



Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho

**Reforço à Torção de Vigas de Concreto Armado com
Compósitos de Fibras de Carbono**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.
Área de concentração: Estruturas.

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

Rio de Janeiro, abril de 2007.

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.



Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho

Reforço à Torção de Vigas de Concreto Armado com Compósitos de Fibras de Carbono

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Marta de Souza Lima Velasco

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Emil de Souza Sánchez Filho

Co-orientador

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFF

Giuseppe Barbosa Guimarães

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Tulio Nogueira Bittencourt

USP

Mauro Schulz

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFF

Ricardo Amorim Einsfeld

IPRJ/UERJ

Maria Teresa Gomes Barbosa

Departamento de Construção Civil – UFJF

José Eugênio Leal

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de abril de 2007.

CDD: 624

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

Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho

Graduou-se em Engenharia Civil, pela URCAMP – Campus Sant’Ana do Livramento em 1999. Concluiu o mestrado na UFSM em 2002. Desenvolveu seu trabalho de pesquisa com ênfase em reforço de estruturas de concreto armado com compósitos de fibras de carbono.

Ficha Catalográfica

Silva Filho, Júlio Jerônimo Holtz

Reforço à torção de vigas de concreto armado com compósitos de fibras de carbono / Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho ; orientadores: Marta de Souza Lima Velasco, Emil de Souza Sánchez Filho. – 2007.

280 f. : il. ; 29,7 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Civil)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Torção. 3. Concreto estrutural. 4. Reforço estrutural. 5. Materiais compósitos. I. Velasco, Marta de Souza Lima. II. Sánchez Filho, Emil de Souza. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

A Deus.

À minha amada esposa Gisele, pelo companheirismo, amor e paciência inestimáveis, que tornaram mais ameno e agradável o tempo dedicado à conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, Júlio e Vera, que muitas vezes renunciaram aos próprios sonhos e não mediram esforços para tornar possível a concretização desta etapa, dando todo o apoio, carinho e incentivo necessários para conclusão desse trabalho.

Ao meu irmão Rafael pela amizade e incentivo.

À professora Marta Velasco, orientadora deste trabalho, pelo apoio e amizade nos momentos difíceis, pela confiança que me dedicou e por suas valiosas orientações.

Ao professor Emil Sánchez, co-orientador deste trabalho, pela qualidade de seus ensinamentos e pela eficiência ao orientar este trabalho.

Às professoras, Elizabeth Veleda e Mabel Pimenta Lopes, que foram as primeiras incentivadoras e grandes responsáveis pelo meu caminho acadêmico.

A toda minha família e amigos do Rio Grande do Sul, que mesmo distantes sempre torceram pelas minhas conquistas e me incentivaram nos momentos de desânimo, em especial às minhas avós Lurdes e Antônia, que sempre intercederam por mim em suas orações.

Às minhas madrinhas, Percília e Marli, que sempre com muito empenho contribuíram com a minha educação e criação, agradeço pelo carinho, atenção e cuidados.

Aos meus sogros, Osmar e Fátima, que me acolheram e me trataram como um filho em sua família, por me ajudarem a enfrentar e superar as dificuldades surgidas ao longo desta etapa.

Aos meus cunhados, Patrícia e Gustavo, por me tratarem como um irmão e ao avô da minha esposa, João Batista, que agora adotei como meu avô, por sua consideração.

Aos amigos aqui conquistados, Leandro (Bob Esponja), André Müller, Luciane, Lucas, Diego, Marcela, Patrício, Joabson, Juliana Meneghel, Tiago, Amanda, Walter, pelos bons momentos de descontração.

Ao Prof. Giuseppe Barbosa Guimarães pelo fornecimento de equipamentos e materiais necessários para o desenvolvimento dessa pesquisa.

À Rita e aos funcionários do LEM-DEC, Euclídes, José Nílson, Haroldo e Evandro, e aos professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC por me oferecerem condições de concretizar esse trabalho.

Ao Engenheiro Paulo de Tarso e à SIKA pelo fornecimento do sistema de reforço necessário para execução dos ensaios realizados.

Ao Eng. Guilherme Andrade da ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, pela ajuda na aquisição do concreto.

À LAFARGE BRASIL S/A pelo fornecimento do concreto utilizado na construção das vigas.

Ao CNPq pelo apoio financeiro durante o doutorado.

Resumo

Silva Filho, Júlio Jerônimo Holtz; Velasco, Marta de Souza Lima; Sánchez Filho, Emil de Souza. **Reforço à Torção de Vigas de Concreto Armado com Compósitos de Fibras de Carbono**. Rio de Janeiro, 2007. 280p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este estudo teórico-experimental analisa o comportamento até a ruptura de vigas de concreto armado reforçadas externamente à torção com compósitos de fibras de carbono (CFC). No programa experimental, sete vigas de concreto armado, com seção transversal de 20 cm x 40 cm e 420 cm de comprimento, com mesma armadura de aço longitudinal e transversal e concreto com mesma resistência à compressão, foram ensaiadas até a ruptura. As vigas testadas foram divididas em três séries, sendo uma viga de referência sem reforço, três vigas com reforço transversal externo e três vigas com reforço externo transversal e longitudinal. Para a realização dos ensaios foi montada uma estrutura auxiliar de aço capaz de transferir às vigas a solicitação de torção pura. No estudo teórico foram desenvolvidas duas formulações. A primeira formulação, baseada no modelo da treliça espacial generalizada com abrandamento de tensões, apresenta uma sistemática para traçado da curva momento torçor x ângulo de torção por unidade de comprimento de vigas de concreto armado reforçadas à torção. A segunda formulação, fundamentada no modelo da Analogia da Treliça Espacial de acordo com a filosofia de dimensionamento do Eurocode 2, apresenta uma sistemática para dimensionamento de reforço com CFC. As duas metodologias adotam um modelo para determinação da aderência entre o substrato de concreto e o reforço. A inclusão da aderência nos modelos desenvolvidos é de grande importância porque em geral a ruptura do elemento estrutural ocorre devido ao descolamento do CFC. Os resultados experimentais obtidos nos testes das vigas foram utilizados para validar as duas formulações teóricas desenvolvidas. Os resultados experimentais apresentaram boa aproximação quando comparados com os modelos propostos. Verificou-se que todas as vigas reforçadas apresentaram um acréscimo de resistência à torção em torno de 40% em relação à viga de referência. Verificou-se que, após a fissuração, as vigas reforçadas apresentaram perda de rigidez inferior à da viga de referência. Observou-se que o ângulo da fissura medido experimentalmente, o ângulo de inclinação calculado pelo estado de deformação e o ângulo de inclinação calculado pelo estado de tensão da viga apresentaram valores próximos para cada viga.

Palavras-chave

Torção; concreto estrutural; reforço estrutural; materiais compósitos.

Abstract

Silva Filho, Júlio Jerônimo Holtz; Velasco, Marta de Souza Lima; Sánchez Filho, Emil de Souza (Advisors). **Carbon Fiber Reinforced Polymer Torsion Strengthening of Reinforced Concrete Beams**. Rio de Janeiro, 2007. 280p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A theoretical-experimental research on the torsional behavior up to failure of reinforced concrete beams strengthened with external carbon fiber composites (CFC) was carried out. The experimental study comprises a series of seven reinforced concrete beams with the same compressive strength of concrete loaded to failure and subjected to torsion. The beams dimensions were 20 cm x 40 cm x 420 cm. The test specimens had the same internal steel reinforcement. The beams were divided in three series: the reference beam without strengthening; three beams with the external strengthening applied transversally and three beams with the external strengthening applied transversally and longitudinally. For the accomplishment of the tests an auxiliary steel structure was mounted, capable to transfer to the beams the pure torsion moment. In the theoretical study two analytical procedures were developed. The first formulation, based on the softened space truss model for torsion, presents a systematic to obtain the curve torsion moment x torsion angle per length unit of the reinforced concrete beams with CFC torsion strengthening. The second systematic, based on the Space Truss Model in accordance with the Eurocode 2, presents the design of the CFC strengthening. Both methodologies adopt the Chen and Teng bond model between concrete and CFC. The consideration of the bond in the developed models is very important because the failure of the concrete members often occurs from debonding of the CFC. The experimental results from the beams tests were used to validate the two analytical procedures. Good agreement was obtained with the experimental and analytical results. For all the strengthened beams the average values of torsion strength were increased by 40% when compared to the reference beam. After cracking, the loss of rigidity in the strengthened beams was lower than in the reference beam. The cracking angle experimentally measured and the strut angles evaluated by strain state and stress state presented close values.

Keywords

Torsion; structural concrete; structural strengthening; composites materials.

Sumário

1 Introdução	30
1.1. Generalidades	30
1.2. Justificativas	31
1.3. Objetivos	33
1.4. Organização do trabalho	34
2 Reforço Estrutural com Compósitos de Fibra de Carbono	35
2.1. Introdução	35
2.2. Compósitos de Fibra de Carbono	35
3 Torção	42
3.1. Introdução	42
3.2. Análise Elástica de Elementos Submetidos à Torção	42
3.2.1. Elementos de Seções Circulares	42
3.2.2. Elementos com Seções Retangulares	45
3.2.3. Torção em Elementos de Parede Fina	47
3.2.3.1. 1ª Fórmula de Bredt	47
3.2.3.2. 2ª Fórmula de Bredt	49
4 Torção em Elementos de Concreto Armado	51
4.1. Histórico	51
4.2. Comportamento de Vigas de Concreto Armado Solicitadas à Torção	53
4.3. Analogia da Treliça Espacial	54
4.4. Treliça Espacial Generalizada	54
4.5. Modelo do Painel Fissurado	55
4.6. Treliça Espacial Generalizada Considerando-se o Modelo do Painel Fissurado	57
5 Reforço de Vigas à Torção com Compósitos de Tecidos de Fibras de Carbono	60
5.1. Ghobarah <i>et al.</i> (2002)	60
5.2. Panchacharam e Belarbi (2002)	66

5.3. Täljsten (2003)	71
5.4. Salom <i>et al.</i> (2004a, b)	75
5.5. Ameli <i>et al.</i> (2005)	78
5.6. Hii e Al-Mahaidi (2006a)	81
5.7. Hii e Al-Mahaidi (2006b)	85
5.8. Hii e Al-Mahaidi (2006c, 2007)	86
5.9. Deifalla e Ghobarah (2006)	88
6 Modelos Propostos	92
6.1. Introdução	92
6.2. Modelo da Trelça Espacial com Abrandamento das Tensões (TEAT)	92
6.2.1. Painel Fissurado	93
6.2.2. Equações de Compatibilidade	98
6.2.3. Distorção Devido à Torção	99
6.2.4. Empenamento da Biela	101
6.2.5. Relações Constitutivas	103
6.2.5.1. Concreto	103
6.2.5.2. Aço	108
6.2.5.3. Reforço com CFC	109
6.2.5.3.1. Aderência entre o reforço de CFC e o concreto	110
6.2.6. Cálculo do Perímetro e da Área Limitada pela Linha Central do Fluxo de Cisalhamento	111
6.2.7. Espessura t_d em Função das Deformações Específicas	112
6.2.8. Deformação Específica ε_ℓ como Função de $f_{s\ell}$ e $f_{f\ell}$	113
6.2.9. Deformação Específica ε_t como Função de f_{ft} e f_{tt}	114
6.2.10. Passos para Solução do Problema	115
6.2.11. Implementação Computacional	118
6.3. Modelo de Dimensionamento de Reforço com CFC para de Vigas de Concreto	119
6.3.1. Armadura transversal de reforço	121
6.3.2. Armadura Longitudinal de Reforço	121
6.3.3. Ângulo da Biela Flexo-Comprimida	122
6.4. Exemplos Numéricos	127

7	Análise Experimental de Vigas Solicitadas à Torção Reforçadas com Tecido de Fibras de Carbono	129
7.1.	Introdução	129
7.2.	Ensaio de Caracterização dos Materiais	129
7.2.1.	Tecido de Fibras de Carbono	129
7.2.2.	Aço	133
7.2.3.	Concreto	135
7.2.3.1.	Resistência à Compressão	136
7.2.3.2.	Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos-de-Prova Cilíndricos	137
7.2.3.3.	Módulo de Elasticidade e Diagrama Tensão-Deformação Específica	139
7.3.	Descrição das Vigas	142
7.3.1.	Características Geométricas	143
7.3.1.1.	Viga de Referência VR	143
7.3.1.2.	Série VT	144
7.3.1.3.	Série VTL	145
7.3.2.	Instrumentação das Vigas	146
7.3.2.1.	Extensômetros Elétricos de Resistência	146
7.3.2.1.1.	Aço	147
7.3.2.1.2.	Concreto e CFC	147
7.3.2.2.	Transdutores Lineares	149
7.4.	Ensaio	150
7.4.1.	Esquema de Ensaio	150
7.5.	Aplicação do Sistema de Reforço com CFC	152
7.6.	Execução dos Ensaio	155
8	Apresentação e Análise dos Resultados	157
8.1.	Introdução	157
8.2.	Comportamento da Curva $T \times \theta$	157
8.3.	Análise das Rigidezes	164
8.4.	Modo de Ruptura e Resistência à Torção	169
8.5.	Análise das Deformações Específicas nas Armaduras de Aço e CFC	171
8.6.	Análise do Ângulo de Inclinação da Biela	175
8.7.	Deformações Específicas Teóricas Calculadas de Acordo com o Bulletin 14 da FIB	184

8.8. Comparação Entre os Valores Experimentais e os Valores Obtidos com o Modelo da Treliza Espacial do Eurocode 2	190
8.9. Comparação entre os Valores Experimentais e os Valores Teóricos Obtidos com o Modelo da Treliza Espacial com Abrandamento de Tensões	192
8.9.1. Momento Torçor de Ruptura	192
8.9.2. Ângulo de Torção por Unidade de Comprimento na Ruptura	194
8.9.3. Curvas $T \times \theta$ Fornecidas pelo Modelo da Treliza Espacial com Abrandamento de Tensões	196
9 Conclusões	198
9.1. Sugestão para trabalhos futuros	201
Referência Bibliográfica	203
Anexo A – Dados	211
VRef	211
VT1	215
VT2	220
VT3	225
VTL1	230
VTL2	237
VTL3	244
Anexo B – Fotografias	251
Aplicação do carregamento	251
Montagem do Sistema de Apoio	252
Ensaio da Viga VRef	253
Ensaio da Viga VT1	257
Ensaio VT2	261
Ensaio VT3	265
Ensaio VTL1	269
Ensaio VTL2	273
Ensaio VTL3	277

Lista de figuras

Figura 1.1 – Reforço estrutural por meio de colagem de chapa de aço com resina epóxi (Disponível em http://www.balvac.co.uk/upload/news).	31
Figura 1.2 – Fissuração devido à torção (Salom, 2004b).	33
Figura 2.1 – Sistemas de reforço com fibras de carbono:	
(a) fios de fibra de carbono;	37
(b) chapas pultrudadas de fibra de carbono; (c) tecidos de fibra de carbono.	37
Figura 2.2 – Diagrama tensão-deformação específica das fibras, aço de construção e cordoalha de protensão (Beber, 2003).	39
Figura 2.3 – Fibras de carbono envolvidas com resina epóxi (Basche <i>et al.</i> , 2000).	40
Figura 2.4 – Confinamento de pilares com CFC.	40
Figura 2.5 – Reforço de chaminé com sistema de fio de fibra de carbono sob tensão (Karbhari, 1998).	40
Figura 2.6 – Reparo de túnel com CFC (Karbhari, 1998).	41
Figura 2.7 – Reforço de ponte à força cortante com CFC.	41
Figura 2.8 – Reforço de lajes à flexão e vigas à flexão e à força cortante com tecidos de CFC.	41
Figura 3.1 – Deformação em uma viga com seção circular solicitada à torção.	43
Figura 3.2 – Elemento longitudinal de uma viga com seção circular submetida à torção.	43
Figura 3.3 – Distribuição da tensão cisalhante na seção circular.	44
Figura 3.4 – Empenamento das seções de viga com seção retangular.	45
Figura 3.5 – Distribuição da tensão cisalhante devida à torção em seções retangulares.	46
Figura 3.6 – Seção vazada de parede fina submetida a um momento torçor.	48
Figura 4.1 – Evolução das teorias para dimensionamento à torção de vigas de concreto armado.	52
Figura 4.2 – Modelo do painel fissurado.	55
Figura 4.3 – Torção em vigas retangulares de concreto estrutural.	57
Figura 5.1 – Detalhe das vigas ensaiadas (Ghobarah <i>et al.</i> , 2002).	61
Figura 5.2 – Configuração de reforço (Ghobarah <i>et al.</i> , 2002).	62
Figura 5.3 – Curvas normalizadas de resistência ao cisalhamento para painéis de concreto armado (Rahal, 2000).	63

Figura 5.4 – Detalhamento das vigas ensaiadas por Panchacharam e Belarbi (2002).	69
Figura 5.5 – Representação esquemática das configurações do reforço aplicado (Panchacharam e Belarbi, 2002).	69
Figura 5.6 – Reforço por meio de estribos inclinados (Täljsten, 2003).	72
Figura 5.7 – Detalhamento das vigas ensaiadas por Täljsten (2003).	73
Figura 5.8 – Curvas $T \times \theta$ e configurações de reforço adotadas por Täljsten (2003).	74
Figura 5.9 – Detalhamento das vigas ensaiadas (Salom <i>et al.</i> , 2004).	77
Figura 5.10 – Configurações de reforço (Ameli <i>et al.</i> , 2005).	79
Figura 5.11 – Características geométricas e armaduras de aço (Hii e Al-Mahaidi, 2006).	81
Figura 5.12 – Configuração inicial da viga (Hii e Al-Mahaidi, 2006).	83
Figura 5.13 – Configurações do reforço (Hii e Al-Mahaidi, 2006).	83
Figura 5.14 – Curvas experimentais momento torçor x ângulo de rotação por unidade de comprimento (Hii e Al-Mahaidi, 2006).	84
Figura 5.15 – Comparação entre curvas experimentais e numéricas (Hii e Al-Mahaidi, 2006).	84
Figura 5.16 – Contribuição do CFC na resistência à torção: a) Bulletin 14 da FIB; b) modificação para a AS3600 de 2001 (Hii e Al-Mahaidi, 2006c, 2007).	86
Figura 5.17 – Contribuição do CFC na resistência à torção: a) AS3600 de 2001; b) ACI 318-2005 (Hii e Al-Mahaidi, 2006c, 2007).	87
Figura 5.18 – Seção transversal das vigas T (Deifalla e Ghobarah, 2006).	89
Figura 5.19 – Esquema de ensaio (Deifalla e Ghobarah, 2006).	90
Figura 5.20 – Esquemas de reforço e ancoragens utilizados: a) TG2; b) TG3; c) TG4 (Deifalla e Ghobarah, 2006).	90
Figura 6.1 – Painel de concreto armado reforçado com CFC.	93
Figura 6.2 – Painel fissurado de concreto armado reforçado com CFC.	94
Figura 6.3 – Forma aditiva para a consideração da resistência do painel fissurado reforçado com CFC.	94
Figura 6.4 – Elemento no interior da biela comprimida.	95
Figura 6.5 – Parâmetros da seção transversal.	97
Figura 6.6 – Círculo de Mohr de deformações específicas.	99
Figura 6.7 – Empenamento em tubos de paredes fina (Hsu, 1993).	100
Figura 6.8 – Flexão da biela de concreto de um painel de uma viga com seção vazada solicitada à torção (Hsu, 1993).	102

Figura 6.9 – Tensões e deformações específicas nas bielas de concreto (Hsu,1993).	104
Figura 6.10 – Curvas tensão-deformação específica para o concreto considerando-se o abrandamento de tensões (Hsu, 1993).	106
Figura 6.11 – Curva tensão-deformação específica do aço.	108
Figura 6.12 – Curva tensão-deformação específica do reforço de CFC.	109
Figura 6.13 – Cálculo dos parâmetros A_o e p_o .	112
Figura 6.14 – Fluxograma para solução do problema.	117
Figura 6.15 – Interface gráfica.	119
Figura 6.16 – Linearização da relação constitutiva do concreto.	123
Figura 6.17 – Fluxograma para dimensionamento de reforço com CFC em vigas solicitadas à torção.	126
Figura 7.1 – Dimensões dos corpos-de-prova de CFC ensaiados (dimensões em mm).	131
Figura 7.2 – Corpos-de-prova de CFC.	131
Figura 7.3 – Realização dos ensaios dos corpos-de-prova de CFC.	132
Figura 7.4 – Diagrama tensão-deformação específica dos corpos-de-prova de CFC.	133
Figura 7.5 – Ensaio das barras de aço.	134
Figura 7.6 – Diagrama tensão deformação específica do aço – $\phi 10\text{ mm}$.	135
Figura 7.7 – Diagrama tensão deformação específica do aço – $\phi 12,5\text{ mm}$.	135
Figura 7.8 – Variação da resistência média à compressão do concreto para diferentes idades.	137
Figura 7.9 – Ensaio de determinação da resistência à tração do concreto por compressão diametral.	138
Figura 7.10 – Ensaio de módulo de elasticidade do concreto.	139
Figura 7.11 – Gráfico tensão x deformação específica do corpos-de-prova 1.	141
Figura 7.12 – Gráfico tensão x deformação específica do corpos-de-prova 2.	141
Figura 7.13 – Gráfico tensão x deformação específica do corpos-de-prova 3.	142
Figura 7.14 – Fluxograma mostrando as séries de vigas.	142
Figura 7.15 – Geometria das vigas.	143
Figura 7.16 – Detalhamento da armadura longitudinal.	144
Figura 7.17 – Detalhamento da armadura na seção transversal.	144
Figura 7.18 – Viga de concreto armado com reforço transversal.	145
Figura 7.19 – Viga de concreto armado com reforço transversal e longitudinal.	145

Figura 7.20 – Seções instrumentadas nas vigas.	146
Figura 7.21 – Nomenclatura dos painéis.	146
Figura 7.22 – Posições da instrumentação executada nas armaduras.	147
Figura 7.23 – Detalhe das seções onde a armadura foi instrumentada.	147
Figura 7.24 – Detalhe dos EER colados no concreto e no CFC.	148
Figura 7.25 – Instrumentação no concreto e no CFC das vigas da série VT.	148
Figura 7.26 – Instrumentação no concreto e no CFC das vigas da série VTL.	149
Figura 7.27 – Localização dos Transdutores Lineares.	150
Figura 7.28 – Esquema de ensaio.	151
Figura 7.29 – Esquema de ensaio (vista lateral).	151
Figura 7.30 – Sistema de ensaio em fase de montagem.	151
Figura 7.31 – Sistema de apoio.	152
Figura 7.32 – Corte das quinas e apicoamento da superfície irregular.	153
Figura 7.33 – Lixamento das laterais.	153
Figura 7.34 – Aplicação e regularização da superfície superior com Sikadur 30.	154
Figura 7.35 – Aplicação do sistema de reforço com CFC.	154
Figura 7.36 – Vigas reforçadas.	155
Figura 7.37 – Ensaio da viga de referência.	155
Figura 7.38 – Ensaio da viga VT1.	156
Figura 7.39 – Detalhe da torção da viga VT1.	156
Figura 8.1 – Ângulo de rotação por unidade de comprimento.	158
Figura 8.2 – Gráfico $T \times \theta$ da viga de referência.	160
Figura 8.3 – Gráfico $T \times \theta$ da viga VT1 .	160
Figura 8.4 – Gráfico $T \times \theta$ da viga VT2.	161
Figura 8.5 – Gráfico $T \times \theta$ da viga VT3.	161
Figura 8.6 – Gráfico $T \times \theta$ da viga VTL1.	162
Figura 8.7 – Gráfico $T \times \theta$ da viga VTL2.	163
Figura 8.8 – Gráfico $T \times \theta$ da viga VTL3.	163
Figura 8.9 – Comportamento da curva de momento torçor versus ângulo de rotação por unidade de comprimento $T \times \theta$	165
Figura 8.10 – Rigidezes das vigas.	167
Figura 8.11 – Comparação entre as rigidezes elásticas das vigas.	168
Figura 8.12 – Comparação entre as rigidezes secantes das vigas.	168
Figura 8.13 – Comparação entre as rigidezes após o escoamento das vigas.	169
Figura 8.14 – Comparação entre os momentos torçores de ruptura.	171

Figura 8.15 – Momento torçor x deformação específica da armadura transversal e longitudinal de aço da viga VTL2.	172
Figura 8.16 – Momento torçor x deformação específica da armadura transversal de CFC da viga VTL2.	172
Figura 8.17 – Momento torçor x deformação específica da armadura longitudinal de CFC da viga VTL2.	173
Figura 8.18 – Posição onde foram obtidas as deformações específicas máximas no CFC.	174
Figura 8.19 – Posição onde foram obtidas as deformações específicas máximas nas armaduras internas de aço.	174
Figura 8.20 – Fator de efetividade das deformações específicas do CFC.	175
Figura 8.21 – Deformações específicas: a) painel fissurado; b) viga VRef.	176
Figura 8.22 – Fluxograma.	177
Figura 8.23 – Ângulo de inclinação das bielas.	178
Figura 8.24 – Ângulo de inclinação das bielas.	179
Figura 8.25 – Ângulo de inclinação das bielas.	179
Figura 8.26 – Gráfico $\frac{\varepsilon_{st,exp}}{\varepsilon_{ft,exp}} \times \alpha$.	180
Figura 8.27 – Figura 8.16 – Gráfico $\frac{\varepsilon_{sl,exp}}{\varepsilon_{fl,exp}} \times \alpha$.	181
Figura 8.28 – Tensão de compressão na biela.	183
Figura 8.29 – Fator de efetividade do concreto.	184
Figura 8.30 – Comparação entre deformações específicas últimas experimentais e deformações específicas calculadas a partir do Bulletin 14 da FIB considerando-se α_ϵ .	186
Figura 8.31 – Comparação entre deformações específicas últimas experimentais e deformações específicas calculadas a partir do Bulletin 14 da FIB considerando-se α_f .	186
Figura 8.32 – Comparação entre deformações específicas últimas experimentais e deformações específicas calculadas a partir do Bulletin 14 da FIB considerando-se α_σ .	187
Figura 8.33 – Comparação entre deformações específicas últimas experimentais e deformações específicas calculadas a partir do Bulletin 14 da FIB considerando-se α_{Ap} .	187

Figura 8.34 – Razões η_t do CFC longitudinal.	189
Figura 8.35 – Razões η_t do CFC transversal.	189
Figura 8.36 – Comparação entre os resultados experimentais e os valores obtidos por intermédio do modelo do Eurocode 2.	192
Figura 8.37 – Comparação entre o momento torçor de ruptura experimental e o valor obtido por meio do modelo TEAT.	194
Figura 8.38 – Comparação entre o ângulo θ_u experimental e o valor obtido por meio do modelo TEAT.	196
Figura 8.39 – Comparação entre as curvas $T \times \theta$ experimental e teórica da Viga VRef.	196
Figura 8.40 – Comparação entre as curvas $T \times \theta$ experimentais e teórica da série VT.	197
Figura 8.41 – Comparação entre as curvas $T \times \theta$ experimentais e teórica da série VTL.	197
Figura A.1 – Gráfico momento torçor x deformação específica das armaduras de aço transversal e longitudinal da viga VRef.	211
Figura A.2 – Gráfico momento torçor x deformação específica das armaduras de aço transversal e longitudinal da viga VT1.	215
Figura A.3 – Gráfico momento torçor x deformação específica da armadura de CFC transversal da viga VT1.	215
Figura A.4 – Gráfico momento torçor x deformação específica das armaduras de aço transversal e longitudinal da viga VT2.	220
Figura A.5 – Gráfico momento torçor x deformação específica da armadura de CFC transversal da viga VT2.	220
Figura A.6 – Gráfico momento torçor x deformação específica das armaduras de aço transversal e longitudinal da viga VT3.	225
Figura A.7 – Gráfico momento torçor x deformação específica da armadura de CFC transversal da viga VT3.	225
Figura A.8 – Gráfico momento torçor x deformação específica das armaduras de aço transversal e longitudinal da viga VTL1.	230
Figura A.9 – Gráfico momento torçor x deformação específica da armadura de CFC transversal da viga VTL1.	230
Figura A.10 – Gráfico momento torçor x deformação específica da armadura de CFC longitudinal da viga VTL1.	231
Figura A.11 – Gráfico momento torçor x deformação específica das	

armaduras de aço transversal e longitudinal da viga VTL2.	237
Figura A.12 – Gráfico momento torçor x deformação específica da armadura de CFC transversal da viga VTL2.	237
Figura A.13 – Gráfico momento torçor x deformação específica da armadura de CFC longitudinal da viga VTL2.	238
Figura A.14 – Gráfico momento torçor x deformação específica das armaduras de aço transversal e longitudinal da viga VTL3.	244
Figura A.15 – Gráfico momento torçor x deformação específica da armadura de CFC transversal da viga VTL3.	244
Figura A.16 – Gráfico momento torçor x deformação específica da armadura de CFC longitudinal da viga VTL3.	245
Figura B.1 – Aplicação da força.	251
Figura B.2 – Elemento de reação.	251
Figura B.3 – Montagem do sistema de apoios:	
a) marcas para posicionamento das peças; b) montagem do sistema de apoio;	
c) aplicação de massa plástica para fixação das peças.	252
Figura B.4 – Vista superior da viga VRef.	253
Figura B.5 – Vista lateral da viga VRef.	253
Figura B.6 – Vista superior da viga VRef após a ruptura.	254
Figura B.7 – Detalhe da ruptura da viga VRef.	254
Figura B.8 – Detalhe da ruptura da viga VRef vista da face esquerda.	255
Figura B.9 – Detalhe da torção aplicada na viga VRef.	255
Figura B.10 – Configuração das fissuras da viga VRef.	256
Figura B.11 – Vista superior da viga VT1.	257
Figura B.12 – Vista frontal da viga VT1.	257
Figura B.13 – Detalhe da torção aplicada na viga VT1.	258
Figura B.14 – Detalhe da ruptura da viga VT1 vista da direita.	258
Figura B.15 – Detalhe da ruptura da viga VT1 vista da esquerda.	259
Figura B.16 – Detalhe da ruptura da viga VT1 vista da face inferior.	259
Figura B.17 – Configuração das fissuras da viga VT1.	260
Figura B.18 – Vista frontal da viga VT2.	261
Figura B.19 – Vista frontal da viga VT2 solicitada à torção.	261
Figura B.20 – Vista da esquerda da viga VT2.	262
Figura B.21 – Detalhe da viga VT2 solicitada à torção.	262
Figura B.22 – Detalhe da ruptura da viga VT2 vista da direita.	263
Figura B.23 – Detalhe da ruptura da viga VT2 vista da esquerda.	263

Figura B.24 – Configuração das fissuras da viga VT2.	264
Figura B.25 – Viga VT3 solicitada à torção.	265
Figura B.26 – Vista superior da viga VT3.	265
Figura B.27 – Detalhe da viga VT3 solicitada à torção.	266
Figura B.28 – Detalhe da ruptura da viga VT3.	266
Figura B.29 – Detalhe da ruptura da viga VT3 vista da direita.	267
Figura B.30 – Detalhe da ruptura da viga VT3 vista inferior.	267
Figura B.31 – Configuração das fissuras da viga VT3.	268
Figura B.32 – Vista lateral do ensaio da viga VTL1.	269
Figura B.33 – Vista superior do ensaio da viga VTL1.	269
Figura B.34 – Detalhe da viga VTL1 solicitada à torção.	270
Figura B.35 – Detalhe da ruptura da viga VTL1 vista da direita.	270
Figura B.36 – Detalhe da ruptura da viga VTL1 vista da esquerda.	271
Figura B.37 – Detalhe do descolamento da CFC.	271
Figura B.38 – Configuração das fissuras da viga VTL1.	272
Figura B.39 – Ensaio da viga VTL2.	273
Figura B.40 – Detalhe da viga VTL2 solicitada à torção.	273
Figura B.41 – Detalhe da ruptura da viga VTL2 vista da direita.	274
Figura B.42 – Detalhe da ruptura da viga VTL2 vista da esquerda.	274
Figura B.43 – Detalhe do descolamento do CFC da viga VTL2 vista da direita.	275
Figura B.44 – Detalhe do descolamento do CFC da viga VTL2 vista da esquerda.	275
Figura B.45 – Configuração das fissuras da viga VTL2.	276
Figura B.46 – Ensaio da viga VTL3.	277
Figura B.47 – Ensaio da viga VTL3 vista da direita.	277
Figura B.48 – Detalhe da viga VTL3 solicitada à torção.	278
Figura B.49 – Detalhe da ruptura da viga VTL3 vista da direita.	278
Figura B.50 – Detalhe das fissuras da viga VTL3 vista da direita.	279
Figura B.51 – Detalhe dos extensômetros colados no concreto da viga VTL3.	279
Figura B.52 – Configuração das fissuras da viga VTL3.	280

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas das fibras (Technical Report nº55, 2000).	38
Tabela 3.1 – Valores de η e β .	47
Tabela 5.1 – Características das vigas ensaiadas (Ghobarah et al., 2002).	61
Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios e deformações teóricas (Ghobarah et al., 2002).	64
Tabela 5.3 – Resultado dos ensaios de Panchacharam e Belarbi (2002).	70
Tabela 5.4 – Resultados experimentais e teóricos (Täljsten, 2003).	75
Tabela 5.5 – Resultados experimentais e analíticos (Salom et al., 2004).	77
Tabela 5.6 – Propriedades das fibras (Ameli et al., 2005).	78
Tabela 5.7 – Resultados experimentais (Ameli et al., 2005).	80
Tabela 5.8 – Momento torçor de ruptura teórico (Ameli et al., 2005).	80
Tabela 5.9 – Configurações de reforço (Hii e Al-Mahaidi, 2006).	82
Tabela 5.10 – Propriedades das armaduras de aço (Hii e Al-Mahaidi, 2006).	82
Tabela 5.11 – Propriedades do compósito de fibras de carbono (Hii e Al-Mahaidi, 2006).	82
Tabela 5.12 – Propriedades do compósito de fibras de carbono (Hii e Al-Mahaidi, 2006).	83
Tabela 5.13 – Resultados dos ensaios e modos de ruptura (Deifalla e Ghobarah, 2006).	90
Tabela 5.14 – Resultados dos ensaios e modos de ruptura (Deifalla e Ghobarah, 2006).	91
Tabela 6.1 – Comparação entre resultados experimentais e o modelo da treliça espacial generalizada com abrandamento de tensões para vigas reforçadas à torção com CFC.	127
Tabela 6.2 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo de dimensionamento de reforço com CFC para as vigas solicitadas à torção.	127
Tabela 7.1 – Dimensões recomendadas pela ASTM D3039/3039M para ensaios em CFC.	130
Tabela 7.2 – Resultados dos ensaios dos corpos-de-prova de CFC.	132
Tabela 7.3 – Resultados dos ensaios das amostras de aço.	134
Tabela 7.4 – Consumo de materiais por m^3 de concreto.	136
Tabela 7.5 – Valores médios da resistência à compressão do concreto.	137

Tabela 7.6 – Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.	138
Tabela 7.7 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade.	140
Tabela 8.1 – Resultados experimentais.	164
Tabela 8.2 – Rigidez à torção.	166
Tabela 8.3 – Armaduras de aço e CFC e modos de ruptura.	169
Tabela 8.4 – Valores dos momentos torçores últimos.	170
Tabela 8.5 – Deformações específicas últimas nas armaduras de aço e no reforço com CFC, nas direções transversal e longitudinal.	173
Tabela 8.6 – Ângulo de inclinação das bielas das vigas.	178
Tabela 8.7 – Razões entre $\frac{\epsilon_{st,exp}}{\epsilon_{ft,exp}}$ e $\frac{\epsilon_{sl,exp}}{\epsilon_{fl,exp}}$.	180
Tabela 8.8 – Tensão de compressão na biela e fator de efetividade do concreto de acordo com os ângulos medidos e calculados.	183
Tabela 8.9 – Deformações específicas últimas calculadas de acordo com o Bulletin 14 da FIB.	185
Tabela 8.10 – Valores das razões η_t e η_ℓ para os ângulos α_ϵ , α_f , α_σ e α_{Ap} .	188
Tabela 8.11 – Comparação entre os resultados experimentais e os valores obtidos por intermédio do modelo do Eurocode 2.	191
Tabela 8.12 – Comparação entre o momento torçor de ruptura experimental e o valor obtido por meio do modelo TEAT.	193
Tabela 8.13 – Comparação entre o ângulo de torção por unidade de comprimento θ_u experimental e o valor obtido por meio do modelo TEAT.	195
Tabela A1 – Ângulo de torção por unidade de comprimento e leituras dos LVDT da viga VRef.	212
Tabela A2 – Leituras dos extensômetros colados na superfície de concreto da viga VRef.	213
Tabela A3 – Leituras dos extensômetros colados na armadura de aço transversal e longitudinal da viga VRef.	214
Tabela A4 – Ângulo de torção por unidade de comprimento e leituras dos LVDT da viga VT1.	216
Tabela A5 – Leituras dos extensômetros colados na superfície de concreto da viga VT1.	217
Tabela A6 – Leituras dos extensômetros colados na armadura de aço transversal e longitudinal da viga VT1.	218

Tabela A7 – Leituras dos extensômetros colados na armadura transversal de CFC da viga VT1.	219
Tabela A8 – Ângulo de torção por unidade de comprimento e leituras dos LVDT da viga VT2.	221
Tabela A9 – Leituras dos extensômetros colados na superfície de concreto da viga VT2.	222
Tabela A10 – Leituras dos extensômetros colados na armadura de aço transversal e longitudinal da viga VT2.	223
Tabela A11 – Leituras dos extensômetros colados na armadura transversal de CFC da viga VT2.	224
Tabela A12 – Ângulo de torção por unidade de comprimento e leituras dos LVDT da viga VT3.	226
Tabela A13 – Leituras dos extensômetros colados na superfície de concreto da viga VT3.	227
Tabela A14 – Leituras dos extensômetros colados na armadura de aço transversal e longitudinal da viga VT3.	228
Tabela A15 – Leituras dos extensômetros colados na armadura transversal de CFC da viga VT3.	229
Tabela A16 – Ângulo de torção por unidade de comprimento e leituras dos LVDT da viga VTL1.	232
Tabela A17 – Leituras dos extensômetros colados na superfície de concreto da viga VTL1.	233
Tabela A18 – Leituras dos extensômetros colados na armadura de aço transversal e longitudinal da viga VTL1.	234
Tabela A19 – Leituras dos extensômetros colados na armadura transversal de CFC da viga VTL1.	235
Tabela A20 – Leituras dos extensômetros colados na armadura longitudinal de CFC da viga VTL1.	236
Tabela A21 – Ângulo de torção por unidade de comprimento e leituras dos LVDT da viga VTL2.	239
Tabela A22 – Leituras dos extensômetros colados na superfície de concreto da viga VTL2.	240
Tabela A23 – Leituras dos extensômetros colados na armadura de aço transversal e longitudinal da viga VTL2.	241
Tabela A24 – Leituras dos extensômetros colados na armadura transversal de CFC da viga VTL2.	242

Tabela A25 – Leituras dos extensômetros colados na armadura longitudinal de CFC da viga VTL2.	243
Tabela A26 – Ângulo de torção por unidade de comprimento e leituras dos LVDT da viga VTL3.	246
Tabela A27 – Leituras dos extensômetros colados na superfície de concreto da viga VTL3.	247
Tabela A28 – Leituras dos extensômetros colados na armadura de aço transversal e longitudinal da viga VTL3.	248
Tabela A29 – Leituras dos extensômetros colados na armadura transversal de CFC da viga VTL3.	249
Tabela A30 – Leituras dos extensômetros colados na armadura longitudinal de CFC da viga VTL3.	250

Lista de Símbolos

Romanos

A_c	Área da seção de concreto
A_ℓ	Área de uma barra da armadura longitudinal
A_f	Área do reforço
A_ℓ	Área total da armadura longitudinal
A_t	Área de uma barra da armadura transversal
A_t	Área dos estribos ao longo do comprimento s
$A_{s\ell}$	Área de aço da armadura longitudinal
A_{st}	Área de aço da armadura transversal
$A_{f\ell}$	Área de reforço longitudinal
A_{ft}	Área de reforço transversal
A_0	Área definida pela linha média do tubo
a_0	Espessura do fluxo de cisalhamento
C	Força de compressão resultante na biela
c_1	Constante de Saint-Venant
d	Operador diferencial
E_f	Módulo de elasticidade do material compósito
E_s	Módulo de elasticidade do aço
f'_c	Resistência à compressão do concreto
f_ℓ	Tensão na armadura longitudinal
$f_{s\ell}$	Tensão na armadura de aço longitudinal
$f_{s\ell y}$	Tensão de escoamento da armadura de aço longitudinal
f_{st}	Tensão na armadura de aço transversal
f_{sty}	Tensão de escoamento da armadura de aço transversal
$f_{f,e}$	Tensão efetiva no reforço
$f_{f\ell}$	Tensão na armadura de reforço longitudinal
f_{ft}	Tensão na armadura de reforço transversal
f_{fu}	Tensão de ruptura do reforço

f_t	Tensão na armadura transversal
f_ℓ	Tensão na armadura longitudinal
f_t	Resistência à tração do concreto
f_{yt}	Tensão de escoamento da armadura de aço transversal
$f_{y\ell}$	Tensão de escoamento da armadura de aço longitudinal
G	Módulo de deformação transversal
h	Espessura do painel
h	Altura da viga
b	Base da viga
b_f	Largura do estribo de reforço
J_t	Momento polar
k_1	Coefficiente adimensional que relaciona a tensão média na biela com seu valor máximo
k_2	Coefficiente que relaciona a distância entre a resultante C e a fibra extrema da biela
ℓ	Perímetro da seção
ℓ	Direção
ℓ_q	Largura do painel
N_ℓ	Resultante das forças na armadura longitudinal
$N_{\ell y}$	Força resultante para o escoamento da armadura longitudinal
n_ℓ	Força normal na armadura longitudinal
$n_{\ell y}$	Força normal unitária para o escoamento da armadura longitudinal
$n_{s\ell}$	Força na armadura longitudinal de aço por unidade de comprimento
n_{st}	Força na armadura transversal de aço por unidade de comprimento
$n_{f\ell}$	Força na armadura longitudinal de reforço por unidade de comprimento
n_{ft}	Força na armadura transversal de reforço por unidade de comprimento
n_t	Força normal na armadura transversal
n_{ty}	Força normal unitária para o escoamento da armadura transversal
PE	Protensão efetiva
P_c	Perímetro externo da seção de concreto
p_c	Perímetro externo da seção de concreto
p_0	Perímetro da linha central do fluxo de cisalhamento

p_0	Perímetro ao longo da metade da espessura t_d
q	Fluxo de tensões tangenciais
R	Raio da seção circular
r	Distância em relação ao eixo da peça na direção radial
r	Distância entre o centro do tubo e a linha central da parede do tubo
s	Espaçamento dos estribos
s	Comprimento ao longo da viga sobre o qual o reforço está distribuído
s_f	Espaçamento centro a centro de cada estribo de reforço
s_ℓ	Espaçamento da armadura longitudinal
s_t	Espaçamento da armadura transversal
T	Momento torçor
T_f	Parcela do momento torçor resistido pelo reforço
T_y	Momento torçor quando do escoamento das armaduras
T_u	Momento torçor último
t_d	Espessura do fluxo de cisalhamento
t	Espessura do tubo de parede fina
t	Espessura do painel
t_d	Espessura do painel
t_f	Espessura do reforço
u	Perímetro da região limitada pela metade da espessura t
W_{EXT}	Trabalho externo
W_{INT}	Trabalho interno
x, y, w	Sistema de coordenadas
w	Deslocamento perpendicular medido a partir do plano $x - y$
v_u	Tensão de cisalhamento no concreto
x	Lado menor do retângulo
y	Lado maior do retângulo
z	Eixo da direção longitudinal

Gregos

α	Ângulo de inclinação das bielas de concreto
β	Constante adimensional obtida por meio da solução da teoria da elasticidade
γ	Distorção na seção transversal
γ_{lt}	Distorção
ε	Deformação específica
ε_0	Deformação específica última do concreto
ε_d	Deformação específica na direção do eixo da fissura
ε_d	Deformação específica média na biela
ε_{ds}	Deformação específica máxima na superfície
ε_f	Deformação específica do reforço
$\varepsilon_{f,e}$	Deformação específica efetiva no reforço
$\varepsilon_{ke,f}$	Deformação específica efetiva característica do compósito de fibras;
ε_ℓ	Deformação específica na direção do eixo longitudinal
ε_{ly}	deformação específica de escoamento da armadura de aço longitudinal;
ε_{ty}	deformação específica de escoamento da armadura de aço transversal;
ε_r	Deformação específica na direção perpendicular ao eixo das fissuras
ε_t	Deformação específica na direção do eixo transversal
ϕ	Ângulo de torção
$\phi(z)$	Ângulo de torção em função de z
ρ_ℓ	Taxa geométrica de armadura longitudinal
ρ_t	Taxa geométrica de armadura transversal
$\rho_{s\ell}$	Taxa geométrica de armadura longitudinal de aço
ρ_{st}	Taxa geométrica de armadura transversal de aço
$\rho_{f\ell}$	Taxa geométrica de armadura longitudinal de reforço
ρ_{ft}	Taxa geométrica de armadura transversal de reforço
σ_d	Tensão de compressão na biela de concreto
σ_d	Tensão na direção do eixo das fissuras
σ_ℓ	Tensão na direção longitudinal

σ_p	Tensão máxima de compressão na biela
σ_r	Tensão na direção perpendicular ao eixo das fissuras
σ_t	Tensão na direção transversal
τ	Tensão cisalhante
$\tau_{m\acute{a}x}$	Tensão cisalhante máxima
$\tau(r)$	Tensão cisalhante em função de r
η	Constante adimensional obtida por meio da solução da teoria da elasticidade
ω_ℓ	Taxa mecânica de armadura longitudinal
ω_t	Taxa mecânica de armadura transversal
ψ	Curvatura
ζ	Coeficiente que considera o abrandamento de tensões na biela

Lista de Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
CFC	Compósitos de Fibras de Carbono
ASTM	American Society for Testing and Materials
TEAT	Treliça Espacial com Abrandamento de Tensões

1 Introdução

1.1. Generalidades

Atualmente tem-se um cuidado mais apurado quanto ao controle de qualidade das construções, pois há um entendimento de que a qualidade é rentável a curto e longo prazos. Sob o ponto de vista econômico evita-se gastos prematuros em reparação, e ocorre um aumento da vida útil das obras (Cánovaz, 1988).

Mesmo que sejam tomadas medidas preventivas para se evitar manifestações patológicas ao longo da vida útil das estruturas, diversos fatores podem levar à necessidade da recuperação estrutural, tais como: a degradação e o desgaste natural durante este período, o aumento das cargas solicitantes e a redistribuição de solicitações, os erros de projeto e execução, os acidentes ou sinistros como incêndios, choques, sismos, etc.

A recuperação ou reabilitação estrutural consiste em uma série de intervenções para aumento da capacidade resistente de elementos estruturais. Os seus objetivos são o restabelecimento das condições usuais de segurança, da funcionalidade, a alteração nas condições de uso e a ampliação ou reposição do período de vida útil.

A escolha da técnica e do material de reforço deve ser feita de maneira criteriosa, buscando-se a racionalização de custos, a facilidade de aplicação do reforço, a compatibilidade do material de reforço com o ambiente em que será instalado e o seu desempenho mecânico.

Os procedimentos necessários para instalação de reforço são:

1. diagnosticar o problema adotando-se medidas emergenciais quando necessário;
2. analisar a viabilidade de aplicação de reforço;
3. investigar o estado da estrutura com o auxílio de ensaios não destrutivos, considerando-se sua rigidez e redistribuição de cargas;
4. selecionar o material e a melhor técnica a ser utilizada;
5. elaborar um projeto detalhado;

6. executar o projeto com rigoroso controle de qualidade.

Ao longo dos anos diversas técnicas para reabilitação estrutural foram desenvolvidas, dentre as quais se pode citar o aumento da seção transversal, a protensão externa, as chapas de aço coladas com resina epóxi.

As chapas coladas com resina epóxi surgiram na década de 1960 na Europa e na África do Sul. A primeira publicação sobre essa técnica de reforço estrutural foi feita por R. L'Hermite e J. Bresson em 1967 num simpósio da RILEM (Emmons, 1998.a; Sánchez, 1998). Este método foi muito utilizado durante os anos setenta para reforçar vigas e lajes à flexão e à força cortante (Figura 1.1). Entretanto, as chapas de aço apresentam problemas de durabilidade ligados à corrosão.



Figura 1.1 – Reforço estrutural por meio de colagem de chapa de aço com resina epóxi (Disponível em <http://www.balvac.co.uk/upload/news>).

Em substituição à chapa de aço surgiu nos anos 1980 a técnica de reforço estrutural utilizando-se compósitos de fibras de carbono (CFC), que além de oferecerem alta resistência, não modificam a geometria da estrutura, não apresentam problemas ligados à corrosão e têm baixa massa específica. Estas características despertaram grande interesse no desenvolvimento de estudos em diversos centros de pesquisa do mundo.

1.2. Justificativas

As atuais pesquisas sobre reforço de estruturas com CFC buscam descobrir o comportamento desse sistema, elaborar modelos consistentes e prover os projetistas de normas seguras e econômicas. A maior parte das

pesquisas são sobre o reforço de vigas à flexão, à força cortante e para o confinamento de pilares. O número de trabalhos referentes a reforço à torção é bastante limitado, podendo-se citar Ghobarah *et al.* (2002), Panchacharam *et al.* (2002), Täljsten (2003), Salom *et al.* (2004), Ameli *et al.* (2004) Deifalla e Ghobarah (2006), Hii e Al-Mahaidi (2006a, 2006b, 2006c, 2007).

Durante muito tempo considerou-se a torção como um efeito secundário nas estruturas de concreto armado, porém, a partir dos anos sessenta observou-se uma evolução nos métodos de análise, com o surgimento de novas teorias ou variações de concepções já existentes. A consideração da torção é de extrema importância para análise de estruturas que requeiram rigidez a este tipo de solicitação, como pontes, vigas de extremidade ou com carregamento excêntrico, e vigas sobre as quais se apóiam marquises.

Diversos fatores podem acarretar a necessidade de reforço à torção, como seção transversal ou armaduras transversal e longitudinal insuficientes, momento torçor solicitante superior ao considerado no projeto, concreto com resistência inferior à especificada, erros de cálculo, rigidez à torção insuficiente, entre outros.

As patologias à torção em estruturas de concreto armado são caracterizadas por fissuras com forma helicoidal que se propagam ao longo do elemento com certa inclinação variável em cada face da viga (Figura 1.2).

O reforço estrutural para vigas de concreto armado solicitadas à torção pode ser feito por meio da colagem externa de CFC no sentido longitudinal e transversal, e de acordo com os trabalhos de Ghobarah *et al.* (2002), Panchacharam *et al.* (2002), Täljsten (2003) e Salom *et al.* (2004), promovem um aumento de resistência em estruturas submetidas a este tipo de solicitação.

Esta pesquisa dá continuidade a uma série de trabalhos iniciados em 2001 no Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, cujo o enfoque é o reforço de estruturas de concreto armado com CFC. Na área experimental foram defendidas as dissertações de mestrado de Araújo (2002a) e de Machado (2004). Na área de modelagem numérica por elementos finitos foi desenvolvida a dissertação de Souto Filho (2002). Joaquim (2004) propôs um modelo analítico para dimensionamento direto do reforço à flexão, e Pereira (2005) implementou sistemáticas de análise para reforço à força cortante. Meneghel (2005) e Pacheco (2006) desenvolveram dissertações de mestrado experimentais sobre aderência entre o concreto e compósitos com tecido de fibras de carbono.

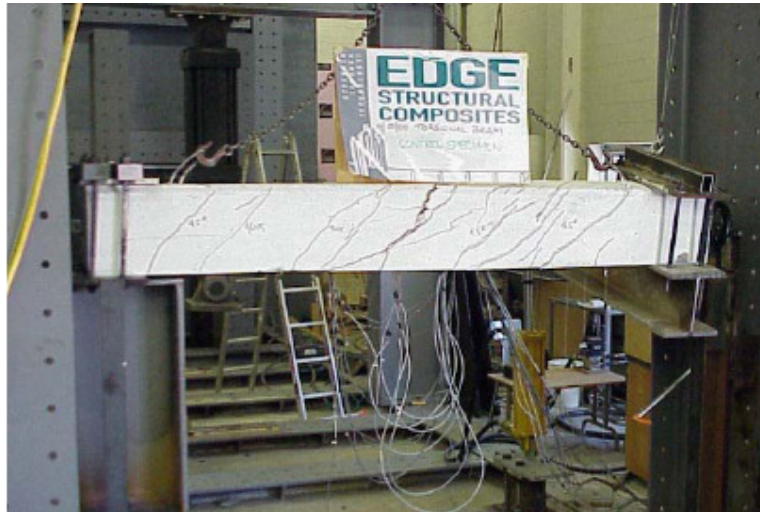


Figura 1.2 – Fissuração devido à torção (Salom, 2004b).

1.3. Objetivos

Este trabalho é uma pesquisa teórico-experimental composta dos ensaios de sete vigas de concreto armado, realizadas no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio, e a elaboração de modelos teóricos consistentes para a análise e dimensionamento do reforço de vigas. Uma das vigas é de referência, sem reforço, e as outras seis vigas com diferentes configurações de reforço à torção com CFC. A partir da análise dos resultados deste programa experimental pretende-se:

- Avaliar o acréscimo de carregamento a que podem resistir as vigas de concreto armado reforçadas à torção com tecidos de fibra de carbono.
- Analisar o comportamento das vigas com diferentes configurações de reforço.
- Desenvolver e validar um modelo de cálculo para determinação do momento torçor último e traçado do diagrama $T \times \theta$ (momento torçor vs. ângulo de torção por unidade de comprimento) de vigas de concreto armado reforçadas à torção com CFC, baseado na formulação da treliça espacial com abrandamento de tensões desenvolvida por Hsu (1993), e num modelo de aderência apresentado em Chen e Teng (2003);
- Propor uma sistemática de cálculo para dimensionamento de reforço à torção com CFC em vigas de concreto armado fundamentada no modelo de treliça espacial do Eurocode 2, e num modelo de aderência.

1.4. Organização do trabalho

Além da introdução, este trabalho está estruturado em mais sete capítulos e referências bibliográficas.

O capítulo 2 mostra as características, vantagens, desvantagens, composição e o uso de compósitos de fibra de carbono no reforço de estruturas de concreto armado.

O terceiro capítulo contém os conceitos, análise e procedimentos de cálculo para elementos solicitados à torção no regime elástico linear com seção circular, seção genérica e seções vazadas de paredes finas.

No quarto capítulo descreve-se a metodologia de análise e dimensionamento de estruturas de concreto armado solicitadas à torção por meio do modelo da treliça espacial generalizada considerando-se o modelo do painel fissurado.

No quinto capítulo são estudados alguns trabalhos experimentais e teóricos encontrados na literatura, relativos a vigas de concreto armado reforçadas à torção com compósitos de fibra de carbono.

No capítulo 6 apresenta-se o modelo de cálculo para determinação do momento torçor último e para o traçado do diagrama $T \times \theta$, e uma sistemática para dimensionamento do reforço com CFC de vigas de concreto armado solicitadas à torção.

O sétimo capítulo contém o programa experimental realizado, onde são mostrados o detalhamento das vigas, os materiais empregados, o esquema de instrumentações, o sistema de aplicação de carga e todas as etapas necessárias para execução dos ensaios das vigas.

No capítulo oito são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir do programa experimental, que são comparados com os modelos propostos.

Ao final deste trabalho são apresentadas as conclusões e algumas sugestões para estudos futuros.

2

Reforço Estrutural com Compósitos de Fibra de Carbono

2.1.

Introdução

Os materiais estruturais podem ser divididos em quatro grupos: metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos (Gibson, 1993). Em termos macro-estruturais os compósitos são formados a partir da combinação de dois ou mais materiais pertencentes aos outros grupos, com o objetivo de obter um novo material com propriedades e comportamento mecânico superiores aos apresentados pelos materiais constituintes, quando estes atuam individualmente (Áviles, 2002).

Segundo Emmons *et al.* (1998a), os egípcios utilizavam materiais compósitos na forma de palha misturada à argila para fabricação de tijolos, buscando melhorar o seu desempenho estrutural.

Nos últimos anos os compósitos de fibra de carbono (CFC) têm despertado o interesse de pesquisadores no mundo inteiro para utilização no reforço de estruturas em substituição aos métodos tradicionais, pois apresentam maior resistência e menor massa específica que o aço.

O CFC faz parte de uma classe de materiais compósitos conhecidos por *Fibre Reinforced Polymers* (FRP), e são constituídos basicamente por duas fases: fibras e matriz polimérica.

2.2.

Compósitos de Fibra de Carbono

As fibras de carbono começaram a ser comercializadas no princípio da década de 1960 após extenso programa de pesquisa desenvolvido nos Estados Unidos, Inglaterra e Japão (Emmons *et al.*, 1998b).

Este material foi utilizado durante muitos anos principalmente pelas indústrias aeroespacial e automobilística. Mais recentemente, também vem sendo utilizado em elementos estruturais, particularmente em ambientes agressivos sujeitos a ataques químicos.

A idéia de reforçar estruturas de concreto armado com CFC surgiu no início dos anos 80 no Japão. Os abalos sísmicos nessa região da Ásia, causando diversos danos às estruturas, mostraram a necessidade de recuperação e reforço em curto intervalo de tempo. Esses foram os principais aspectos considerados para utilização desse material no confinamento de pilares (Machado, 2004).

De acordo com Meier (1995) desde 1982 o *Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research* (EMPA) desenvolve pesquisas utilizando os compósitos de fibra de carbono para reforçar vigas de concreto armado.

No Brasil a primeira aplicação de CFC para reforço estrutural ocorreu em 1998 no viaduto Santa Tereza localizado em Belo Horizonte. O CFC foi escolhido principalmente por aspectos estéticos, pois se tratava de uma estrutura tombada pelo patrimônio histórico (Beber, 2003).

O CFC apresenta diversas vantagens quando comparado com os materiais usualmente utilizados para reforço, dentre as quais pode-se citar:

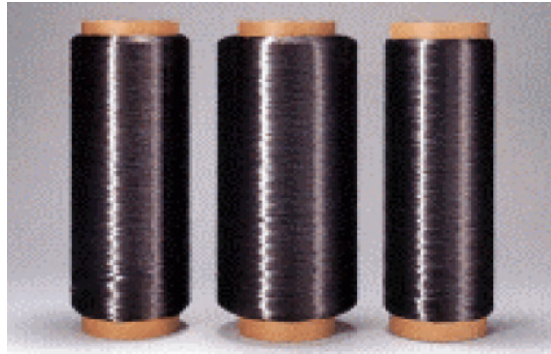
- alta resistência e rigidez;
- massa específica reduzida;
- alta resistência à fadiga;
- baixo coeficiente de dilatação térmica;
- ótima resistência contra ataques químicos e corrosão;
- rapidez e facilidade de instalação.

Como desvantagens, o sistema de reforço com CFC apresenta incompatibilidade com superfícies irregulares, baixa resistência ao fogo e à exposição a raios ultravioletas, e pode estar sujeito ao vandalismo. Estes problemas também são apresentados por outros sistemas de reforço, como as chapas de aço coladas com resina epóxi.

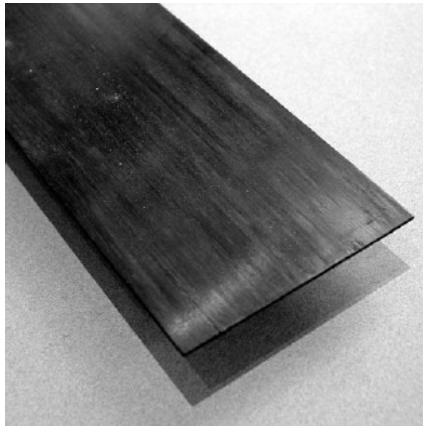
O sistema de reforço com CFC é composto por fibras de carbono envolvidas por uma matriz polimérica, e apresenta-se nas seguintes formas (Lima, 2001):

- **fios de fibra de carbono:** são enrolados sob tensão e colados sobre a superfície do concreto (Figura 2.1.a);
- **chapas pultrudadas:** são chapas de polímeros reforçados com fibras de carbono impregnadas com resina epóxi ou poliéster, que resultam em perfis contínuos com formatos diversos e complexos, que são colados sobre a superfície de concreto com adesivo (Figura 2.1.b);

- **tecidos de fibra de carbono:** são tecidos pré-impregnados (*prepreg*), colados sobre a superfície com resina epóxi, com espessura similar a do papel de parede. Este sistema segue exatamente a curvatura do elemento e permite a aplicação em cantos vivos (Figura 2.1.c).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.1 – Sistemas de reforço com fibras de carbono: (a) fios de fibra de carbono; (b) chapas pultrudadas de fibra de carbono; (c) tecidos de fibra de carbono.

As fibras têm como funções principais fornecer resistência e rigidez ao compósito. Estas propriedades variam em função do tipo, tamanho, grau de concentração e disposição das mesmas na matriz (Araújo, 2002.a; Avilés 2002; Nordin, 2003). A escolha da fibra a ser empregada em determinada situação depende do tipo de estrutura, grau de solicitação e condições ambientais.

Em reforço estrutural além das fibras de carbono podem ser utilizadas também fibras de vidro e aramida. As fibras podem ser longas ou curtas, com comprimentos de 3 mm a 50 mm, e apresentam diâmetros entre 0,07 mm e 0,10 mm. O Quadro 2.1 apresenta um estudo comparativo entre as características das fibras.

Quadro 2.1 – Comparativo entre as características dos diversos tipos de fibra.

Consideração	Fibra de Carbono	Fibra de Vidro	Fibra de Aramida
Alcalidade / Exposição à meios ácidos	Alta resistência	Não tolera	Não tolera
Expansão térmica	Próximo de zero, pode causar altas tensões de aderência	Similar ao concreto	Próximo de zero, pode causar altas tensões de aderência
Condutividade elétrica	Alta	Excelente isolante	Excelente isolante
Tolerância ao impacto	Baixa	Alta	Alta
Fluência e fadiga	Alta resistência	Baixa resistência	Baixa resistência

Os compósitos com fibras de carbono (CFC) são os materiais mais indicados para o reforço de vigas de concreto armado, pois apresentam alto desempenho mecânico e o aumento na seção transversal original é praticamente desprezível. Na Tabela 2.1 estão as propriedades mecânicas de alguns tipos de fibras.

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas das fibras (Technical Report n°55, 2000).

Tipo de Fibra	Tensão de Ruptura (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação Específica Última (%)	Densidade Específica
Carbono de alta resistência	4300 – 4900	230 – 240	1,9 – 2,1	1,8
Carbono de alto módulo	2740 – 5490	294 – 329	0,7 – 1,9	1,78 – 1,81
Carbono de alta resistência e alto módulo	2600 – 4020	540 – 640	0,4 – 0,8	1,91 – 2,12
Aramida de alta resistência e alto módulo	3200 – 3600	124 – 130	2,4	1,44
Vidro	2400 – 3500	70 – 85	3.5 – 4,7	2,6

A Figura 2.2 apresenta os diagramas tensão-deformação específica das fibras, aço de construção e cordoalhas de protensão.

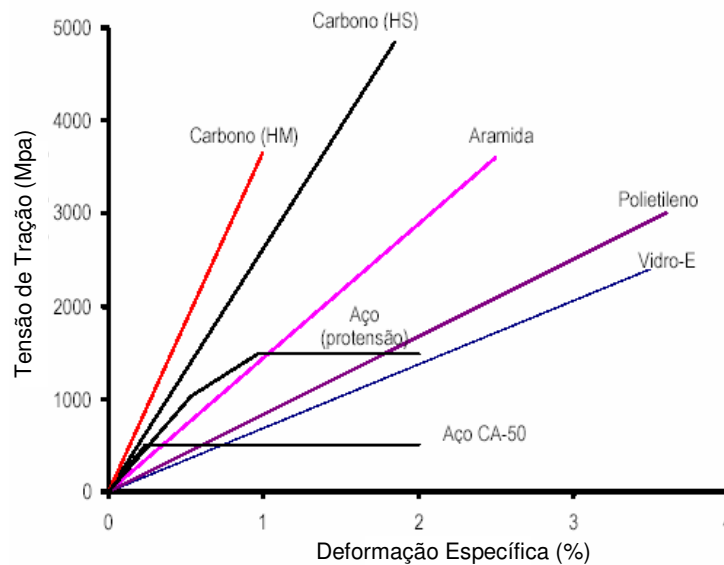


Figura 2.2 – Diagrama tensão-deformação específica das fibras, aço de construção e cordoalha de protensão (Beber, 2003).

A matriz é responsável por envolver completamente as fibras, proporcionando proteção mecânica e proteção contra agentes agressivos, além de garantir a transferência integral das tensões do elemento estrutural para as fibras por atrito ou adesão.

As matrizes utilizadas em polímeros reforçados com fibras são constituídas por resinas termoplásticas ou resinas termo-rígidas, as quais devem apresentar compatibilidade química e térmica com a fibra.

As resinas termo-rígidas ou termofixas são aquelas em que a cura é feita pela ação do calor, ou tratamento químico com catalisadores formando um produto final infusível e insolúvel (Fiorelli, 2002; Beber, 2003).

As resinas termoplásticas são aquelas em que o processo de cura é reversível, ou seja, podem ser fundidas por meio do aumento de temperatura tornando a se solidificar ao serem resfriadas (Fiorelli, 2002).

Em reforço estrutural utiliza-se resinas de origem termo-rígida, dentre as quais pode-se citar o poliéster, o éster-vinílico, o uretano metacrilato, o fenol e principalmente o epóxi.

Machado (2004) relata que as resinas epóxi são as mais utilizadas pois apresentam excelente aderência, durabilidade, compatibilidade com o concreto, boa resistência à tração, bom comportamento à fluência, boa resistência química e a solventes, forte adesão com as fibras e baixa retração durante a cura. A

qualidade do reforço com CFC depende da quantidade de fibras em contato com a resina epóxi (Figura 2.3).

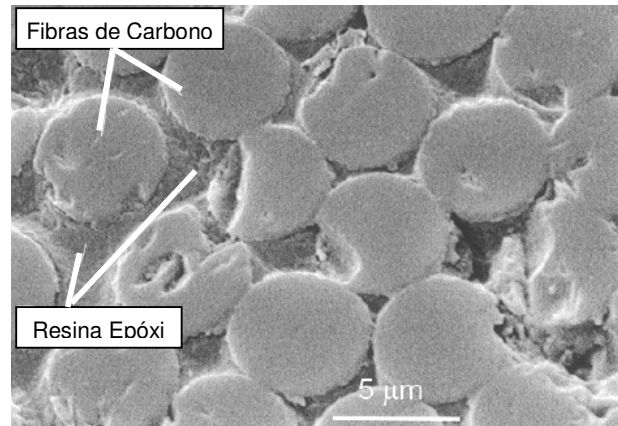


Figura 2.3 – Fibras de carbono envolvidas com resina epóxi (Basche *et al.*, 2000).

Atualmente os CFC são utilizados para reforçar vigas à flexão e à força cortante, lajes, chaminés, alvenaria estrutural, silos, reservatórios, túneis, pilares por meio de confinamento ou para redução de deformações. Alguns exemplos são ilustrados nas Figuras 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8.



Figura 2.4 – Confinamento de pilares com CFC.



Figura 2.5 – Reforço de chaminé com sistema de fio de fibra de carbono sob tensão (Karbhari, 1998).



Figura 2.6 – Reparo de túnel com CFC (Karbhari, 1998).



Figura 2.7 – Reforço de ponte à força cortante com CFC.



Figura 2.8 – Reforço de lajes à flexão e vigas à flexão e à força cortante com tecidos de CFC.

3 Torção

3.1. Introdução

A primeira tentativa de se solucionar problemas de torção em peças homogêneas de seção circular data do século XVIII, mais precisamente em 1784 com Coulomb. Este cientista criou um dispositivo para medir a relação entre cargas elétricas e forças magnéticas, que consistia simplesmente num fio suspenso com uma agulha metálica. Ele verificou que uma pequena força magnética na extremidade do fio causava uma torção e uma rotação angular no mesmo (Hsu, 1984).

Os problemas de torção analisados segundo as teorias elástico-lineares da resistência dos materiais dividem-se basicamente em: vigas com seções circulares, vigas com seções não circulares e vigas com seções vazadas de paredes finas.

Quando um eixo, sólido ou tubular de uma viga com seção circular, estiver submetido à torção, cada seção transversal permanece plana e gira em torno do eixo desse elemento. Por outro lado, as seções transversais de uma viga de seção retangular ficam distorcidas quando essa barra é torcida em torno do seu eixo.

3.2. Análise Elástica de Elementos Submetidos à Torção

3.2.1. Elementos de Seções Circulares

A análise de torção em vigas de seções circulares requer a consideração das seguintes hipóteses para sua formulação:

- as seções circulares permanecem circulares depois da torção, e o eixo da viga permanece reto e inextensível;
- cada seção transversal permanece plana e perpendicular ao eixo, sem apresentar qualquer tipo de empenamento após a torção da seção;

- as linhas radiais permanecem retas e radiais à medida que a seção transversal gira em torno do eixo longitudinal da viga;
- admite-se o regime elástico linear do material (lei de Hooke);
- admite-se o regime de pequenas deformações, e que material seja homogêneo e isótropo.

Seja uma viga com seção transversal circular com raio R e com uma extremidade engastada e outra livre. Aplicando-se um momento torçor T em sua extremidade livre, o seu eixo gira apresentando uma rotação ao longo da viga, resultando num ângulo de torção ϕ (Figura 3.1).

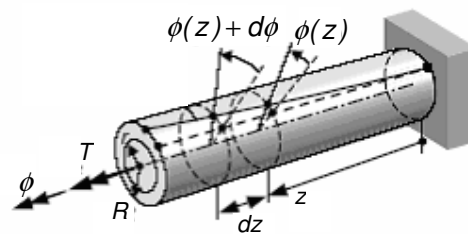


Figura 3.1 – Deformação em uma viga com seção circular solicitada à torção.

Considerando-se o elemento de comprimento dz (Figura 3.2) tem-se:

$$\operatorname{tg} \gamma = r \frac{d\phi}{dz} \quad (3.1)$$

onde

dz – elemento diferencial ao longo do eixo longitudinal;

$d\phi$ – elemento diferencial angular.

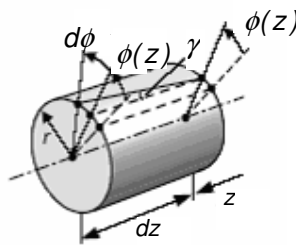


Figura 3.2 – Elemento longitudinal de uma viga com seção circular submetida à torção.

Como γ é pequeno tem-se que:

$$\gamma = \operatorname{tg} \gamma \quad (3.2)$$

Reescrevendo-se a expressão 3.1:

$$\gamma = r \frac{d\phi}{dz} \quad (3.3)$$

onde γ é a distorção na seção transversal de abscissa z numa distância r do eixo da peça.

Admitindo-se que as seções não empenem, ou seja, as seções permanecem planas, pode-se aplicar lei de Hooke para se determinar a tensão de cisalhamento:

$$\tau(r) = G\gamma \quad (3.4)$$

onde G é o módulo de deformação transversal.

A distribuição da tensão cisalhante varia de forma linear desde o eixo da viga até a sua face externa (Figura 3.3), então:

$$\tau(r) = \tau_{m\acute{a}x} \frac{r}{R} \quad (3.5)$$

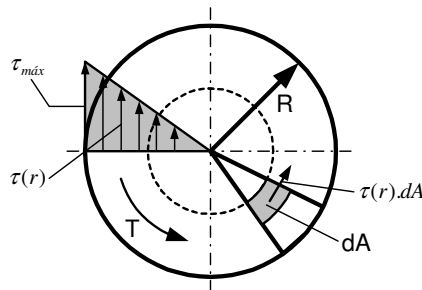


Figura 3.3 – Distribuição da tensão cisalhante na seção circular.

Considerando-se o equilíbrio de uma seção elemental de área dA tem-se:

$$dT = \tau(r)dAr \quad (3.6)$$

Substituindo-se a expressão 3.5 na expressão 3.6 tem-se:

$$dT = \tau_{m\acute{a}x} \frac{r}{R} dAr \quad (3.7)$$

Manipulando-se a expressão 3.7 segue-se:

$$dT = \tau_{m\acute{a}x} \frac{r^2}{R} dA \quad (3.8)$$

Integrando-se a expressão 3.8 tem-se:

$$T = \int_A \tau_{m\acute{a}x} \frac{r^2}{R} dA \quad (3.9)$$

donde

$$T = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{R} \int_A r^2 dA \quad (3.10)$$

O momento polar J_t para seções circulares é dado por:

$$J_t = \int_A r^2 dA \quad (3.11)$$

Substituindo-se a expressão 3.11 na expressão 3.10 tem-se:

$$T = \frac{\tau_{m\acute{a}x} J_t}{R} \quad (3.12)$$

ou

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{TR}{J_t} \quad (3.13)$$

3.2.2. Elementos com Seções Retangulares

A formulação desenvolvida no item anterior é aplicável apenas para o cálculo de tensões e deformações em vigas de seção circular.

Nas vigas com seção transversal retangular submetidas à torção as seções transversais empenam (Figura 3.4).

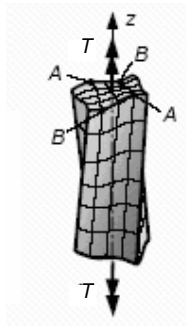


Figura 3.4 – Empenamento das seções de viga com seção retangular.

O desenvolvimento da teoria de torção em viga com seção genérica deve-se a Barré de Saint-Venant, que em 1853 apresentou sua famosa memória sobre torção à Academia Francesa de Ciências.

Numa viga com seção circular a tensão cisalhante varia de forma linear a partir do centro da seção, atingindo seu valor máximo na face externa da peça.

Para vigas com seção transversal retangular a tensão tangencial nos vértices desses elementos é nula. O seu valor máximo ocorre no meio do lado maior, que é o ponto externo mais próximo do centro da peça (Figura 3.5).

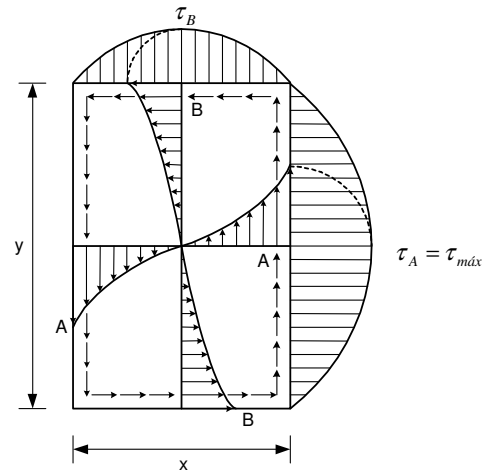


Figura 3.5 – Distribuição da tensão cisalhante devida à torção em seções retangulares.

A tensão cisalhante máxima em vigas com seção retangular submetidas à torção é dada por:

$$\tau_{máx} = \frac{T}{\eta y x^2} \quad (3.14)$$

onde

T – momento torçor solicitante;

η – constante adimensional obtida por meio da solução da teoria da elasticidade;

y – lado maior do retângulo;

x – lado menor do retângulo.

O ângulo de torção em elementos com seção retangular é dado por:

$$\phi = \frac{TL}{GJ} \quad (3.15)$$

onde:

$$J = \beta yx^3 \quad (3.16)$$

sendo β uma constante adimensional e L o comprimento do elemento.

Os valores de η e β são apresentados na Tabela 3.1. Esses valores são válidos apenas para $y/x \geq 1$.

Tabela 3.1 – Valores de η e β .

y/x	1	1,5	1,75	2	2,5	3	4	6	8	10	∞
η	0,208	0,231	0,239	0,246	0,258	0,267	0,282	0,298	0,307	0,312	0,333
β	0,141	0,196	0,214	0,229	0,249	0,263	0,281	0,98	0,307	0,312	0,333

Prandt em 1903 apresentou uma formulação matemática para a solução de problemas de torção utilizando a analogia da membrana. Este modelo estabelece relações particulares entre a superfície deformada de uma membrana sob carregamento uniformemente distribuído, e a distribuição de tensões em seções submetidas à torção.

3.2.3. Torção em Elementos de Parede Fina

Bredt em 1896 solucionou o problema de torção em vigas com seções vazadas de paredes finas. Esta formulação é a base para a resolução de problemas em vigas de concreto estrutural solicitados à torção.

Por meio da consideração de hipóteses simplificadoras o problema de torção em seções de paredes finas pode ser resolvido de modo imediato. Estas hipóteses são:

- o elemento é cilíndrico com seção transversal constante ao longo do seu comprimento;
- a seção transversal é fechada;
- a espessura da parede quando comparada às dimensões da seção transversal é pequena;
- as seções permanecem planas após as deformações, logo não empenam;
- admite-se o regime elástico linear (lei de Hooke);
- admite-se o regime de pequenas deformações, e que o material seja homogêneo e isótropo.

3.2.3.1. 1ª Fórmula de Bredt

A Figura 3.6 apresenta um elemento de parede fina submetida à torção. O equilíbrio deste elemento é dado pela expressão 3.17:

$$-\tau \cdot t \Delta x + \left(\tau + \frac{d\tau}{ds} \right) \left(t + \frac{dt}{ds} \Delta s \right) \Delta x = 0 \quad (3.17)$$

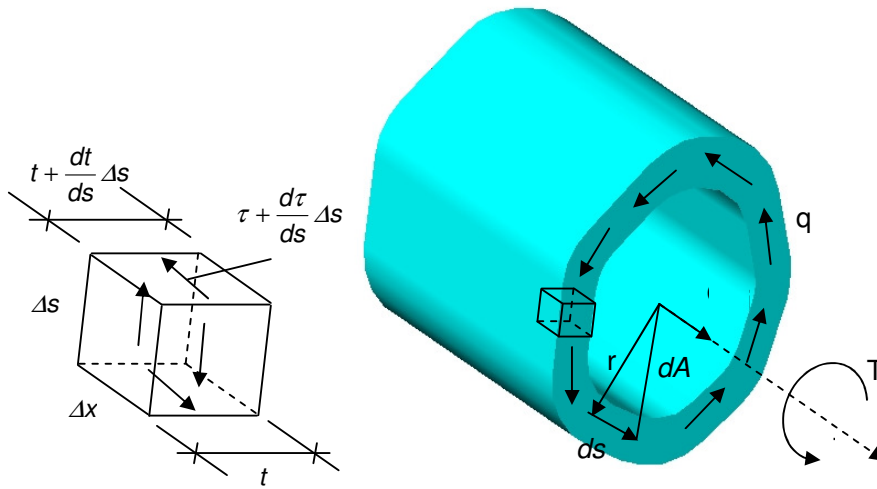


Figura 3.6 – Seção vazada de parede fina submetida a um momento torçor.

Expandindo-se e manipulando-se a expressão 3.17:

$$\left(\tau \frac{dt}{ds} + t \frac{d\tau}{ds} \right) \Delta s + \frac{d\tau}{ds} \frac{dt}{ds} (\Delta s)^2 = 0 \quad (3.18)$$

Desprezando-se os termos de ordem superior dessa expressão tem-se:

$$\left(\tau \frac{dt}{ds} + t \frac{d\tau}{ds} \right) = 0 \quad (3.19)$$

Verifica-se que expressão 3.19 é a diferencial de:

$$\frac{d(\tau \cdot t)}{ds} = 0 \quad (3.20)$$

Definindo-se o fluxo de tensões tangenciais por:

$$q = \tau \cdot t \quad (3.21)$$

Substituindo-se a expressão 3.21 na expressão 3.20 resulta:

$$\frac{dq}{ds} = 0 \quad (3.22)$$

Conclui-se que o fluxo de tensões cisalhantes é constante ao longo das paredes desse tubo.

O momento torçor solicitante deve ser equilibrado pelas ações internas resistentes, ou seja, pela integral do produto vetorial entre o vetor r e o fluxo de tensões tangenciais ao longo da seção do tubo, logo:

$$T_i = \oint r \times (\tau t) ds \quad (3.23)$$

Substituindo-se a expressão 3.21 na expressão 3.23:

$$T_i = q \oint r \times ds \quad (3.24)$$

O produto vetorial entre dois vetores resulta num vetor axial perpendicular a estes. O módulo deste vetor resultante é igual à área do paralelogramo cujos lados são esses dois vetores.

O módulo do produto vetorial $r \times ds$ é igual a duas vezes a área dA indicada na Figura 3.6, e o vetor resultante perpendicular ao plano da seção é o vetor referente às ações internas. O somatório dessas ações internas é dado por:

$$\oint r \times ds = 2A_{0i} \quad (3.25)$$

A integral fechada na expressão 3.25 indica que essas áreas elementares devem ser somadas ao longo da coordenada setorial s , logo:

$$T_i = 2A_{0i}(\tau t) \quad (3.26)$$

onde A_0 é a área definida pela linha média do tubo.

Isolando-se a tensão tangencial na expressão 3.26:

$$\tau = \frac{T}{2A_0 t} \quad (3.27)$$

Substituindo-se a expressão do fluxo de tensões tangenciais na expressão 3.27 e isolando-o tem-se:

$$q = \frac{T}{2A_0} \quad (3.28)$$

As expressões 3.27 e 3.28 são denominadas 1ª fórmula de Bredt.

Esta formulação mostra que o fluxo de tensões tangenciais se desenvolve ao longo das paredes das seções. Como o fluxo é constante, se a espessura da parede varia a tensão tangencial também varia.

3.2.3.2. 2ª Fórmula de Bredt

Essa fórmula pode ser deduzida por meios energéticos, desde que se admita um comportamento elástico linear para o material. Para a energia potencial de deformação unitária devida ao cisalhamento puro tem-se:

$$\frac{dW_{INT}}{dV} = \frac{1}{2} \frac{\tau^2}{G} \quad (3.29)$$

com o volume elementar

$$dV = t ds dx \quad (3.30)$$

Substituindo-se a expressão 3.30 na expressão 3.29 tem-se:

$$dW_{INT} = \frac{1}{2} \frac{\tau^2}{G} t ds dx \quad (3.31)$$

Integrando-se em ambos os lados dessa expressão resulta:

$$W_{INT} = \frac{1}{2} \int_0^{\ell} \oint \frac{\tau^2}{G} t ds dx \quad (3.32)$$

O trabalho externo de uma viga submetida à torção no regime elástico linear é dado por:

$$W_{EXT} = \frac{1}{2} T\phi \quad (3.33)$$

onde ϕ é o ângulo de torção.

Aplicado-se o princípio dos trabalhos virtuais, no qual o trabalho externo deve ser igual ao trabalho interno tem-se:

$$W_{EXT} = W_{INT} \quad (3.34)$$

Substituindo-se as expressões 3.32 e 3.33 na expressão 3.34 resulta:

$$T\phi = \int_0^{\ell} \oint \frac{\tau^2}{G} t ds dx \quad (3.35)$$

Integrando-se essa expressão ao longo do perímetro da seção obtém-se:

$$T\phi = \frac{\ell}{G} \oint \tau^2 t ds \quad (3.36)$$

Manipulando-se a expressão 3.36 resulta:

$$\frac{T\phi}{\ell} = \frac{1}{G} \oint \tau^2 t ds \quad (3.37)$$

$$\frac{\phi}{\ell} = \frac{d\phi}{dx} \quad (3.38)$$

Substituindo-se expressão 3.38 na expressão 3.37 seguem-se:

$$T \frac{d\phi}{dx} = \frac{1}{G} \oint \tau^2 t ds \quad (3.39)$$

$$\frac{d\phi}{dx} = \frac{T}{4A_0^2 G} \oint \frac{ds}{t} \quad (3.40)$$

Como a espessura t é constante, tem-se o ângulo de torção por unidade de comprimento:

$$\frac{d\phi}{dx} = \frac{T u}{4 A_0^2 G t} \quad (3.41)$$

onde u é o perímetro da área A_0 .

4 Torção em Elementos de Concreto Armado

4.1. Histórico

As teorias para análise de vigas de materiais elásticos, homogêneos e isotropos solicitadas à torção datam dos séculos XVIII e XIX. O concreto armado como material estrutural teve seu uso difundido no mundo inteiro a partir do fim do século XIX, e as principais teorias para análise de vigas solicitadas à torção produzidas com esse material foram desenvolvidas ao longo do século XX (Figura 4.1).

A base para análise das vigas de concreto armado solicitadas à torção está fundamentada na analogia da treliça, proposta inicialmente por Ritter em 1889 e mais tarde por Mörsch 1902, utilizada para a análise do comportamento de vigas de concreto armado submetidas à força cortante, e na teoria de Bredt para tubos de paredes finas apresentada em 1896.

A analogia da treliça consiste em considerar o comportamento de uma viga fissurada similar ao de uma treliça isostática, com barras diagonais comprimidas com inclinação de 45° , ligando a parte superior comprimida à parte inferior tracionada.

Mörsch em 1904 conduziu nos laboratórios de Stuttgart, Alemanha, os primeiros ensaios à torção em corpos-de-prova de concreto armado cilíndricos, maciços e ocos, para analisar o comportamento deste material quando solicitado à torção. Em 1921, Mörsch, executou mais uma série de ensaios afim de aprofundar os estudos já iniciados.

A idéia de juntar a analogia da treliça com a teoria de Bredt para a análise de vigas à torção deve-se a Ernest Rausch, que em 1929, em sua tese de doutorado, onde se propôs um modelo denominado Analogia da Treliça Espacial, que considera diagonais comprimidas a 45° . A segunda edição desse trabalho foi apresentada em forma de livro, publicado em 1938, e a terceira edição em 1952.

Em 1958, com algumas adaptações, esse modelo foi incorporado à DIN-1045, que foi a primeira norma no mundo a ter prescrições sobre torção em seu

escopo. No ano de 1959 surgiu na antiga União Soviética um modelo para a análise da torção de vigas de concreto armado, de autoria de Lessig, fundamentado em equações de equilíbrio, admitindo-se os modos de ruptura da viga à torção.

A partir da década de 1960 houve um súbito interesse na pesquisa experimental sobre o comportamento das vigas de concreto armado e protendido solicitadas à torção. No ano de 1962, Yudin publicou um trabalho contendo contribuições que generalizavam o modelo de Lessig. Em 1963, Thomas T. C. Hsu publicou os resultados dos ensaios à torção de 53 vigas de concreto armado, que se tornaram referência na literatura. Em 1968 surgiu a publicação do American Concrete Institute intitulada *Torsion of Structural Concrete SP-18*, contendo uma coletânea de resultados de ensaios e de trabalhos teóricos. Os trabalhos dessa publicação adotavam, em geral, o modelo de Lessig.

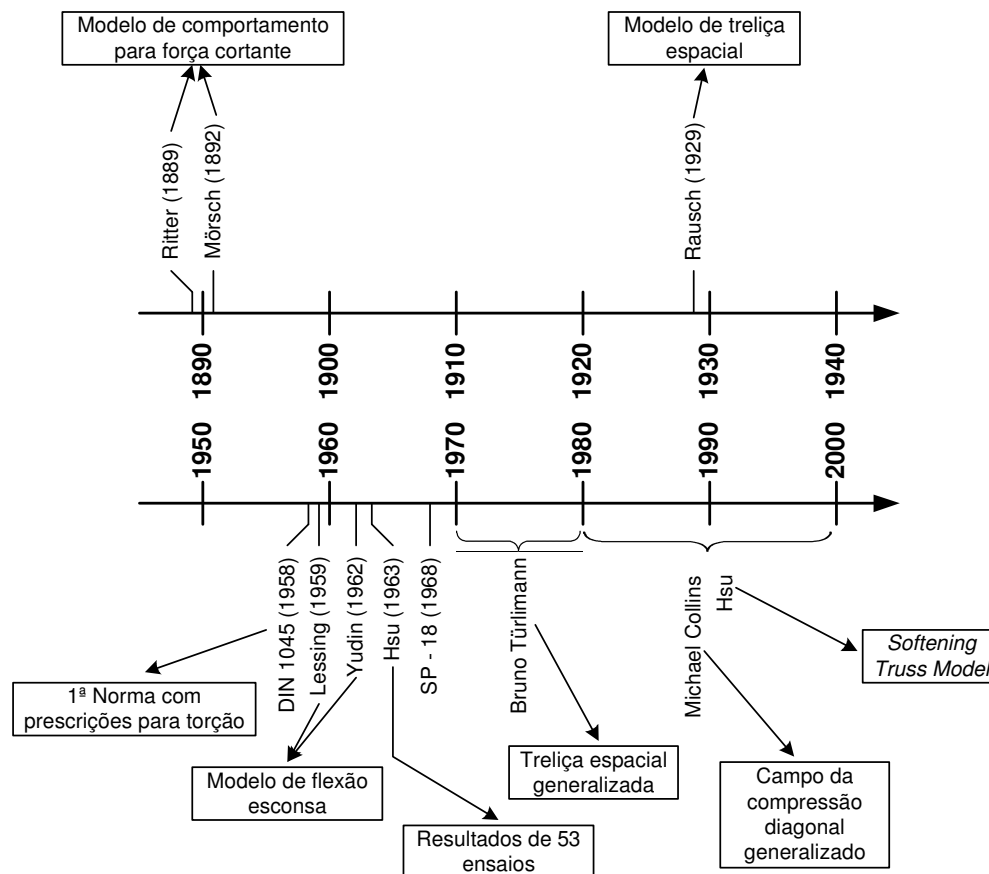


Figura 4.1 – Evolução das teorias para dimensionamento à torção de vigas de concreto armado.

Na Suíça, Alemanha e França, o modelo de treliça de Rausch recebeu diversas contribuições teóricas e experimentais. No ETH-Zürich sob o comando

do professor Bruno Thürlimann foi desenvolvido um amplo programa experimental, cujo objetivo foi generalizar o modelo da treliça espacial. Na Alemanha foram publicados pela *Deutsch Ausschuss für Stahlbeton* os resultados dos ensaios de vigas solicitadas à torção realizados por Fritz Leonhardt em Stuttgart (Leonhardt e Schelling, 1974).

A sistemática atual para dimensionamento de vigas de concreto estrutural solicitadas à torção, adotada por diversas normas internacionais entre elas, Eurocode 2, ACI, CSA *apud* Gabrielsson (1999) e também pela NBR 6118/2003, está fundamentada no modelo da treliça espacial generalizada.

4.2.

Comportamento de Vigas de Concreto Armado Solicitadas à Torção

As vigas de concreto armado solicitadas à torção apresentam três estágios distintos de comportamento em função da magnitude da solicitação (Sánchez, 1989).

1º Estágio – Nível de solicitação baixo:

- para um torçor de pequena magnitude a fissuração é praticamente inexistente;
- a seção transversal é considerada de forma integral;
- os princípios utilizados para análise de peças de materiais homogêneos, isotrópicos e elástico lineares são aplicados.

2º Estágio – Nível de solicitação médio:

- existe dificuldade em se determinar quando ocorre o início e o término deste estágio de solicitação;
- mesmo com o aparecimento das primeira fissuras, as teorias elásticas ainda podem ser utilizadas;
- o mecanismo interno resistente da viga é modificado de modo considerável;

3º Estágio – Nível de solicitação alto:

- há o desenvolvimento da fissuração ao longo da viga;
- os modelos elásticos para análise do mecanismo interno resistente não podem ser aplicados, pois o comportamento da viga torna-se inelástico;
- é necessário a elaboração de modelos mais sofisticados, baseados na Teoria da Plasticidade.

De maneira geral, quando uma viga é solicitada à torção as fissuras ocorrem para baixos valores de sollicitação, dificultando o estabelecimento do início e do término de cada estágio citado anteriormente.

4.3. Analogia da Treliça Espacial

O modelo proposto por Rausch em 1929 está baseado nas seguintes concepções (Hsu, 1984; Alnuaimi, 1999):

- a treliça espacial é formada por bielas de concreto comprimidas a 45° e por barras de aço longitudinais e transversais conectadas formando nós;
- o elemento diagonal é carregado somente com compressão axial, sendo a resistência ao cisalhamento negligenciada;
- as barras de aço transversais e longitudinais são solicitadas somente à tração, sendo desprezado o efeito de pino;
- para uma seção maciça o núcleo de concreto não contribui para resistência última à torção, o que viabiliza o uso da teoria de Bredt para análise destes elementos.

Este modelo assume que o volume de aço longitudinal é igual ao volume de aço transversal. Os resultados experimentais mostram que o modelo com ângulo da biela igual a 45° é bastante conservador, principalmente em vigas com taxas de armadura reduzidas.

4.4. Treliça Espacial Generalizada

Lampert e Thürlimann (1971) generalizaram o modelo da treliça espacial para elementos de concreto estrutural sujeitos à torção, ou à combinação da flexão com a torção. Esses autores assumiram que o ângulo de inclinação das bielas pode diferir de 45° . Admitem um comportamento elasto-plástico perfeito e uma curva tensão-deformação específica para a armadura. No modelo com bielas inclinadas de 45° está implícito que as taxas volumétricas das armaduras transversal e longitudinal são iguais.

Equações análogas às deduzidas inicialmente por Lampert e Thürlimann (1971) são obtidas a partir do modelo do painel fissurado.

4.5. Modelo do Pannel Fissurado

Seja um pannel de concreto de espessura t_d , de lados com dimensões unitárias e armaduras transversal e longitudinal distribuídas em seu interior, submetido a um fluxo de tensões tangenciais (Figura 4.2.a). Após a fissuração desse elemento este terá a configuração mostrada na Figura 4.2.b, onde as bielas de concreto são comprimidas, e têm inclinação α . O uso desse elemento visa possibilitar uma análise genérica das solicitações combinadas (ações normais e tangenciais).

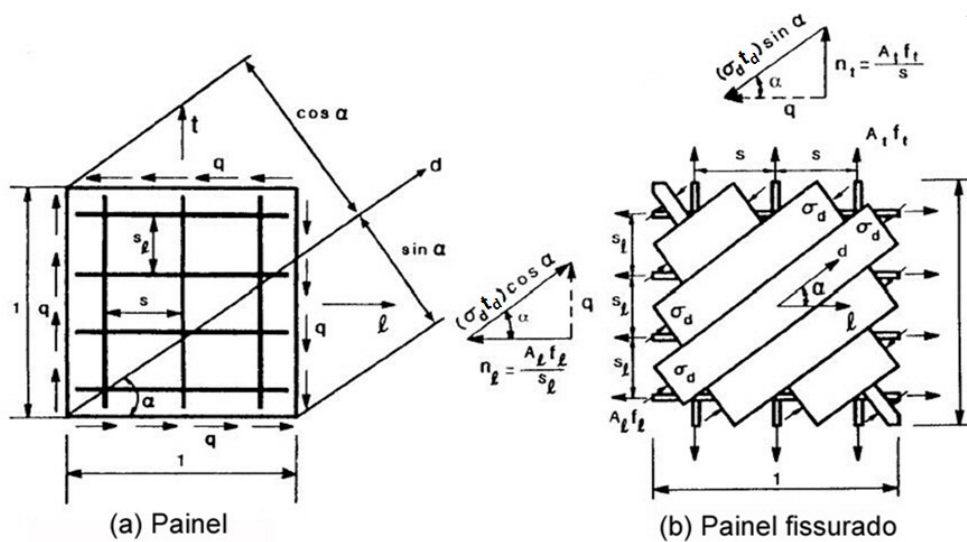


Figura 4.2 – Modelo do pannel fissurado.

Formulando-se o equilíbrio na face vertical do elemento tem-se:

$$tg \alpha = \frac{q}{n_\ell} \quad (4.1)$$

ou

$$q = n_\ell tg \alpha \quad (4.2)$$

Na face horizontal do elemento tem-se:

$$tg \alpha = \frac{n_t}{q} \quad (4.3)$$

ou

$$q = n_t cotg \alpha \quad (4.4)$$

Escrevendo-se o fluxo de tensões em termos da tensão na biela resulta:

$$q = \sigma_d (t_d sen \alpha) cos \alpha \quad (4.5)$$

ou

$$q = \sigma_d t_d (\text{sen } \alpha \cos \alpha) \quad (4.6)$$

Definido-se as forças por unidade de comprimento n_ℓ e n_t como:

$$n_\ell = \frac{A_\ell f_\ell}{s_\ell} \quad (4.7)$$

e

$$n_t = \frac{A_t f_t}{s_t} \quad (4.8)$$

Igualando-se as expressões 4.1 e 4.3 de modo a se eliminar α tem-se:

$$\frac{q}{n_\ell} = \frac{n_t}{q} \quad (4.9)$$

logo

$$q = \sqrt{n_\ell n_t} \quad (4.10)$$

De forma análoga, eliminando-se q tem-se:

$$n_t \cotg \alpha = n_\ell tg \alpha \quad (4.11)$$

donde

$$tg \alpha = \sqrt{\frac{n_t}{n_\ell}} \quad (4.12)$$

A tensão na biela é dada por:

$$\sigma_d = \frac{q}{t_d (\text{sen } \alpha \cos \alpha)} \quad (4.13)$$

onde

- q – fluxo de tensões tangenciais;
- α – ângulo de inclinação das bielas comprimidas;
- n_ℓ – força normal na armadura longitudinal;
- n_t – força normal na armadura transversal;
- σ_d – tensão de compressão na biela de concreto;
- t_d – espessura do painel;
- A_ℓ – área de uma barra da armadura longitudinal;
- f_ℓ – tensão na armadura longitudinal;
- s_ℓ – espaçamento da armadura longitudinal;
- A_t – área de uma barra da armadura transversal;
- f_t – tensão na armadura transversal;
- s_t – espaçamento da armadura transversal.

4.6. Treliça Espacial Generalizada Considerando-se o Modelo do Painel Fissurado

As vigas de concreto estrutural solicitadas à torção comportam-se de maneira semelhante às vigas com seção vazada (Figura 4.3). Desta forma o fluxo de tensões tangenciais é dado por meio da 1ª equação de Bredt.

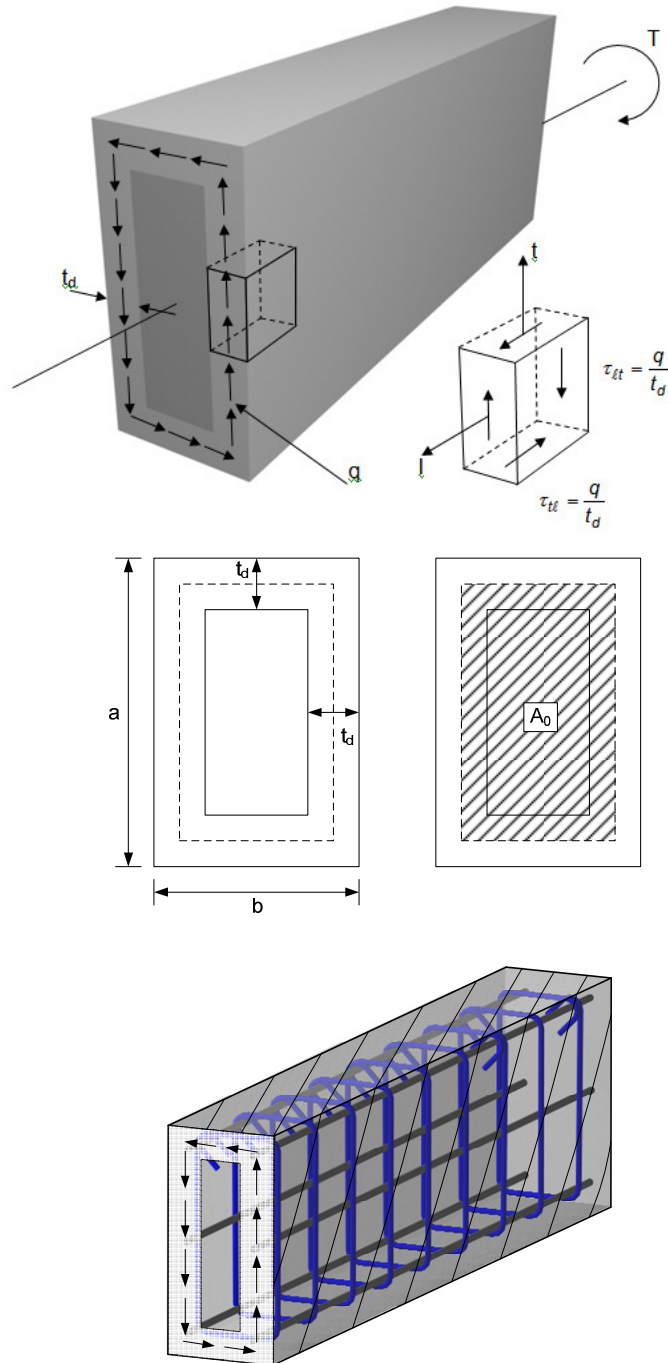


Figura 4.3 – Torção em vigas retangulares de concreto estrutural.

Considerando-se que a viga de concreto armado seja composta por painéis fissurados formando uma elemento com seção vazada, a resultante das forças na armadura longitudinal N_ℓ é dada por:

$$N_\ell = n_\ell u \quad (4.14)$$

Substituindo-se as expressão 4.14 e a 1ª fórmula de Bredt na expressão 4.2, tem-se para a armadura longitudinal:

$$\frac{T}{2A_0} = \frac{N_\ell}{u} \operatorname{tg} \alpha \quad (4.15)$$

$$T = \left(\frac{N_\ell}{u} \right) 2A_0 \operatorname{tg} \alpha \quad (4.16)$$

Para a armadura transversal tem-se:

$$\frac{T}{2A_0} = n_t \operatorname{cotg} \alpha \quad (4.17)$$

$$T = n_t 2A_0 \operatorname{cotg} \alpha \quad (4.18)$$

Para a biela tem-se:

$$\frac{T}{2A_0} = (\sigma_d t_d) \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha \quad (4.19)$$

$$T = (\sigma_d t_d) 2A_0 \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha \quad (4.20)$$

Quando do escoamento da armadura longitudinal e transversal tem-se $n_\ell = n_{\ell y}$, $N_\ell = N_{\ell y}$ e $n_t = n_{ty}$, logo:

$$T = \left(\frac{N_{\ell y}}{u} \right) 2A_0 \operatorname{tg} \alpha \quad (4.21)$$

$$T = n_{ty} 2A_0 \operatorname{cotg} \alpha \quad (4.22)$$

Eliminando-se T das expressões 4.21 e 4.22:

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\frac{n_{ty}}{\left(\frac{N_{\ell y}}{u} \right)}} \quad (4.23)$$

Eliminando-se o ângulo α das expressões 4.21 e 4.22 tem-se:

$$T_y = 2A_0 \sqrt{\left(\frac{N_{\ell y}}{u} \right) n_{ty}} \quad (4.24)$$

onde

N_ℓ – força resultante na armadura longitudinal;

u – perímetro da região limitada pela metade da espessura t ;

A_0 – área da região limitada pela metade da espessura t ;

T – momento torçor solicitante;

$n_{\ell y}$ – força normal unitária para o escoamento da armadura longitudinal;

$n_{\ell y}$ – força normal unitária para o escoamento da armadura transversal;

$N_{\ell y}$ – força resultante para o escoamento da armadura longitudinal;

T_y – momento torçor quando do escoamento das armaduras.

5

Reforço de Vigas à Torção com Compósitos de Tecidos de Fibras de Carbono

Desde o princípio da utilização de compósitos de fibras de carbono como técnica para reforçar estruturas, as pesquisas concentraram-se principalmente em estudar vigas reforçadas à flexão ou à força cortante. Atualmente o número de trabalhos publicados sobre o reforço de estruturas à torção é bastante reduzido. Nesse capítulo são apresentados de forma sucinta os principais aspectos, características, metodologia de dimensionamento do reforço, e as conclusões obtidas nesses trabalhos.

5.1.

Ghobarah *et al.* (2002)

A pesquisa desenvolvida por Ghobarah *et al.* (2002) buscou avaliar o aumento de resistência por meio da aplicação de compósitos de tecidos de fibras de carbono e fibras de vidro em vigas ensaiadas à torção pura. No total foram ensaiadas 11 vigas com diferentes configurações de reforço. Foram monitoradas a variação do carregamento, o ângulo de rotação e as deformações.

As vigas tinham seção transversal de 150mm x 350mm e 2440mm de comprimento. O cobrimento lateral era de 25mm e o superior e inferior de 35mm. A armadura longitudinal superior era composta por 2 ϕ 10mm, e a inferior de 2 ϕ 15mm, com exceção da viga N3 cuja armadura inferior era constituída de 2 ϕ 20mm. A armadura transversal foi construída com estribos com diâmetro de 6,3mm, com espaçamento variando para cada viga (Figura 5.1).

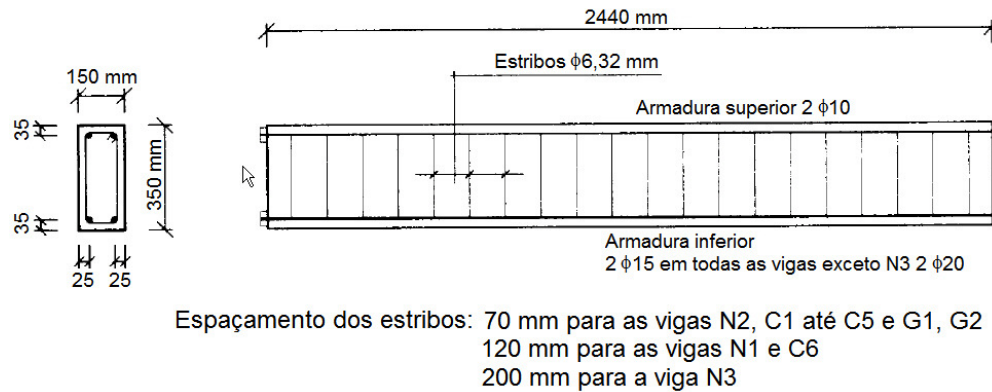


Figura 5.1 – Detalhe das vigas ensaiadas (Ghobarah *et al.*, 2002).

As vigas da série N tinham apenas armadura interna de aço. As vigas da série C tinham, além dessa armadura, uma armadura de reforço com fibras de carbono, e as da série G tinham armadura interna de aço e armadura de reforço com fibras de vidro. As configurações de reforço aplicado nas vigas são mostradas na Tabela 5.1 e na Figura 5.2.

Tabela 5.1 – Características das vigas ensaiadas (Ghobarah *et al.*, 2002).

Viga	Configurações do reforço	Armadura superior	Espaçamento dos estribos (mm)
N1	–	2 φ 15	120
N2	–	2 φ 15	70
N3	–	2 φ 20	200
C1	Envolvimento completo	2 φ 15	70
C2	5 estribos verticais de 100 mm com espaçamento de 100 mm	2 φ 15	70
C3	3 estribos verticais de 100 mm com inclinação de 45°, em um lados da viga	2 φ 15	70
C4	3 estribos verticais de 200 mm com espaçamento de 100 mm	2 φ 15	70
C5	4 estribos verticais de 100 mm com espaçamento de 150 mm	2 φ 15	70
C6	3 estribos verticais de 100 mm com inclinação de 45°, em forma de espiral em volta da viga	2 φ 15	120
G1	Envolvimento completo	2 φ 15	70
G2	5 estribos verticais de 100 mm com espaçamento de 100 mm	2 φ 15	70

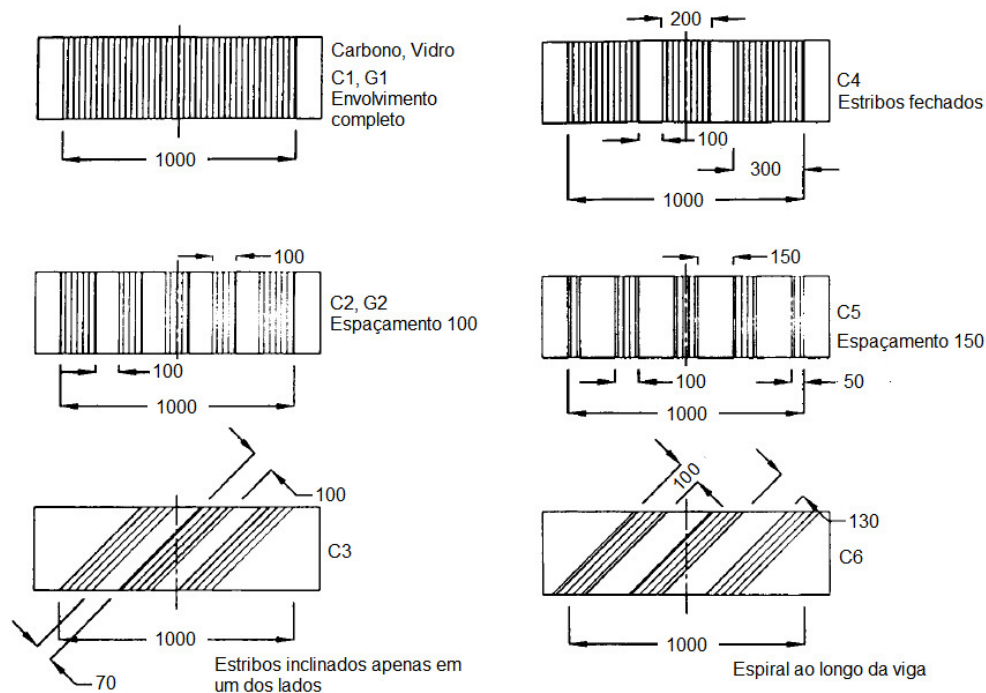


Figura 5.2 – Configuração de reforço (Ghobarah *et al.*, 2002).

Metodologia empregada

Para determinação da resistência à torção das vigas de referência, Ghobarah *et al.* (2002) utilizam a metodologia apresentada por Rahal (2000), que pressupõe que a relação entre o momento último à torção T_u e a máxima tensão de cisalhamento no concreto v_u é dada pela expressão 5.1:

$$T_u = 0,67 \left(\frac{A_c^2}{P_c} \right) v_u \quad (5.1)$$

onde

A_c – área bruta da seção transversal de concreto;

P_c – perímetro externo da seção de concreto.

A resistência do concreto ao cisalhamento é calculada como uma fração da resistência à compressão do concreto f'_c , considerando-se as taxas das armaduras transversal e longitudinal.

A relação entre v_u/f'_c é obtida por meio do ábaco ilustrado na Figura 5.3, sendo necessária a determinação dos parâmetros ω_ℓ e ω_t , dados pelas expressões 5.2 e 5.3:

$$\omega_\ell = \frac{\rho_\ell f_{y\ell}}{f'_c} \quad (5.2)$$

$$\omega_t = \frac{\rho_t f_{yt}}{f'_c} \quad (5.3)$$

sendo ρ_ℓ e ρ_t

$$\rho_\ell = \frac{A_\ell}{p_0 a_0} \quad (5.4)$$

$$\rho_t = \frac{A_t}{s a_0} \quad (5.5)$$

onde

ω_ℓ – taxa mecânica de armadura longitudinal;

ω_t – taxa mecânica de armadura transversal;

ρ_ℓ – taxa geométrica de armadura longitudinal;

ρ_t – taxa geométrica de armadura transversal;

s – espaçamento dos estribos;

A_ℓ – área total da armadura longitudinal;

A_t – área dos estribos ao longo do comprimento s ;

p_0 – perímetro da linha central do fluxo de cisalhamento;

a_0 – espessura do fluxo de cisalhamento;

$f_{y\ell}$ – tensão de escoamento do aço longitudinal;

f_{yt} – tensão de escoamento do aço transversal.

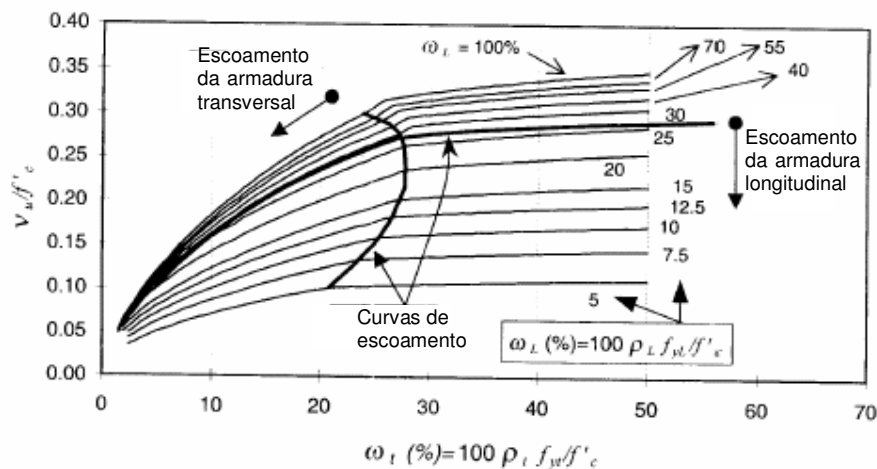


Figura 5.3 – Curvas normalizadas de resistência ao cisalhamento para painéis de concreto armado (Rahal, 2000).

O acréscimo de resistência devido ao reforço é a diferença entre o momento torçor último, obtido nos ensaios das vigas reforçadas com materiais compósitos e o torçor último das respectivas vigas de referência. Com esse acréscimo de resistência à torção determina-se a deformação específica na fibra por meio da seguinte expressão:

$$\varepsilon_f = \frac{T_f \left(\frac{A_f}{s} \right)^{-1}}{2A_c E_f} \quad (5.6)$$

onde

ε_f – deformação específica do reforço;

T_f – parcela do momento torçor resistido pelo reforço;

A_f – área do reforço;

s – comprimento ao longo da viga sobre o qual o reforço está distribuído;

E_f – módulo de elasticidade do material compósito.

No caso de envolvimento por espiral ou estribos a 45° , a deformação específica na direção das fibras é calculada por:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_f}{\cos 45^\circ} \quad (5.7)$$

A Tabela 5.2 apresenta de forma resumida os resultados dos ensaios e as deformações específicas experimentais e teóricas.

Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios e deformações teóricas (Ghobarah *et al.*, 2002).

Viga	Força de fissuração (kN)	Força de ruptura (kN)	Ângulo de rotação ($^\circ$)	Rotação máxima ($^\circ$)	$\varepsilon_f (\times 10^{-3})$	
					Exp.	Teórico
N1	8,04	19,45	4,63	13,66	–	–
N2	8,88	19,67	4,07	11,90	–	–
N3	9,96	19,02	9,16	14,57	–	–
C1	12,01	32,10	5,88	16,94	3,25	3,11
C2	9,88	24,93	6,34	13,30	3,17	2,63
C3	16,75	21,95	3,87	13,37	3,14	3,07
C4	11,74	28,27	5,02	13,47	2,61	2,64
C5	10,49	23,96	4,40	13,61	2,90	2,69
C6	–	30,05	6,47	13,30	6,34	6,13
G1	12,81	33,81	6,41	16,11	3,20	3,14
G2	11,23	23,48	4,76	12,46	2,79	2,96

Observa-se que as deformações específicas do reforço, com exceção da viga C6, não ultrapassam 0,35%. Desta forma, o momento torçor acrescido pelo reforço T_f , é estimado por meio da deformação específica média, que é de

aproximadamente 0,30%. A parcela do momento torçor resistido pelo reforço é dada por:

$$T_f = \frac{0,006 A_f A_c E_f}{s} \quad (5.8)$$

O momento torçor total resistido pela viga é dado por:

$$T = T_u + T_f \quad (5.9)$$

As principais conclusões deste trabalho foram:

- O completo envolvimento da zona de torção é muito mais efetivo no aumento da resistência à torção do que o reforço na forma de estribos, seja inclinado ou não. Quando a viga é reforçada usando-se estribos de compósitos de fibras, a ruptura é retardada, mas inevitavelmente ocorre nos espaços com ausência de reforço entre os estribos.
- O envolvimento com espirais inclinados a 45° é muito mais eficiente no aumento da resistência à torção das vigas de concreto armado do que os estribos. Isto se deve ao fato das fibras inclinadas estarem tracionadas durante a ruptura, enquanto o reforço vertical está submetido a forças que não estão ao longo da direção das fibras.
- Os estribos de materiais compósitos inclinados a 45° apenas em um lado da viga não é uma configuração de reforço eficiente, devido à descontinuidade no envolvimento do reforço. Para um reforço efetivo, este deve ser aplicado de forma a envolver completamente a seção, e ao longo de toda a viga em forma de espiral com inclinação de 45°. Conclui-se que a continuidade do reforço é importante para uma resistência à torção efetiva. Colando-se o reforço nos lados da viga, sem envolver as outras faces da mesma, não há aumento significativo na resistência à torção.
- Há uma pequena diferença no comportamento após a fissuração das vigas reforçadas usando-se envolvimento com estribos apenas com tramos verticais. Isto porque o reforço proporciona um pequeno confinamento devido a seção transversal ter geometria retangular. Ocorre uma fissuração significativa do concreto, causando o descolamento prematuro das camadas de compósitos, ocasionando a ruptura do concreto. A deformação específica média encontrada para o reforço com compósito de fibras de vidro ou fibras de carbono durante a ruptura do concreto foi de aproximadamente 0,30%. Esta observação levou à adoção da expressão 5.8 para calcular a contribuição do reforço

transversal com material compósito de fibras de vidro ou de fibras de carbono, para o aumento da capacidade resistente ao momento torçor da vigas de concreto armado.

5.2. Panchacharam e Belarbi (2002)

A pesquisa desenvolvida por Panchacharam e Belarbi (2002) estudou o comportamento e o desempenho de vigas de concreto armado reforçadas externamente com tecidos compósitos de fibras de do vidro (GFRP) sujeitas à torção pura. No total foram ensaiadas oito vigas de concreto armado, sendo uma viga de referência e sete vigas com diferentes configurações de reforço.

As variáveis consideradas neste estudo experimental incluem a orientação das fibras, o número de faces reforçadas (três ou quatro), o efeito do número de faces reforçadas, e a influência da ancoragem dos estribos em forma de **U**.

Modelo analítico empregado

O aumento no momento torçor de fissuração das vigas reforçadas foi calculado como vigas de concreto armado submetidas à protensão. A deformação específica do reforço varia gradualmente devido à tensão de tração na superfície da viga. Durante a variação gradual da deformação específica no reforço, a protensão efetiva foi determinada considerando-se a deformação específica média do reforço no instante da fissuração, por meio da expressão 5.10. O cálculo da deformação específica do reforço foi obtido por meio do círculo de Mohr, logo:

$$PE = \frac{\varepsilon_f E_f}{2} \quad (5.10)$$

onde

PE – protensão efetiva;

ε_f – deformação específica do reforço;

E_f – módulo de elasticidade do reforço.

O momento de fissuração é determinado usando-se a protensão efetiva dada pela seguinte expressão:

$$T_{cr} = c_1 b^2 h f_t \sqrt{1 + \frac{PE}{f_t}} \quad (5.11)$$

onde

c_1 – constante de Saint Venant (baseada em teorias elásticas);

h – altura da viga;

b – base da viga;

f_t – resistência à tração do concreto.

O momento de ruptura obtido considera a orientação das fibras e o modo de ruptura. Quando a ruína da viga for controlada pela ruptura das fibras, e se essas são orientadas na direção de 90°, a contribuição do reforço é determinada usando-se a deformação específica desse reforço.

A deformação específica efetiva no reforço é determinada usando-se as equações empíricas propostas pela FIB (2001). Se a ruptura do reforço não governar o modo de ruína da viga, deve-se utilizar um modelo baseado no comprimento de aderência efetiva para o cálculo do momento torçor último da viga. Quando as fibras são orientadas na direção de 0°, o torçor último é pouco superior ao momento torçor de fissuração.

Para envolvimento completo e estribos tem-se:

$$T_{u,frp} = 2\varepsilon_{ke,f} E_f \frac{t_f b_f}{s_f} b h \cotg \alpha \quad (5.12)$$

Para estribos em **U** com ancoragem:

$$T_{u,frp} = \varepsilon_{ke,f} E_f \frac{t_f b_f}{s_f} b h \cotg \alpha \quad (5.13)$$

onde

$\varepsilon_{ke,f}$ – deformação específica efetiva característica do compósito de fibras;

E_f – módulo de elasticidade do reforço na direção das fibras;

t_f – espessura do reforço;

s_f – espaçamento do reforço;

b_f – largura do reforço;

α – ângulo da fissura o qual assume-se 45°.

O cálculo da resistência última à torção das vigas de concreto armado recomendado pelo ACI 318-99 (1999) é dado por:

$$T_{u,RC} = \frac{2A_0 A_t f_{yv}}{s} \cotg \alpha \quad (5.14)$$

onde

A_0 – área da seção transversal limitada pela linha central do fluxo de tensões tangenciais;

A_t – área da armadura transversal (estribos);

f_{yv} – tensão de escoamento da armadura transversal;

s – espaçamento dos estribos

α – inclinação da fissura.

A resistência última à torção das vigas reforçadas com material compósito de fibras foi obtida por meio da seguinte forma aditiva:

$$T_u = T_{u,RC} + T_{u,frp} \quad (5.15)$$

onde

$T_{u,RC}$ – torção resistido pela viga de concreto armado;

$T_{u,frp}$ – torção resistido pelo reforço.

Programa experimental

As vigas ensaiadas tinham comprimento total de 3960 mm e seção transversal quadrada com lado de 279,4 mm. O cobrimento da armadura era de aproximadamente 50 mm.

A armadura longitudinal era composta por 4 ϕ 12,7 mm e por 4 ϕ 9,53 mm. Os estribos eram de barras com diâmetro de 9,53 mm e o seu espaçamento dependia da zona da viga. Nas regiões dos apoios os estribos tinham espaçamento de 38,1 mm, e na região central o espaçamento era de 152,4 mm (Figura 5.4).

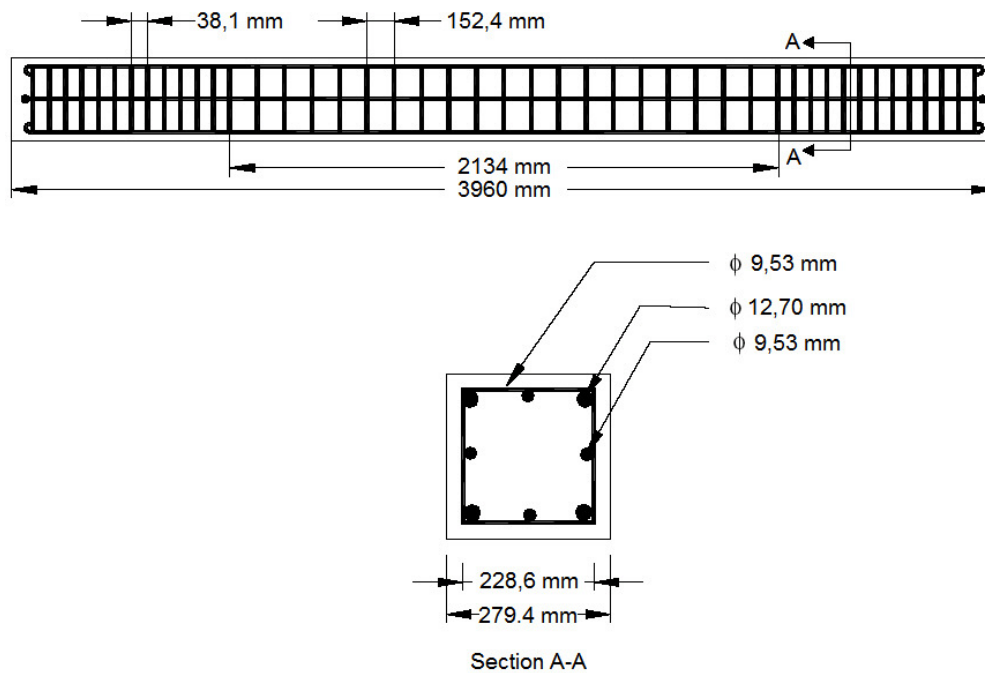


Figura 5.4 – Detalhamento das vigas ensaiadas por Panchacharam e Belarbi (2002).

Para cada viga adotou-se uma configuração de reforço que variava de acordo com a orientação das fibras, tipo de envolvimento, número de faces reforçadas, etc. (Figura 5.5).

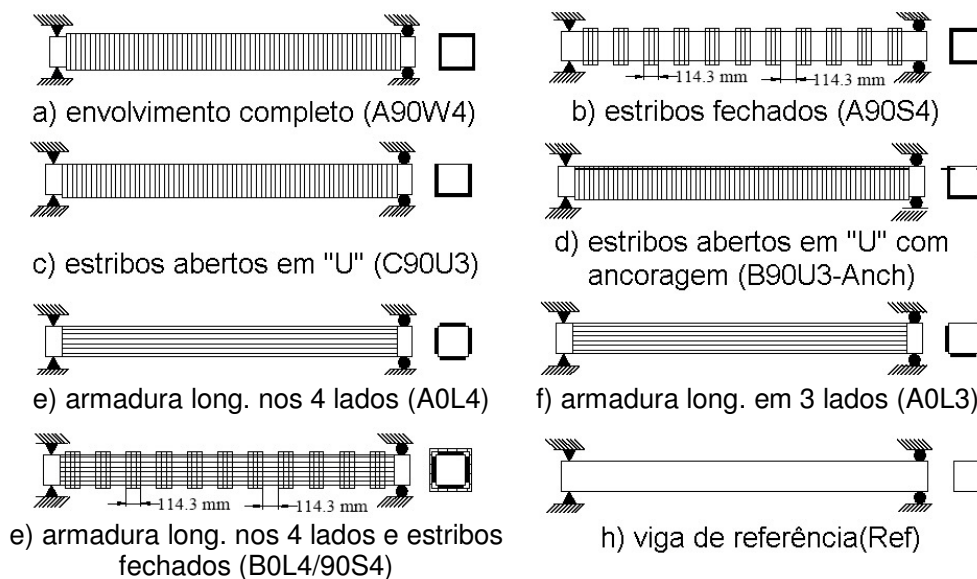


Figura 5.5 – Representação esquemática das configurações do reforço aplicado (Panchacharam e Belarbi, 2002).

Os resultados obtidos para os momentos torçores de fissuração e de ruptura, usando-se o modelo analítico descrito anteriormente, são apresentados e comparados com os resultados experimentais na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resultado dos ensaios de Panchacharam e Belarbi (2002).

Viga	Momento de fissuração (kNm)			Momento de ruptura (kNm)		
	Exp.	An.	Ex/An.	Exp.	An.	Ex/An
A90W4	17,1	15,7	1,09	18,2	16,9	1,07
A90S4	22,9	20,8	1,10	47,1	45,4	1,04
A0L4	22,1	17,7	1,25	36	36,4	0,99
A0L3	27,0	29,9	0,90	30,7	29,9	1,03
B0L4 / 90S4	26,3	28,8	0,91	27,8	28,8	0,97
B90U3* – Anch	20,1	24,4	0,82	32,6	35,9	0,91
C90U3	22,0	18,2	1,20	26,3	28,1	0,94
Ref	20,6	19,1	1,08	24,6	26,4	0,93
Média			1,04			0,98
C. Var.			0,14			0,06

As principais conclusões deste estudo foram:

- As vigas de concreto armado reforçadas à torção com tecidos compósitos de fibras de vidro apresentaram um aumento significativo no momento torçor de fissuração e no momento torçor de ruptura, assim como nas deformações angulares últimas.
- As vigas reforçadas com envolvimento completo e com orientação das fibras a 90° em relação ao eixo da viga tiveram um confinamento efetivo, que resultou num aumento superior a 150 % na resistência última à torção.
- Observou-se um aumento substancial na resistência à fissuração quando as vigas são reforçadas com as fibras orientadas na sua direção longitudinal, onde o compósito de fibra de vidro promove forças de protensão passivas.
- O reforço com compósitos de fibras de vidro na direção longitudinal da viga, em três ou quatro faces da seção transversal, promove comportamento similar.
- O reforço com estribos em forma de **U** leva a uma menor capacidade de rotação, devido ao descolamento do compósito de fibras de vidro ao longo dos lados da viga.

- A combinação de reforço com fibras na direção longitudinal da viga com estribos de envolvimento completo resulta no aumento da resistência última, da capacidade de rotação pós-fissuração e da ductilidade da viga.
- As expressões propostas para o cálculo do momento torçor de fissuração e do momento torçor de ruptura, fornecem resultados muito próximos aos resultados experimentais obtidos.

5.3. Täljsten (2003)

A pesquisa desenvolvida por Täljsten (2003) apresenta os resultados de ensaios realizados em cinco vigas de concreto submetidas à torção. Dessas cinco vigas ensaiadas uma era de referência, uma reforçada com compósitos de fibras de vidro, e três com diferentes configurações de reforço com compósitos de fibras de carbono. Neste trabalho também é mostrada uma metodologia para o dimensionamento de reforço de FRP à torção em vigas de concreto armado.

Metodologia de análise

Para o desenvolvimento das equações é necessária a consideração das seguintes hipóteses:

- O material compósito tem resistência apenas no sentido das fibras.
- Supõe-se que o ângulo das fissuras é de 45° , e que as tensões de tração principais são perpendiculares ao plano de fissuração.

Considera-se a possibilidade de dois tipos de reforço: com estribos ou envolvimento completo.

Formulando-se o equilíbrio das forças verticais atuantes em uma viga de concreto armado reforçada com material compósito (Figura 5.6) tem-se:

$$V + qh - F_f \frac{h \cotg \alpha + h \cotg \beta}{s_f} \text{sen} \beta = 0 \quad (5.16)$$

segundo-se

$$\frac{F_t}{s_f} = q \frac{1}{(\cotg \alpha + \cotg \beta) \text{sen} \beta} + \frac{V}{h} \frac{1}{(\cotg \alpha + \cotg \beta) \text{sen} \beta} \quad (5.17)$$

No caso de torção pura tem-se:

$$\frac{F_t}{s_f} = \frac{\sigma_{f,e} A_f}{s_f} = q \frac{1}{(\cotg \alpha + \cotg \beta) \text{sen} \beta} \quad (5.18)$$

Com a 1ª fórmula de Bredt tem-se:

$$q = \frac{T}{2bh} \quad (5.19)$$

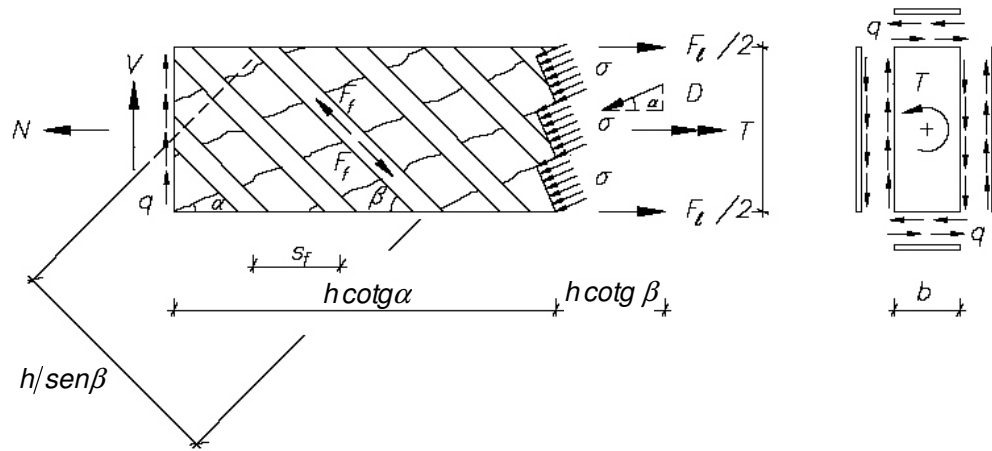


Figura 5.6 – Reforço por meio de estribos inclinados (Täljsten, 2003).

Substituindo-se a expressão 5.19 na expressão 5.18, considerando-se $\alpha = 45^\circ$ e sendo:

$$A_f = 2t_f b_f \quad (5.20)$$

tem-se

$$\sigma_{f,e} = \sigma_f \cos^2(\theta) = \varepsilon_f E_f \cos^2(\theta) \quad (5.21)$$

$$\theta = \alpha + \beta - 90^\circ \quad (5.22)$$

onde

$$45^\circ < \beta < 90^\circ;$$

V – força cortante;

q – fluxo de tensões tangenciais;

b – base da viga;

h – altura da viga;

F_f – força nas fibras;

α – ângulo da fissura;

β – ângulo do reforço;

s_f – espaçamentos dos estribos de reforço.

$\sigma_{f,e}$ – tensão efetiva no reforço;

A_f – área de reforço;

t_f – espessura do reforço;

b_f – largura do reforço.

ε_f – deformação específica das fibras.

Reescrevendo-se a expressão 5.18:

$$\frac{2t_f b_f \varepsilon_f E_f}{s_f} = \frac{T}{2bh} \frac{1}{[\cotg \alpha + \cotg \beta] \text{sen} \beta} \quad (5.23)$$

Como a distribuição de tensões não é uniforme ao longo da seção transversal, a deformação específica última deve ser multiplicada por um fator redutor igual a 0,6 . Reescrevendo-se a expressão 5.23, tem-se:

$$\frac{1,2t_f b_f \varepsilon_{fu} E_f}{s_f} = \frac{T}{2bh} \frac{1}{[\cotg \alpha + \cotg \beta] \text{sen} \beta} \quad (5.24)$$

Estudo experimental

A Figura 5.7 mostra os detalhes das vigas ensaiadas, com seção transversal de 150 mm×600 mm e comprimento total de 6000 mm , que foram armadas com 8φ 12mm como armadura longitudinal e estribos de 8mm cada 50mm . Esses estribos foram posicionados apenas nas regiões de introdução de carga, ou seja, apenas nas extremidades das vigas cobrindo um trecho de 1000 mm . O concreto utilizado na fabricação das vigas apresentou resistência média à compressão de 72,1 MPa e resistência média à tração de 4,5 MPa . Os ensaios foram realizados em corpos-de-prova cúbicos. O material compósito com fibras de vidro apresentou módulo de elasticidade de 20 GPa e deformação específica máxima de 1,6% . O compósito com fibras de carbono apresentou módulo de elasticidade de 65 GPa , e deformação específica máxima de 2,5% .

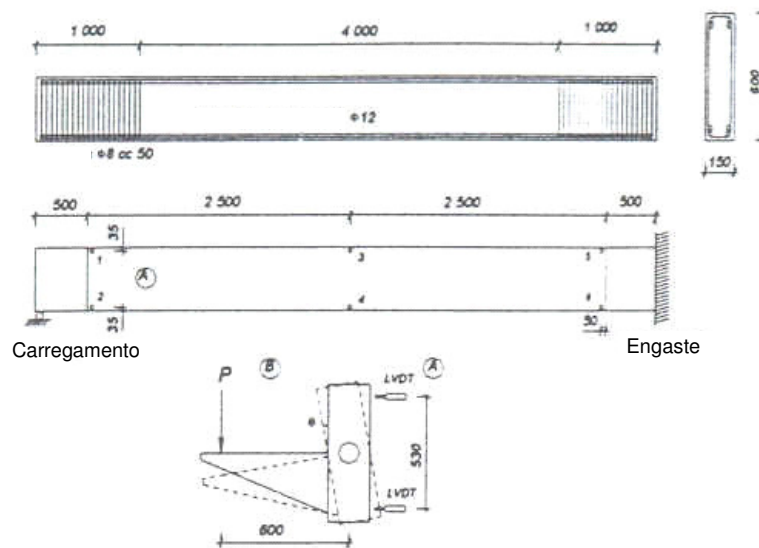


Figura 5.7 – Detalhamento das vigas ensaiadas por Täljsten (2003).

A Figura 5.8 ilustra as cinco vigas ensaiadas com suas respectivas curvas $T \times \theta$. Mostra também o tipo de material e configuração de reforço adotados, com exceção da viga de referência.

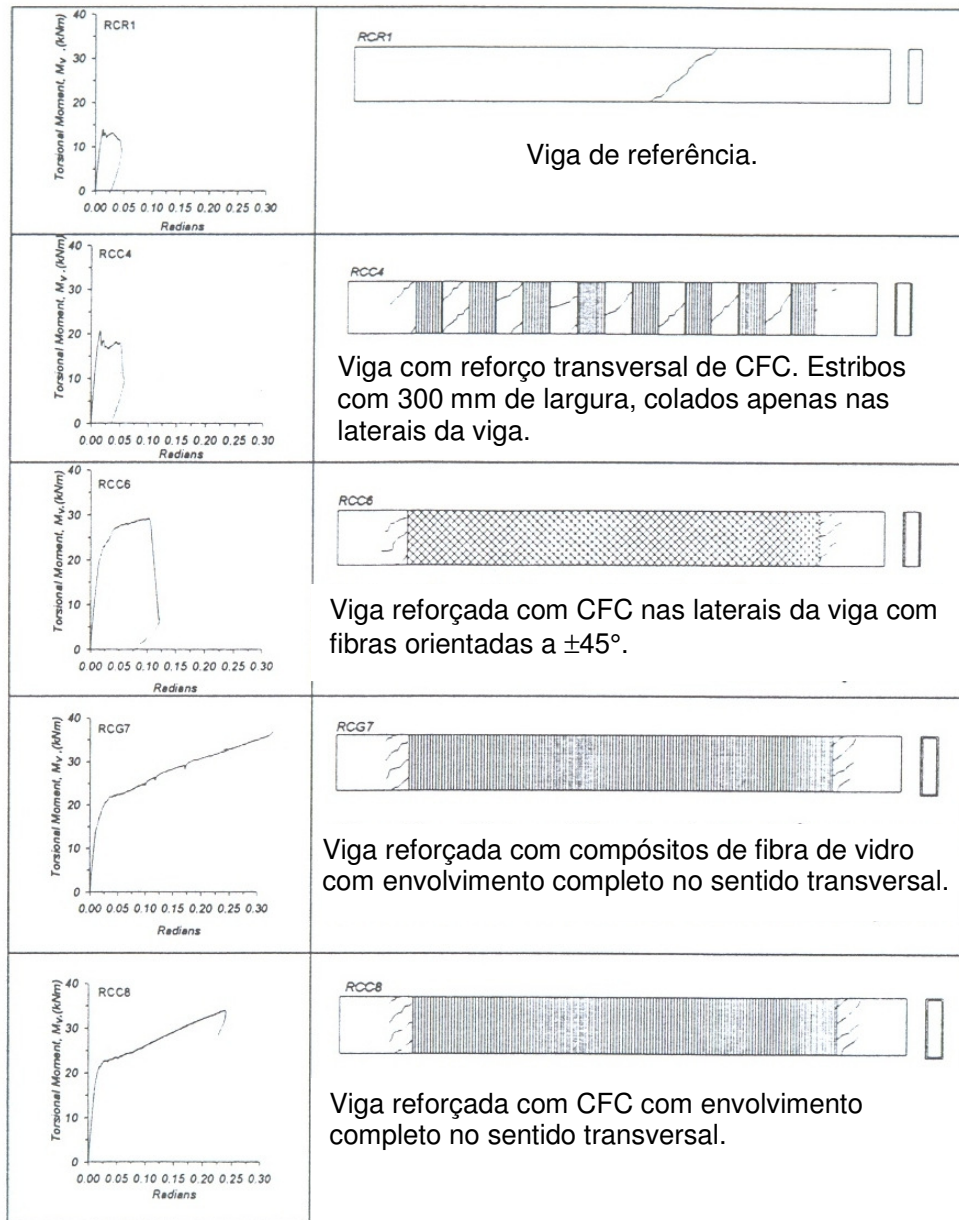


Figura 5.8 – Curvas $T \times \theta$ e configurações de reforço adotadas por Täljsten (2003).

O comparação entre os resultados experimentais e teóricos são apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Resultados experimentais e teóricos (Täljsten, 2003).

Viga	T_{max} (kNm)	θ_{max} (rad)	$\frac{T_{max}}{T_{ref}}$	T_c (kNm)	$\frac{T_{max}}{T_c + T_{ref}}$
RCR1	14,2	0,05	1,0	–	–
RCC4	20,8	0,06	1,5	3,5	1,2
RCC6	29,2	0,12	2,1	6,8	1,4
RCG7	>38,4	>0,33	>2,7	13,0	1,4
RCC8	>34,1	>0,24	>2,4	13,5	1,2

Os resultados dos ensaios mostraram que é possível reforçar vigas à torção. As equações de projeto são de fácil utilização, porém, o modelo teórico apresentado subestima a contribuição proveniente do material compósito.

5.4. Salom *et al.* (2004a, b)

A pesquisa conduzida por Salom *et al.* (2004a, b) teve como enfoque principal a análise de vigas localizadas no perímetro das estruturas, ou seja, vigas de extremidade. Estas vigas devido a sua disposição e concepção estrutural, podem ter suas solicitações dependentes das solicitações de vigas e lajes que nela se apóiam, surgindo um momento torçor de compatibilidade. No total foram ensaiadas seis vigas, sendo duas de referência e quatro com diferentes disposições de reforço com lâminas de fibras de carbono. As variáveis consideradas neste estudo foram a orientação das fibras, o uso de lâminas compósitas, e os efeitos do sistema de ancoragem dessas lâminas.

Modelo analítico empregado

Neste trabalho também foi adotada a metodologia do ACI 318-99 (1999) para o cálculo do momento torçor nominal, dado pela expressão 5.14.

Para o cálculo da resistência nas vigas reforçadas assumiu-se que o reforço foi aplicado ao longo de todo o perímetro da viga, por meio de estribos fechados. Combinando-se a expressão 5.14 com a expressão do ACI 440-01 (2001), usada para estimar a resistência à força cortante de vigas reforçadas com material compósito tem-se:

$$T_f = \frac{2A_0 A_f f_{fe}}{s} (\cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha) \quad (5.25)$$

sendo

$$A_f = n w_f t_f \quad (5.26)$$

onde

T_f – resistência à torção proveniente do reforço;

A_0 – área bruta da seção transversal;

A_f – área do reforço;

f_{fe} – resistência à tração do material compósito;

s – espaçamento dos estribos de reforço;

n – número de camadas de reforço;

w_f – largura dos estribos;

t_f – espessura do reforço aplicado;

α – ângulo entre a orientação das fibras e o eixo longitudinal da viga.

A resistência à tração do material compósito é dada por:

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f \quad (5.27)$$

onde:

ε_{fe} – deformação específica efetiva do reforço;

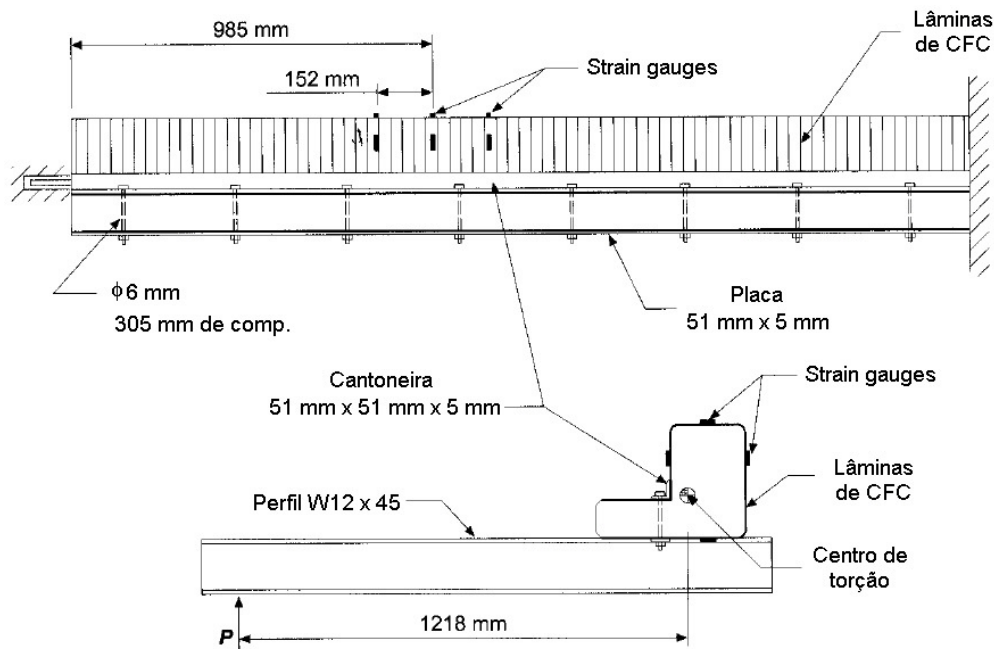
E_f – módulo de elasticidade do reforço.

Substituindo-se a expressão 5.27 na expressão 5.26, e isolando-se o termo ε_{fe} , tem-se para a deformação específica do reforço:

$$\varepsilon_{fe} = \frac{T_f s}{2A_0 A_f E_f (\cos \alpha + \operatorname{sen} \alpha)} \quad (5.28)$$

Programa Experimental

As seis vigas tinham as mesmas dimensões e armaduras internas. O comprimento das vigas era de 2438mm, e sua seção transversal era em **L**. A mesa tinha dimensões de 102mm × 203mm. As vigas foram armadas com 6φ16mm e 2φ13mm no sentido longitudinal, localizadas ao longo do perímetro das vigas. Os estribos eram constituídos de φ13mm de diâmetro com espaçamento de 152mm. Foram adicionados ganchos com φ13mm localizados nas mesas das vigas, representando a armadura negativa relativa à conexão da laje-viga. A Figura 5.9 apresenta o detalhamento do esquema de ensaio e instrumentação das vigas. Os resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 5.5.

Figura 5.9 – Detalhamento das vigas ensaiadas (Salom *et al.*, 2004).Tabela 5.5 – Resultados experimentais e analíticos (Salom *et al.*, 2004).

Viga	Orient. das fibras	Ancor.	Torçor Máximo	Incremento Torçor		Deformação específica nas fibras	
				<i>kNm</i>	(%)	Exp.	An.
TB1	Ref.	–	20,3	–	–	–	–
TB2	[0 / 90]	não	33,0	8,6	35	0,12 – 0,14	0,12
TB3	[± 45]	sim	43,4	19,0	77	0,18 – 0,28	0,18
TB4	[0 / 90]	sim	37,3	12,9	53	0,12 – 0,13	0,17
TB5	[90]	sim	35,7	11,3	46	0,14 – 0,23	0,15
TB6	Ref.	–	24,4	–	–	–	–

Conclusões

- a resistência à torção das vigas reforçadas apresentou aumento de até 77% quando comparadas com as vigas de referência. Contudo, mais experimentos e um desenvolvimento analítico mais apurado são necessários. Os resultados provam que o material compósito aumenta a resistência à torção de vigas de concreto armado;
- a adição de ancoragem aumenta a contribuição do reforço na resistência a torção da viga em 50%. Este aumento deve-se ao fluxo de tensões tangenciais na ancoragem, que também retarda o descolamento do compósito;
- as vigas com ancoragem das lâminas de reforço à 45° foram as mais eficientes;

É necessário reconhecer a limitação destes resultados, por não considerarem a influência do número de camadas de reforço, tipos de fibras, tipo e geometria do sistema de ancoragem, e o fator de escala das vigas ensaiadas.

5.5. Ameli *et al.* (2005)

Ameli *et al.* (2005) apresentam um programa experimental composto pelo ensaio de doze vigas de concreto armado solicitadas à torção reforçadas com compósitos de fibras de carbono e compósitos de fibras de vidro, usando diferentes configurações de reforço. Nessa pesquisa foram estudados os modos de ruptura e o aumento de resistência à torção devido ao reforço, e foram comparadas as vantagens e desvantagens entre os dois tipos de reforços utilizados.

O programa experimental foi composto por doze vigas de concreto armado com seção transversal de 150 mm x 350 mm e 1900 mm de comprimento, sendo duas vigas de referência, cinco vigas reforçadas com compósitos de fibras de carbono e cinco vigas reforçadas com compósitos de fibras de vidro. As diferentes configurações de reforço utilizadas são mostradas na Figura 5.10. A armadura de aço longitudinal foi composta por quatro barras de N16 e estribos de R6 com espaçamento de 80 mm. A resistência à compressão do concreto aos 28 dias foi de 39 MPa para as vigas reforçadas com CFC e de 36 MPa para as vigas reforçadas com compósitos de fibra de vidro. As propriedades das fibras utilizadas são apresentadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Propriedades das fibras (Ameli *et al.*, 2005).

Fibra	Espessura (mm)	E_f (MPa)	f_{fu} (MPa)
CF130	0,165	240000	3900
EG900	0,154	73000	3400

As vigas foram solicitadas à torção pura e o carregamento foi aplicado por meio de dois macacos hidráulico, com capacidade de carga de 100 kN cada, localizados na extremidade livre da viga, a 500 mm do seu eixo.

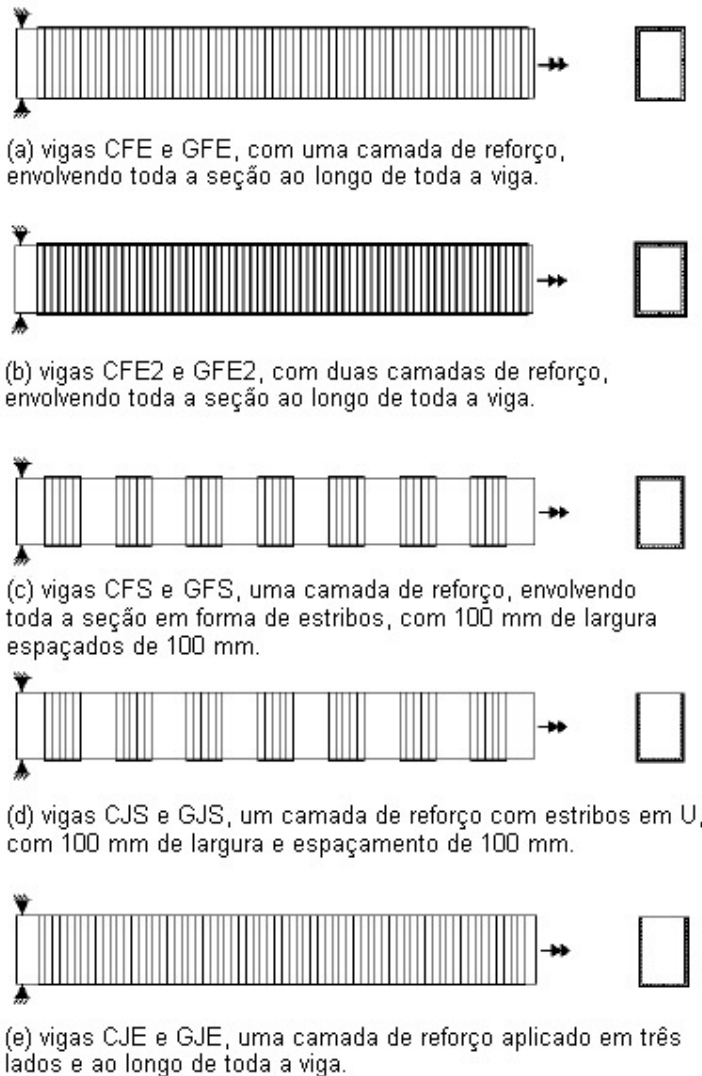


Figura 5.10 – Configurações de reforço (Ameli *et al.*, 2005).

A Tabela 5.7 apresenta os momentos torçores de ruptura das vigas ensaiadas e o aumento de resistência em relação a viga de referência.

Para o cálculo do momento torçor de ruptura das vigas de referência foram empregadas a metodologia proposta pela AS3600-2001 *apud* Ameli *et al.* (2005) e a teoria do campo de compressão diagonal (Mitchell e Collins, 1974 e Collins e Mitchell, 1980). Para o cálculo do acréscimo de resistência à torção promovido pelo reforço foi utilizada a formulação proposta pelo Bulletin 14 da FIB.

Os valores dos momentos torçores de ruptura teóricos são mostrados na Tabela 5.8.

Tabela 5.7 – Resultados experimentais (Ameli *et al.*, 2005).

Viga	$T_{u,Exp}$	(%)	Viga	$T_{u,Exp}$	(%)
RC	15	–	RG	14,8	–
CFE	28	87	GFE	26,3	78
CFE2	36,5	143	GFE2	31,1	110
CJE	20	33	GJE	19,5	32
CFS	21,7	45	GFS	19,9	34
CJS	17,4	16	GJS	16,9	14

Tabela 5.8 – Momento torçor de ruptura teórico (Ameli *et al.*, 2005).

Viga	T_u	$\Delta T, FRP$	$T_{Teó,1}$	$T_{Teó,2}$	$\frac{T_{Teó,1}}{T_u}$ (%)	$\frac{T_{Teó,2}}{T_u}$ (%)
RC	15	–	4,9	16,4	67	9
CFE	28	17,1	22,0	33,5	22	19
CFE2	36,5	27,4	32,3	43,9	11	20
CJE	20	4,6	9,5	21,0	53	5
CFS	21,7	10,4	15,3	27,0	29	24
CJS	17,4	3,4	8,3	19,8	52	14
RG	14,8	–	4,9	15,8	67	7
GFE	26,3	7,1	12,0	22,9	54	14
GFE2	31,1	14,2	19,1	30,0	39	4
GJE	19,5	2,6	7,5	18,4	62	6
GFS	19,9	3,5	8,4	19,3	58	3
GJS	16,9	1,8	6,7	17,6	61	4

Para as diferentes configurações de reforço o aumento da resistência à torção das vigas variou de 16% a 143% para as vigas reforçadas com compósitos de fibras de carbono, e 14% a 110% para as vigas reforçadas com compósitos de fibras de vidro.

O maior aumento da resistência à torção ocorreu nas vigas totalmente envolvidas com duas camadas de reforço, e o menor aumento foi nas vigas reforçadas com estribos em U;

Os dois métodos analíticos empregados para avaliar a contribuição do reforço na resistência à torção das vigas mostraram resultados muito diferentes

entre eles, sendo que o método da teoria do campo de compressão diagonal apresentou resultados mais próximos dos resultados experimentais;

Dois tipos de ruptura foram observados: o descolamento do reforço e o a ruptura do reforço.

5.6. Hii e Al-Mahaidi (2006a)

O estudo de Hii e Al-Mahaidi (2006a) é composto por um programa experimental de vigas de concreto armado de seção cheia e vazada reforçadas com compósitos de fibras de carbono solicitadas à torção, complementado por uma análise numérica por meio do método dos elementos finitos.

Foram ensaiadas seis vigas de concreto armado com seção transversal de $500\text{ mm} \times 350\text{ mm}$ e 2500 mm de comprimento. Duas vigas tinham seção maciça, sendo que uma era de referência e a outra foi reforçada com compósitos de fibras de carbono. As outras quatro vigas tinham seção vazada, sendo uma viga de referência e três vigas reforçadas com compósitos de fibras de carbono.

As armaduras de aço longitudinal e transversal e as outras características das vigas são mostradas na Figura 5.11.

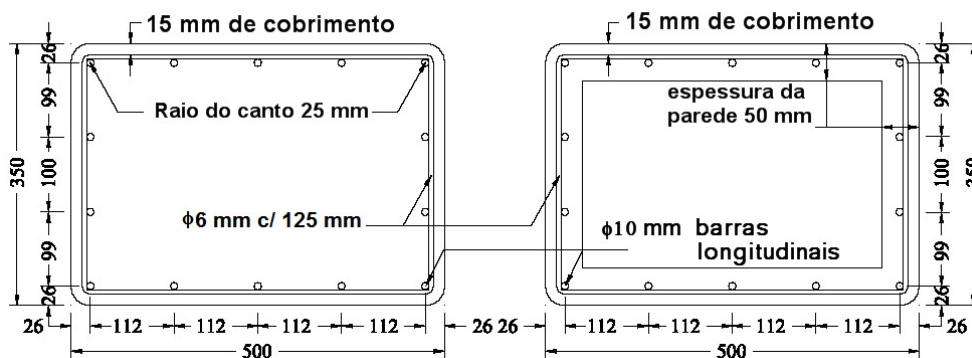


Figura 5.11 – Características geométricas e armaduras de aço (Hii e Al-Mahaidi, 2006).

As Tabelas 5.9, 5.10 e 5.11 apresentam as configurações do reforço adotado, as propriedades das armaduras de aço e as propriedades do compósito de fibras de carbono utilizados na pesquisa.

Tabela 5.9 – Configurações de reforço (Hii e Al-Mahaidi, 2006).

Viga	Esquema de reforço			f_c (MPa)
	Tipo seção	Nº. camadas	Espaçamento	
CS1	Referência seção maciça	–	–	52,5
FS050D2	Estribos seção maciça	2	0,50D	56,4
CH1	Referência seção vazada	–	–	48,9
FH075D1	Estribos seção vazada	1	0,75D	48,9
FH050D1	Estribos seção vazada	1	0,50D	56,4
FH050D2	Estribos seção vazada	2	0,50D	52,8

Tabela 5.10 – Propriedades das armaduras de aço (Hii e Al-Mahaidi, 2006).

Propriedades do aço	Estribos	Arm. longitudinal
	$\phi 6 \text{ mm}$	$\phi 10 \text{ mm}$
Área, A_s (mm^2)	28,27	78,54
Módulo de Elasticidade E_s (GPa)	213	207
Tensão de escoamento f'_y (MPa)	426,5	398,2
Coefficiente de Poisson ν	0,3	0,3

Tabela 5.11 – Propriedades do compósito de fibras de carbono (Hii e Al-Mahaidi, 2006).

MBrace CF 130 (S&P C-sheet 240)	
Fibra	Carbono alta resistência
Densidade (g/cm^3)	1,7
Módulo de Elasticidade, E_f (GPa)	240
Peso (g/m^2)	426,5
Espessura (mm)	0,176
Tensão de ruptura (MPa)	3800
Deformação específica última (%)	1,55

O momento torçor foi aplicado por meio de um macaco hidráulico com capacidade de carga de 25 kN, posicionado sobre um braço fixado na viga, distante de 1,8 m do centro de torção (Figura 5.12).



Figura 5.12 – Configuração inicial da viga (Hii e Al-Mahaidi, 2006).

A Figura 5.13 mostra uma viga ensaiada e a Tabela 5.12 e a Figura 5.14 apresentam os resultados experimentais obtidos.

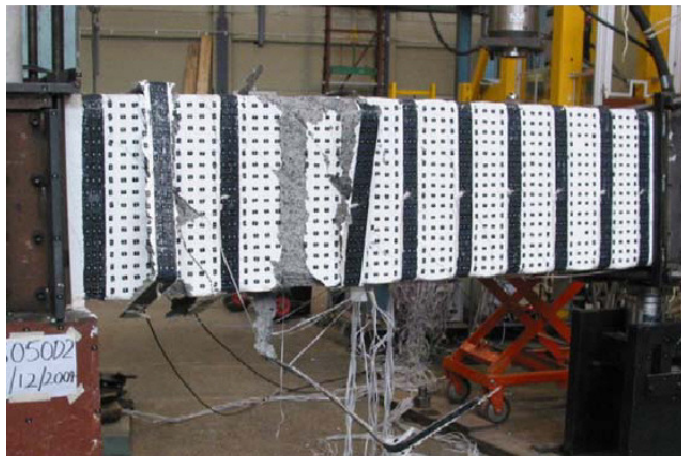


Figura 5.13 – Configurações do reforço (Hii e Al-Mahaidi, 2006).

Tabela 5.12 – Propriedades do compósito de fibras de carbono (Hii e Al-Mahaidi, 2006).

Viga	T_{cr} (kNm)	ϕ_{cr} (°)	T_u (kNm)	ϕ_u (°)
CS1	68,4	0,15	62,9	1,79
FS050D2	73,7 (7,7%)	0,16	93,8 (49,2%)	7,54
CH1	15,8	0,03	49,4	5,29
FH075D1	19,6	0,00	67,5 (36,7%)	4,60
FH050D1	21,3	0,04	78,4 (51,5%)	5,43
FH050D2	22,2	0,02	87,7 (77,6%)	5,52

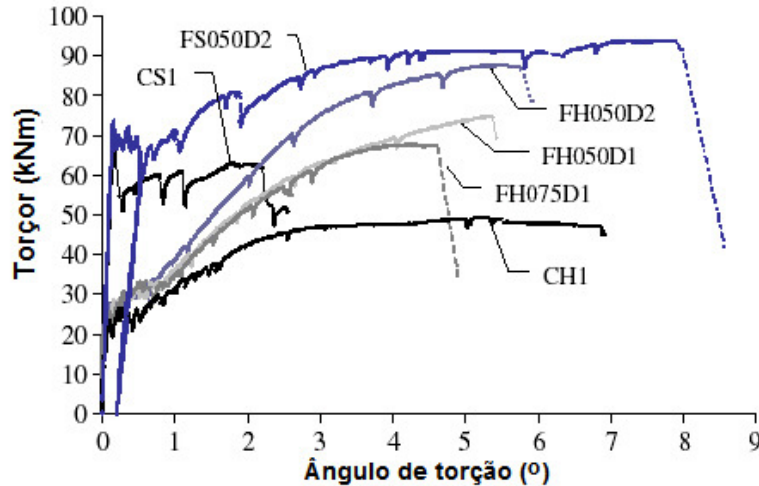


Figura 5.14 – Curvas experimentais momento torção x ângulo de rotação por unidade de comprimento (Hii e Al-Mahaidi, 2006).

A Figura 5.15 apresenta a comparação entre as curvas experimentais e numérica da variação momento torção *versus* ângulo de torção por unidade de comprimento, As curva teórica forma obtidas por meio de modelagem com método dos elementos finitos.

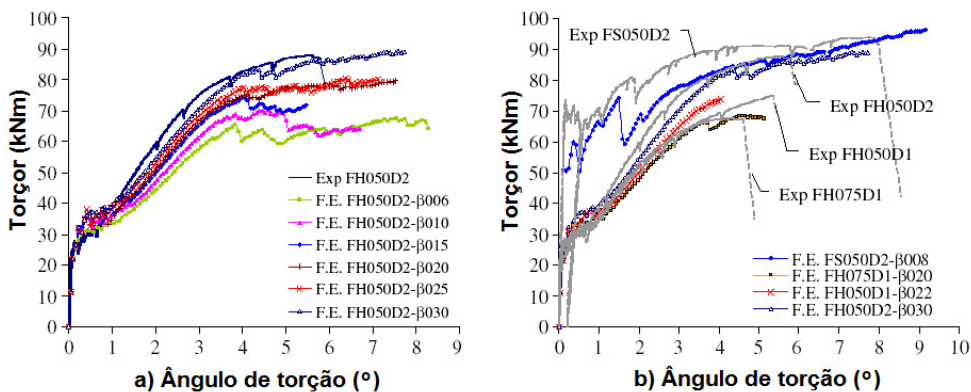


Figura 5.15 – Comparação entre curvas experimentais e numéricas (Hii e Al-Mahaidi, 2006).

Com o programa experimental comprovou-se a viabilidade da utilização de compósitos de fibras de carbono para aumentar a resistência à torção de vigas de concreto armado com seção retangular maciça e vazada.

Verificou-se um aumento no momento torção de fissuração e de ruptura superior a 40% e 78%, respectivamente, quando comparadas com as vigas de referência.

As medidas efetuadas comprovaram que a distribuição de tensão é não-uniforme entre e através dos estribos de compósitos de fibras de carbono;

A análise numérica com método dos elementos finitos não-lineares apresentou boa concordância com os resultados experimentais para o comportamento da curva momento torçor *versus* ângulo de torção por unidade de comprimento, do aço, do CFC e para o padrão de fissuração obtido.

5.7.

Hii e Al-Mahaidi (2006b)

Este estudo dá continuidade ao trabalho de Hii e Al-Mahaidi (2006a) descrito anteriormente. Em Hii e Al-Mahaidi (2006b) foi utilizada a fotogrametria para medir as distorções causadas pelo momento torçor atuante nas vigas. Essas medições são difíceis de serem realizadas devido aos deslocamentos tridimensionais e deformações fora do plano devido ao empenamento da seção.

A fotogrametria também tem sido utilizada para estudar o engrenamento dos agregados em vigas de concreto armado.

Foram marcados aproximadamente três mil pontos refletivos posicionados nas superfícies de concreto e nas faixas de reforço (Figura 5.12 e 5.13). Ao se fotografar diferentes posições da viga os dados podem ser automaticamente processados num computador para se obter a posição precisa de cada ponto refletivo. Durante a realização de cada ensaio foram feitas pausas para que novas fotografias fossem tiradas.

O uso da fotogrametria mostrou de forma conclusiva que o mecanismo básico de deformação de vigas reforçadas permanecem inalteradas quando comparadas com as vigas de referência.

Verifica-se que o reforço de vigas de concreto armado solicitadas à torção reforçadas externamente com compósitos de fibras de carbono limita efetivamente a abertura das fissuras. Isto propicia indiretamente uma melhor contribuição do concreto na resistência à torção devido a ação mais significativa do engrenamento dos agregados.

5.8. Hii e Al-Mahaidi (2006c, 2007)

Nestes trabalhos os autores reuniram os resultados experimentais de vigas de concreto armado solicitadas à torção reforçadas com compósitos de fibras de carbono e comparando-os os resultados obtido usando-se modelos teóricos encontrados na literatura.

No gráfico da Figura 5.16a verifica-se que a contribuição teórica do CFC na resistência à torção da viga foi calcula pela expressão 5.12 do Bulletin 14 da FIB. Os valores calculados foram conservativos, em média 52% maiores do que os experimentais.

Para o cálculo mais eficaz da contribuição do CFC na resistência à torção das vigas, a área de concreto utilizada na expressão 5.12 foi substituída pela área do polígono limitado pelo centro das barras de aço longitudinais localizadas nas quinas da seção transversal. Dessa forma a expressão ficou consistente com as prescrições da AS3600 *apud* Hii e Al-Mahaidi (2006c, 2007). Com essa modificação os valores teóricos calculados ficaram mais conservadores, mantendo uma razão média de 1,07 entre os valores experimentais e teóricos, ficando a favor da segurança (Figura 5.16b).

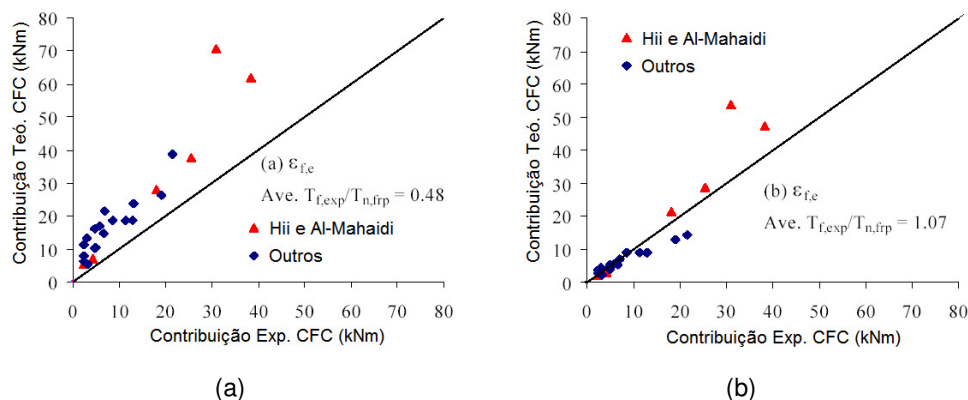


Figura 5.16 – Contribuição do CFC na resistência à torção: a) Bulletin 14 da FIB; b) modificação para a AS3600 de 2001 (Hii e Al-Mahaidi, 2006c, 2007).

A resistência total à torção T_n de vigas reforçadas com CFC, pode ser calculada usando-se o princípio da superposição da parcela referente ao aço $T_{n,s}$ e da parcela referente ao reforço $T_{n,frp}$:

$$T_n = T_{n,s} + T_{n,frp} \quad (5.26)$$

que pode ser reescrita da seguinte maneira

$$T_n = \phi 2A_n (\cotg \theta + \cotg \alpha) \text{sen} \alpha (f_{sy,f} A_{sw} s_t^{-1} + \epsilon_{fd,e} E_f A_f s_f^{-1}) \quad (5.27)$$

O ângulo de inclinação das fissuras considerado é o proposto pela AS3600 *apud* Hii e Al-Mahaidi (2006c, 2007):

$$\theta = 30^\circ + 15^\circ \left[\frac{T_n - \phi T_{uc}}{\phi T_{u,m\acute{a}x} - \phi T_{uc}} \right] \quad (5.28)$$

onde

- A_{sw} – área de um tramo do estribo de aço;
- $f_{sy,f}$ – tensão de escoamento do aço do estribo;
- s_t – espaçamento dos estribos de aço;
- ϕ – fator de resistência à torção;
- T_{uc} – momento torçor de fissuração;
- $T_{u,m\acute{a}x}$ – momento torçor último.

A Figura 5.17a mostra a razão entre o momento torçor de ruptura experimental e o momento torçor teórico calculado pela expressão 5.27. A razão média da T_{exp}/T_n foi 1,24.

Adaptando-se a expressão 5.12 do Bulletin 14 da FIB ao ACI 318-05 tem-se uma expressão similar à expressão 5.27, porém, o parâmetro A_n é equivalente a 85% da área limitada pela linha central dos estribos. A média da razão T_{exp}/T_n , sendo T_n calculado pela expressão adaptada do ACI 318-05, foi 1,72.

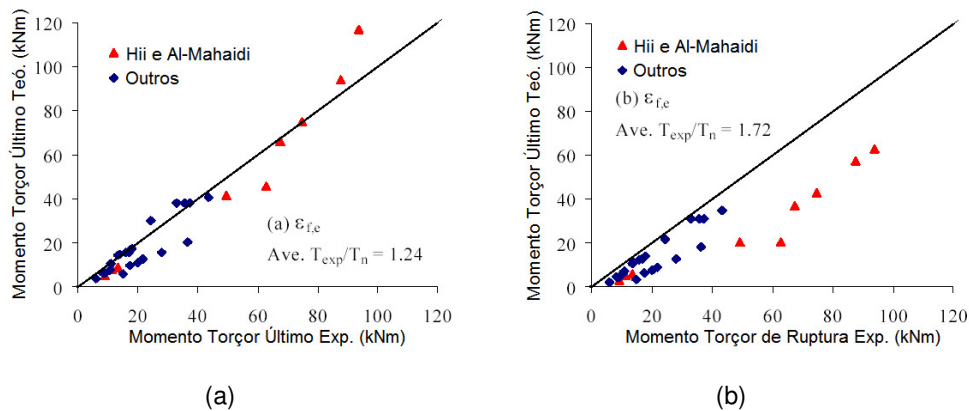


Figura 5.17 – Contribuição do CFC na resistência à torção: a) AS3600 de 2001; b) ACI 318-2005 (Hii e Al-Mahaidi, 2006c, 2007).

Os resultados obtidos usando-se as prescrições do Bulletin 14 da FIB foram contra a segurança, porque esse Bulletin considera que o fluxo de cisalhamento resultante do CFC localiza-se na superfície de concreto, o que contradiz a premissa do modelo da treliça espacial.

A contribuição do reforço foi mais precisa quando a posição do fluxo de cisalhamento foi modificada para ficar consistente com as prescrições da AS3600 *apud* Hii e Al-Mahaidi (2006c, 2007).

Para o cálculo do momento torçor resistente total o método do Bulletin 14 da FIB adaptado para a AS3600 *apud* Hii e Al-Mahaidi (2006c, 2007) apresentou melhores resultados do que quando adaptado ao ACI 318-05, que forneceu resultados muito conservativos.

5.9.

Deifalla e Ghobarah (2006)

O objetivo desse estudo foi determinar a espessura de CFC necessária para reforçar vigas **T** solicitadas à combinação de momento torçor e força cortante.

A espessura t_t de CFC necessária para resistir a um momento torçor é calculada usando-se a analogia da treliça espacial, sendo:

$$t_t = \frac{T - T_0}{2E_f \varepsilon_f A_0 (\cos \beta + \sin \beta)} \quad (5.28)$$

Baseados nas prescrições da CSA-S806-02 *apud* Deifalla e Ghobarah (2006), calcularam a espessura t_v de CFC necessária para resistir à força cortante:

$$t_v = \frac{V - V_0}{2E_f \varepsilon_f d (\cos \beta + \sin \beta)} \quad (5.28)$$

A espessura t_f de CFC necessária para resistir à combinação de momento torçor e força cortante é expressa por:

$$t_f = t_v + t_t \quad (5.28)$$

A deformação específica da fibra ε_f é calculada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon_f = \frac{0,33w_f}{L_e s_f} \quad (5.28)$$

Sendo L_e dado por:

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_c}}} \quad (5.28)$$

onde

T – momento torçor resistente da viga **T** reforçada com CFC;

T_0 – momento torçor resistente da viga **T** sem reforço;

V – força cortante resistente da viga **T** reforçada com CFC;

V_0 – força cortante resistente da viga **T** sem reforço.

O programa experimental foi composto pelo ensaio de quatro vigas de concreto armado com seção **T**, sendo TG1 a viga de referência e TG2, TG3 e TG4 as vigas reforçadas com CFC.

O concreto apresentou resistência à compressão de 25,6 *MPa* aos 28 dias.

As propriedades mecânicas do CFC foram: tensão de ruptura de 609 *MPa*, módulo de elasticidade de 63,3 *GPa*, deformação específica máxima de 0,96% e espessura de 0,86 *mm*.

As vigas **T** foram solicitadas por momento torçor e força cortante na razão de 0,5 *m*, e por um momento fletor de baixa magnitude. A seção transversal e as armaduras de aço utilizadas são mostradas na Figura 5.18.

As vigas foram fortemente armadas na direção longitudinal, minimizando o efeito da flexão, focando a ação do momento torçor e da força cortante.

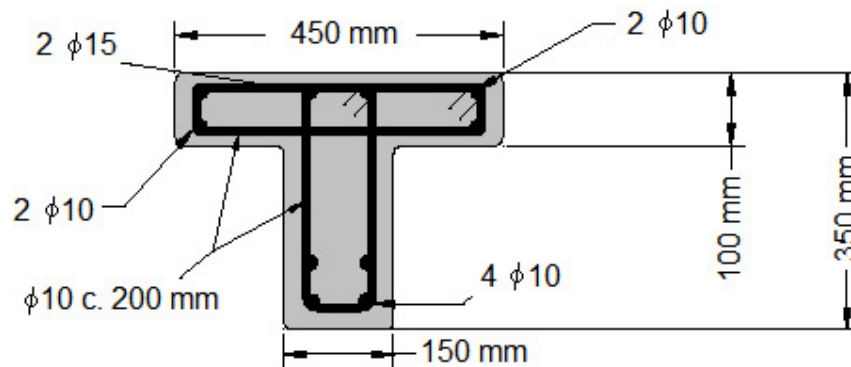


Figura 5.18 – Seção transversal das vigas **T** (Deifalla e Ghobarah, 2006).

O esquema de ensaio e as configurações de reforço e ancoragem são apresentados nas Figuras 5.19 e 5.20, respectivamente.

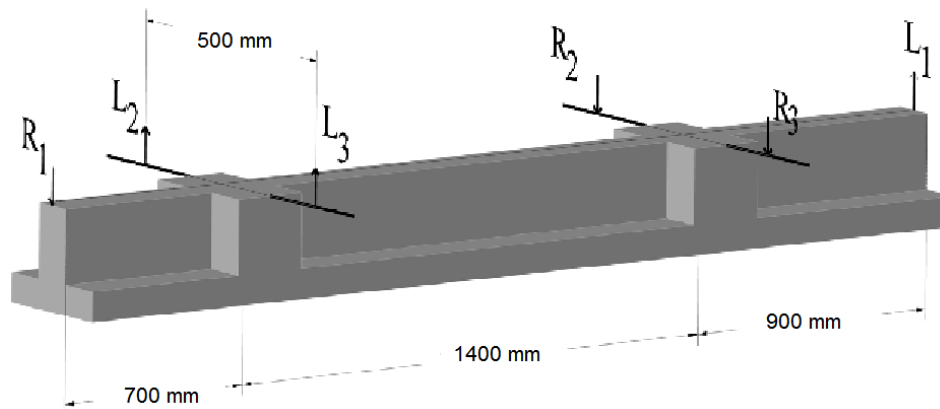


Figura 5.19 – Esquema de ensaio (Deifalla e Ghobarah, 2006).

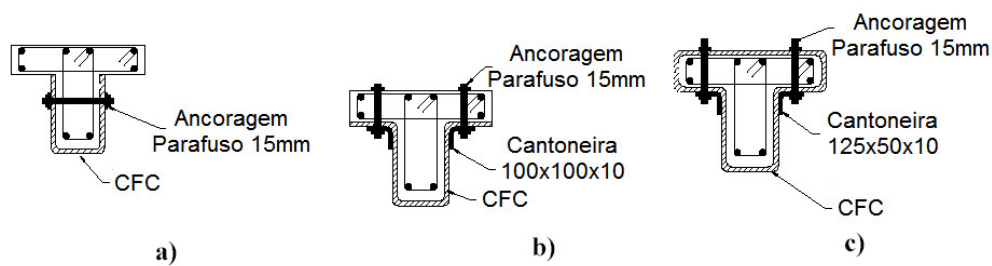


Figura 5.20 – Esquemas de reforço e ancoragens utilizados: a) TG2; b) TG3; c) TG4 (Deifalla e Ghobarah, 2006).

A Tabela 5.14 mostra os resultados dos ensaios e os modos de ruptura das vigas ensaiadas.

Tabela 5.14 – Resultados dos ensaios e modos de ruptura (Deifalla e Ghobarah, 2006).

Viga	Força Cortante* (kN)	Modo de Ruptura
TG1	46,0	escoamento do aço dos estribos seguido do esmagamento do concreto
TG2	68,0	descolamento do CFC seguido do esmagamento do concreto
TG3	76,0	descolamento do CFC
TG4	80,0	descolamento do CFC

* A razão entre o momento torçor e a força cortante foi de 0,5 m.

A Tabela 5.15 apresenta o comparativo entre a espessura de CFC utilizada e a espessura de CFC calculada pela formulação apresentada:

Tabela 5.15 – Resultados dos ensaios e modos de ruptura (Deifalla e Ghobarah, 2006).

Viga	Técnica de Reforço	Razão entre a espessura calculada e a utilizada
TG2	Estribos em U ancorados	0,74
TG3	Estribos em U com ancoragem estendida	0,85
TG4	Envolvimento completo com ancoragem	0,91
Média		0,83
Desvio Padrão		0,09

A formulação apresentada para o cálculo da espessura do reforço para a força cortante e o momento torçor de vigas **T** forneceu resultados conservativos para a espessura requerida.

6 Modelos Propostos

6.1. Introdução

Neste capítulo são apresentadas duas sistemáticas, uma para análise de vigas solicitadas à torção e outra para dimensionamento. Apresenta-se inicialmente um modelo para cálculo do momento torçor último, e para o traçado do diagrama $T \times \theta$ em vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibras de carbono (CFC) fundamentado na formulação de Hsu (1993). O segundo modelo é uma formulação para dimensionamento de reforço com CFC em vigas de concreto armado baseado na sistemática adotada pelo Eurocode 2 (1991). Esses modelos consideram em sua formulação o modelo de aderência proposto por Chen e Teng (2003). Durante o desenvolvimento deste trabalho, alguns dados e conclusões parciais foram publicados: Sánchez Filho e Silva Filho (2005), Silva Filho *et al.* (2005) e Silva Filho *et al.* (2006a, b).

6.2. Modelo da Treliça Espacial com Abrandamento das Tensões (TEAT)

Esta sistemática é desenvolvida considerando-se a formulação denominada *Softening Truss Model*, que leva em conta o abrandamento de tensões em elementos de concreto armado e protendido solicitados à torção, e baseia-se no modelo da Treliça Espacial Generalizada desenvolvido por Hsu (1983, 1984, 1988, 1990, 1991a, 1991b, 1996, 1997) e Hsu e Mo (1985).

Nesta formulação, os parâmetros analisados no modelo original referentes à força de protensão são substituídos de forma consistente pelos parâmetros relativos ao reforço com CFC. São consideradas as relações constitutivas dos três materiais, aço, concreto e CFC, e adota-se o modelo de aderência para vigas reforçadas à força cortante com compósitos de fibras de carbono proposto por Chen e Teng (2003). A consideração da aderência neste modelo é de grande importância, pois, em geral, a ruptura do reforço se dá por meio do descolamento e não pela ruptura do CFC.

6.2.1. Painel Fissurado

O modelo do painel fissurado considera um elemento de concreto com lados unitários e espessura t_d , com armaduras longitudinal e transversal distribuídas em seu interior, com espaçamentos s_ℓ e s_t , respectivamente. Além da armadura de aço, este elemento tem em sua face externa um reforço com CFC, distribuído no sentido longitudinal com espaçamento s_{fl} , e no sentido transversal com espaçamento s_{ft} (Figura 6.1).

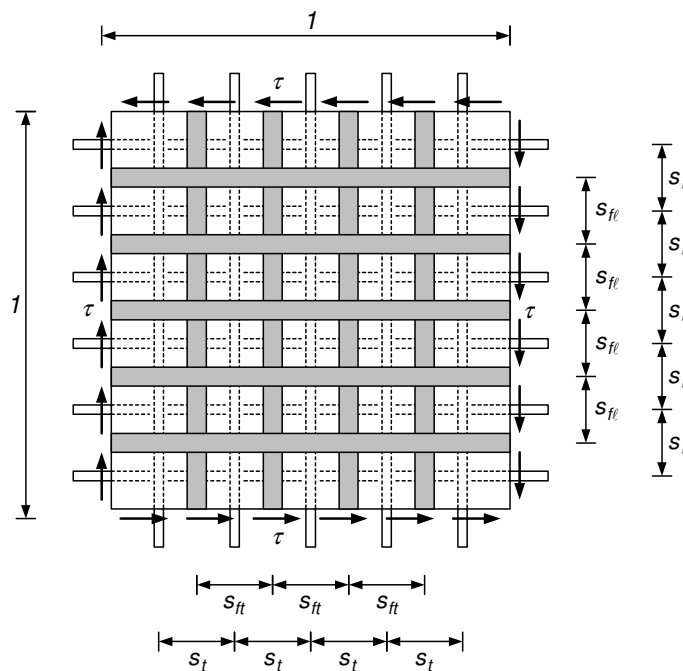


Figura 6.1 – Painel de concreto armado reforçado com CFC.

A formulação deste modelo consiste em admitir-se o painel fissurado devido a um estado de cisalhamento puro, definido pela tensão tangencial τ , sendo as fissuras inclinadas de um ângulo α (Figura 6.2). O mecanismo resistente deste tipo de elemento é composto por bielas comprimidas de concreto e armaduras tracionadas.

O ângulo de inclinação das bielas é admitido como igual ao ângulo de inclinação das fissuras, e igual ao ângulo de inclinação da deformação específica principal de compressão.

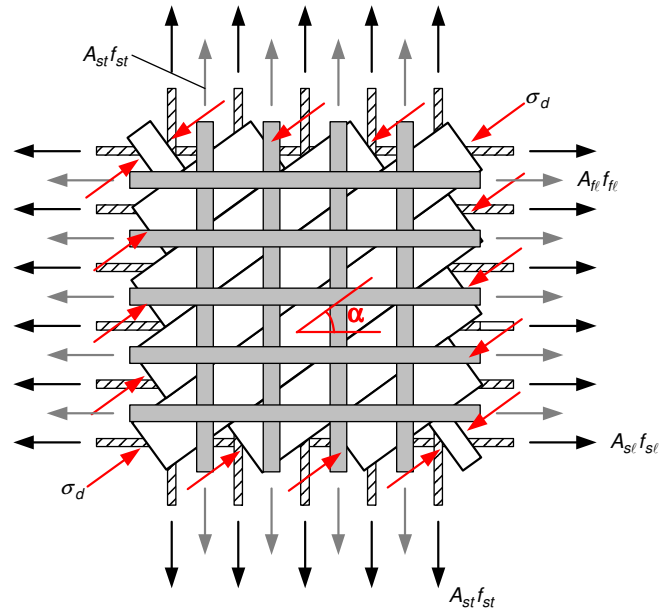


Figura 6.2 – Painel fissurado de concreto armado reforçado com CFC.

Para estabelecimento das equações de equilíbrio considera-se a resistência do painel fissurado como a soma de três parcelas referentes ao concreto, às armaduras de aço e ao reforço com CFC (Figura 6.3):

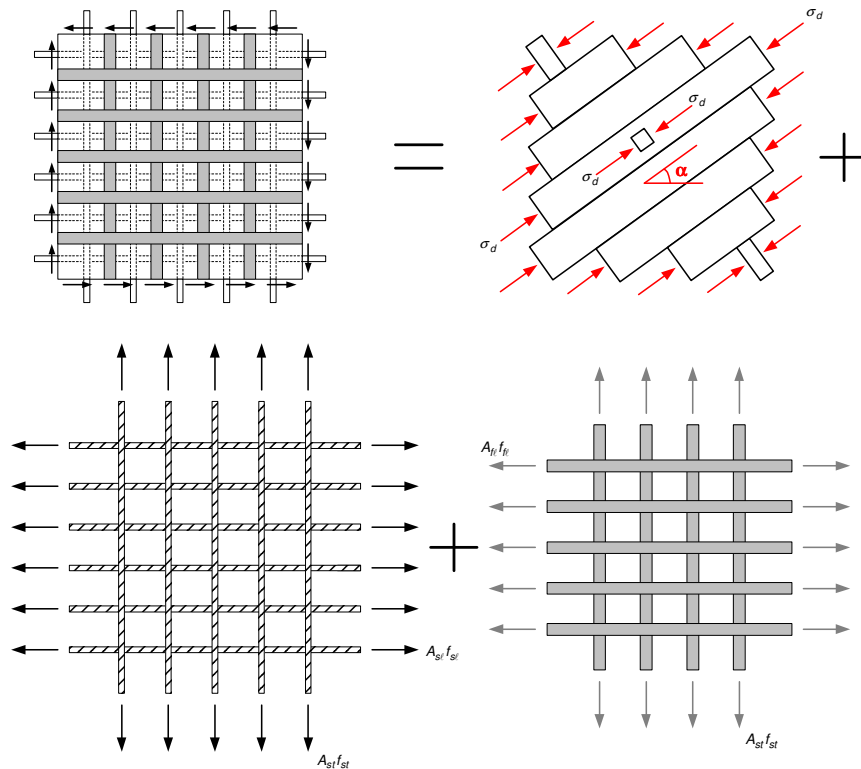


Figura 6.3 – Forma aditiva para a consideração da resistência do painel fissurado reforçado com CFC.

As equações de equilíbrio para a parcela referente ao concreto (Figura 6.4) são dadas por:

$$\sigma_\ell = \sigma_d \cos^2 \alpha + \sigma_r \operatorname{sen}^2 \alpha \quad (6.1)$$

$$\sigma_t = \sigma_d \operatorname{sen}^2 \alpha + \sigma_r \cos^2 \alpha \quad (6.2)$$

$$\tau_{\ell t} = (-\sigma_d + \sigma_r) \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha \quad (6.3)$$

onde

σ_ℓ – tensão na direção do eixo longitudinal;

σ_t – tensão na direção do eixo transversal;

σ_d – tensão na direção do eixo das fissuras;

σ_r – tensão na direção perpendicular ao eixo das fissuras.

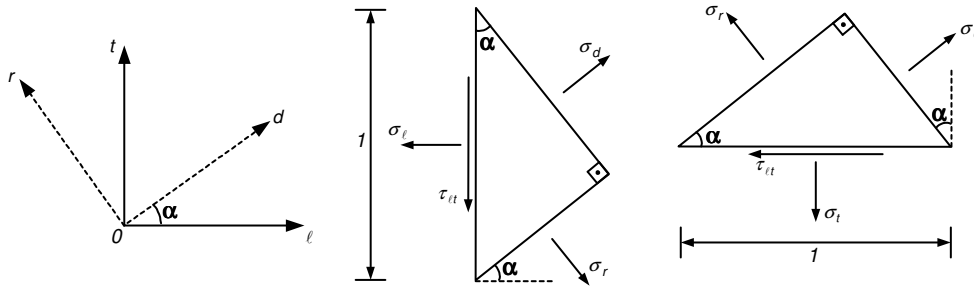


Figura 6.4 – Elemento no interior da biela comprimida.

Adicionando-se as parcelas referentes às armaduras de aço e de reforço tem-se:

$$\sigma_\ell = \sigma_d \cos^2 \alpha + \sigma_r \operatorname{sen}^2 \alpha + \frac{n_{s\ell}}{t_d} + \frac{n_{f\ell}}{t_d} \quad (6.4)$$

$$\sigma_t = \sigma_d \operatorname{sen}^2 \alpha + \sigma_r \cos^2 \alpha + \frac{n_{st}}{t_d} + \frac{n_{ft}}{t_d} \quad (6.5)$$

$$\tau_{\ell t} = (-\sigma_d + \sigma_r) \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha \quad (6.6)$$

sendo

$$n_{s\ell} = \frac{A_{s\ell} f_{s\ell}}{s_\ell} \quad (6.7)$$

$$n_{st} = \frac{A_{st} f_{st}}{s_t} \quad (6.8)$$

$$n_{f\ell} = \frac{A_{f\ell} f_{f\ell}}{s_{f\ell}} \quad (6.9)$$

$$n_{ft} = \frac{A_{ft} f_{ft}}{S_{ft}} \quad (6.10)$$

onde

$A_{s\ell}$ – área de uma barra de aço da armadura longitudinal;

A_{st} – área de uma barra de aço da armadura transversal;

$A_{f\ell}$ – área de reforço longitudinal;

A_{ft} – área de reforço transversal;

$n_{s\ell}$ – força na armadura longitudinal de aço por unidade de comprimento;

n_{st} – força na armadura transversal de aço por unidade de comprimento;

$n_{f\ell}$ – força na armadura longitudinal de reforço por unidade de comprimento;

n_{ft} – força na armadura transversal de reforço por unidade de comprimento;

$f_{s\ell}$ – tensão na armadura de aço longitudinal;

f_{st} – tensão na armadura de aço transversal.

$f_{f\ell}$ – tensão na armadura de reforço longitudinal;

f_{ft} – tensão na armadura de reforço transversal.

Considerando-se que uma viga de concreto armado reforçada com CFC seja composta por painéis fissurados, a força resultante nas armaduras longitudinais é distribuída ao longo do perímetro médio referente à espessura t_d . A força resultante nas armaduras longitudinais de reforço é distribuída ao longo do perímetro externo da viga (Figura 6.5). Por meio da expressão 6.4 tem-se:

$$\sigma_\ell = \sigma_d \cos^2 \alpha + \sigma_r \operatorname{sen}^2 \alpha + \frac{\sum A_{s\ell} f_{s\ell}}{\rho_0 t_d} + \frac{\sum A_{f\ell} f_{f\ell}}{\rho_c t_d} \quad (6.11)$$

onde $\sum A_{s\ell}$ e $\sum A_{f\ell}$ é o somatório das armaduras longitudinais de aço e CFC distribuídas na seção transversal da viga.

Definindo-se:

$$\rho_{s\ell} = \frac{\sum A_{s\ell}}{\rho_0 t_d} \quad (6.12)$$

$$\rho_{st} = \frac{A_{st}}{s_t t_d} \quad (6.13)$$

$$\rho_{f\ell} = \frac{\sum A_{f\ell}}{\rho_c t_d} \quad (6.14)$$

$$\rho_{ft} = \frac{A_{ft}}{s_{ft}t_d} \quad (6.15)$$

as equações de equilíbrio para uma viga solicitada a torção passam a ser

$$\sigma_\ell = \sigma_d \cos^2 \alpha + \sigma_r \operatorname{sen}^2 \alpha + \rho_{sl} f_{sl} + \rho_{fl} f_{fl} \quad (6.16)$$

$$\sigma_t = \sigma_d \operatorname{sen}^2 \alpha + \sigma_r \cos^2 \alpha + \rho_{st} f_{st} + \rho_{ft} f_{ft} \quad (6.17)$$

onde

- ρ_0 – perímetro ao longo da metade da espessura t_d ;
- ρ_c – perímetro externo da seção de concreto;
- ρ_{sl} – taxa geométrica de armadura longitudinal de aço;
- ρ_{st} – taxa geométrica de armadura transversal de aço;
- ρ_{fl} – taxa geométrica de armadura longitudinal de reforço;
- ρ_{ft} – taxa geométrica de armadura transversal de reforço.

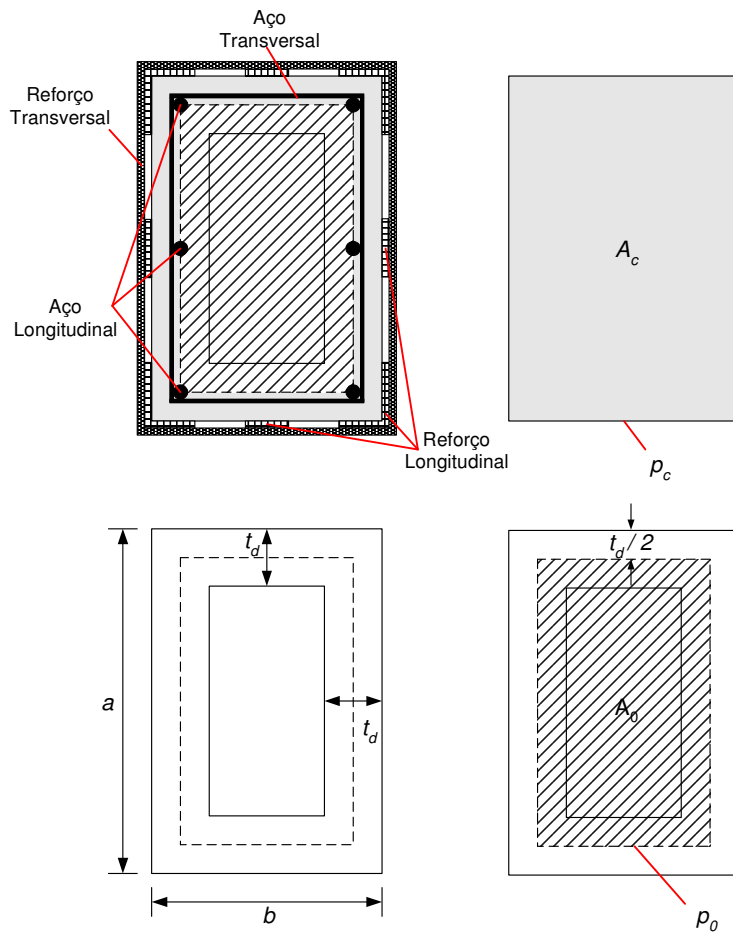


Figura 6.5 – Parâmetros da seção transversal.

O fluxo de cisalhamento na espessura t_d , deduzido a partir da 1ª fórmula de Bredt, é dado por:

$$\tau_{lt} = \frac{q}{t_d} = \frac{T}{2A_0 t_d} \quad (6.18)$$

6.2.2. Equações de Compatibilidade

A equações de compatibilidade de deformações específicas para o painel fissurado com fissuras inclinadas de um ângulo α , podem ser determinadas a partir do círculo de Mohr ilustrado na Figura 6.6, logo:

$$\varepsilon_\ell = \varepsilon_d \cos^2 \alpha + \varepsilon_r \sin^2 \alpha \quad (6.19)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_d \sin^2 \alpha + \varepsilon_r \cos^2 \alpha \quad (6.20)$$

$$\frac{\gamma_{lt}}{2} = (-\varepsilon_d + \varepsilon_r) \sin \alpha \cos \alpha \quad (6.21)$$

$$\sin^2 \alpha = \frac{\varepsilon_\ell - \varepsilon_d}{\varepsilon_r - \varepsilon_d} \quad (6.22)$$

$$\cos^2 \alpha = \frac{\varepsilon_t - \varepsilon_d}{\varepsilon_r - \varepsilon_d} \quad (6.23)$$

$$\tan^2 \alpha = \frac{\varepsilon_\ell - \varepsilon_d}{\varepsilon_t - \varepsilon_d} \quad (6.24)$$

$$\varepsilon_r + \varepsilon_d = \varepsilon_\ell + \varepsilon_t \quad (6.25)$$

onde

ε_ℓ – deformação específica na direção do eixo longitudinal;

ε_t – deformação específica na direção do eixo transversal;

ε_d – deformação específica na direção do eixo da fissura;

ε_r – deformação específica na direção perpendicular ao eixo das fissuras.

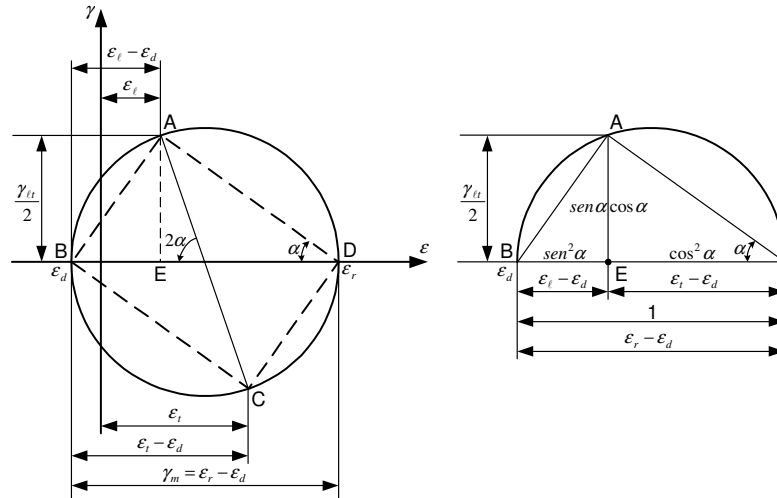


Figura 6.6 – Círculo de Mohr de deformações específicas.

6.2.3. Distorção Devido à Torção

A relação entre o ângulo de torção por unidade de comprimento θ num tubo de parede fina e a distorção $\gamma_{\ell t}$ na parede desse tubo é obtida a partir da condição de compatibilidade considerando-se o empenamento da seção. Efetuando-se um corte longitudinal num elemento de comprimento $d\ell$ do tubo (Figura 6.7), tem-se para a integral do empenamento diferencial dw (na direção ℓ) ao longo do perímetro:

$$\oint dw = 0 \quad (6.26)$$

pois o empenamento deve ser nulo.

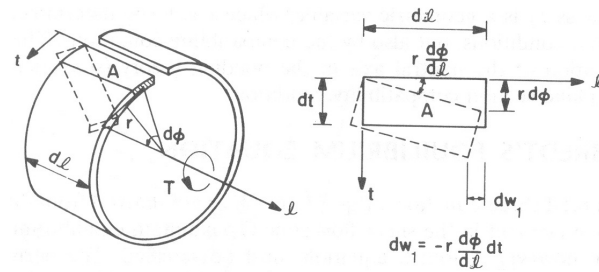
O empenamento de um elemento diferencial A com lados $d\ell$ e dt é composto pela soma de duas parcelas, a primeira referente a uma rotação rígida $d\phi$ (Figura 6.7.a), e a segunda é devida à distorção $\gamma_{\ell t}$ (Figura 6.7.b), donde:

$$dw = dw_1 + dw_2 \quad (6.27)$$

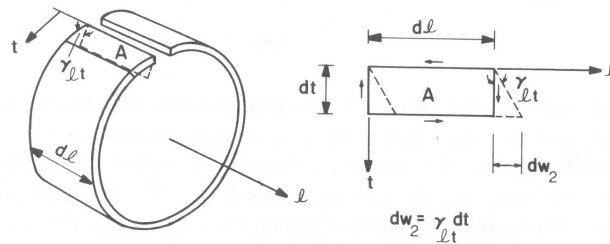
No elemento A solicitado à torção o empenamento diferencial dw_1 causado por uma rotação r com ângulo $r \frac{d\phi}{d\ell}$ é dado por:

$$dw_1 = -r \frac{d\phi}{d\ell} dt = -r\theta dt \quad (6.28)$$

onde r é a distância entre o centro do tubo no qual é aplicado o momento torçor e a linha central da parede do tubo.



(a) Empenamento na direção l devido ao ângulo de torção.



(b) Empenamento na direção l devido à distorção γ_{lt} .

Figura 6.7 – Empenamento em tubos de paredes fina (Hsu, 1993).

O empenamento diferencial dw_2 do elemento A (Figura 6.7.b), causado pela distorção γ_{lt} é dado por:

$$dw_2 = \gamma_{lt} dt \quad (6.29)$$

Substituindo-se as expressões 6.28 e 6.29 na expressão 6.27 tem-se:

$$dw = -r\theta dt + \gamma_{lt} dt \quad (6.30)$$

Como a integral do empenamento diferencial dw ao longo do perímetro deve ser nula segue-se:

$$\oint dw = -\theta \oint r dt + \oint \gamma_{lt} dt = 0 \quad (6.31)$$

sendo

$$\oint r dt = 2A_0 \quad (6.32)$$

então

$$\oint \gamma_{lt} dt = 2A_0 \theta \quad (6.33)$$

Para tubos com paredes de espessura constante a tensão de cisalhamento τ_{lt} é constante, o que resulta numa distorção γ_{lt} uniforme. Isto permite escrever a expressão 6.33 como:

$$\gamma_{lt} \oint dt = 2A_0 \theta \quad (6.34)$$

Sendo $\oint dt$ o perímetro da linha central do fluxo de cisalhamento tem-se:

$$p_0 = \oint dt \quad (6.35)$$

Substituindo-se a expressão 6.35 na expressão 6.34, e isolando-se θ resulta em:

$$\theta = \frac{p_0}{2A_0} \gamma_{lt} \quad (6.36)$$

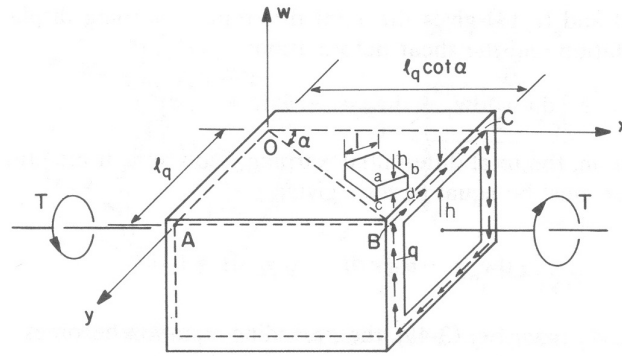
O ângulo de torção por unidade de comprimento θ causa uma distorção γ_{lt} nas parede onde ocorre o fluxo de cisalhamento. A distorção γ_{lt} causará no aço deformações específicas ε_ℓ e ε_t , e deformações específicas ε_r e ε_d no concreto.

6.2.4. Empenamento da Biela

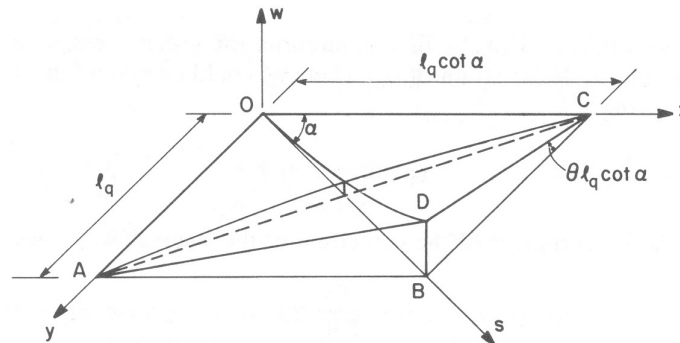
Em vigas solicitadas à torção o ângulo de torção por unidade de comprimento θ causa empenamento dos painéis que compõem as vigas de concreto armado, acarretando, além da compressão proveniente do fluxo de cisalhamento, flexão nas bielas inicialmente admitidas como comprimidas no modelo do painel fissurado.

A Figura 6.8 ilustra uma viga com seção retangular vazada composta por quatro painéis com espessura h e submetida a um momento torçor T . Cada painel é solicitado por um fluxo de cisalhamento q com espessura t_d . O painel superior tem largura ℓ_q e seu comprimento é dado por $\ell_q \cotg\alpha$ (Figura 6.8.a), onde a diagonal da linha média da seção onde atua o fluxo de cisalhamento para o painel superior $OABC$ tem um ângulo de inclinação α .

A viga com seção vazada ao se torcer de um ângulo θ , tem o plano $OABC$ do painel superior transformado numa superfície $OADC$ com formato de um parabolóide-hiperbólico (Figura 6.8.b). O lado CB do plano gira para a posição CD de um ângulo $\theta \ell_q \cotg \alpha$, e a linha OD inicialmente reta, passa a ter uma curvatura ψ .



(a) Viga com seção vazada submetida à torção.



(b) Deformação do painel superior.

Figura 6.8 – Flexão da biela de concreto de um painel de uma viga com seção vazada solicitada à torção (Hsu, 1993).

O sistema de coordenadas com eixos x , y e w é posicionado ao longo dos do plano OC , AO , com o eixo vertical situado na origem (Figura 6.8.b). A equação do parabolóide-hiperbólico $OADC$ é dada por:

$$w = \theta xy \quad (6.37)$$

onde w é o deslocamento perpendicular medido a partir do plano $x - y$.

Considerando-se um eixo s passando por OB na direção da biela de concreto, tem-se que a inclinação da curva OD é obtida derivando-se a expressão de w em relação a s . Aplicando-se a regra da cadeia à expressão 6.37 tem-se:

$$\frac{dw}{ds} = \frac{dw}{dx} \frac{dx}{ds} + \frac{dw}{dy} \frac{dy}{ds} = (\theta y) \frac{dx}{ds} + (\theta x) \frac{dy}{ds} \quad (6.38)$$

sendo

$$\text{sen } \alpha = \frac{dx}{ds} \quad (6.39)$$

e

$$\cos \alpha = \frac{dy}{ds} \quad (6.40)$$

Substituindo-se as expressões 6.39 e 6.40 na expressão 6.38 tem-se:

$$\frac{dw}{ds} = (\theta y) \cos \alpha + (\theta x) \operatorname{sen} \alpha \quad (6.41)$$

A curvatura da biela de concreto ψ é definida como:

$$\frac{d^2w}{ds^2} = \frac{\partial(dw/ds)}{\partial x} \frac{dx}{ds} + \frac{\partial(dw/ds)}{\partial y} \frac{dy}{ds} \quad (6.42)$$

donde

$$\frac{d^2w}{ds^2} = (\theta \operatorname{sen} \alpha) \cos \alpha + (\theta \cos \alpha) \operatorname{sen} \alpha \quad (6.43)$$

Considerando-se a relação trigonométrica:

$$\operatorname{sen}(2\alpha) = 2 \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha \quad (6.44)$$

resulta

$$\psi = \theta \operatorname{sen}(2\alpha) \quad (6.45)$$

6.2.5. Relações Constitutivas

6.2.5.1. Concreto

A curvatura ψ leva a uma distribuição de deformações específicas não-uniformes na biela de concreto. A Figura 6.9 mostra uma biela de concreto numa seção vazada com largura unitária e espessura h . A parte da biela que é tracionada não é considerada nessa análise. A área comprimida $abcd$ é considerada eficiente para resistir ao fluxo de cisalhamento. A profundidade da zona de compressão é definida pela linha neutra medida a partir da fibra extrema comprimida, definindo a espessura do fluxo de cisalhamento t_d . No interior da espessura t_d assume-se que a distribuição de deformações específicas é linear (Figura 6.9.b). A espessura t_d pode ser expressa em termos da curvatura ψ e da deformação específica máxima na superfície ε_{ds} :

$$t_d = \frac{\varepsilon_{ds}}{\psi} \quad (6.46)$$

A deformação específica média ε_d na biela é dada por:

$$\varepsilon_d = \frac{\varepsilon_{ds}}{2} \tag{6.47}$$

Considerando-se que a distribuição de deformação específica nas bielas seja linear, a distribuição de tensão é dada pela curva mostrada na Figura 6.9.c.

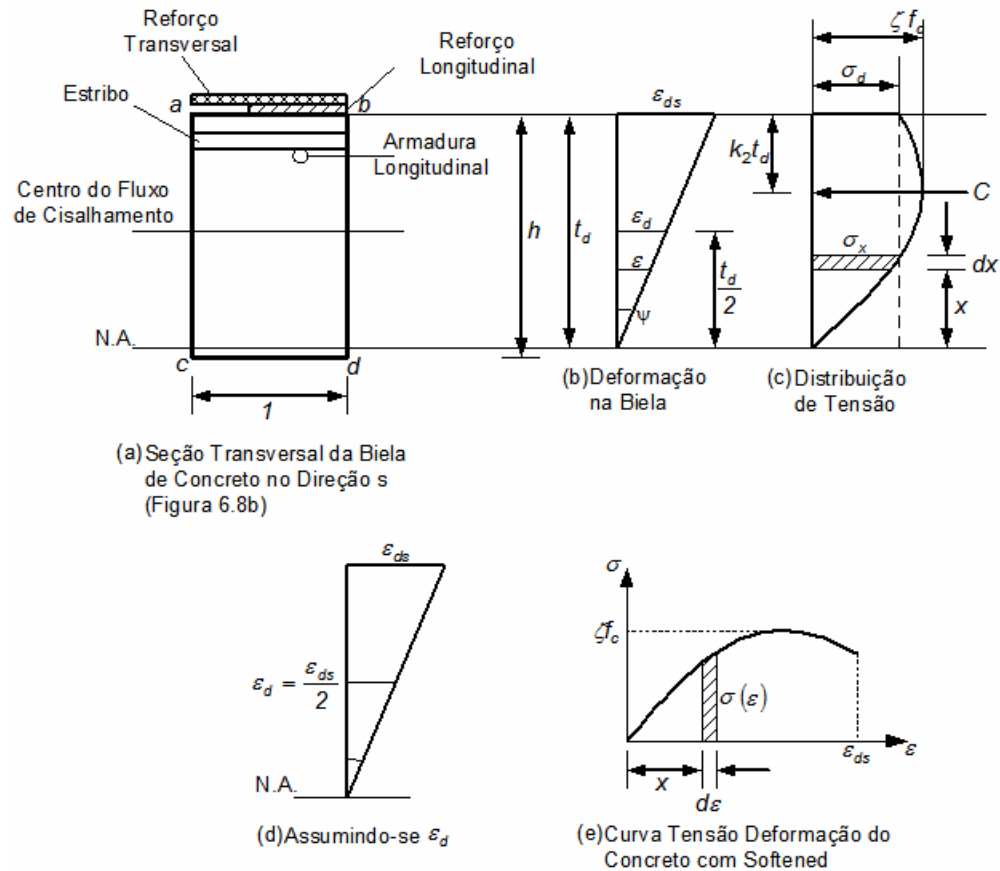


Figura 6.9 – Tensões e deformações específicas nas bielas de concreto (Hsu,1993).

A tensão máxima de compressão na biela é dada por:

$$\sigma_p = \zeta f'_c \tag{6.48}$$

Para a tensão média na biela tem-se:

$$\sigma_d = k_1 \sigma_p = k_1 \zeta f'_c \tag{6.49}$$

onde

ζ – coeficiente que considera o abrandamento de tensões na biela;

f'_c – resistência à compressão do concreto;

k_1 – coeficiente adimensional que relaciona a tensão média na biela com o seu valor máximo.

A força de compressão resultante C na biela é dada por:

$$C = \sigma_d t_d \quad (6.50)$$

ou

$$C = k_1 \sigma_p t_d \quad (6.51)$$

donde

$$C = k_1 \zeta' t_d \quad (6.52)$$

Essa resultante está localizada a uma distância $k_2 t_d$ da fibra extrema comprimida. O coeficiente k_2 relaciona a distância entre a resultante C e a fibra extrema da biela.

Efetuando-se o equilíbrio das forças por meio da integração das tensões ao longo da biela, tem-se para o coeficiente k_1 :

$$C = k_1 \sigma_p t_d = \int_0^{t_d} \sigma(x) dx \quad (6.53)$$

Considerando-se que a distribuição da deformação específica ao longo da biela é linear, tem-se por semelhança de triângulos:

$$x = \left(\frac{t_d}{\varepsilon_{ds}} \right) \varepsilon \quad (6.54)$$

donde

$$dx = \left(\frac{t_d}{\varepsilon_{ds}} \right) d\varepsilon \quad (6.55)$$

Substituindo-se a expressão 6.55 na expressão 6.53, e alterando-se os limites de integração de t_d para ε_{ds} tem-se:

$$C = k_1 \sigma_p t_d = \int_0^{\varepsilon_{ds}} \sigma(\varepsilon) \left(\frac{t_d}{\varepsilon_{ds}} \right) d\varepsilon = \frac{t_d}{\varepsilon_{ds}} \int_0^{\varepsilon_{ds}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$$

logo

$$C = \frac{t_d}{\varepsilon_{ds}} \int_0^{\varepsilon_{ds}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (6.56)$$

$$k_1 = \frac{1}{\sigma_p \varepsilon_{ds}} \int_0^{\varepsilon_{ds}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (6.57)$$

Estabelecendo-se o equilíbrio em torno da linha neutra por meio de $\sum M = 0$, determina-se o coeficiente k_2 , logo:

$$c(1 - k_2)t_d = \int_0^{t_d} \sigma(x) x dx \quad (6.58)$$

Substituindo-se as expressões 6.54 e 6.55 na expressão 6.58, e alterando-se o limite de integração tem-se:

$$c(1-k_2)t_d = \left(\frac{t_d}{\varepsilon_{ds}}\right)^2 \int_0^{\varepsilon_{ds}} \sigma(\varepsilon)\varepsilon d\varepsilon \quad (6.59)$$

Substituindo-se a expressão 6.56 na expressão 6.59, e isolando-se k_2 tem-se:

$$k_2 = 1 - \frac{1}{\varepsilon_{ds}} \frac{\int_0^{\varepsilon_{ds}} \sigma(\varepsilon)\varepsilon d\varepsilon}{\int_0^{\varepsilon_{ds}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon} \quad (6.60)$$

Relação constitutiva do concreto

A curva tensão-deformação específica do concreto proposta por Hsu (1993) considera o abrandamento de tensões, e apresenta-se sob a forma de duas equações, uma para o trecho ascendente e outra para os trechos descendentes (Figura 6.10), dadas por:

- Trecho ascendente:

$$\sigma_d = \sigma_p \left[2 \left(\frac{\varepsilon_d}{\zeta \varepsilon_0} \right) - \left(\frac{\varepsilon_d}{\zeta \varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (6.61)$$

- Trecho descendente:

$$\sigma_d = \sigma_p \left[1 - \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{2\varepsilon_0 - \varepsilon_p} \right)^2 \right] \quad (6.62)$$

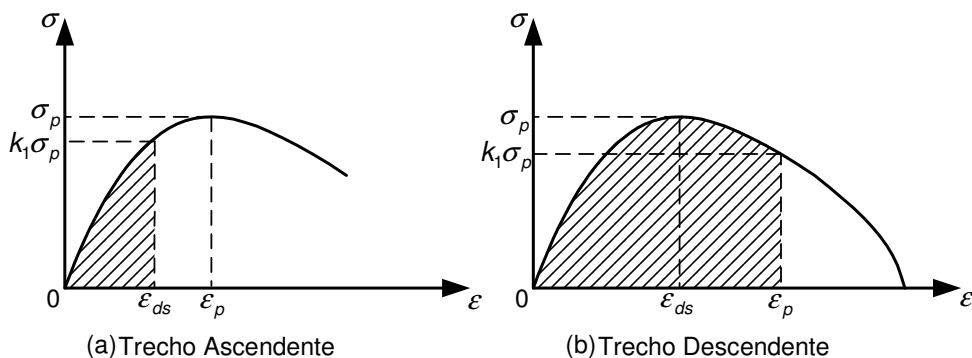


Figura 6.10 – Curvas tensão-deformação específica para o concreto considerando-se o abrandamento de tensões (Hsu, 1993).

Cálculo do coeficiente k_1

- Trecho ascendente: se as deformações específicas nas bielas estiverem no trecho ascendente da curva $\sigma_d \times \varepsilon$, ou seja, $\varepsilon_{ds}/\varepsilon_p \leq 1$ tem-se:

$$k_1 = \frac{1}{\sigma_p \varepsilon_{ds}} \int_0^{\varepsilon_{ds}} \sigma_p \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right)^2 \right] d\varepsilon \quad (6.63)$$

Integrando-se a expressão 6.63 resulta:

$$k_1 = \frac{\varepsilon_{ds}}{\varepsilon_p} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{\varepsilon_{ds}}{\varepsilon_p} \right) \quad (6.64)$$

sendo $\varepsilon_p = \zeta \varepsilon_0$, e expressando-se k_1 em termos de ζ segue-se

$$k_1 = \frac{\varepsilon_{ds}}{\zeta \varepsilon_0} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{\varepsilon_{ds}}{\zeta \varepsilon_0} \right) \quad (6.65)$$

- Trecho descendente: se as deformações específicas nas bielas estiverem no trecho descendente da curva $\sigma_d \times \varepsilon$, ou seja, $\varepsilon_{ds}/\varepsilon_p > 1$ tem-se:

$$k_1 = \frac{1}{\sigma_p \varepsilon_{ds}} \int_0^{\varepsilon_p} \sigma_p \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right)^2 \right] d\varepsilon + \frac{1}{\sigma_p \varepsilon_{ds}} \int_0^{\varepsilon_p} \sigma_p \left[1 - \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{2\varepsilon_0 - \varepsilon_p} \right)^2 \right] d\varepsilon \quad (6.66)$$

Integrando-se e simplificando-se a expressão 6.66 tem-se:

$$k_1 = \left[1 - \frac{\varepsilon_p^2}{(2\varepsilon_0 - \varepsilon_p)^2} \right] \left(1 - \frac{1}{3} \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{ds}} \right) + \frac{\varepsilon_p^2}{(2\varepsilon_0 - \varepsilon_p)^2} \frac{\varepsilon_{ds}}{\varepsilon_p} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{\varepsilon_{ds}}{\varepsilon_p} \right) \quad (6.67)$$

sendo $\varepsilon_p = \zeta \varepsilon_0$, e expressando-se k_1 em termos de ζ segue-se

$$k_1 = \left[1 - \frac{\zeta^2}{(2 - \zeta)^2} \right] \left(1 - \frac{1}{3} \frac{\zeta \varepsilon_0}{\varepsilon_{ds}} \right) + \frac{\zeta^2}{(2 - \zeta)^2} \frac{\varepsilon_{ds}}{\varepsilon_p} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{\varepsilon_{ds}}{\zeta \varepsilon_0} \right) \quad (6.68)$$

O coeficiente ζ é dado por:

$$\zeta = \frac{0,9}{\sqrt{1 + 600\varepsilon_r}} \quad (6.69)$$

Cálculo do coeficiente k_2

O coeficiente k_2 pode ser calculado de maneira semelhante ao coeficiente k_1 , ou seja, por meio da integração da expressão 6.60, considerando-se as expressões 6.61 e 6.62 para o comportamento da curva $\sigma_d \times \varepsilon$.

Hsu (1993) relata que o valor de k_2 situa-se entre 0,40 e 0,45 e recomenda a adoção de $k_2 = 0,5$, ou seja, o centro do fluxo de cisalhamento esta a uma distância $0,5t_d$ da fibra externa comprimida. Com isso evita-se o

processo de integração para determinação k_2 , pois a linha central do fluxo de cisalhamento coincide com o valor médio da deformação específica ε_d , e o cálculo de A_0 e ρ_0 são simplificados.

6.2.5.2. Aço

Para a relação constitutiva do aço adota-se um modelo elasto-plástico perfeito (Figura 6.11), com comportamento linear até se atingir a deformação específica relativa à tensão de escoamento.

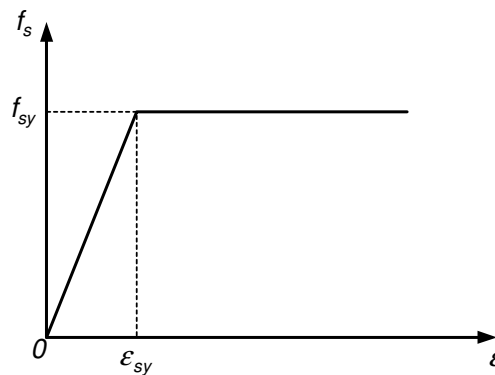


Figura 6.11 – Curva tensão-deformação específica do aço.

Para $\varepsilon_\ell < \varepsilon_{\ell y}$, ou seja, a deformação específica na direção longitudinal é menor que a deformação específica de escoamento da armadura de aço longitudinal, a tensão na armadura de aço longitudinal é dada por:

$$f_{s\ell} = E_{s\ell} \varepsilon_\ell \quad (6.70)$$

Para $\varepsilon_\ell \geq \varepsilon_{\ell y}$ tem-se:

$$f_{s\ell} = f_{s\ell y} \quad (6.71)$$

De forma análoga o mesmo pode ser escrito para a armadura de aço transversal, ou seja, quando $\varepsilon_t < \varepsilon_{ty}$ a tensão na armadura é dada por:

$$f_{st} = E_{st} \varepsilon_t \quad (6.72)$$

quando $\varepsilon_t \geq \varepsilon_{ty}$ tem-se:

$$f_{st} = f_{sty} \quad (6.73)$$

onde

$f_{s\ell y}$ – tensão de escoamento da armadura de aço longitudinal;

f_{sty} – tensão de escoamento da armadura de aço transversal;

E_{sl} – módulo de elasticidade do aço longitudinal;

E_{st} – módulo de elasticidade do aço transversal;

ε_{ly} – deformação específica de escoamento da armadura de aço longitudinal;

ε_{ty} – deformação específica de escoamento da armadura de aço transversal.

6.2.5.3. Reforço com CFC

Para o reforço com CFC adota-se um modelo elástico perfeito (Figura 6.12), com comportamento linear até o material de reforço atingir a tensão de ruptura do reforço ou a tensão de aderência entre o reforço de CFC e o concreto.

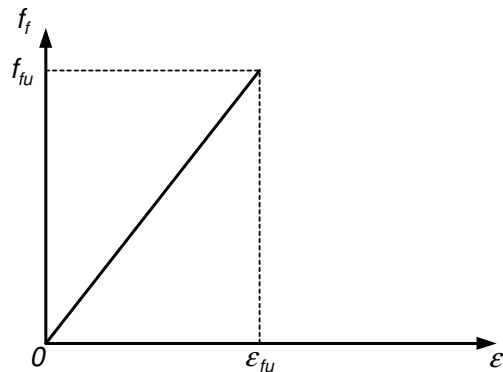


Figura 6.12 – Curva tensão-deformação específica do reforço de CFC.

A tensão no reforço de CFC no sentido longitudinal é dada por:

$$f_{fl} = E_f \varepsilon_l \quad (6.74)$$

De forma análoga para a tensão no reforço de CFC no sentido transversal tem-se:

$$f_{ft} = E_f \varepsilon_t \quad (6.75)$$

onde

f_{fl} – tensão na armadura de reforço longitudinal;

f_{ft} – tensão na armadura de reforço transversal;

f_{fu} – tensão de ruptura do reforço;

E_f – módulo de elasticidade do CFC.

6.2.5.3.1. Aderência entre o reforço de CFC e o concreto

As propriedades mecânicas do CFC dependem do fabricante e devem ser analisadas criteriosamente, pois esse tipo de material tem uma grande variação nas suas características intrínsecas.

Deve-se garantir a aderência total entre o CFC e o substrato de concreto, de modo a permitir a aplicação das sistemáticas apresentadas neste trabalho. Essa condição básica leva à adoção de um modelo teórico fundamentado na tensão efetiva de aderência.

Em Chen e Teng (2003) é apresentado um modelo baseado no modo de ruptura por descolamento do CFC. Nesse modelo a tensão efetiva axial resistida pelo CFC é dada por:

$$f_{f,e} = E_f \varepsilon_{f,e} \quad (6.76)$$

onde

$f_{f,e}$ – tensão efetiva no reforço;

$\varepsilon_{f,e}$ – deformação específica efetiva no reforço de CFC;

Como a tensão axial resistida pelo reforço não é transmitida de modo uniforme para o concreto, considera-se então um coeficiente de distribuição de tensão D_f . Assim a expressão 6.76 pode ser reescrita como:

$$f_{f,e} = D_f \sigma_{f,máx} \quad (6.77)$$

De acordo com Chen e Teng (2003) a tensão máxima no CFC é dada por:

$$\sigma_{f,máx} = 0,427 \beta_w \beta_L \sqrt{\frac{E_f}{t_f} f'_c} \leq f_{f,u} \quad (6.78)$$

onde

f'_c – resistência à compressão do concreto;

t_f – espessura do reforço em CFC.

Neste modelo tem-se o coeficiente adimensional $\lambda = \frac{L_{máx}}{L_e} = 1$, onde $L_{máx}$ é o comprimento máximo de ancoragem do CFC, e L_e é o comprimento efetivo de ancoragem. Para $\lambda = 1$ tem-se $\beta_L = 1$, e considerando-se $\beta_w = 0,707$ para reforço contínuo, donde resulta para a expressão 6.78:

$$\sigma_{f,máx} = 0,302 \sqrt{\frac{E_f}{t_f} f'_c} \leq f_{f,u} \quad (6.79)$$

O fator de distribuição de tensão segundo esses autores é dado por:

$$D_f = \frac{2}{\pi} = 0,637 \quad (6.80)$$

Substituindo-se as expressões 6.79 e 6.80 na expressão 6.77 tem-se:

$$f_{f,e} = 0,192 \sqrt{\frac{E_f}{t_f}} \sqrt{f'_c} \leq f_{f,u} \quad (6.81)$$

6.2.6.

Cálculo do Perímetro e da Área Limitada pela Linha Central do Fluxo de Cisalhamento

Considerando-se $k_2 = 0,5$ o cálculo do perímetro e da área limitada pela linha central do fluxo de cisalhamento é simplificado (Figura 6.13), donde segue-se:

$$A_0 = (b - t_d)(h - t_d) \quad (6.82)$$

Desenvolvendo-se a expressão 6.82 tem-se:

$$A_0 = ab - (a + b)t_d + t_d^2 \quad (6.83)$$

sendo

$$p_c = 2(a + b) \quad (6.84)$$

e

$$A_c = ab \quad (6.85)$$

Seguindo-se para a expressão 6.85:

$$A_0 = A_c - \frac{1}{2} p_c t_d + t_d^2 \quad (6.86)$$

e para o perímetro

$$p_0 = p_c - 4t_d \quad (6.87)$$

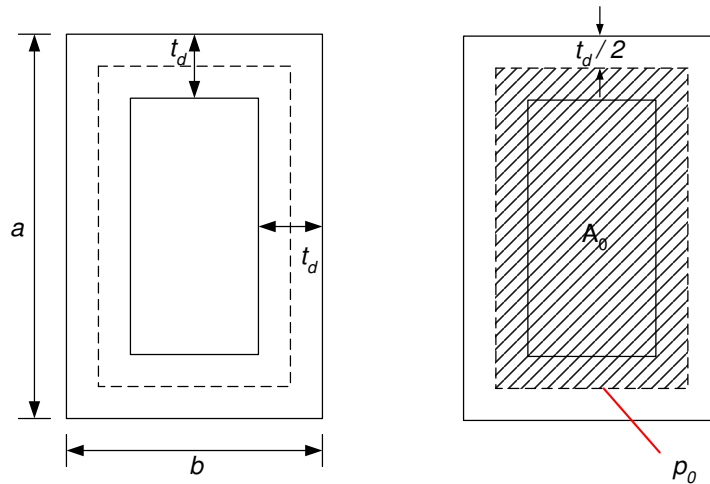


Figura 6.13 – Cálculo dos parâmetros A_0 e p_0 .

6.2.7. Espessura t_d em Função das Deformações Específicas

A espessura t_d pode ser expressa em termos das deformações específicas por meio da utilização das equações de compatibilidade. Substituindo-se a expressão 6.21 na expressão 6.36 tem-se:

$$\theta = \frac{p_0}{2A_0} 2(-\varepsilon_d + \varepsilon_r) \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha$$

donde

$$\theta = \frac{p_0}{A_0} (\varepsilon_r - \varepsilon_d) \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha \quad (6.88)$$

Substituindo-se a expressão 6.88 na expressão 6.45 tem-se:

$$\psi = \frac{p_0}{A_0} (\varepsilon_r - \varepsilon_d) \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha \operatorname{sen}(2\alpha) \quad (6.89)$$

sendo

$$\operatorname{sen}(2\alpha) = 2 \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha \quad (6.90)$$

donde

$$\psi = \frac{p_0}{A_0} (\varepsilon_r - \varepsilon_d) 2 \operatorname{sen}^2 \alpha \cos^2 \alpha \quad (6.91)$$

Substituindo-se a expressão 6.91 na expressão 6.46 tem-se:

$$\operatorname{sen}^2 \alpha \cos^2 \alpha = \frac{A_0}{2p_0 t_d} \frac{(-\varepsilon_{ds})}{(\varepsilon_r - \varepsilon_d)} \quad (6.92)$$

Substituindo-se as expressões 6.22, 6.23 e 6.47 na expressão 6.92 resulta:

$$\frac{(\varepsilon_\ell - \varepsilon_d)(\varepsilon_t - \varepsilon_d)}{(\varepsilon_r - \varepsilon_d)(\varepsilon_r - \varepsilon_d)} = \frac{A_0}{2\rho_0 t_d} \frac{(-\varepsilon_{ds})}{(\varepsilon_r - \varepsilon_d)}$$

donde

$$t_d = \frac{A_0}{\rho_0} \left[\frac{(-\varepsilon_d)(\varepsilon_r - \varepsilon_d)}{(\varepsilon_\ell - \varepsilon_d)(\varepsilon_t - \varepsilon_d)} \right] \quad (6.93)$$

6.2.8.

Deformação Específica ε_ℓ como Função de f_{sl} e f_{fl}

Substituindo-se a expressão 6.22 na expressão 6.92 tem-se:

$$\frac{(\varepsilon_\ell - \varepsilon_d)}{(\varepsilon_r - \varepsilon_d)} \cos^2 \alpha = \frac{A_0}{2\rho_0 t_d} \frac{(-\varepsilon_{ds})}{(\varepsilon_r - \varepsilon_d)}$$

logo

$$\cos^2 \alpha = \frac{A_0}{2\rho_0 t_d} \frac{(-\varepsilon_{ds})}{(\varepsilon_\ell - \varepsilon_d)} \quad (6.94)$$

Considerando-se a relação trigonométrica:

$$\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1 \quad (6.95)$$

que substituída na expressão 6.16 leva à

$$\sigma_\ell = \sigma_d \cos^2 \alpha + \sigma_r (1 - \cos^2 \alpha) + \rho_{sl} f_{sl} + \rho_{fl} f_{fl} \quad (6.96)$$

Desenvolvendo-se a expressão 6.96 tem-se:

$$\sigma_\ell = \sigma_d \cos^2 \alpha + \sigma_r - \sigma_r \cos^2 \alpha + \rho_{sl} f_{sl} + \rho_{fl} f_{fl} \quad (6.97)$$

e com $\cos^2 \alpha$ em evidência e manipulando-se

$$\begin{aligned} \sigma_\ell &= \cos^2 \alpha (\sigma_d - \sigma_r) + \sigma_r + \rho_{sl} f_{sl} + \rho_{fl} f_{fl} \\ \cos^2 \alpha &= \frac{(\sigma_\ell - \sigma_r) - (\rho_{sl} f_{sl} + \rho_{fl} f_{fl})}{(\sigma_d - \sigma_r)} \\ \cos^2 \alpha &= \frac{(-\sigma_\ell + \sigma_r) + (\rho_{sl} f_{sl} + \rho_{fl} f_{fl})}{(\sigma_r - \sigma_d)} \end{aligned} \quad (6.98)$$

Substituindo-se as expressões 6.12, 6.14 e 6.98 na expressão 6.94 seguem-se:

$$\frac{A_0}{2\rho_0 t_d} \frac{(-\varepsilon_{ds})}{(\varepsilon_\ell - \varepsilon_d)} = \frac{(-\sigma_\ell + \sigma_r) + \left(\frac{A_{sl}}{\rho_0 t_d} f_{sl} + \frac{A_{fl}}{\rho_c t_d} f_{fl} \right)}{(\sigma_r - \sigma_d)}$$

$$\begin{aligned}
(\varepsilon_\ell - \varepsilon_d) &= \frac{A_0(-\varepsilon_{ds})(\sigma_r - \sigma_d)}{2\rho_0 t_d \left[(-\sigma_\ell + \sigma_r) + \left(\frac{A_{s\ell}}{\rho_0 t_d} f_{s\ell} + \frac{A_{f\ell}}{\rho_c t_d} f_{f\ell} \right) \right]} \\
\varepsilon_\ell &= \varepsilon_d + \frac{A_0(-\varepsilon_{ds})(\sigma_r - \sigma_d)}{2\rho_0 t_d \left[(-\sigma_\ell + \sigma_r) + \left(\frac{\rho_c A_{s\ell} f_{s\ell} + \rho_0 A_{f\ell} f_{f\ell}}{\rho_0 \rho_c t_d} \right) \right]} \\
\varepsilon_\ell &= \varepsilon_d + \frac{\rho_0 \rho_c t_d A_0(-\varepsilon_{ds})(\sigma_r - \sigma_d)}{2\rho_0 t_d [\rho_0 \rho_c t_d (-\sigma_\ell + \sigma_r) + (\rho_c A_{s\ell} f_{s\ell} + \rho_0 A_{f\ell} f_{f\ell})]} \\
\varepsilon_\ell &= \varepsilon_d + \frac{\rho_c A_0(-\varepsilon_{ds})(\sigma_r - \sigma_d)}{2[\rho_0 \rho_c t_d (-\sigma_\ell + \sigma_r) + (\rho_c A_{s\ell} f_{s\ell} + \rho_0 A_{f\ell} f_{f\ell})]} \quad (6.99)
\end{aligned}$$

Para torção pura tem-se $\sigma_\ell = 0$. Inserindo-se $\sigma_r = 0$ e $\varepsilon_d = \varepsilon_{ds}/2$ na expressão 6.99 tem-se:

$$\varepsilon_\ell = \varepsilon_d + \frac{\rho_c A_0(-\varepsilon_d)(-\sigma_d)}{(\rho_c A_{s\ell} f_{s\ell} + \rho_0 A_{f\ell} f_{f\ell})} \quad (6.100)$$

6.2.9.

Deformação Específica ε_t como Função de f_{ft} e f_{st}

Combinando-se as expressões 6.23 e 6.92 tem-se:

$$\text{sen}^2 \alpha \frac{(\varepsilon_t - \varepsilon_d)}{(\varepsilon_r - \varepsilon_d)} = \frac{A_0}{2\rho_0 t_d} \frac{(-\varepsilon_{ds})}{(\varepsilon_r - \varepsilon_d)}$$

segundo-se

$$\text{sen}^2 \alpha = \frac{A_0}{2\rho_0 t_d} \frac{(-\varepsilon_{ds})}{(\varepsilon_t - \varepsilon_d)} \quad (6.101)$$

Substituindo-se a expressão 6.95 na expressão 6.17 seguem-se:

$$\sigma_t = \sigma_d \text{sen}^2 \alpha + \sigma_r (1 - \text{sen}^2 \alpha) + \rho_{st} f_{st} + \rho_{ft} f_{ft}$$

$$\sigma_t = \sigma_d \text{sen}^2 \alpha + \sigma_r - \sigma_r \text{sen}^2 \alpha + \rho_{st} f_{st} + \rho_{ft} f_{ft}$$

$$\sigma_t = \sigma_r + \text{sen}^2 \alpha (\sigma_d - \sigma_r) + \rho_{st} f_{st} + \rho_{ft} f_{ft}$$

$$\text{sen}^2 \alpha = \frac{(\sigma_t - \sigma_r) - (\rho_{st} f_{st} + \rho_{ft} f_{ft})}{(\sigma_d - \sigma_r)}$$

$$\text{sen}^2 \alpha = \frac{-(\sigma_t - \sigma_r) + (\rho_{st} f_{st} + \rho_{ft} f_{ft})}{(-\sigma_d + \sigma_r)} \quad (6.102)$$

Substituindo-se as expressões 6.13, 6.15 e 6.102 na expressão 6.101 seguem-se:

$$\frac{A_0}{2\rho_0 t_d} \frac{(-\varepsilon_{ds})}{(\varepsilon_t - \varepsilon_d)} = \frac{-(\sigma_t - \sigma_r) + \left(\frac{A_{st}}{s_t t_d} f_{st} + \frac{A_{ft}}{s_{ft} t_d} f_{ft} \right)}{(-\sigma_d + \sigma_r)}$$

$$(\varepsilon_t - \varepsilon_d) = \frac{A_0(-\varepsilon_{ds})(-\sigma_d + \sigma_r)}{2\rho_0 t_d \left[-(\sigma_t - \sigma_r) + \left(\frac{A_{st}}{s_t t_d} f_{st} + \frac{A_{ft}}{s_{ft} t_d} f_{ft} \right) \right]}$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_d + \frac{A_0(-\varepsilon_{ds})(-\sigma_d + \sigma_r)}{2\rho_0 t_d \left[-(\sigma_t - \sigma_r) + \left(\frac{s_{ft} A_{st} f_{st} + s_t A_{ft} f_{ft}}{s_t s_{ft} t_d} \right) \right]}$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_d + \frac{A_0 s_t s_{ft} t_d (-\varepsilon_{ds})(-\sigma_d + \sigma_r)}{2\rho_0 t_d [-s_t s_{ft} t_d (\sigma_t - \sigma_r) + (s_{ft} A_{st} f_{st} + s_t A_{ft} f_{ft})]} \quad (6.103)$$

Para torção pura tem-se $\sigma_t = 0$. Inserindo-se $\sigma_r = 0$ e $\varepsilon_d = \varepsilon_{ds}/2$ na expressão 6.103 tem-se:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_d + \frac{A_0 s_t s_{ft} (-\varepsilon_{ds})(-\sigma_d)}{\rho_0 (s_{ft} A_{st} f_{st} + s_t A_{ft} f_{ft})} \quad (6.104)$$

6.2.10. Passos para Solução do Problema

Como o modelo proposto não considera a resistência à tração do concreto, o primeiro passo para a resolução do problema é obter o momento torçor de fissuração T_{cr} , que pode ser calculado pela seguinte expressão (Hsu, 1968 e Hsu, 1983):

$$T_{cr} = (1 + 4\rho_{s,total}) T_{np} \quad (6.105)$$

Sendo:

$$\rho_{s,total} = \rho_{st} + \rho_{sl} \quad (6.106)$$

e

$$T_{np} = 6(x^2 + 10)y\sqrt[3]{f'_c} \quad (6.107)$$

onde

f'_c – resistência a compressão do concreto;

$\rho_{s,total}$ – taxa de armadura de aço total;

T_{np} – momento torçor resistido pelo concreto.

x – largura da viga;

y – altura da viga.

Para o cálculo do ângulo de torção por unidade de comprimento θ_{cr} relativo à fissuração da viga, adota-se a expressão 3.15 apresentada no item 3.22, pois considera-se o concreto como material homogêneo e isótropo.

Calculados T_{cr} e θ_{cr} , o problema de vigas de concreto armado reforçadas com CFC solicitadas à torção passa a ser composto por 19 equações e 22 incógnitas, cuja solução do problema é obtida por um processo iterativo.

Inicialmente deve-se arbitrar valores para ε_d , ε_r e t_d e, ao final de cada passo iterativo, verifica-se se os valores assumidos para ε_r e t_d são iguais aos calculados, senão torna-se a repetir o processo.

A curva $T \times \theta$ é construída a partir dos valores assumidos para ε_d , ou seja, para cada valor de ε_d escolhido o problema converge para um par de valores (T, θ) . O fluxograma mostrado na Figura 6.14 ilustra esse procedimento de cálculo.

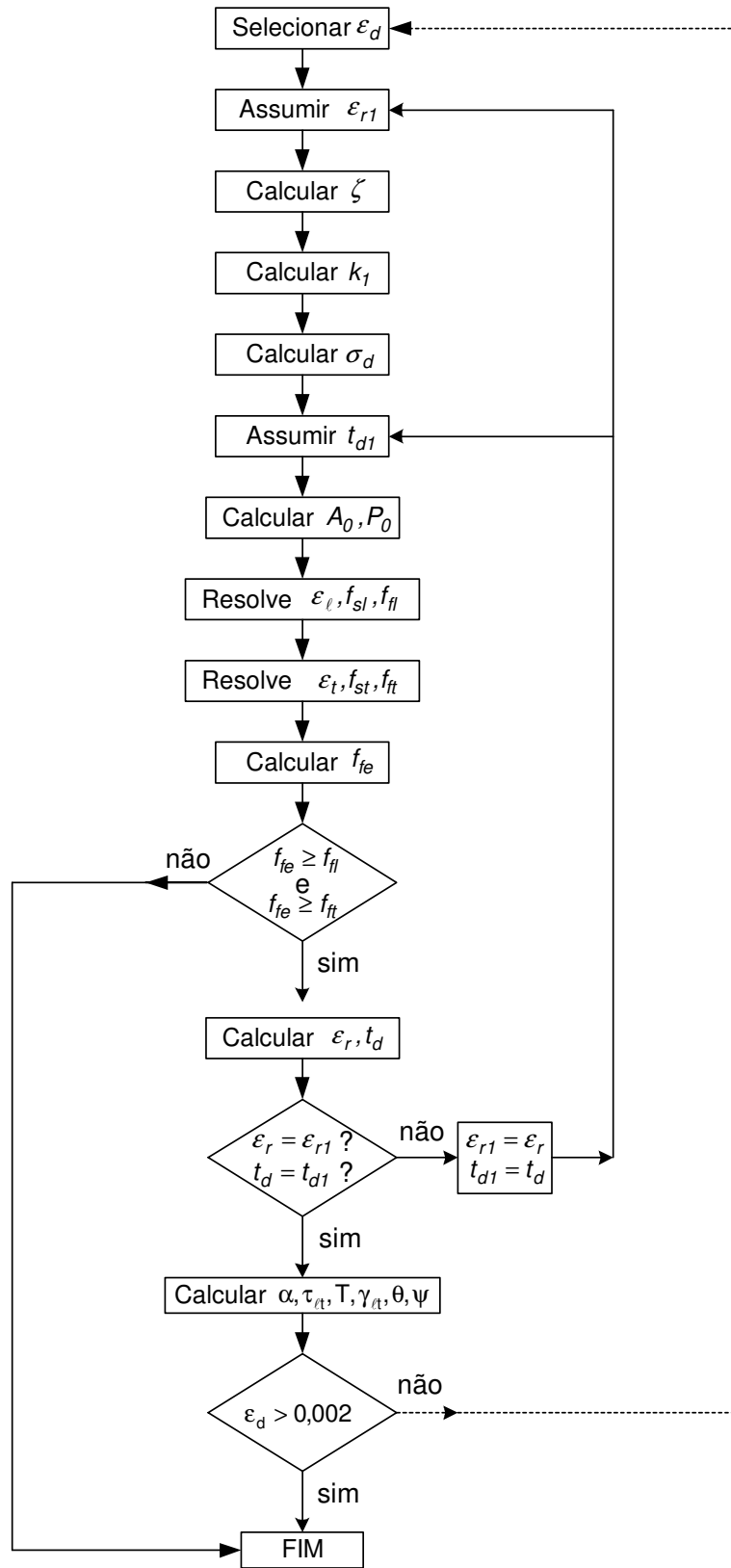


Figura 6.14 – Fluxograma para solução do problema.

6.2.11. Implementação Computacional

Foi desenvolvido um programa para o cálculo da curva $T \times \theta$ de vigas retangulares de concreto armado solicitadas à torção a partir do modelo TEAT (Figura 6.15). Utilizou-se a biblioteca IUP (*Portable User Interface*) para a composição da interface gráfica e a biblioteca XY para o traçado do gráfico, que são bibliotecas gráficas desenvolvidas e mantidas pelo TecGraf.

Além de calcular a curva teórica, o programa permite importar outras curvas. A Figura 6.15 mostra a interface gráfica do programa desenvolvido, cujas regiões numeradas são descritas a seguir:

1. Dados de entrada – características geométricas da viga e propriedades mecânicas dos materiais.
2. Curvas – lista das curvas teórica, calculada pelo programa, e experimentais, que são importadas pelo programa.
3. Região onde são traçadas as curvas $T \times \theta$. A curva teórica é sempre traçada em vermelho e as cores das curvas experimentais podem ser selecionadas ao pressionar o botão direito do mouse sobre o nome da curva localizado na região 2.
4. Área onde são informados os valores máximos de momento torçor e ângulo de torção por unidade de comprimento da curva teórica.

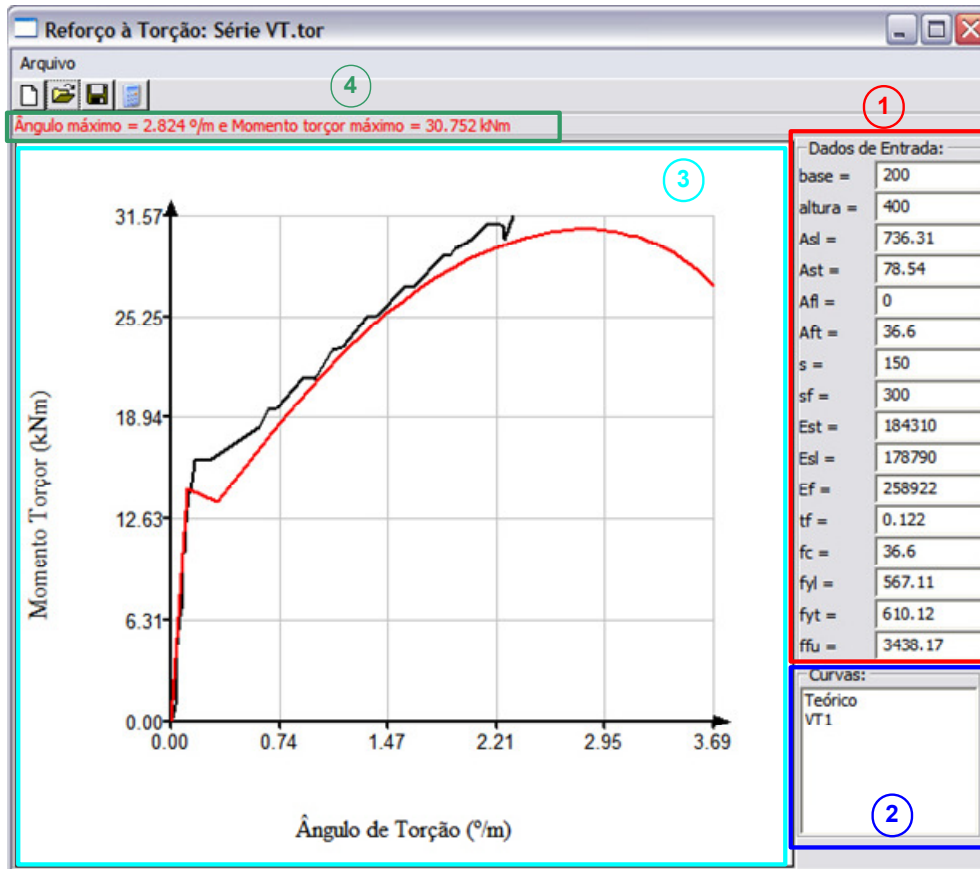


Figura 6.15 – Interface gráfica.

6.3. Modelo de Dimensionamento de Reforço com CFC para de Vigas de Concreto

O dimensionamento do reforço à torção com material compósito, adotando-se o modelo da Trelça Espacial Generalizada e o formato do Eurocode 2 (1991), é função da armadura longitudinal e dos estribos fechados, que em conjunto constituem esse reforço. Essa filosofia de dimensionamento é expressa por:

$$T_{Sd} \leq \begin{cases} T_{Rd1} \\ T_{Rd2} \end{cases} \quad (6.108)$$

onde

T_{Sd} – momento torçor de projeto;

T_{Rd1} – momento torçor resistido pelas bielas;

T_{Rd2} – momento torçor resistido pelas armaduras (de aço e de CFC).

O momento torçor resistido pelas bielas é dado por:

$$T_{Rd1} = 2\nu f_{cd} \frac{tA_k}{(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{cotg}\alpha)} \quad (6.109)$$

sendo

$$\nu = 0,7 \left(0,7 - \frac{f_{ck}}{200} \right) \geq 0,35 \quad (6.110)$$

onde

f_{cd} – resistência à compressão de cálculo do concreto;

ν – fator de efetividade do concreto;

f_{ck} – resistência característica do concreto (MPa);

α – ângulo de inclinação das bielas.

A redução em 30% no valor de ν , no caso da torção, deve-se ao fato das bielas serem flexo-comprimidas, e no caso da força cortante elas são comprimidas. Quando da torção as bielas assumem a forma de uma superfície de dupla curvatura (parabolóide hiperbólico) conforme mostrado no item 6.2.4. O intervalo de variação do ângulo de inclinação das bielas é $32^\circ \leq \alpha \leq 68^\circ$ (Hsu, 1993).

As parcelas do momento torçor devidas às armaduras de reforço são obtidas por meio da condição de resistência da biela:

$$T_{Rd2} = T_{Rd,RC} + T_{Rd,CFC} \quad (6.111)$$

onde a parcela correspondente à resistência da viga sem reforço é dada por

$$T_{Rd,RC} = 2A_k \operatorname{tg}\alpha \frac{A_{St} f_{ytd}}{u_k} = 2A_k \operatorname{cotg}\alpha \frac{A_{St} f_{ytd}}{s} \quad (6.112)$$

onde A_k, u_k são, respectivamente, a área definida pela linha média da seção admitida com um tubo de paredes finas de espessura t , e o perímetro dessa área.

As expressões anteriores mostram que o reforço em CFC somente pode ser executado se for garantida a condição de integridade das bielas. O acréscimo de resistência deve ser determinado de modo a evitar a ruptura das bielas, donde o dimensionamento deve ser efetuado considerando-se a seguinte parcela de momento torçor:

$$\Delta T_{Sd} = T_{Rd1} - T_{Rd,RC} \quad (6.113)$$

O momento torçor fornecido pela expressão 6.113 deve ser resistido pelas armaduras de reforço com CFC:

$$\Delta T_{Sd} \leq \begin{cases} T_{Rdt,CFC} \\ T_{Rdl,CFC} \end{cases} \quad (6.114)$$

sendo $T_{Rdt,CFC}$, $T_{Rdl,CFC}$ as parcelas do reforço transversal e longitudinal.

6.3.1. Armadura transversal de reforço

O Bulletin 14 da FIB fornece para a parcela da armadura transversal do reforço em CFC no caso de envolvimento completo da viga a seguinte expressão:

$$T_{Rdt,CFC} = 2bh\varepsilon_{ek,f}E_f t_f \cot\alpha \quad (6.115)$$

onde

$\varepsilon_{fk,e}$ – deformação específica característica efetiva do CFC;

E_f – módulo de elasticidade do CFC na direção de alinhamento das fibras;

t_f – espessura do reforço;

b_f – largura do reforço;

s_f – espaçamento do reforço.

Para o arranjo do reforço em **U** com os extremos ancorados e em estribos fechados, essa parcela é dada por:

$$T_{Rdt,CFC} = 2bh\varepsilon_{ek,f}E_f \frac{t_f b_f}{s_f} \cot\alpha \quad (6.116)$$

6.3.2. Armadura Longitudinal de Reforço

No caso das fibras do CFC serem alinhadas na direção do eixo da viga o Bulletin 14 da FIB fornece:

$$T_{Rdl,CFC} = 2bh\varepsilon_{ek,f}E_f \frac{A_{fl}}{u_k} \tan\alpha \quad (6.117)$$

onde A_{fl} é a área da armadura longitudinal de reforço.

6.3.3. Ângulo da Biela Flexo-Comprimida

As equações de equilíbrio 6.16, 6.17 e 6.6 para análise de vigas de concreto armado reforçadas com CFC solicitadas à torção, deduzidas a partir do modelo do painel fissurado são:

$$\begin{cases} \sigma_\ell = \sigma_d \cos^2 \alpha + \sigma_r \operatorname{sen}^2 \alpha + \rho_{s\ell} f_{s\ell} + \rho_{f\ell} f_{f\ell} \\ \sigma_t = \sigma_d \operatorname{sen}^2 \alpha + \sigma_r \cos^2 \alpha + \rho_{st} f_{st} + \rho_{ft} f_{ft} \\ \tau_{\ell t} = (-\sigma_d + \sigma_r) \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha \end{cases}$$

Substituindo-se a relação trigonométrica dada pela expressão 6.95 na equação 6.16 seguem-se:

$$\begin{aligned} \sigma_\ell &= \sigma_d \cos^2 \alpha + \sigma_r (1 - \cos^2 \alpha) + \rho_{s\ell} f_{s\ell} + \rho_{f\ell} f_{f\ell} \\ \sigma_\ell &= \sigma_d \cos^2 \alpha + \sigma_r - \sigma_r \cos^2 \alpha + \rho_{s\ell} f_{s\ell} + \rho_{f\ell} f_{f\ell} \\ -\sigma_\ell + \sigma_r + \rho_{s\ell} f_{s\ell} + \rho_{f\ell} f_{f\ell} &= (-\sigma_d + \sigma_r) \cos^2 \alpha \end{aligned} \quad 6.118$$

De forma análoga substituindo-se a equação 6.95 na equação 6.17 seguem-se:

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \sigma_d \operatorname{sen}^2 \alpha + \sigma_r (1 - \operatorname{sen}^2 \alpha) + \rho_{st} f_{st} + \rho_{ft} f_{ft} \\ \sigma_t &= \sigma_d \operatorname{sen}^2 \alpha + \sigma_r - \sigma_r \operatorname{sen}^2 \alpha + \rho_{st} f_{st} + \rho_{ft} f_{ft} \\ -\sigma_t + \sigma_r + \rho_{st} f_{st} + \rho_{ft} f_{ft} &= (-\sigma_d + \sigma_r) \operatorname{sen}^2 \alpha \end{aligned} \quad 6.119$$

Eliminando-se $(-\sigma_d + \sigma_r)$ das expressões 6.119 e 6.6:

$$\begin{aligned} -\sigma_\ell + \sigma_r + \rho_{s\ell} f_{s\ell} + \rho_{f\ell} f_{f\ell} &= \frac{\tau_{\ell t}}{\operatorname{sen} \alpha \cos \alpha} \cos^2 \alpha \\ -\sigma_\ell + \sigma_r + \rho_{s\ell} f_{s\ell} + \rho_{f\ell} f_{f\ell} &= \tau_{\ell t} \operatorname{cotg} \alpha \end{aligned} \quad 6.120$$

De forma análoga, eliminando $(-\sigma_d + \sigma_r)$ das equações 6.120 e 6.6 seguem-se:

$$\begin{aligned} -\sigma_t + \sigma_r + \rho_{st} f_{st} + \rho_{ft} f_{ft} &= \frac{\tau_{\ell t}}{\operatorname{sen} \alpha \cos \alpha} \operatorname{sen}^2 \alpha \\ -\sigma_t + \sigma_r + \rho_{st} f_{st} + \rho_{ft} f_{ft} &= \tau_{\ell t} \operatorname{tan} \alpha \end{aligned} \quad 6.121$$

Desprezando-se a resistência a tração do concreto, ou seja, $\sigma_r = 0$ e sendo para torção pura $\sigma_\ell = 0$ e $\sigma_t = 0$ e considerando-se a relação trigonométrica:

$$\operatorname{sen} \alpha \cos \alpha = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{cotg} \alpha} \quad 6.122$$

as equações de equilíbrio podem ser escritas como

$$\rho_{sl} f_{sl} + \rho_{fl} f_{fl} = \tau_{lt} \cot \alpha \quad 6.123$$

$$\rho_{st} f_{st} + \rho_{ft} f_{ft} = \tau_{lt} \operatorname{tg} \alpha \quad 6.124$$

$$(-\sigma_d) = \tau_{lt} (\operatorname{tg} \alpha + \cot \alpha) \quad 6.125$$

Do círculo de Mohr para as deformações mostrado na Figura 6.6, tem-se a equação de compatibilidade dada por:

$$\operatorname{tg}^2 \alpha = \frac{\varepsilon_\ell - \varepsilon_d}{\varepsilon_t - \varepsilon_d} \quad 6.126$$

Admitindo-se a equação constitutiva do concreto por meio de uma linearização (Figura 6.16), e a aderência entre o concreto e as armaduras de aço e de CFC, seguem-se para as deformações específicas:

$$\varepsilon_d = \frac{\tau}{E_{c,sec}} (\operatorname{tg} \alpha + \cot \alpha) \quad 6.127$$

$$\varepsilon_t = \frac{\tau}{E_{c,sec}} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{(n_s \rho_{st} + n_f \rho_{ft})} \quad 6.128$$

Supondo-se que a deformação específica do concreto ao longo do painel fissurado seja uma média entre a deformação específica de sua parte superior e a deformação específica da parte inferior resulta:

$$\varepsilon_\ell = \frac{\varepsilon_{sup} + \varepsilon_{inf}}{2} \quad 6.129$$

$$\varepsilon_\ell = - \frac{\tau}{E_{c,sec}} \frac{\cot \alpha}{n_s \rho_{sl} + n_f \rho_{fl}} \quad 6.130$$

sendo

$$n_s = \frac{E_s}{E_c} \quad 6.131$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} \quad 6.132$$

onde

$E_{c,sec}$ – módulo de elasticidade secante do concreto;

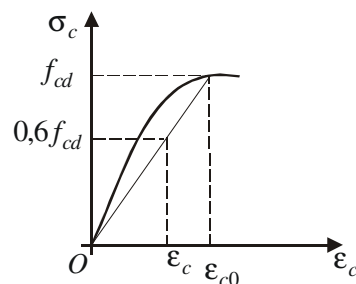


Figura 6.16 – Linearização da relação constitutiva do concreto.

Substituindo-se as expressões 6.127, 6.128 e 6.130 na expressão 6.126 tem-se:

$$tg^2 \alpha = \frac{tg \alpha + cotg \alpha + \frac{cotg \alpha}{n_s \rho_{sl} + n_f \rho_{fl}}}{tg \alpha + cotg \alpha + \frac{tg \alpha}{(n_s \rho_{st} + n_f \rho_{ft})}} \quad 6.133$$

Isolando-se $tg \alpha$ na expressão 6.133:

$$tg^2 \alpha = \frac{\left(1 + \frac{1}{n_s \rho_{sl} + n_f \rho_{fl}}\right) \frac{1}{tg \alpha} + tg \alpha}{\left(1 + \frac{1}{(n_s \rho_{st} + n_f \rho_{ft})}\right) tg \alpha + \frac{1}{tg \alpha}} \quad 6.134$$

e pondo-se

$$A = \left(1 + \frac{1}{n_s \rho_{sl} + n_f \rho_{fl}}\right) \quad 6.135$$

$$B = \left(1 + \frac{1}{n_s \rho_{st} + n_f \rho_{ft}}\right) \quad 6.136$$

tem-se

$$tg^2 \alpha = \frac{A \frac{1}{tg \alpha} + tg \alpha}{B tg \alpha + \frac{1}{tg \alpha}}$$

$$tg^2 \alpha = \frac{\frac{A + tg^2 \alpha}{tg \alpha}}{\frac{B tg^2 \alpha + 1}{tg \alpha}}$$

$$tg^2 \alpha = \frac{A + tg^2 \alpha}{tg \alpha} \frac{tg \alpha}{B tg^2 \alpha + 1}$$

que simplificada fica

$$tg^2 \alpha = \frac{A + tg^2 \alpha}{B tg^2 \alpha + 1}$$

Seguindo-se:

$$tg^2 \alpha (B tg^2 \alpha + 1) = A + tg^2 \alpha$$

$$B tg^4 \alpha + tg^2 \alpha = A + tg^2 \alpha$$

donde

$$tg^4 \alpha = \frac{A}{B} \quad 6.137$$

Substituindo-se as expressões 6.135 e 6.136 na expressão 6.137 resulta:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{1 + \frac{1}{n_s \rho_{sl} + n_f \rho_{fl}}}{1 + \frac{1}{n_s \rho_{st} + n_f \rho_{ft}}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad 6.138$$

O ângulo de inclinação das bielas α é admitido igual ao ângulo de inclinação das fissuras e igual ao ângulo de inclinação das deformações específicas principais. Após o reforço com CFC esse ângulo varia de acordo com a equação 6.138 (Aprile e Bendetti, 2004).

A consideração da aderência entre o CFC e o substrato de concreto é feita por meio do cálculo da tensão efetiva apresentado por Chen e Teng (2003), detalhado no item 6.2.5.3.

O fluxograma mostrado na Figura 6.17 ilustra o procedimento para dimensionamento utilizando-se esta sistemática.

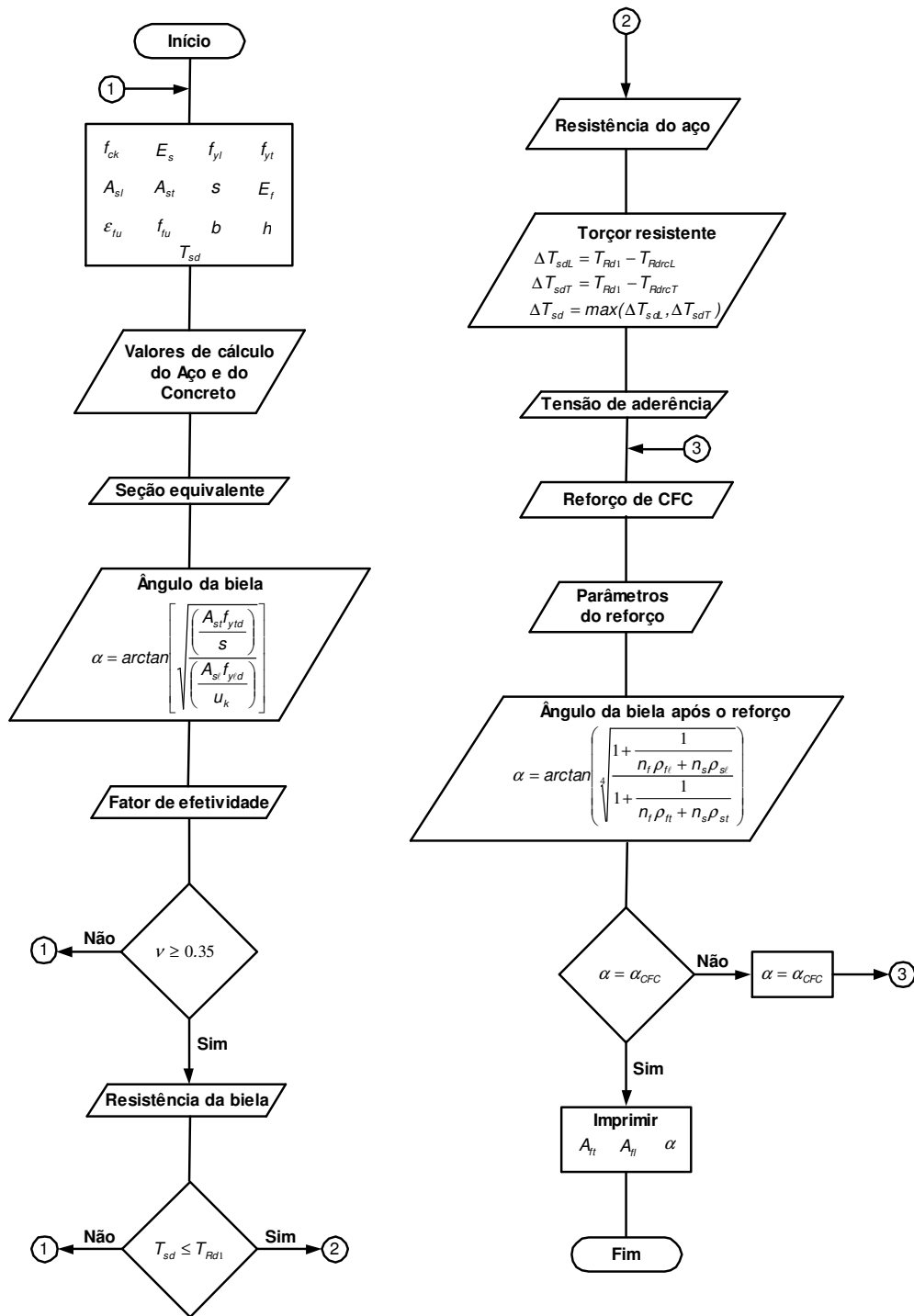


Figura 6.17 – Fluxograma para dimensionamento de reforço com CFC em vigas solicitadas à torção.

6.4. Exemplos Numéricos

Para ilustração dos modelos apresentados são calculados os momentos torçores últimos para as vigas C1, C2, C4 e C5 ensaiadas por Ghobarah *et al.* (2002).

A Tabela 6.1 compara os resultados experimentais e os resultados teóricos obtidos por meio do modelo da treliça espacial generalizada com abrandamento de tensões.

Tabela 6.1 – Comparação entre resultados experimentais e o modelo da treliça espacial generalizada com abrandamento de tensões para vigas reforçadas à torção com CFC.

Viga	A_{ft}/s_{ft}	Experimental	Teórico	Exp. / Teor.
C1	0,165	17,97	17,03	1,06
C4	0,11	15,83	16,01	0,99
C2	0,083	13,96	15,14	0,92
C5	0,066	13,41	15,03	0,89
			Média	0,96
			Des. Padrão	0,07
			Coef. Var. (%)	7,5

A Tabela 6.2 compara os resultados experimentais e os resultados teóricos calculados por meio do modelo proposto para o dimensionamento de reforço com CFC.

Tabela 6.2 – Comparação entre os resultados experimentais e o modelo de dimensionamento de reforço com CFC para as vigas solicitadas à torção.

Viga	A_{ft}/s_{ft}	Experimental	Teórico	Exp / Teor.
C1	0,165	17,97	17,38	1,03
C4	0,11	15,83	15,91	1,00
C2	0,083	13,96	15,15	0,92
C5	0,066	13,41	14,70	0,91
			Média	0,97
			Des. Padrão	0,06
			Coef. Var. (%)	6,1

Os resultados obtidos nos dois modelos apresentaram boa aproximação em relação aos resultados experimentais da bibliografia. No modelo da treliça espacial generalizada com abrandamento de tensões, a relação *Exp./Teór.* obtida foi de 0,96 e o coeficiente de variação de 7,5%. No modelo de dimensionamento de reforço a relação *Exp./Teór.* obtida foi de 0,97 e o coeficiente de variação de 6,1%.

Verificou-se que quanto menor a taxa de armadura transversal de reforço maior é a diferença entre resultados experimentais e teóricos. Esse problema, ao que tudo indica, está relacionado com o modelo de aderência entre o CFC e o substrato de concreto.

7

Análise Experimental de Vigas Solicitadas à Torção Reforçadas com Tecido de Fibras de Carbono

7.1.

Introdução

Neste capítulo são apresentadas as características e as propriedades dos materiais utilizados na confecção das vigas do programa experimental, as dimensões destas vigas, o esquema de ensaio à torção, os dados sobre a concretagem, a instrumentação, os sistemas de aplicação de torção, a descrição das etapas de aplicação do reforço, além de todas as etapas dos ensaios.

7.2.

Ensaio de Caracterização dos Materiais

7.2.1.

Tecido de Fibras de Carbono

O sistema de reforço com compósitos de fibras de carbono utilizado nesta pesquisa foi fornecido pela Sika. Este sistema é composto por tecido de fibras de carbono SIKAWRAP®-230 C e adesivo epóxi de média viscosidade (tixotrópico), e bicomponente de pega normal SIKADUR®300 (Sika, 2005).

As propriedades segundo o manual do fabricante são:

a) SIKAWRAP®-230 C

- Base: tecido de fibras de carbono unidirecional.
- Cor: preta.
- Conteúdo de fibras em volume: 99%.
- Densidade: 1,78 g/cm³.
- Peso: 220 g/m².
- Temperatura máxima de serviço: +50 °C.
- Dimensão: 30 cm de largura por 50 m de comprimento.
- Espessura: 0,122 mm.
- Módulo de elasticidade: 230 GPa.
- Resistência à tração 4.100 MPa.

- Deformação específica máxima 1,7%.

Obs.: as propriedades mecânicas correspondem à direção longitudinal.

b) SIKADUR® 330

- Cor (componente A): branco.
- Cor (componente B): cinza escuro.
- Mistura (A+B): cinza.
- Relação em peso (A+B): 4:1
- Vida útil da mistura (*Pot-Life*): 40 minutos (25 °C/50% UR).

O consumo de adesivo epóxi SIKADUR® 330 recomendado pelo fabricante é de:

- 0,7 a 1,2 kg/m² para a camada de impregnação do substrato de concreto;
- 0,5 kg/m² para a camada de proteção.

Para a caracterização das propriedades mecânicas do reforço de CFC utilizado nesta pesquisa foram realizados ensaios seguindo-se as recomendações da ASTM D3039/3039M *Standard Test Method for Tensile Properties of Matrix Composite Material* (2000), que especifica os procedimentos para a determinação da resistência à tração e o módulo de elasticidade do CFC.

A ASTM D3039/3039M propõe as dimensões mínimas necessárias para que o corpo-de-prova a ser ensaiado tenha um número suficiente de fibras em sua seção transversal que represente suas características (Tabela 7.1).

Tabela 7.1 – Dimensões recomendadas pela ASTM D3039/3039M para ensaios em CFC.

Orientação das fibras	Largura (mm)	Compr. (mm)	Espessura (mm)	Compr. da aba (mm)	Espessura da aba (mm)	Ângulo da aba (°)
0° unidir.	15	250	1,0	56	1,5	7 ou 90
90° unidir.	25	175	2,0	25	1,5	90
Fios descon.	25	250	2,5	–	–	–

Oito corpos-de-prova de tecido unidirecional de fibras de carbono revestidos com resina epóxi com dimensões de 15 mm de largura e 250 mm de comprimento foram ensaiados à tração (Figura 7.1 e 7.2).

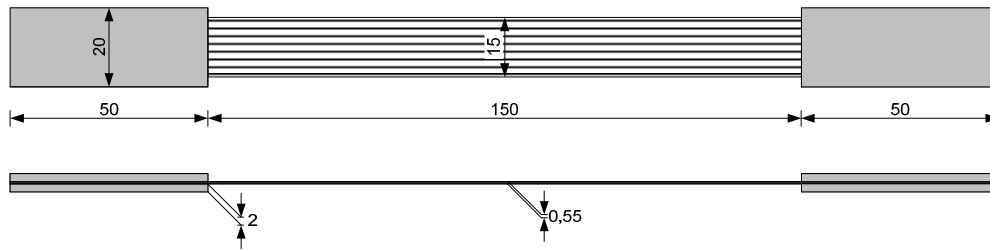


Figura 7.1 – Dimensões dos corpos-de-prova de CFC ensaiados (dimensões em mm).

Os corpos-de-prova foram instrumentados com extensômetros elétricos de resistência para a leitura da deformação específica do CFC durante a realização dos ensaios, permitindo desta forma a determinação do módulo de elasticidade e da deformação última do CFC, e o traçado do diagrama tensão-deformação específica.



Figura 7.2 – Corpos-de-prova de CFC.

Os ensaios foram realizados na máquina MTS do Laboratório de Fadiga do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, com capacidade de carga de 250 kN (Figura 7.3).

A velocidade de ensaio foi realizada por controle de deslocamento de 2 mm/min, atendendo à recomendação da ASTM D3039/3039M.



Figura 7.3 – Realização dos ensaios dos corpos-de-prova de CFC.

Durante a realização dos ensaios, as leituras referentes ao corpo-de-prova número 2 foram perdidas, devido a problemas de configuração no programa responsável pela aquisição de dados. A Tabela 7.2 apresenta os resultados obtidos de força de ruptura, tensão de ruptura, deformação específica última e módulo de elasticidade E_f .

Tabela 7.2 – Resultados dos ensaios dos corpos-de-prova de CFC.

	F_u (kN)	Tensão (MPa)	ϵ_{fu} (‰)	E_f (MPa)
CP1	6,206	3391,29	12,091	281778
CP3	5,961	3257,87	12,778	256946
CP4	6,094	3329,89	13,465	248086
CP5	6,616	3615,41	14,437	254301
CP6	6,943	3794,19	15,113	252850
CP7	6,177	3375,28	13,324	253624
CP8	6,045	3303,24	12,822	258570
Média	6,292	3438,17	13,433	258022
DP	3,56	194,40	1,037	10988
CV	5,65%	5,65%	7,72%	4,26%

A Figura 7.4 apresenta os diagramas tensão-deformação específica dos corpos-de-prova de CFC.

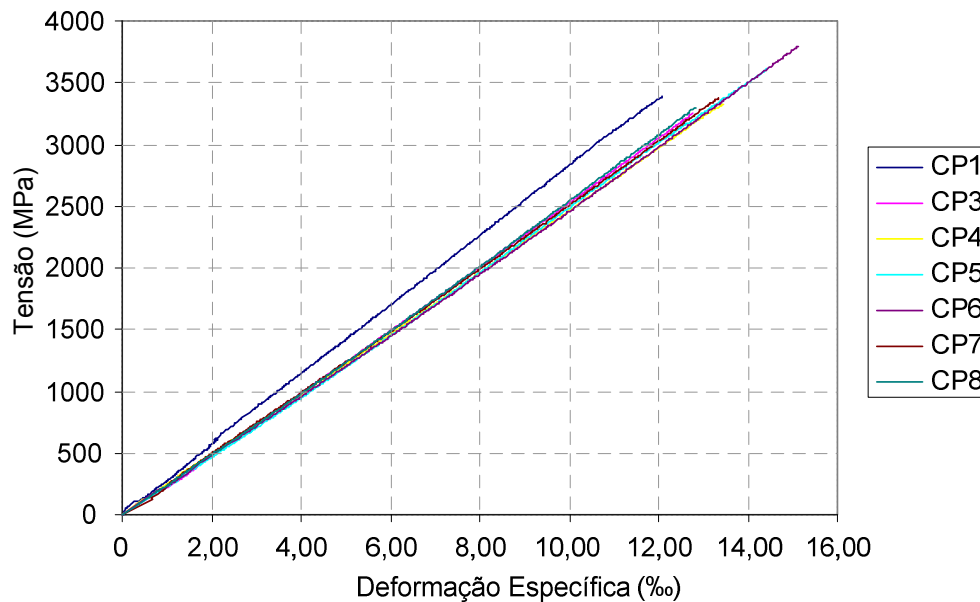


Figura 7.4 – Diagrama tensão-deformação específica dos corpos-de-prova de CFC.

7.2.2. Aço

O aço utilizado para armar as vigas foi do tipo CA 50 fabricado pela Gerdau. Para a determinação das propriedades mecânicas do aço, foram realizados em laboratório ensaios de resistência à tração, do módulo de elasticidade, e foi traçado o diagrama tensão-deformação específica.

Foram ensaiados à tração seis corpos-de-prova no Laboratório de Fadiga do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, de acordo com a NBR-6152 (1980). As amostras do aço, três de $\phi 10$ mm e três de $\phi 12,5$ mm, foram ensaiadas na máquina MTS, com capacidade de 250 kN (Figura 7.5).

A Tabela 7.3 mostra os resultados das tensões de escoamento e de ruptura dos ensaios realizados, e as Figuras 7.6 e 7.7 apresentam os diagramas tensão-deformação específica. A deformação específica de escoamento ε_y foi de 2‰ e a deformação específica última ε_{su} foi maior que 10‰.



Figura 7.5 – Ensaio das barras de aço.

Tabela 7.3 – Resultados dos ensaios das amostras de aço.

	AMOSTRA	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E_s (GPa)
ϕ 10	CP 1	578,18	743,43	182,36
	CP 2	563,63	736,09	187,21
	CP 3	559,53	738,70	183,36
	Média	567,11	739,407	184,31
	Desvio Padrão	9,80	3,72	2,56
	Coef. Variação	1,73%	0,50%	1,39%
	ϕ 12.5	CP 1	610,12	734,26
CP 2		627,94	748,90	178,47
CP 3		599,93	726,70	176,49
Média		612,66	736,62	178,79
Desvio Padrão		14,18	11,29	2,48
Coef. Variação		2,31%	1,53%	1,38%

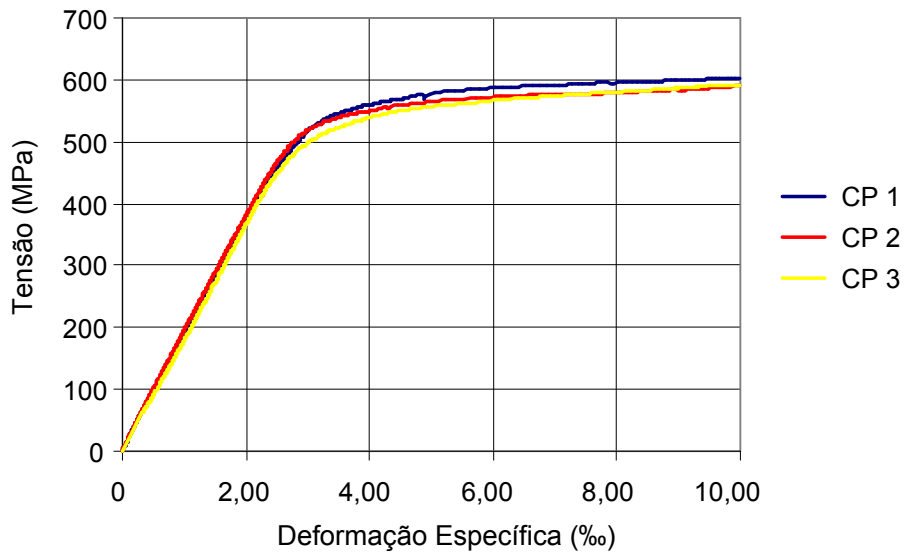


Figura 7.6 – Diagrama tensão deformação específica do aço – $\phi 10\text{ mm}$.

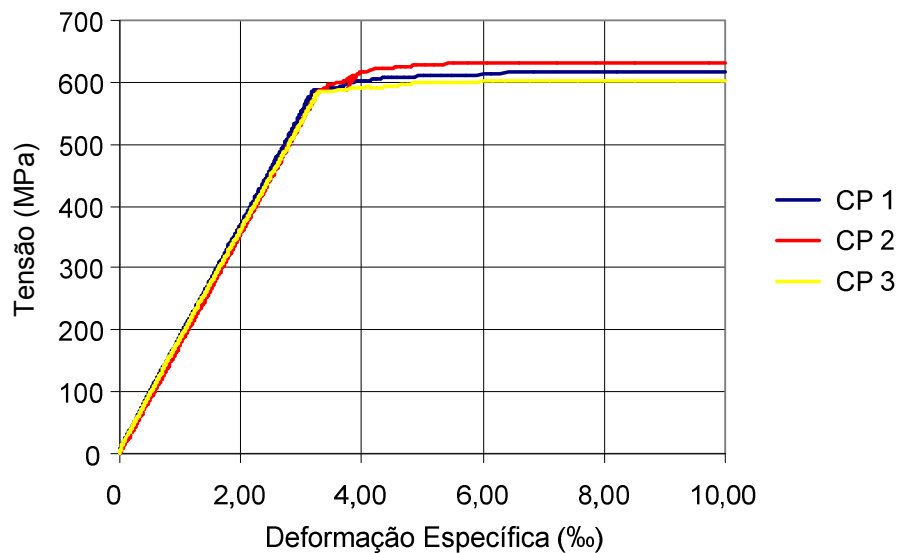


Figura 7.7 – Diagrama tensão deformação específica do aço – $\phi 12,5\text{ mm}$.

7.2.3. Concreto

O concreto das sete vigas do programa experimental foi fornecido pela empresa LAFARGE BRASIL S/A. A concretagem foi executada no dia 16 de dezembro de 2004 e durou aproximadamente 1 h : 45 min. O concreto fornecido pela empresa foi dosado para atingir a resistência de 30 *MPa* aos 28 dias.

Para o preparo do concreto foi utilizado Cimento Portland de Alto Forno CP III 40 RS fabricado pela MAÚA. O concreto foi misturado de forma a se obter

4 m³ de material num caminhão betoneira com capacidade de 8 m³, e apresentou 10 cm de abatimento do tronco de cone. O consumo de materiais necessários por m³ de concreto é apresentado na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 – Consumo de materiais por m³ de concreto.

Material	Quantidade
Cimento	323 kg/m ³
Brita 1 (Britabrás)	996 kg/m ³
Areia natural quartzosa (Areminas areia)	492 kg/m ³
Areia artificial de granito (Britabrás)	338 kg/m ³
Água	188 ℓ
Aditivo Chrysoplast 213 (Chryso)	0,969 ℓ

Este consumo é equivalente ao traço 1 : 2,57 : 3,08, com fator água-cimento de 0,582 e 52,3% de argamassa.

7.2.3.1. Resistência à Compressão

Para o controle tecnológico do concreto utilizado nas vigas foram moldados durante a concretagem 30 corpos-de-prova cilíndricos, com dimensões de 10 cm × 20 cm, e 20 corpos-de-prova com dimensões de 15 cm × 30 cm, de acordo com as recomendações da NBR-5738 (1993).

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados nas idades de 7 dias, 28 dias e nos dias de ensaios das vigas, seguindo-se as recomendações da NBR-5739 (1993). Os ensaios de resistência à compressão foram realizados na prensa CONTENCO, com capacidade de 2400 kN, do Laboratório de Estruturas e Matérias (LEM) da PUC-Rio. O concreto atingiu em média 29,7 MPa após 28 dias da concretagem, valor superior à resistência de dosagem.

Como as vigas foram ensaiadas com idades do concreto bem avançadas, mais de 300 dias, foi considerado o mesmo valor de f_{cm} .

Os valores médios da resistência à compressão do concreto são mostrados na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 – Valores médios da resistência à compressão do concreto.

Viga	Idade	Número de Corpos-de-Prova	Resistência (MPa)
–	7 dias	3	21,7
–	28 dias	3	29,7
Vigas	> 300 dias	18	36,6

A evolução da resistência à compressão do concreto é mostrada na Figura 7.7.

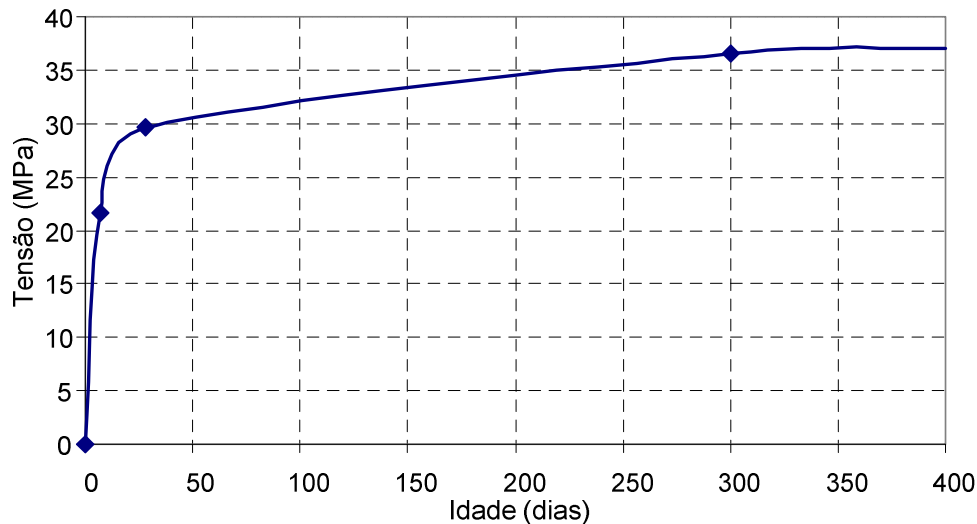


Figura 7.8 – Variação da resistência média à compressão do concreto para diferentes idades.

7.2.3.2.

Resistência à Tração por Compressão Diametral de Corpos-de-Prova Cilíndricos

A determinação da resistência à tração do concreto utilizado na construção das vigas foi realizada seguindo-se as recomendações da NBR-7222/1994 Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.

Segundo a NBR 7122/1994, a resistência à tração do concreto por compressão diametral é determinada pela expressão 7.1:

$$f_{t,D} = \frac{2F}{\pi dL} \quad (7.1)$$

onde

F – é a força máxima aplicada;

d – é o diâmetro do corpo-de-prova;

L – é a altura do corpo-de-prova.

No total foram ensaiados seis corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 10 cm x 20 cm. A resistência média à tração foi de 3,01 MPa, o desvio padrão de 0,14 e o coeficiente de variação de 4,70% (Tabela 7.6 e Figura 7.9).

Tabela 7.6 – Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

Corpo-de-prova	Força máxima (kN)	$f_{t,D}$ (MPa)
1	92,56	2,95
2	98,60	3,14
3	96,06	3,06
4	99,03	3,15
5	86,89	2,77
6	95,38	3,04
Média	94,76	3,01
Desvio padrão	4,51	0,14
Coef. de variação	4,76%	4,70%



Figura 7.9 – Ensaio de determinação da resistência à tração do concreto por compressão diametral.

7.2.3.3. Módulo de Elasticidade e Diagrama Tensão-Deformação Específica

A determinação do módulo de elasticidade secante do concreto foi realizada seguindo-se as recomendações da NBR 8522 (1984) – Concreto – Determinação do Módulo de Deformação Estática e Diagrama – Tensão-Deformação.

Adotou-se o plano de carga 3 da NBR 8522 (1984) que simula a estrutura em seu primeiro carregamento, e que fornece o módulo de deformação secante e permite o traçado do diagrama tensão-deformação específica.

No total foram ensaiados três corpos-de-prova, instrumentados com dois extensômetros elétricos de resistência colados a meia altura em lados opostos.

Inicialmente foi executada a centragem do corpo-de-prova, por meio de um pré-carregamento de até 10% da força prevista de ruptura, para que as deformações específicas lidas nos extensômetros fossem compatibilizadas, de modo que essas deformações não apresentassem desvios superiores a 20% da maior leitura. A previsão da força de ruptura foi obtida por meio de ensaios preliminares de resistência à compressão em outros três corpos-de-prova (Figura 7.10).



Figura 7.10 – Ensaio de módulo de elasticidade do concreto.

Após a centragem do corpo-de-prova, foi aplicado um carregamento crescente à velocidade de 0,50 MPa/s, com variação máxima de $\pm 0,05$ MPa,

efetuando-se pausas de 60 a 120 segundos entre cada estágio de carregamento.

De acordo com a NBR 8522 (1984) foram realizadas nove leituras, sendo que a leitura inicial ℓ_0 refere-se a $\sigma_{inf} = 0,5$ MPa. A leitura seguinte, $\ell_{0,1}$, é referente a $0,1f_c$. As demais, $\ell_{0,2}$, $\ell_{0,3}$, $\ell_{0,4}$, $\ell_{0,5}$, $\ell_{0,6}$, $\ell_{0,7}$ e $\ell_{0,8}$ foram realizadas a cada incremento de $0,1f_c$.

Após a leitura $\ell_{0,8}$ prosseguiu-se o carregamento do corpo-de-prova à velocidade de $0,5$ MPa/s até a sua ruptura.

O módulo de deformação secante em cada leitura é dada por:

$$E_{sec,n} = \frac{\sigma_n - \sigma_{inf}}{\epsilon_n - \epsilon_0} \quad 7.2$$

onde

$E_{sec,n}$ – é o módulo de deformação secante correspondente à inclinação da reta unindo os pontos do diagrama tensão-deformação específica relativos às tensões $\sigma_{inf} = 0,5$ MPa e σ_n ;

ϵ_n – deformação específica para o cálculo do módulo secante;

$n = 0,1 \dots 0,7$ ou $0,8$;

ϵ_0 – deformação específica correspondente à leitura ℓ_0 ;

A Tabela 7.7 mostra os resultados dos ensaios em três corpos-de-prova. São apresentados a força máxima, a tensão máxima, a deformação específica média máxima, e o módulo de elasticidade secante referente a uma tensão de $0,3 f_c$.

Tabela 7.7 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade.

Corpo-de-prova	Força máx. (kN)	Tensão máx. (MPa)	$\bar{\epsilon}_{c,máx}$ (‰)	$E_{sec,0,3}$ (MPa)
1	643,2	36,4	2,459	23418,5
2	682,1	38,6	2,599	24261,9
3	646,8	36,6	2,484	26240,3
Média	657,4	37,2	2,514	24640,3
Desvio padrão	21,50	1,22	0,075	1448,5
Coef. de variação	3,27%	3,27%	2,97%	5,88%

Os resultados foram considerados válidos, pois a resistência à compressão máxima obtida para cada corpo-de-prova não diferiu em mais de 20% da resistência prevista f_c .

As Figuras 7.11, 7.12 e 7.13 apresentam os diagramas tensão-deformação específica dos corpos-de-prova ensaiados. As curvas mostradas referem-se aos dois extensômetros elétricos de resistência colados na superfície de cada corpo-de-prova.

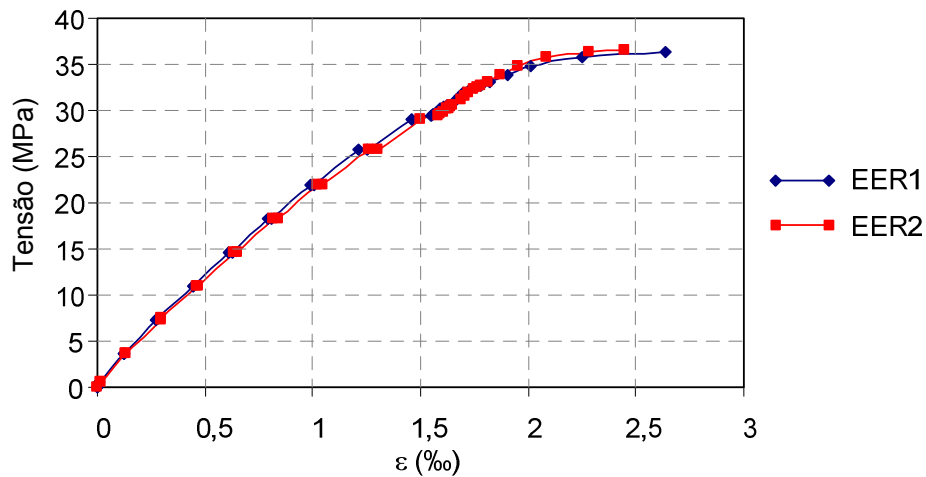


Figura 7.11 – Gráfico tensão x deformação específica do corpos-de-prova 1.

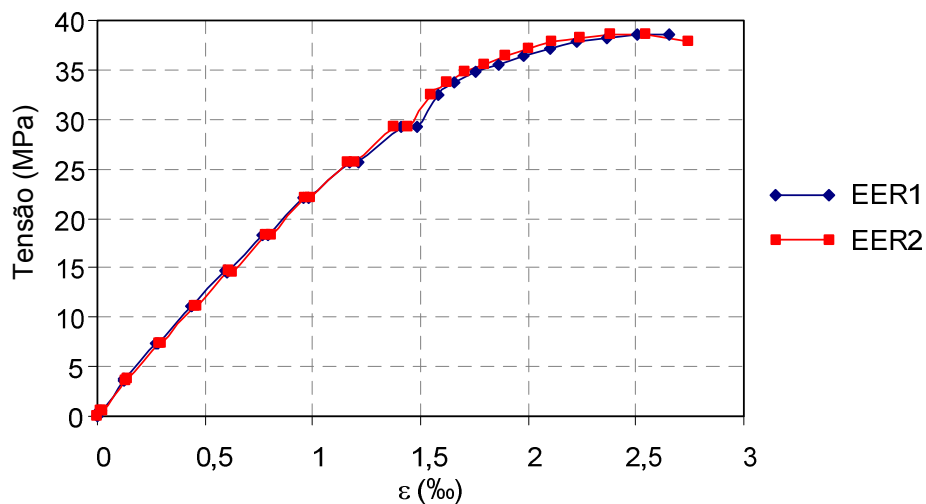


Figura 7.12 – Gráfico tensão x deformação específica do corpos-de-prova 2.

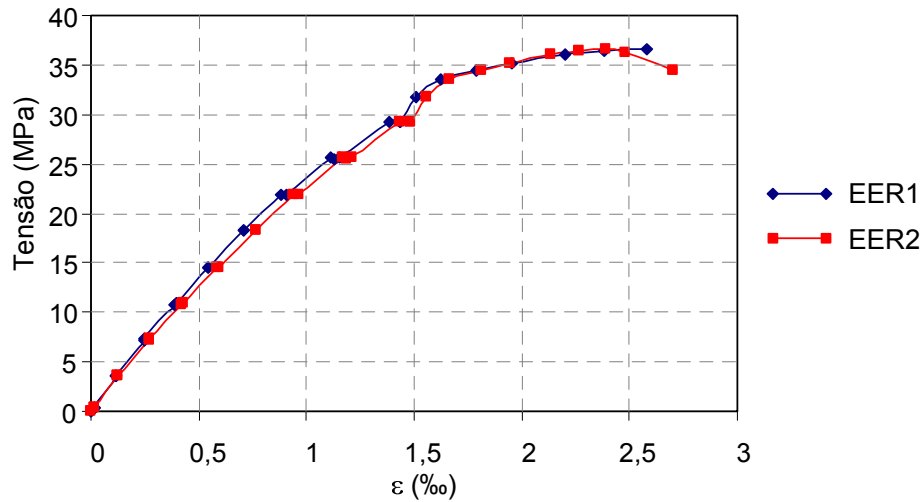


Figura 7.13 – Gráfico tensão x deformação específica do corpos-de-prova 3.

7.3. Descrição das Vigas

Para a realização do programa experimental foram construídas sete vigas de concreto armado, todas com a mesma armadura e concreto com a mesma resistência à compressão.

As vigas foram divididas em três séries, sendo uma viga de referência, três vigas com reforço transversal e três vigas com reforço transversal e longitudinal. O esquema mostrado na Figura 7.14 apresenta de maneira sucinta a forma como foram divididas as séries de vigas.

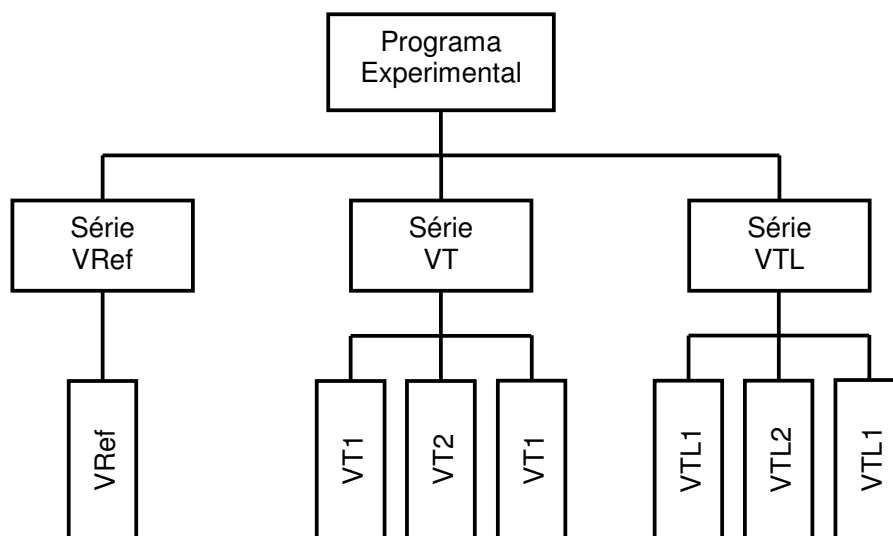


Figura 7.14 – Fluxograma mostrando as séries de vigas.

O código de cada série significa:

- VRef – Viga de Concreto Armado de Referência;
- VT – Viga de Concreto Armado com Reforço Transversal;
- VTL – Viga de Concreto Armado com Reforço Transversal e Longitudinal.

A numeração após cada codificação indica o número da viga dentro de sua série.

7.3.1. Características Geométricas

7.3.1.1. Viga de Referência VR

Todas as vigas tinham seção transversal de 20 cm de largura e 40 cm de altura, e comprimento total de 420 cm (Figura 7.15).

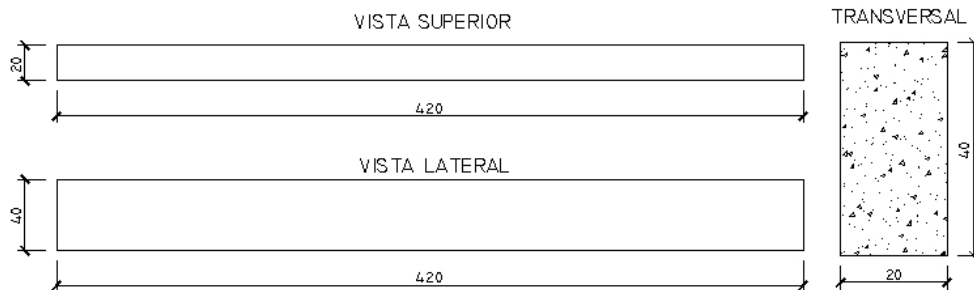


Figura 7.15 – Geometria das vigas.

A armadura longitudinal das vigas foi composta por 6 $\phi 12,5$ mm CA 50, distribuídas ao longo do perímetro da seção transversal.

Para a armadura transversal foram utilizadas barras de aço de $\phi 10$ mm CA 50. A disposição da armadura transversal na viga foi dividida em três trechos.

Os trechos extremos próximos aos apoios tinham armadura mais densa, com espaçamento de 7,5 cm entre cada estribo. Este procedimento foi adotado para se evitar a ruptura do concreto devido à introdução da solicitação de torção nessas regiões, o que ocasiona uma concentração de tensões. Na região central o espaçamento da armadura transversal foi de 15 cm. Esses detalhes são mostrados nas Figura 7.16 e 7.17.

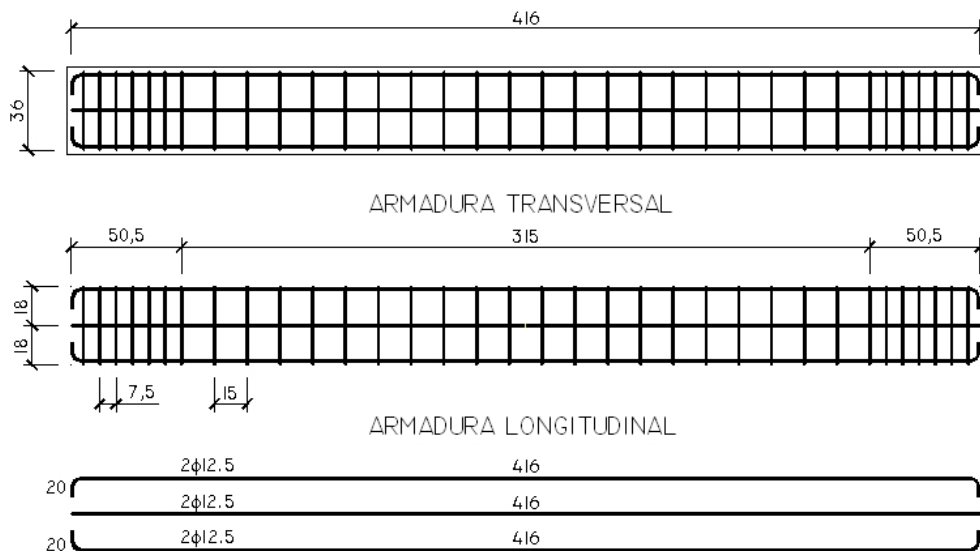


Figura 7.16 – Detalhamento da armadura longitudinal.

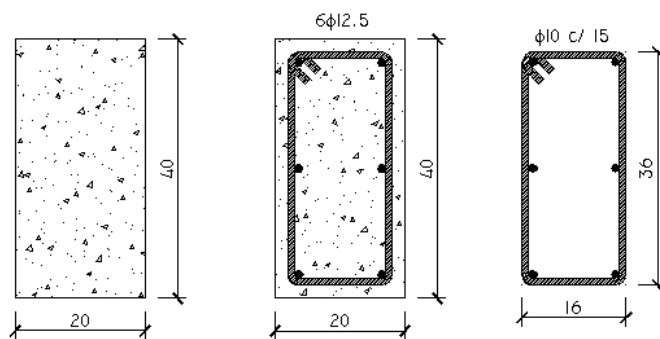


Figura 7.17 – Detalhamento da armadura na seção transversal.

7.3.1.2. Série VT

As três vigas com reforço transversal, denominadas VT1, VT2 e VT3, tinham além das armaduras longitudinais e transversais da viga de referência, estribos de tecidos de fibra de carbono com 15 *cm* de largura espaçados de 30 *cm*, e aplicados em duas camadas (Figura 7.18). Os estribos de tecido de fibra de carbono envolveram totalmente a viga com um traspasse de 10 *cm*, para que o CFC fosse ancorado de forma eficiente.

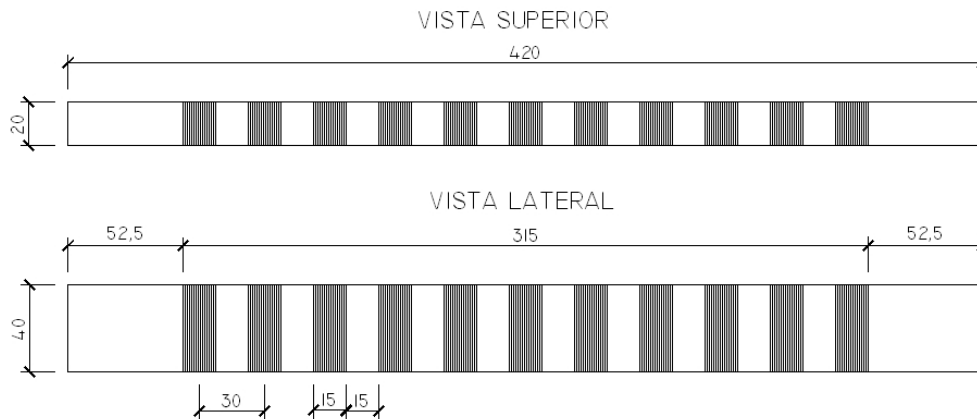


Figura 7.18 – Viga de concreto armado com reforço transversal.

7.3.1.3. Série VTL

As três vigas com reforço longitudinal e transversal da série VTL foram reforçadas por meio da aplicação de CFC nas suas faces laterais, sendo o reforço constituído por fibras orientadas no sentido longitudinal, envolvidas por estribos de CFC com 15 cm de largura e espaçados de 30 cm. O reforço longitudinal foi aplicado nos quatro cantos da viga, sendo que cada faixa de reforço tinha 15 cm de largura e 315 cm de comprimento, cobrindo 5 cm das faces superior e inferior e 10 cm nas laterais (Figura 7.19).

As vigas dessa série tinham a mesma armadura longitudinal e transversal da viga de referência.

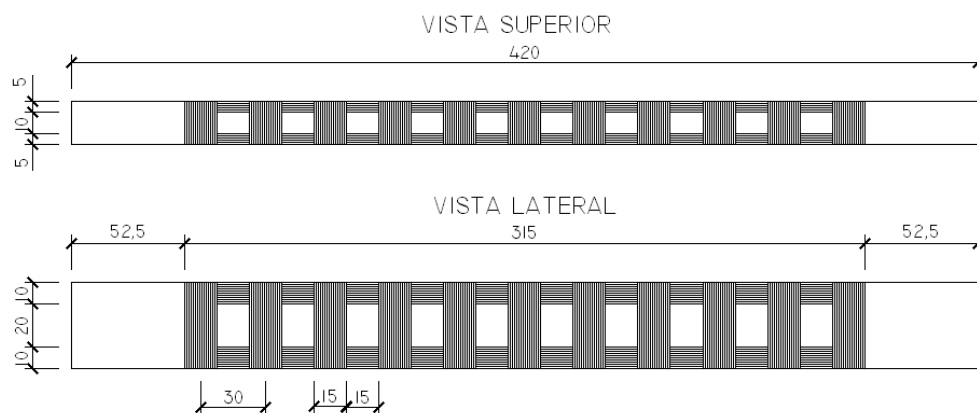


Figura 7.19 – Viga de concreto armado com reforço transversal e longitudinal.

7.3.2. Instrumentação das Vigas

As vigas foram instrumentadas por meio da colagem de extensômetros elétricos e pinos metálicos para leitura das deformações específicas nas seções selecionadas. Para o acompanhamento da evolução da rotação das vigas utilizaram-se transdutores de deslocamentos (LVDT).

7.3.2.1. Extensômetros Elétricos de Resistência

As Figuras 7.20 e 7.21 mostram em detalhes as três seções que foram instrumentadas com extensômetros elétricos de resistência (EER), e a identificação dos painéis das vigas.

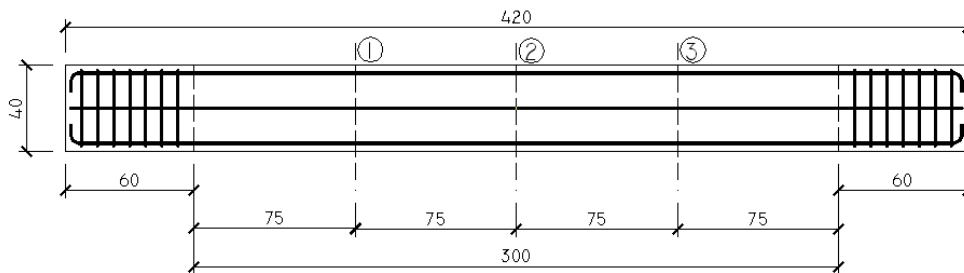


Figura 7.20 – Seções instrumentadas nas vigas.

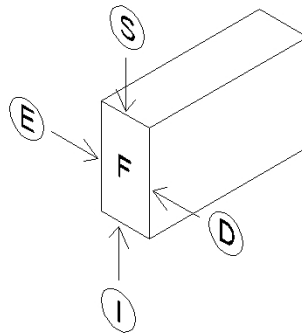


Figura 7.21 – Nomenclatura dos painéis.

7.3.2.1.1.

Aço

Cada viga foi instrumentada com seis EER, sendo três colados na armadura longitudinal e três colados na armadura transversal nas seções indicadas na Figuras 7.22 e 7.23.

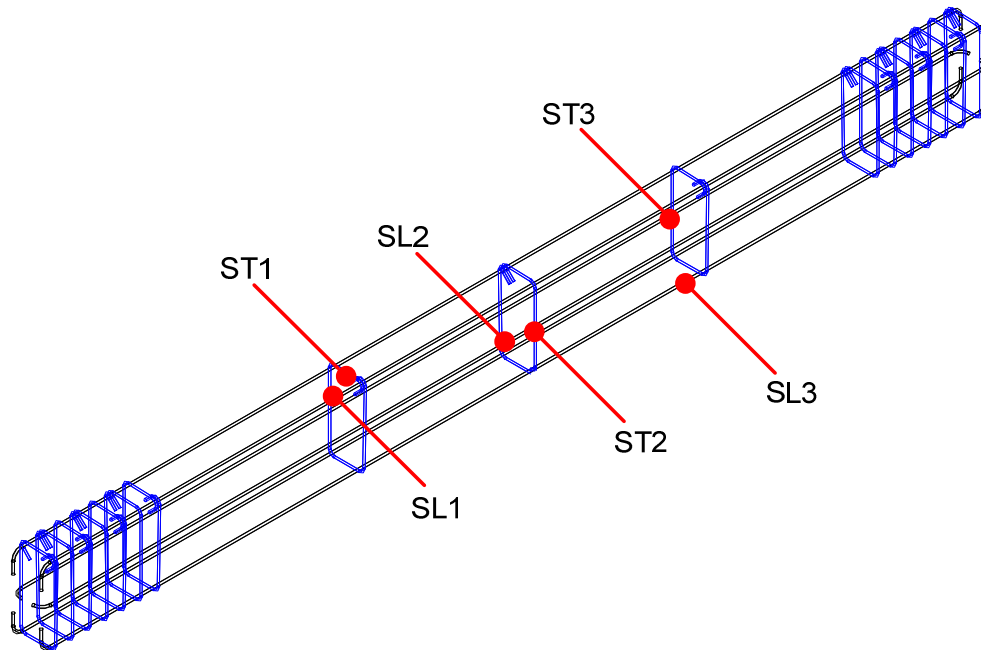


Figura 7.22 – Posições da instrumentação executada nas armaduras.

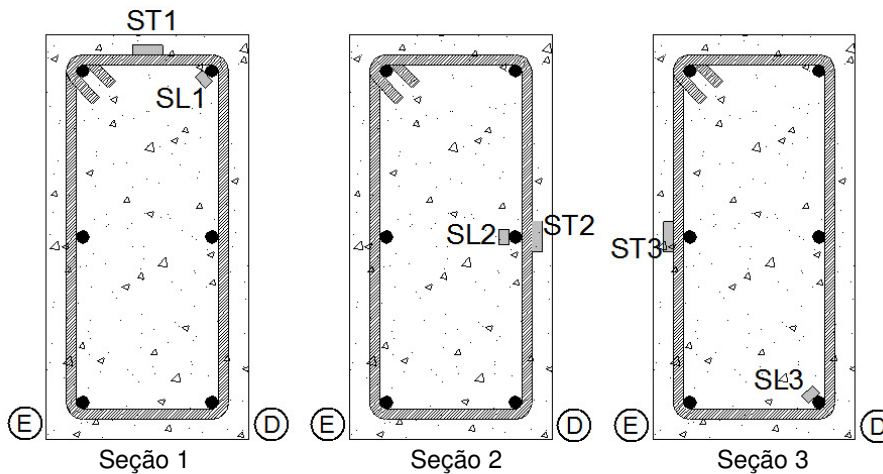


Figura 7.23 – Detalhe das seções onde a armadura foi instrumentada.

7.3.2.1.2.

Concreto e CFC

Cada viga foi instrumentada com 9 EER para medir as deformações específicas no concreto, em 3 posições diferentes. Cada grupo de 3 EER foram

colados numa mesma região com uma diferença de 45° de um para o outro, de modo a se obter o ângulo de inclinação da biela flexo-comprimida. No CFC os EER foram sempre colados na direção da fibra (Figura 7.24). As Figuras 7.25 e 7.26 mostram detalhadamente o esquema de instrumentação das vigas com os EER, no concreto e no CFC.

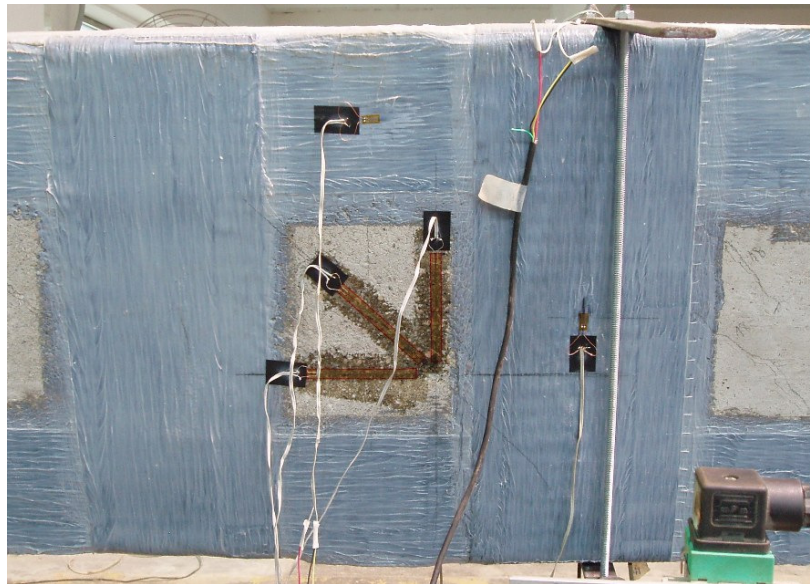


Figura 7.24 – Detalhe dos EER colados no concreto e no CFC.

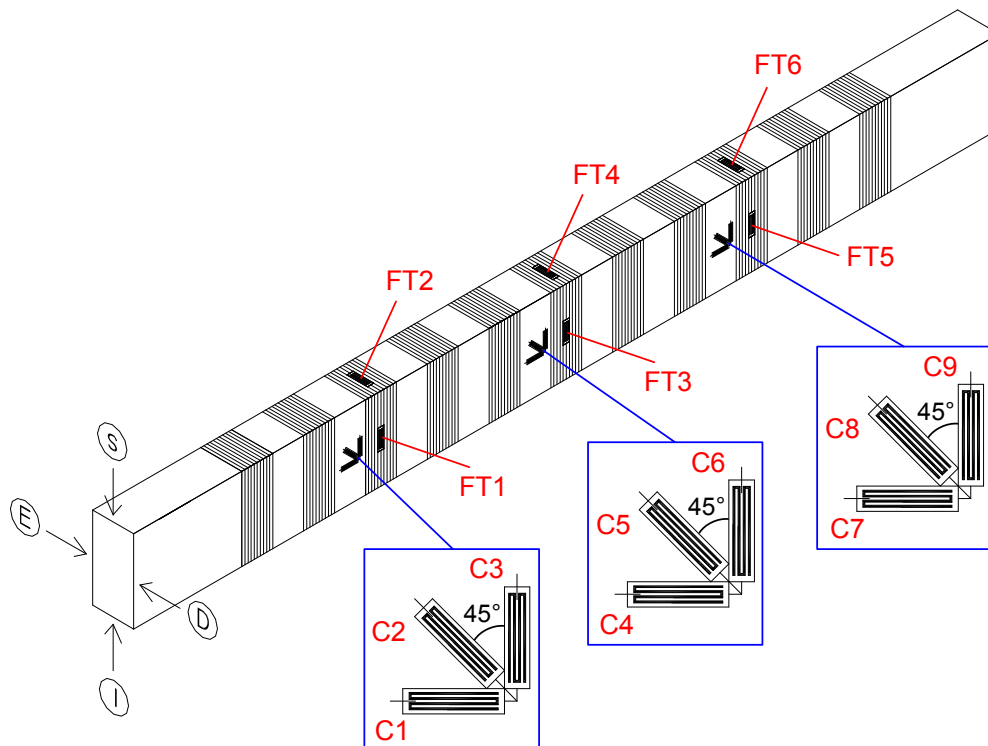


Figura 7.25 – Instrumentação no concreto e no CFC das vigas da série VT.

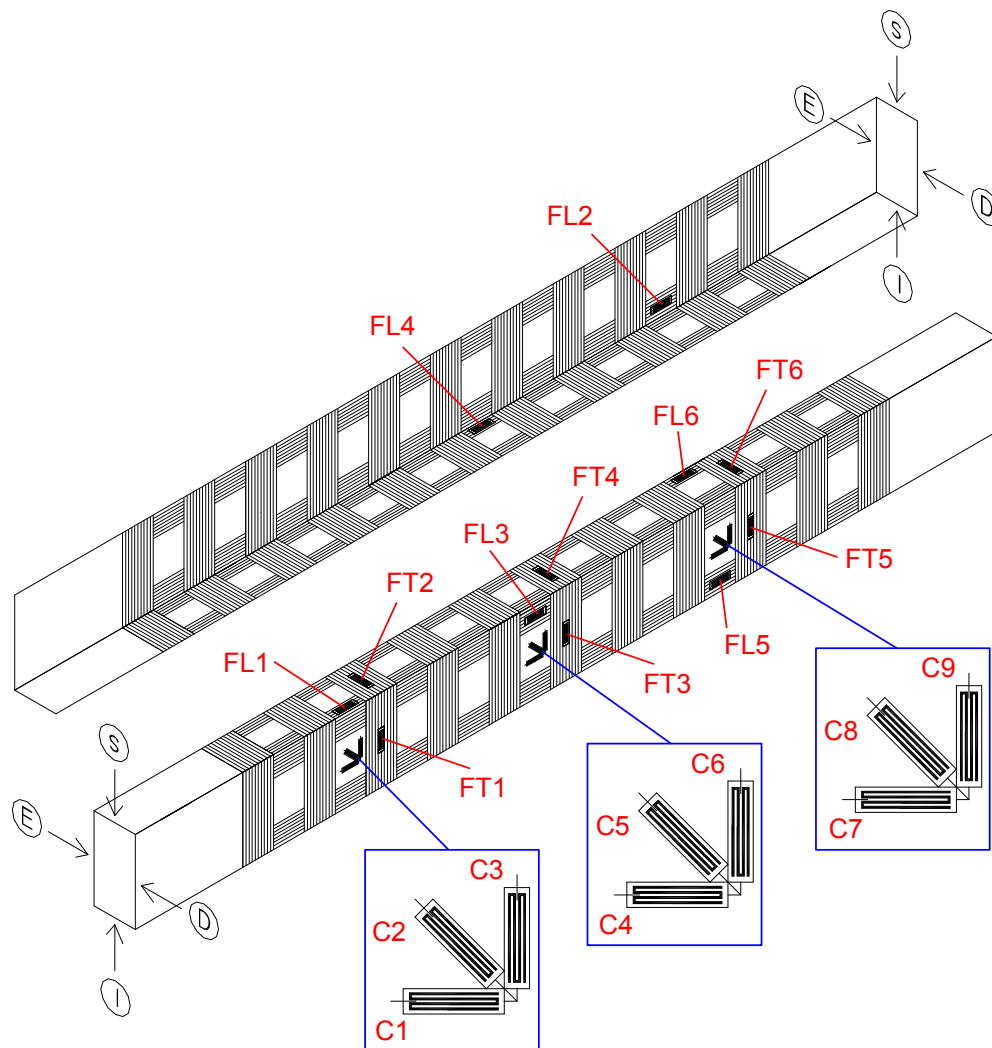


Figura 7.26 – Instrumentação no concreto e no CFC das vigas da série VTL.

7.3.2.2. Transdutores Lineares

Foram instalados cinco transdutores lineares em cada viga, localizados a uma distância de 300 mm da face lateral da viga. O posicionamento desses aparelhos possibilitou a leitura do ângulo de torção em cada estágio de carregamento ao qual a viga foi submetida. Com isso foi possível traçar o diagrama $T \times \theta$ que retratou o comportamento da viga (Figura 7.27).

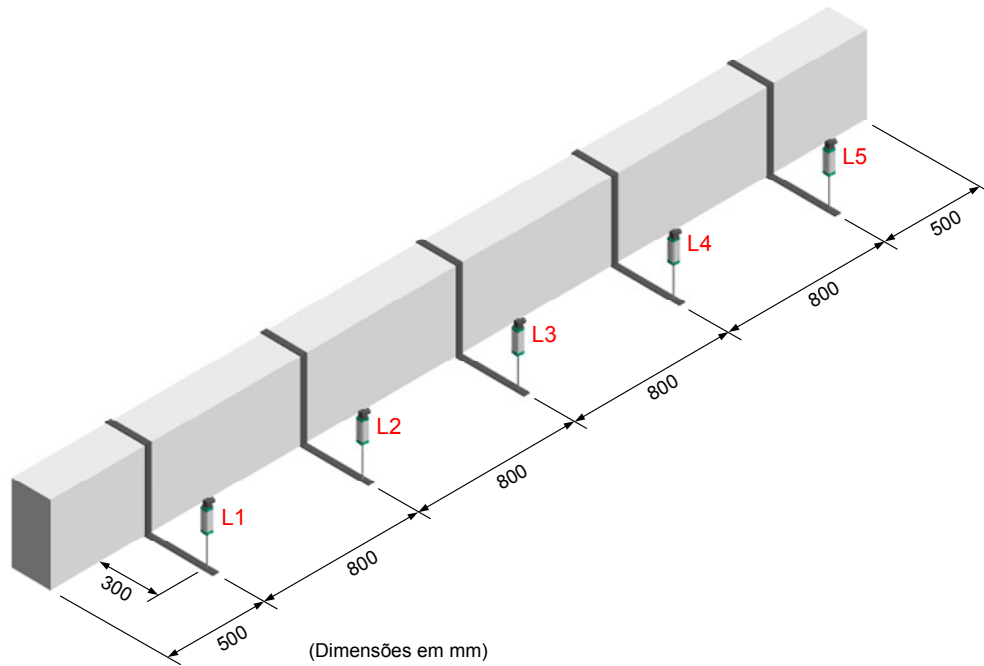


Figura 7.27 – Localização dos Transdutores Lineares.

7.4. Ensaio

7.4.1. Esquema de Ensaio

Para a realização dos ensaios foi montado um aparato estrutural capaz de transferir à viga de concreto armado a solicitação de torção pura (Figuras 7.28, 7.29, 7.30 e 7.31).

A estrutura foi composta basicamente de:

- dois perfis de aço que formaram o braço de alavanca necessário para a transmissão do momento torçor para a viga;
- quatro chapas de aço para acoplar os perfis metálicos na viga;
- duas chapas de aço para transferência da força do perfil para a viga;
- oito parafusos para fixação das placas de aço;
- um apoio que permitia a estrutura girar apenas em torno de seu eixo longitudinal;
- um macaco hidráulico para aplicação do carregamento;
- um parafuso de reação.

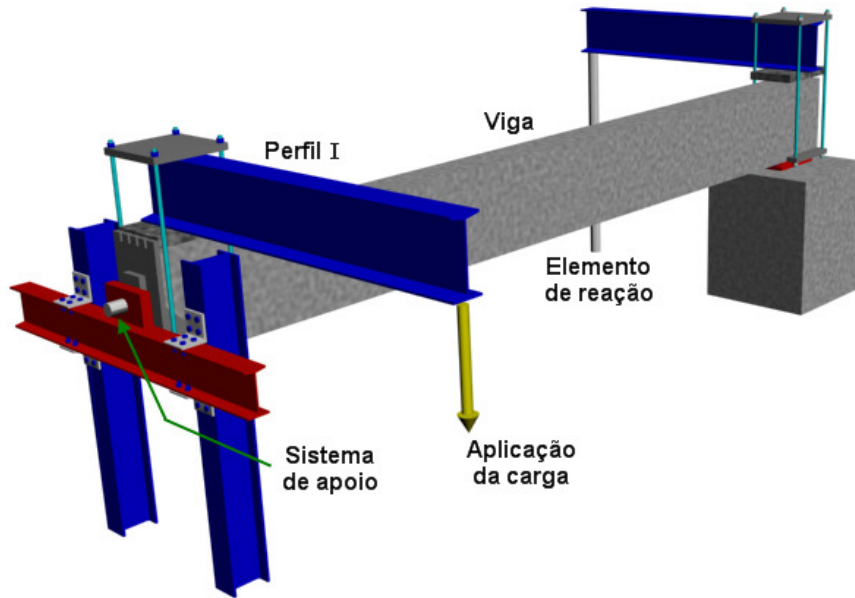


Figura 7.28 – Esquema de ensaio.

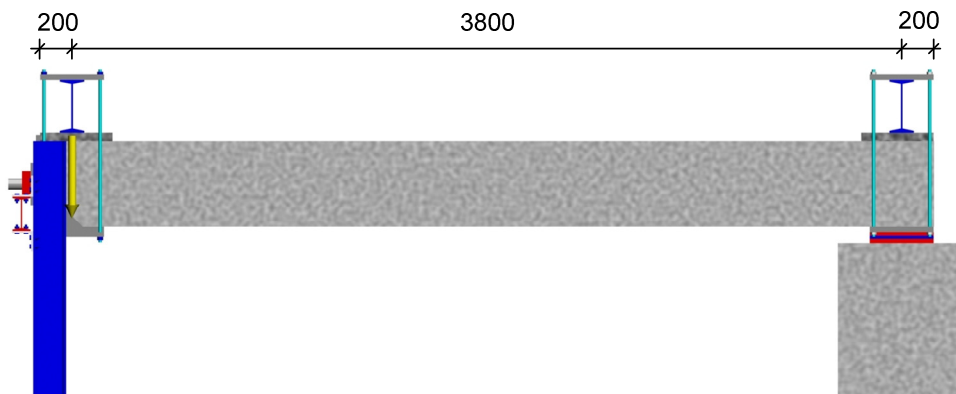


Figura 7.29 – Esquema de ensaio (vista lateral).



Figura 7.30 – Sistema de ensaio em fase de montagem.

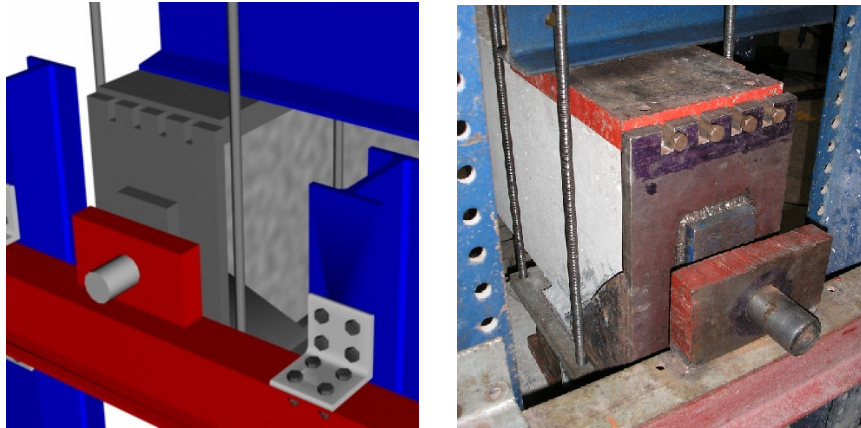


Figura 7.31 – Sistema de apoio.

7.5. Aplicação do Sistema de Reforço com CFC

Para que o sistema de reforço com CFC fosse aplicado, foi necessário inicialmente que as superfícies das vigas fossem preparadas adequadamente, de modo a garantir que a superfície a ser reforçada estivesse sã, limpa, seca, livre de partículas soltas, pinturas, desmoldantes, contaminação de graxa, óleo, pó agentes de cura, nata de cimento ou quaisquer outros materiais estranhos.

O manual da Sika (2004) faz as seguintes recomendações para aplicação do sistema de reforço com CFC:

- umidade do substrato de concreto inferior a 4%;
- idade mínima do concreto superior a 28 dias;
- resistência de aderência à tração do adesivo na superfície do substrato a ser reforçado superior a 1,5 MPa;
- quinas e bordas arredondadas com um raio de pelo menos 12,5 mm.

Inicialmente foi executado o apicoamento da superfície superior da viga com ponteiro, e foram feitos cortes das quinas com talhadeira nas regiões onde o CFC foi colado (Figura 7.32).



Figura 7.32 – Corte das quinas e apicoamento da superfície irregular.

Após o corte e o apicoamento, foi feito o lixamento das superfícies e o arredondamento das quinas das vigas com o uso de uma esmerilhadeira (Figura 7.33).

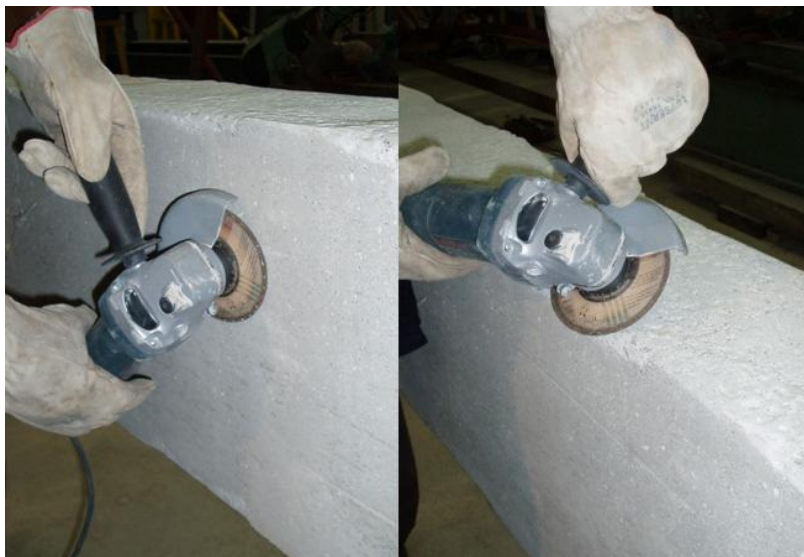


Figura 7.33 – Lixamento das laterais.

A próxima etapa foi a aplicação de Sikadur 30 com adição de cimento nas regiões apicoadas ou que apresentassem rebarbas ou irregularidades superiores a 2 mm, a fim de se obter superfícies planas (Figura 7.34).



Figura 7.34 – Aplicação e regularização da superfície superior com Sikadur 30.

Antes da aplicação do reforço foi feita a retirada da poeira superficial com o uso de aspirador de pó.

O consumo de adesivo epóxi SIKADUR® 330 ideal a que se chegou após alguns testes foi de $0,75 \text{ kg/m}^2$ na fase de impregnação do concreto, e $0,5 \text{ kg/m}^2$ para a camada de proteção.

Para cada mistura do adesivo epóxi foi considerada uma perda estimada de 20%, referentes ao material perdido nas vasilhas utilizadas para pesagem, armazenamento e mistura, e no rolo de aplicação.

As Figuras 7.35 e 7.36 ilustram a aplicação do adesivo epóxi e do tecido de fibras de carbono, e as vigas reforçadas no seu estado final, respectivamente.



Figura 7.35 – Aplicação do sistema de reforço com CFC.



Figura 7.36 – Vigas reforçadas.

7.6. Execução dos Ensaios

As vigas foram ensaiadas no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio (LEM). O carregamento foi aplicado de forma similar em todas as vigas, com incrementos de força de 2 kN aplicados com excentricidade de 0,95 m, o que gerou um momento torçor de 1,9 kNm. Entre cada estágio de carregamento esperava-se cerca de 10 minutos até que as deformações específicas e as rotações medidas na viga se estabilizassem (Figuras 7.37, 7.38 e 7.39).

Até atingir a fissuração, para um momento torçor em torno de 15 kNm, o comportamento da curva $T \times \theta$ foi linear e semelhante em todas as vigas. Após a fissuração essa curva permaneceu linear, entretanto, a redução da inclinação da curva da viga de referência foi maior do que as das vigas reforçadas .



Figura 7.37 – Ensaio da viga de referência.



Figura 7.38 – Ensaio da viga VT1.



Figura 7.39– Detalhe da torção da viga VT1.

8 Apresentação e Análise dos Resultados

8.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos no programa experimental realizado de acordo com as descrições do capítulo 7, no qual foram apresentados os ensaios de sete vigas de concreto armado submetidas à solicitação de torção pura, sendo uma viga de referência e seis vigas reforçadas com CFC.

8.2. Comportamento da Curva $T \times \theta$

As vigas de concreto armado solicitadas à torção têm o comportamento da curva de momento torçor *versus* ângulo de rotação por unidade de comprimento $T \times \theta$ caracterizado por três trechos: 1) o trecho elástico-linear quando do início do carregamento, limitado pelo momento torçor de fissuração T_{cr} ; 2) o trecho entre T_{cr} e o momento torçor de escoamento T_y ; 3) e o trecho entre T_y e o momento torçor de ruptura T_u . Para cada um desses momentos torçores tem-se o seu respectivo ângulo de torção por unidade de comprimento θ . Sendo θ_{cr} o ângulo correspondente a T_{cr} , θ_y o ângulo relativo a T_y , e θ_u o ângulo referente a T_u .

No capítulo 7 foi mostrada a localização dos Transdutores Lineares nas vigas, os quais foram posicionados sobre réguas, e que forneceram os deslocamentos da viga a partir de uma distância de 30 cm da lateral da mesma (40 cm do eixo vertical).

As réguas foram posicionadas na altura da superfície inferior da viga, não coincidindo com seu eixo horizontal. Portanto, a rotação não pode ser calculada de maneira direta admitindo-se $tg\phi = \Delta l / 40$, pois no ponto A onde a régua foi posicionada ocorre uma translação para o ponto A' (Figura 8.1).

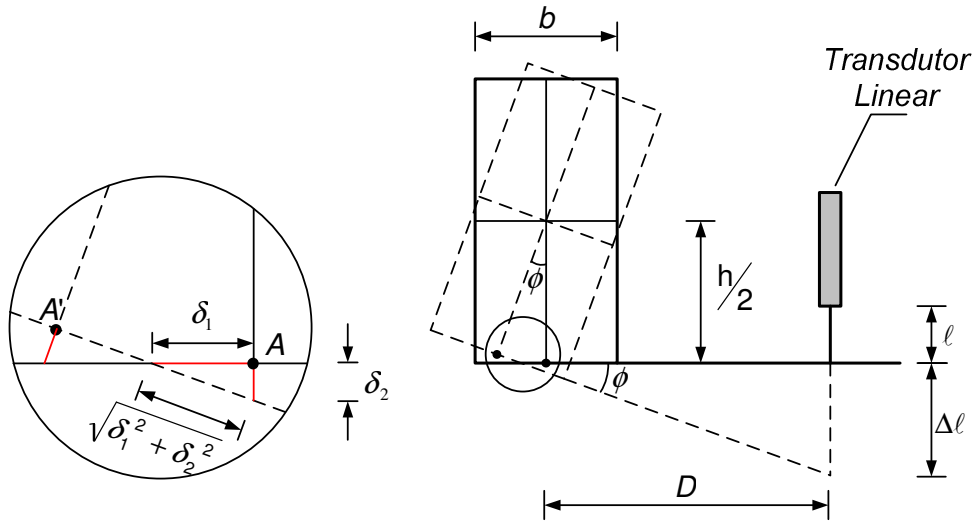


Figura 8.1 – Ângulo de rotação por unidade de comprimento.

Com os parâmetros da Figura 8.1 seguem-se por semelhança de triângulos:

$$\frac{\delta_2}{\delta_1} = \frac{\Delta \ell}{D + \delta_1} \quad (8.1)$$

$$\frac{h/2}{\delta_1 + \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2}} = \frac{D + \delta_1}{\Delta \ell} \quad (8.2)$$

Isolando-se o deslocamento δ_2 na expressão 8.1, e substituindo-o na expressão 8.2 seguem-se:

$$\delta_2 = \frac{\Delta \ell \delta_1}{D + \delta_1} \quad (8.3)$$

$$\frac{h/2}{\delta_1 + \sqrt{\delta_1^2 + \left(\frac{\Delta \ell \delta_1}{D + \delta_1}\right)^2}} = \frac{D + \delta_1}{\Delta \ell} \quad (8.4)$$

Então δ_1 pode ser escrito como:

$$\delta_1 = \frac{1}{2(4\Delta \ell + 4h)} \left[-4D + 4(D^2 + \Delta \ell^2 + h\Delta \ell)^{1/2} \right] h \quad (8.5)$$

Calculando-se δ_2 a partir da expressão 8.1, pode-se determinar o ângulo de rotação correspondente ao deslocamento $\Delta \ell$:

$$\text{tg} \phi = \frac{\delta_2}{\delta_1} \quad (8.6)$$

$$\phi = \arctg\left(\frac{\delta_2}{\delta_1}\right) \quad (8.7)$$

O ângulo de torção por unidade de comprimento é dado pela expressão 8.8:

$$\theta = \frac{\phi_{L1} - \phi_{L5}}{L} \quad (8.8)$$

onde

ϕ_{L1} e ϕ_{L5} – ângulos de torção medidos nas posições L1 e L5, respectivamente (Figura 7.27);

L – distância entre os transdutores lineares L1 e L5.

Nas sete vigas ensaiadas os comportamentos das curvas $T \times \theta$ foram bastante similares, mantendo-se linear até atingir o momento torçor de fissuração T_{cr} . Observando-se que após a fissuração houve uma redução na inclinação da curva $T \times \theta$, que se manteve praticamente linear até atingir o momento torçor de escoamento T_y . Entre o momento torçor de escoamento e o momento torçor de ruptura a curva $T \times \theta$ também apresentou comportamento linear, entretanto, a inclinação da curva praticamente não se alterou.

A viga de referência apresentou fissuras para $T_{cr} = 16,4$ kNm, com $\theta_{cr} = 0,142$ %/m. Após a fissuração ocorreu uma grande redução na inclinação da curva $T \times \theta$ até se atingir $T_y = 20,7$ kNm, e $T_u = 22,4$ kNm, correspondentes a $\theta_y = 1,647$ %/m e $\theta_u = 2,293$ %/m, respectivamente (Figura 8.2).

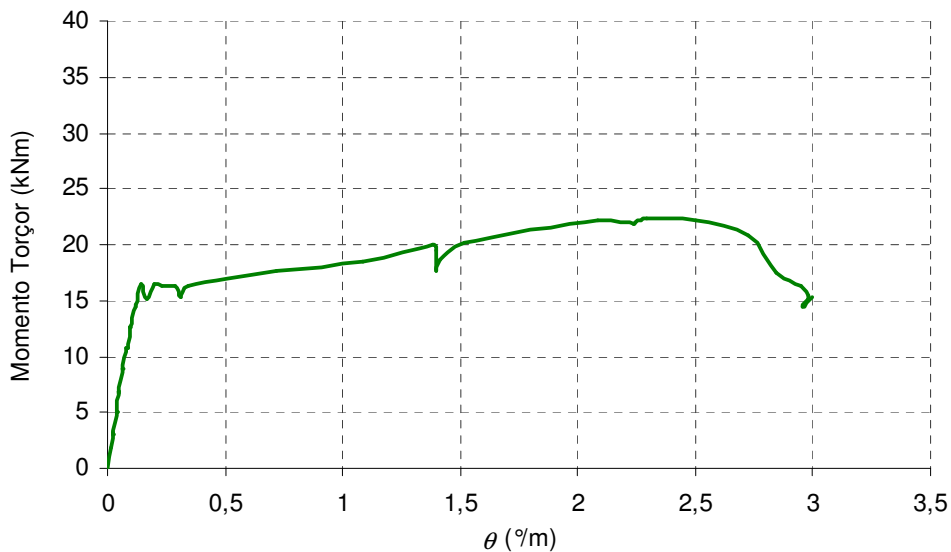
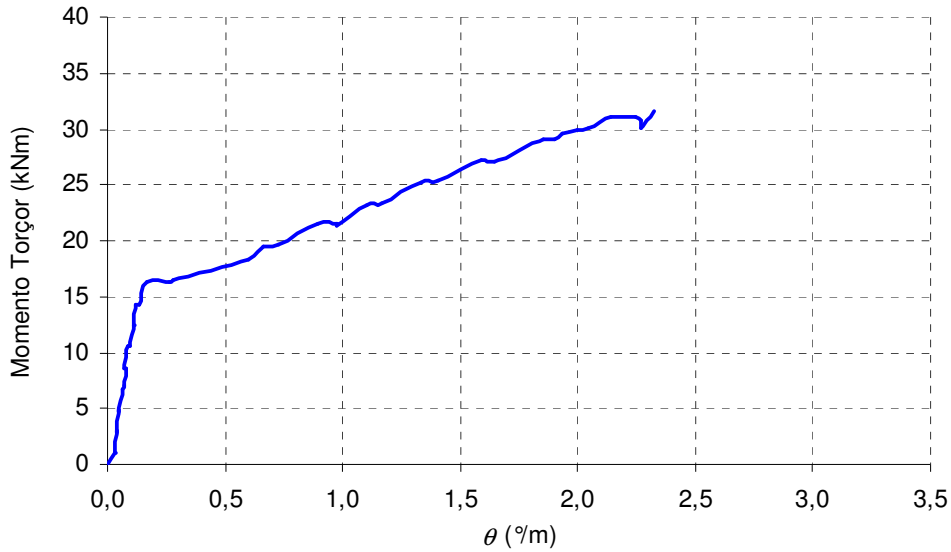


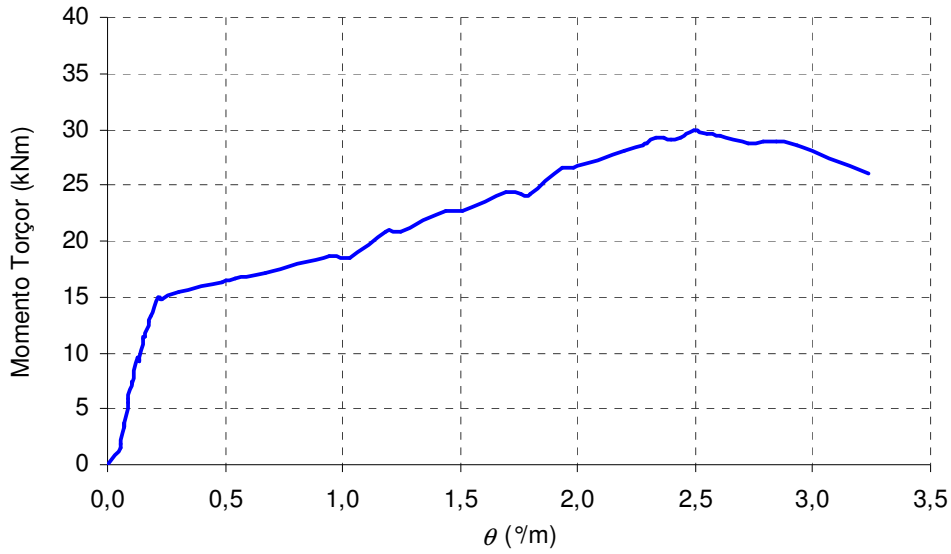
Figura 8.2 – Gráfico $T \times \theta$ da viga de referência.

Para a viga VT1 obteve-se $T_{cr} = 16,4$ kNm e $\theta_{cr} = 0,167$ %/m. Após a fissuração também ocorreu uma redução na inclinação da curva $T \times \theta$ até se atingir os momentos torçores T_y e T_u , entretanto, essa redução não foi tão acentuada como na viga de referência. Sendo $T_y = 27,9$ kNm e $T_u = 31,6$ kNm relativos a $\theta_y = 1,728$ %/m e $\theta_u = 2,326$ %/m, respectivamente (Figura 8.3).

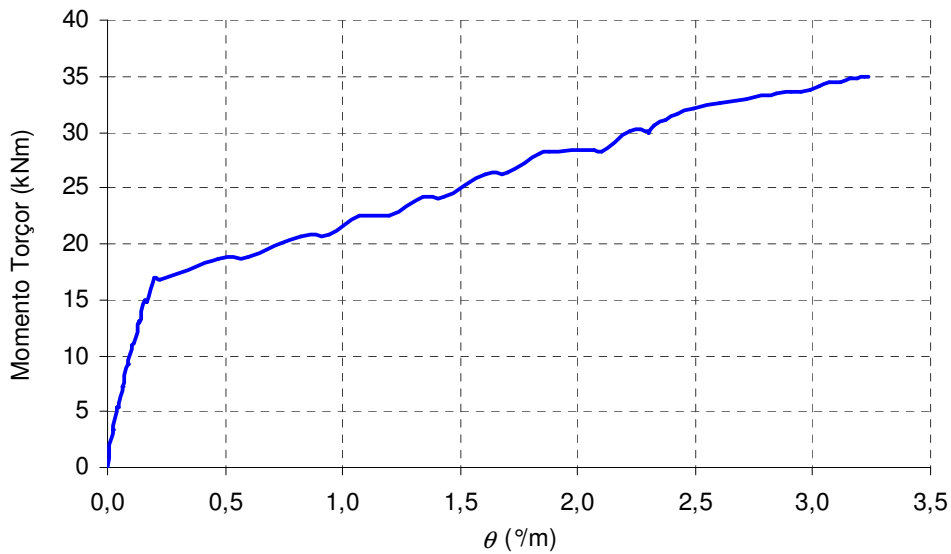
Figura 8.3 – Gráfico $T \times \theta$ da viga VT1 .

As vigas VT2 e VT3 apresentaram comportamentos semelhantes ao da viga VT1.

Para a viga VT2 foram obtidos $T_{cr} = 14,9$ kNm, $T_y = 22,7$ kNm e $T_u = 29,9$ kNm, e os respectivos ângulos de torção por unidade de comprimento foram $\theta_{cr} = 0,219$ %/m, $\theta_y = 1,507$ %/m e $\theta_u = 2,494$ %/m (Figura 8.4).

Figura 8.4 – Gráfico $T \times \theta$ da viga VT2.

Os valores experimentais obtidos para a viga VT3 foram $T_{cr} = 16,8$ kNm, $T_y = 24,4$ kNm e o $T_u = 35,0$ kNm, e os respectivos ângulos de torção por unidade de comprimento foram $\theta_{cr} = 0,197$ %/m, $\theta_y = 1,496$ %/m e $\theta_u = 3,223$ %/m (Figura 8.5).

Figura 8.5 – Gráfico $T \times \theta$ da viga VT3.

Os diagramas $T \times \theta$ das vigas da série VTL foram muito semelhantes aos das vigas da série VT, sendo a redução na inclinação da curva após a fissuração menos acentuada do que a da viga de referência.

Para a viga VTL1 os resultados foram $T_{cr} = 14,9$ kNm para um $\theta_{cr} = 0,204$ %/m, e após a fissuração a sua rigidez diminuiu, sendo $T_y = 24,4$ kNm para $\theta_y = 1,710$ %/m. O momento torçor último $T_u = 28$ kNm teve um ângulo de torção por unidade de comprimento $\theta_u = 2,392$ %/m (Figura 8.6).

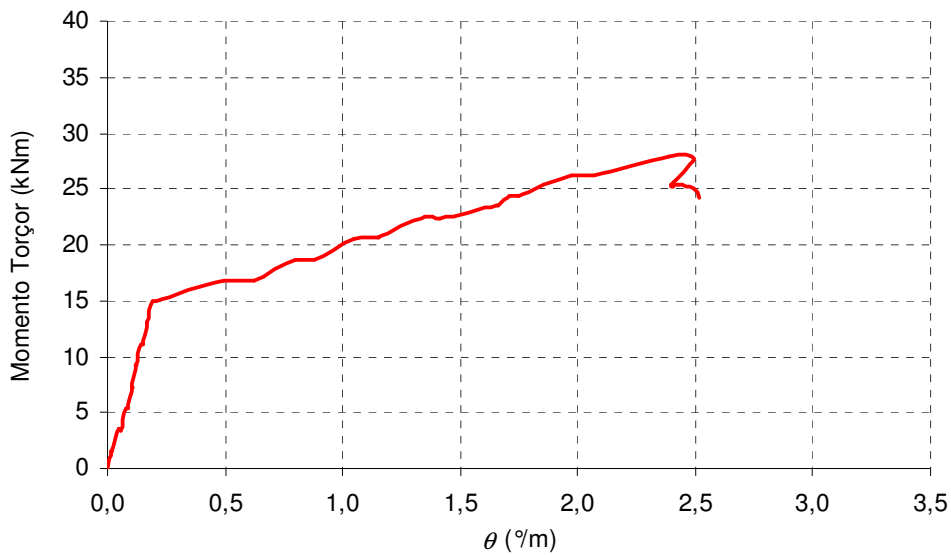


Figura 8.6 – Gráfico $T \times \theta$ da viga VTL1.

As vigas VTL2 e VTL3 apresentaram comportamentos semelhantes ao da viga VTL1.

Para a viga VTL2 foram obtidos os seguintes momentos torçores $T_{cr} = 16,3$ kNm, $T_y = 24,1$ kNm e $T_u = 32,9$ kNm, e os respectivos ângulos de torção por unidade de comprimento foram $\theta_{cr} = 0,223$ %/m, $\theta_y = 1,426$ %/m e $\theta_u = 3,352$ %/m (Figura 8.7).

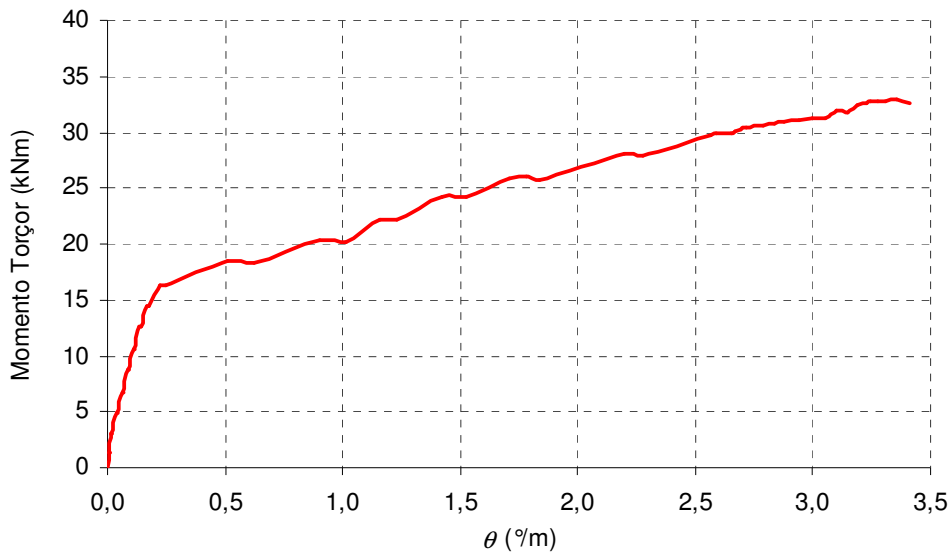


Figura 8.7 – Gráfico $T \times \theta$ da viga VTL2.

Para a viga VTL3 os resultados foram $T_{cr} = 16,8$ kNm, $T_y = 28,3$ kNm e o $T_u = 31,7$ kNm, e seus respectivos ângulos de torção por unidade de comprimento foram $\theta_{cr} = 0,251$ %/m, $\theta_y = 2,027$ %/m e $\theta_u = 2,811$ %/m (Figura 8.8).

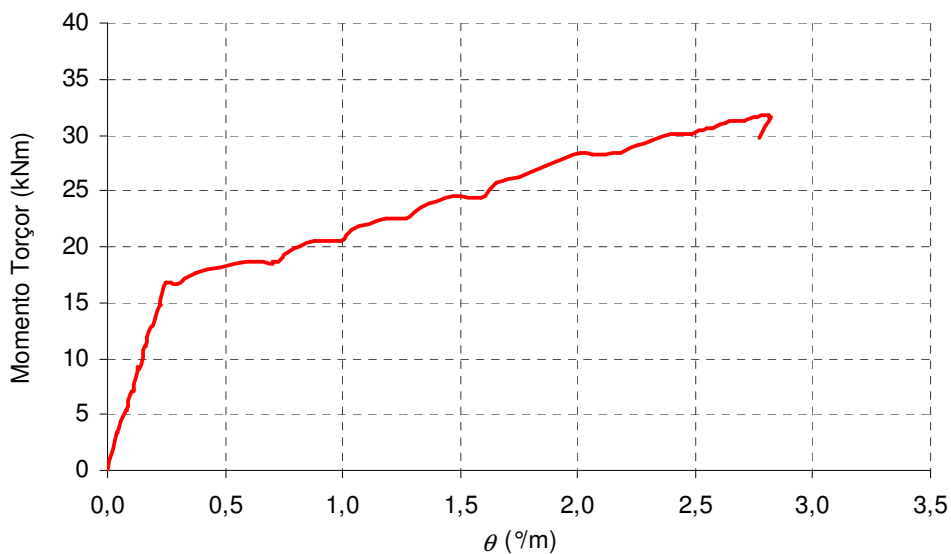


Figura 8.8 – Gráfico $T \times \theta$ da viga VTL3.

Os gráficos $T \times \theta$ de todas as vigas mostram que o comportamento das mesmas apresentou três trechos bem delineados: o trecho elástico linear pré-fissuração, o trecho pós-fissuração até o escoamento de uma das armaduras e o trecho até a ruptura.

Isso indica que os resultados dos ensaios mostraram-se consistentes para uma avaliação teórica.

A Tabela 8.1 apresenta um resumo dos momentos torçores de fissuração, de escoamento e de ruptura, com seus respectivos ângulos de torção por unidade de comprimento. Mostra também a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação correspondente a cada série de vigas.

Tabela 8.1 – Resultados experimentais.

Viga		T_{cr} (kNm)	θ_{cr} (°/m)	T_y (kNm)	θ_y (°/m)	T_u (kNm)	θ_u (°/m)
VRef		16,4	0,142	20,7	1,647	22,4	2,293
Série VT	VT1	16,4	0,167	27,9	1,728	31,6	2,326
	VT2	14,9	0,219	22,7	1,507	29,9	2,494
	VT3	16,8	0,197	24,4	1,496	35,0	3,223
Série VTL	VTL1	14,9	0,204	24,4	1,710	28,0	2,392
	VTL2	16,3	0,223	24,1	1,426	32,9	3,352
	VTL3	16,8	0,251	28,3	2,027	31,7	2,811
Série VT	Média	16,03	0,19	25,0	1,58	32,17	2,68
	D. P.	1,00	0,03	2,65	0,13	2,60	0,48
	Coef. Var. (%)	6,25	13,43	10,61	8,30	8,07	17,79
Série VTL	Média	16,00	0,23	25,60	1,72	30,87	2,85
	D. P.	0,98	0,02	2,34	0,30	2,55	0,48
	Coef. Var. (%)	6,16	10,46	9,15	17,47	8,27	16,88

8.3. Análise das Rigidezes

No item 8.2 foi mostrado que as vigas apresentaram grande redução de rigidez após a fissuração, e que no trecho compreendido entre o momento torçor de escoamento e o momento torçor de ruptura a rigidez à torção não apresentou grandes variações.

Os valores das rigidezes de cada viga (Figura 8.9), para cada estágio de comportamento foram calculados a partir das expressões 8.9, 8.10 e 8.11. e são apresentados na Tabela 8.2 e na Figura 8.10:

$$(GJ)_{CR} = tg\beta_{CR} = \frac{T_{CR}}{\theta_{CR}} \quad (8.9)$$

$$(GJ)_y = \operatorname{tg}\beta_y = \frac{T_y - T_{CR}}{\theta_y - \theta_{CR}} \quad 8.10$$

$$(GJ)_u = \operatorname{tg}\beta_u = \frac{T_u - T_y}{\theta_u - \theta_y} \quad 8.11$$

onde:

$(GJ)_{CR}$ – rigidez elástica calculada entre o início do carregamento e a fissuração da viga;

$(GJ)_y$ – rigidez secante calculada entre a fissuração da viga e o escoamento da armadura de aço;

$(GJ)_u$ – rigidez calculada entre os trechos de escoamento e ruptura da viga.

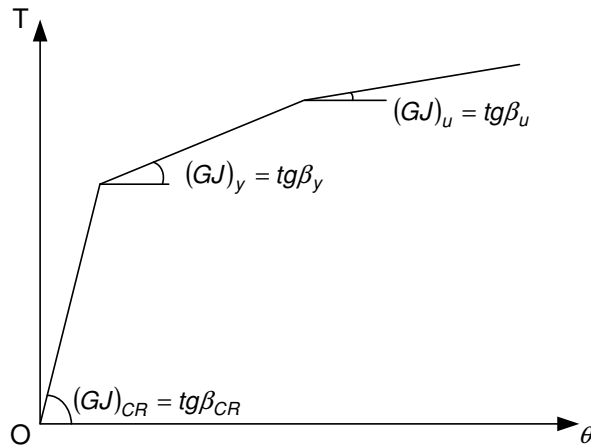


Figura 8.9 – Comportamento da curva de momento torçor versus ângulo de rotação por unidade de comprimento $T \times \theta$

A partir dos dados apresentados na Tabela 8.2, conclui-se que:

1. na viga de referência, até se atingir a fissuração, a rigidez à torção em regime elástico e linear foi 6617,26 kNm². Em seguida ocorreu uma redução de 97,52% da rigidez à torção, que diminuiu para 163,70 kNm². Entre o momento torçor de escoamento e o momento torçor de ruptura a rigidez secante diminuiu para 150,78 kNm², ou seja, uma redução de 97,72 % da rigidez em relação ao valor inicial;
2. a série VT apresentou em média uma rigidez à torção inicial de 4803,66 kNm², com um desvio padrão de 867,17 kNm² e um coeficiente de variação de 18,05%. Após a fissuração o valor da rigidez secante média reduziu 91,78%, ficando em 394,66 kNm² com um desvio padrão de 36,29 kNm² e um coeficiente de variação de 9,20%. Após o escoamento a rigidez praticamente não se alterou, apresentado um valor médio de

369,68 kNm², o que representou uma redução de 92,30% quando comparado com o valor inicial. O desvio padrão foi de 369,68 kNm² e o coeficiente de variação de 7,78%.

3. a rigidez média à torção em regime elástico linear para a série VTL foi 4069,25 kNm², com um desvio padrão de 202,93 kNm² e um coeficiente de variação de 4,99%. Assim como a viga de referência e as vigas da série VT, a rigidez média da série VTL caiu bruscamente após a fissuração das vigas, em torno de 90,96%, sendo 367,97 kNm², com um desvio padrão de 5,68 kNm² e um coeficiente de variação de 1,54%. O trecho compreendido entre o escoamento e a ruptura apresentou uma rigidez média a torção de 267,93 kNm², com um desvio padrão de 29,97 kNm² e um desvio padrão de 11,19%. Em relação a rigidez inicial, o valor médio após o escoamento teve uma redução de 93,42%.

Tabela 8.2 – Rigidez à torção.

Viga		(GJ) _{cr} (kNm ²)	(GJ) _y (kNm ²)	(GJ) _u (kNm ²)
VRef		6617,26	163,70	150,78
Série VT	VT1	5626,65	422,10	354,51
	VT2	3898,21	408,37	402,87
	VT3	4886,14	353,51	351,67
Série VTL	VTL1	4184,84	361,43	302,44
	VTL2	4187,99	371,49	252,86
	VTL3	3834,94	371,00	248,48
Série VT	Média	4803,66	394,66	369,68
	Desvio Padrão	867,17	36,29	28,78
	Coef. de Var. (%)	18,05	9,20	7,78
Série VTL	Média	4069,25	367,97	267,93
	Desvio Padrão	202,93	5,68	29,97
	Coef. de Var. (%)	4,99	1,54	11,19

Baseando-se nos valores dos coeficientes de variação apresentados na Tabela 8.2, conclui-se que as vigas da série VTL tiveram uma menor dispersão dos resultados relativos às rigidezes de fissuração e escoamento.

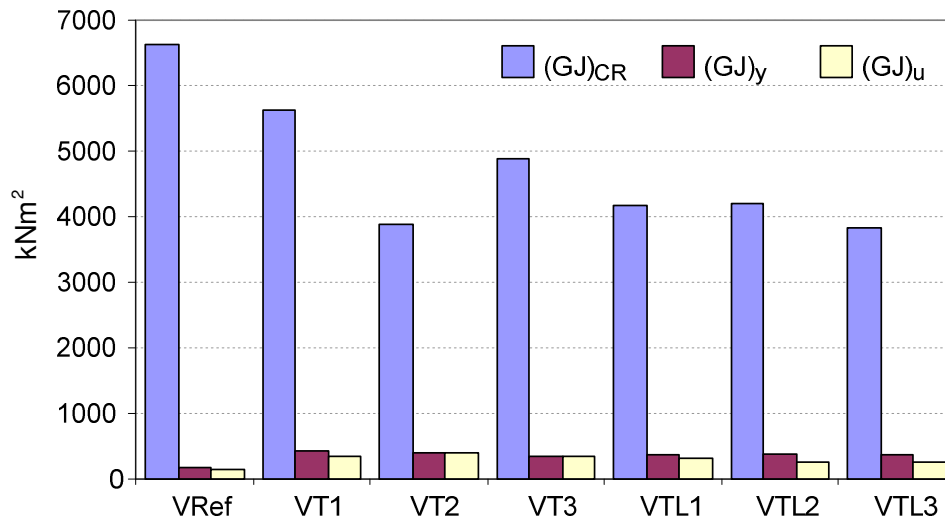


Figura 8.10 – Rigidezes das vigas.

As Figuras 8.11, 8.12 e 8.13 comparam as rigidezes das vigas para cada estágio de comportamento, permitindo concluir que:

1. a rigidez inicial da viga de referência foi 37,75% superior à rigidez inicial média da série VT e 62,62% superior ao valor médio da série VTL;
2. a série VT apresentou rigidez inicial média 18,05% superior ao valor médio da série VTL;
3. após a fissuração a rigidez média da série VT foi 141,09% maior que o valor da viga de referência, e 7,25% superior à rigidez média da série VTL;
4. a rigidez média da série VTL depois da fissuração foi 124,78% maior que a viga de referência;
5. entre o escoamento e a ruptura a série VT apresentou uma rigidez média 145,18% maior que a viga de referência e 37,98% superior à média da série VTL;
6. a rigidez média da série VTL no trecho compreendido entre o escoamento e a ruptura superou em 77,70% a rigidez da viga de referência.

As rigidezes $(GJ)_y$ e $(GJ)_u$ são da mesma ordem de grandeza para todas as vigas (Figura 8.10).

Verifica-se que tal como nas vigas de concreto armado a fissuração diminui acentuadamente a rigidez à torção da viga. O reforço com CFC pouco contribuiu para o acréscimo da rigidez das vigas ensaiadas.

Observa-se que a viga VRef apresentou $(GJ)_{CR}$ muito superior às demais vigas, mas suas rigidezes $(GJ)_y$ e $(GJ)_u$ foram inferiores.

A análise das rigidezes, face aos resultados obtidos, não é conclusivo, e requer um estudo mais apurado de modo a associar essas rigidezes à ductilidade das vigas.

Ressalta-se que para as vigas de concreto armado ainda não se tem um estudo conclusivo quanto à rigidez à torção na fase fissurada.

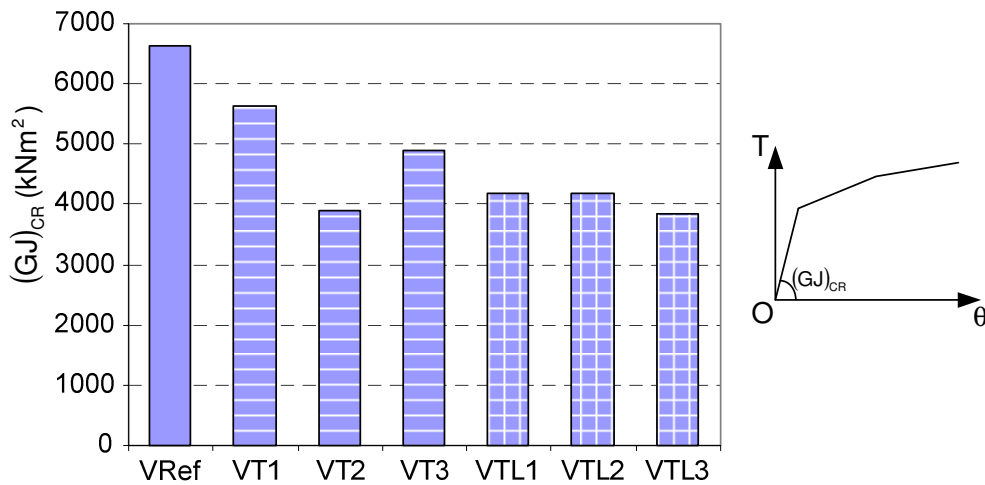


Figura 8.11 – Comparação entre as rigidezes elásticas das vigas.

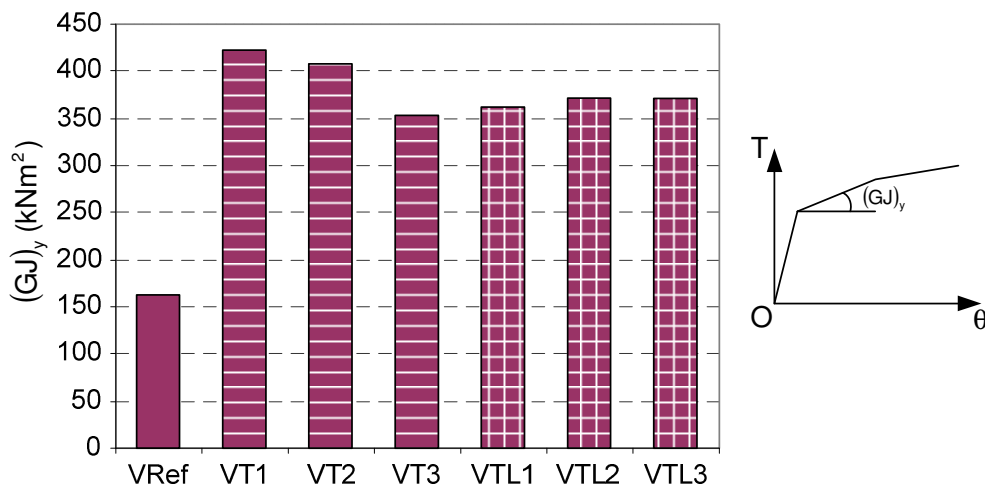


Figura 8.12 – Comparação entre as rigidezes secantes das vigas.

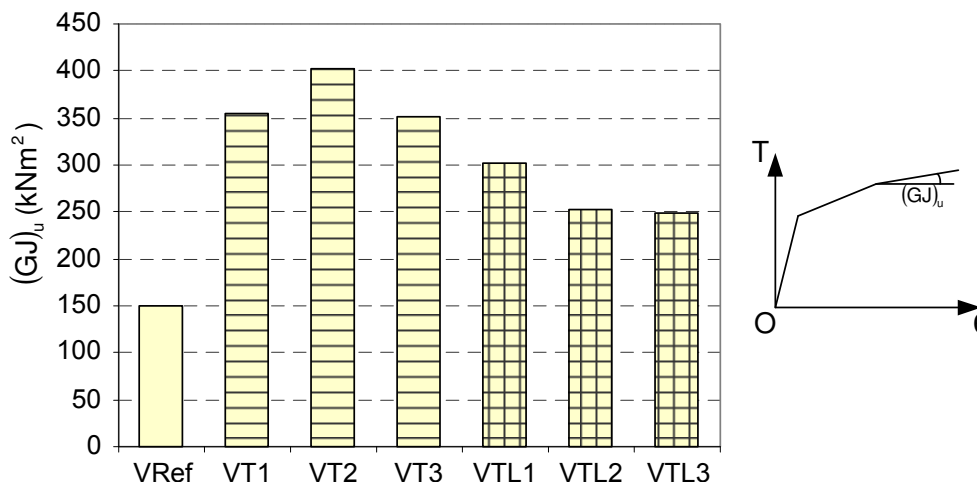


Figura 8.13 – Comparação entre as rigidezes após o escoamento das vigas.

8.4. Modo de Ruptura e Resistência à Torção

As taxas de armadura e os modos de ruptura das vigas podem ser observados na Tabela 8.3. Observa-se que todas as vigas apresentaram ruptura por esmagamento da biela de concreto.

Tabela 8.3 – Armaduras de aço e CFC e modos de ruptura.

Viga	A_{sl} mm^2	A_{st} mm^2	A_{fl} mm^2	A_{ft} mm^2	ρ_{sl} %	ρ_{st} %	ρ_{fl} %	ρ_{ft} %	Modos de Rupt.	
VRef	78,54	736,3	–	–	0,92	0,785	–	–	Esmagamento da biela de concreto	
Serie VT	VT1	78,54	736,3	–	36,6	0,92	0,785	–		0,183
	VT2	78,54	736,3	–	36,6	0,92	0,785	–		0,183
	VT3	78,54	736,3	–	36,6	0,92	0,785	–		0,183
Serie VTL	VTL1	78,54	736,3	73,2	18,3	0,92	0,785	0,118		0,092
	VTL2	78,54	736,3	73,2	18,3	0,92	0,785	0,118		0,092
	VTL3	78,54	736,3	73,2	18,3	0,92	0,785	0,118		0,092

A Tabela 8.4 e a Figura 8.14 mostram a resistência última à torção das sete vigas ensaiadas. As vigas das séries VT e VTL tiveram resistência à torção última superior à da viga de referência.

Para as vigas VT1, VT2 e VT3 obteve-se o valor médio $T_u = 32,17$ kNm, com desvio padrão igual a 2,60 kNm, e coeficiente de variação de 8,07%. O

valor médio de T_u da série VT foi 44% superior ao valor médio de T_u da viga de referência.

As três vigas da série VTL foram em média 38% mais resistentes que a viga de referência. O valor médio de T_u da série foi igual a 30,87 kNm, com desvio padrão igual a de 2,55 kNm, e coeficiente de variação de 8,27%.

As duas séries de vigas apresentaram valores médios de ruptura bem próximos, entretanto, o valor médio de T_u da série VT foi 4,21% superior ao valor médio de T_u da série VTL.

A análise estatística dos dados da Tabela 8.3 mostra que os resultados obtidos foram muito uniformes, e que o coeficiente de variação foi baixo.

Tabela 8.4 – Valores dos momentos torçores últimos.

Viga		T_u (kNm)	$\frac{T_u}{T_{u,ref}}$
VRef		22,4	–
Série VT	VT1	31,6	1,41
	VT2	29,9	1,33
	VT3	35,0	1,56
Série VTL	VTL1	28,0	1,25
	VTL2	32,9	1,47
	VTL3	31,7	1,42
Série VT	Média	32,17	1,44
	Desv. Pad.	2,60	0,12
	Coef. Var. (%)	8,07	
Série VTL	Média	30,87	1,38
	Desv. Pad.	2,55	0,11
	Coef. Var. (%)	8,27	

O aumento da resistência à torção foi de cerca de 40%, o que mostra que esse tipo de reforço é efetivo.

Verificou-se que a ruptura sempre foi controlada pela biela flexo-comprimida, o que mostra que tal como nas vigas de concreto armado a verificação da biela é uma etapa fundamental nesse tipo de análise.

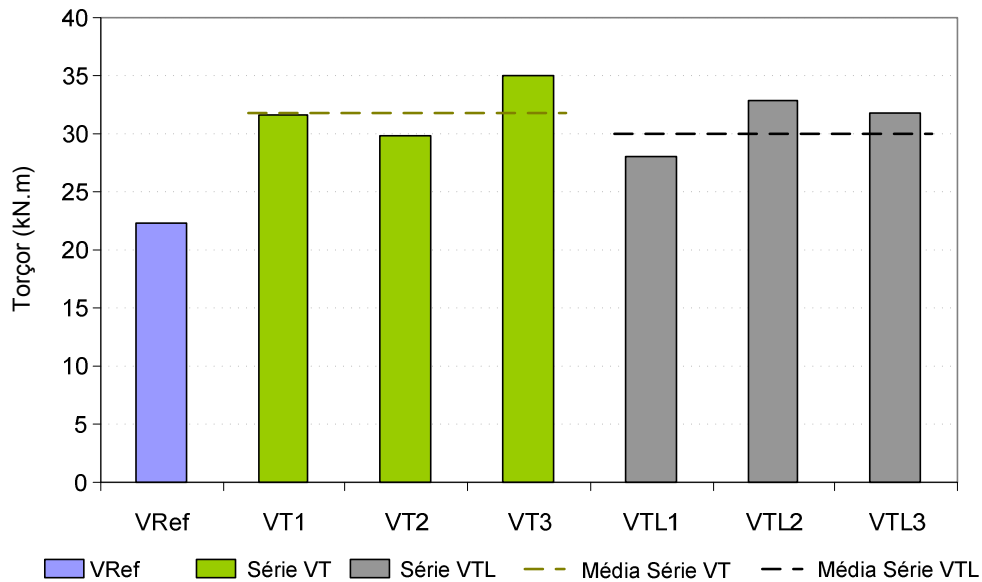


Figura 8.14 – Comparação entre os momentos torçores de ruptura.

8.5. Análise das Deformações Específicas nas Armaduras de Aço e CFC

As Figuras 8.15, 8.16 e 8.17 mostram os diagramas momento torçor vs. deformação específica $T \times \varepsilon$, das armaduras de aço e do reforço com CFC da viga VTL2, nas direções transversal e longitudinal, nas posições instrumentadas com os EER tal como apresentadas no capítulo 7.

Até se atingir o momento torçor de fissuração as deformações específicas foram praticamente nulas, tanto nas armaduras de aço e nos reforços de CFC, nas direções transversal e longitudinal.

Após a fissuração as deformações específicas nas armaduras de aço aumentaram expressivamente, apresentando um comportamento aproximadamente linear.

As deformações específicas das armaduras de CFC, longitudinais e transversais, também aumentaram bruscamente após o momento torçor de fissuração, entretanto, o comportamento da curva $T \times \varepsilon$ não apresentou um padrão definido.

Os gráficos das demais vigas apresentaram o mesmo padrão, e constam do Anexo A.

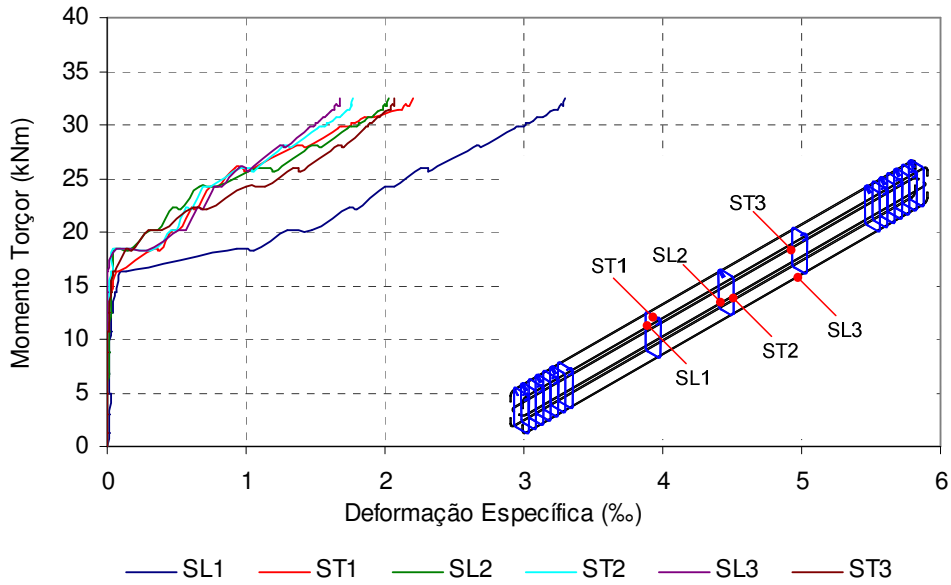


Figura 8.15 – Momento torçor x deformação específica da armadura transversal e longitudinal de aço da viga VTL2.

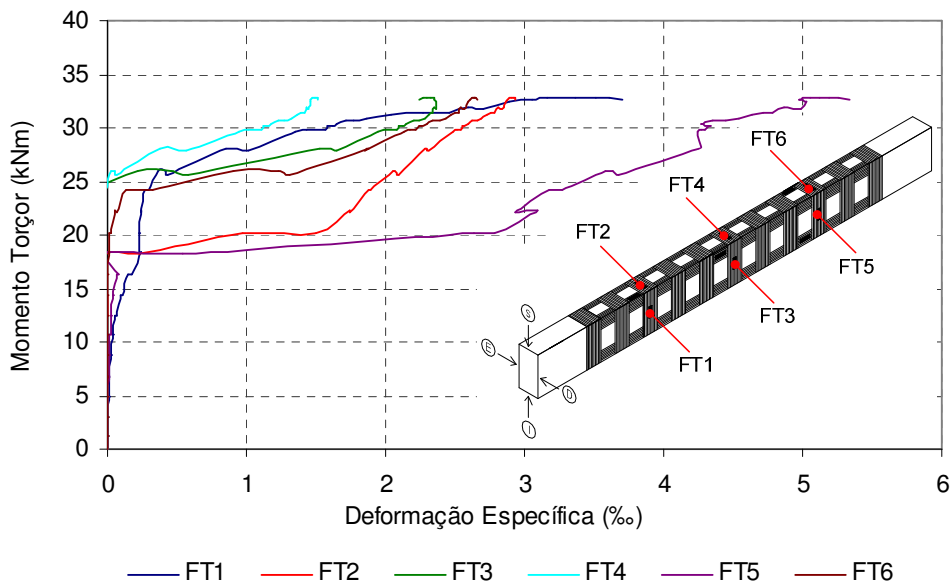


Figura 8.16 – Momento torçor x deformação específica da armadura transversal de CFC da viga VTL2.

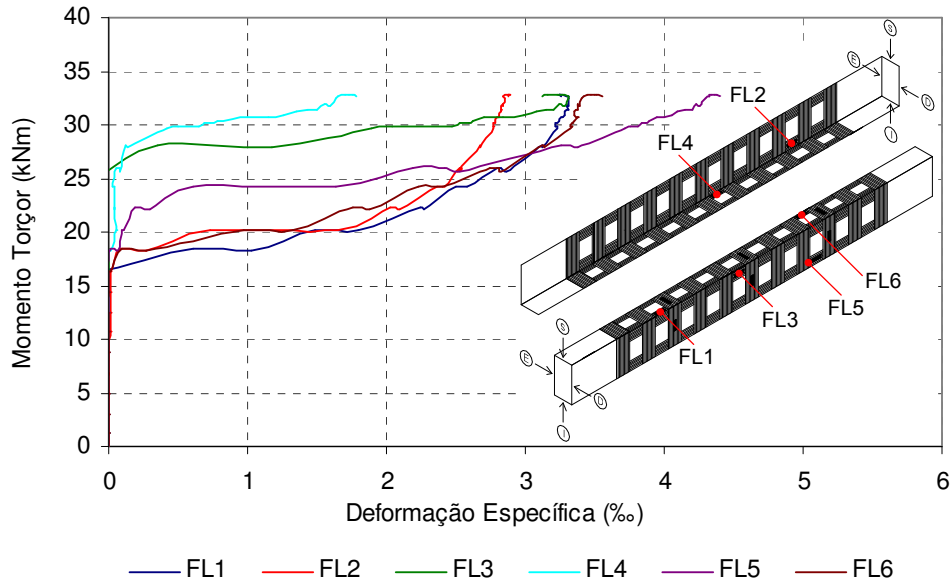


Figura 8.17 – Momento torçor x deformação específica da armadura longitudinal de CFC da viga VTL2.

Os valores das deformações específicas últimas nas armaduras de aço e do reforço com CFC das vigas ensaiadas são mostrados na Tabela 8.5, e as posições onde esses valores foram obtidos são mostrados nas Figuras 8.18 e 8.19.

Tabela 8.5 – Deformações específicas últimas nas armaduras de aço e no reforço com CFC, nas direções transversal e longitudinal.

Viga	ϵ_{su} (‰)		ϵ_{fu} (‰)		
	Transv.	Long.	Transv.	Long.	
Ref	2,186	2,387	–	–	
Série VT	VT1	2,145	2,302	3,486	
	VT2	2,428	2,587	4,064	
	VT3	1,690	3,151	4,271	
Série VTL	VTL1	1,713	2,408	3,247	3,302
	VTL2	2,275	3,397	5,253	4,382
	VTL3	2,151	2,475	4,090	3,566

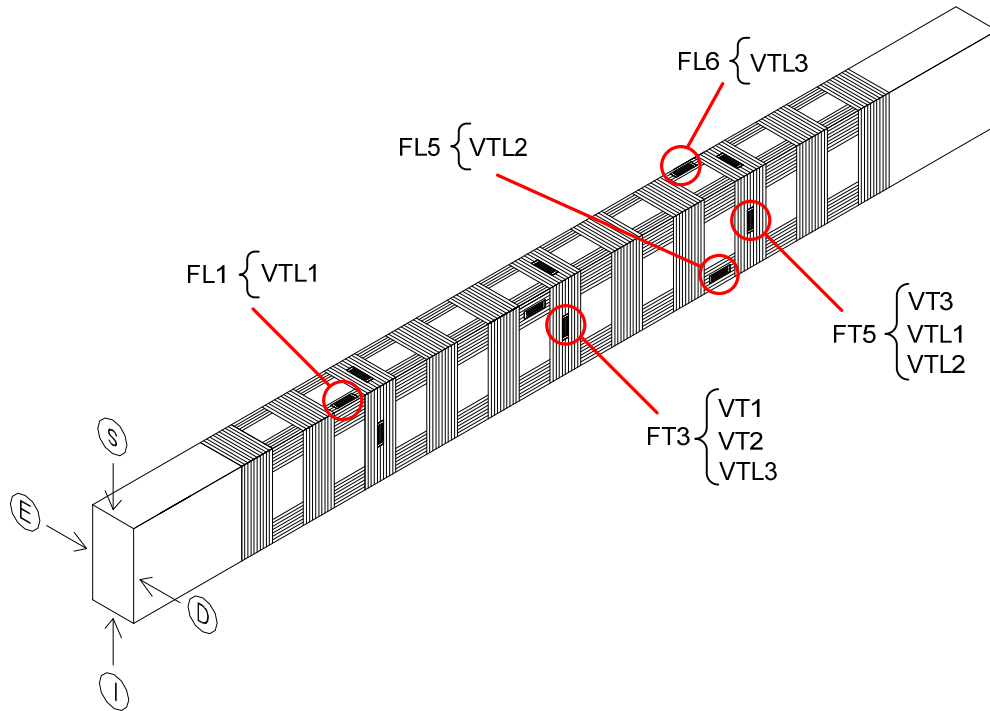


Figura 8.18 – Posição onde foram obtidas as deformações específicas máximas no CFC.

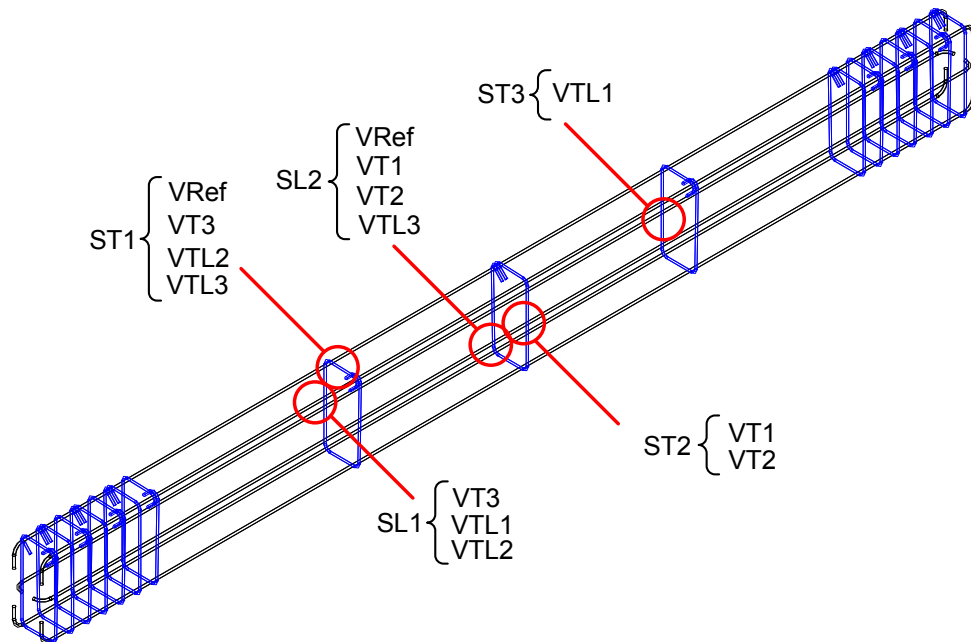


Figura 8.19 – Posição onde foram obtidas as deformações específicas máximas nas armaduras internas de aço.

O gráfico da Figura 8.20 apresenta o fator de efetividade das deformações específicas do CFC, que é a razão entre a deformação específica máxima obtida

nos ensaios das vigas e a deformação específica última média obtida nos ensaios de tração do CFC.

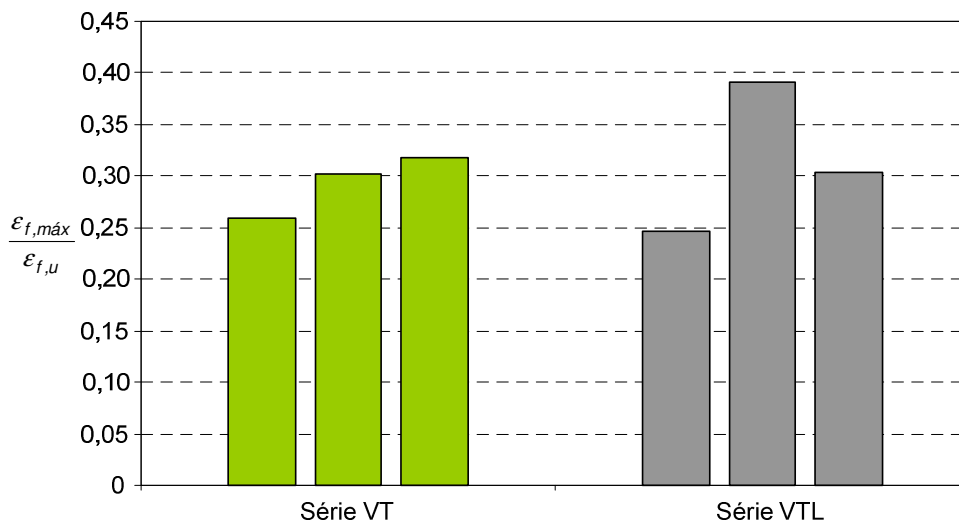


Figura 8.20 – Fator de efetividade das deformações específicas do CFC.

Os valores de das deformações específicas de todas as vigas mostraram-se consistentes, mas para se obter uma relação das mesmas com os demais parâmetros das vigas, tais como, resistência à compressão do concreto f_c e taxa geométrica total das armaduras $\rho_{TOTAL} = (\rho_{st} + \rho_{sl}) + (\rho_{ft} + \rho_{fl})$, é necessário a realização de ensaios apropriados para esse tipo de análise.

8.6. Análise do Ângulo de Inclinação da Biela

Para cada viga ensaiada foram obtidos quatro diferentes ângulos de inclinação da biela: o ângulo determinado a partir do estado de deformação da viga α_ε , o ângulo das fissuras α_f , o ângulo calculado a partir do campo de tensões existentes na viga α_σ e o ângulo α_{Ap} calculado a partir da expressão 6.138 de Aprile e Benedetti (2004) (Figura 8.21a e 8.21b).

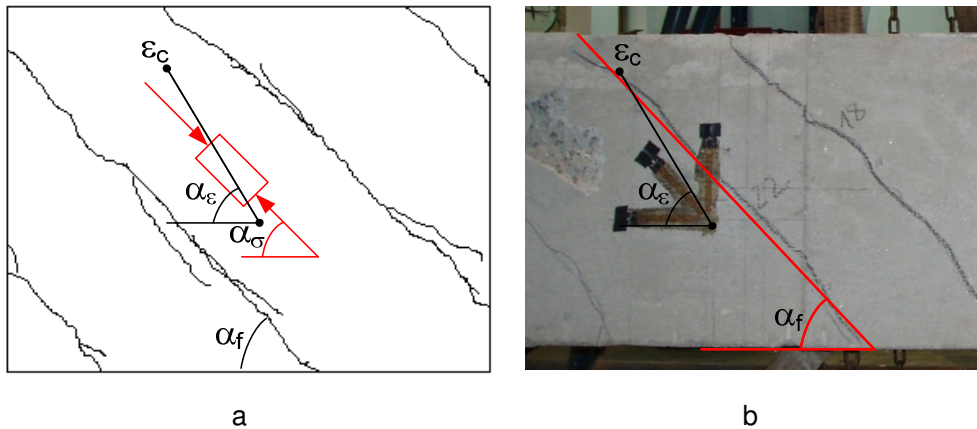


Figura 8.21 – Deformações específicas: a) painel fissurado; b) viga VRef.

Utilizando-se o círculo de Mohr, calculou-se o ângulo α_ϵ a partir das deformações específicas medidas por meio dos três extensômetros colados na superfície da viga.

O ângulo α_f foi determinado graficamente por meio da utilização de programa de computador para edição gráfica. Para cada viga foram feitas várias medições dos ângulos das fissuras, e para o cálculo de α_f foi obtida uma média desses valores.

O ângulo α_σ foi calculado utilizando-se a formulação apresentada no item 6.2, e as deformações específicas medidas no concreto e nas armaduras transversal e longitudinal de aço e CFC. O processo foi executado de forma iterativa, de acordo com o fluxograma mostrado na Figura 8.22:

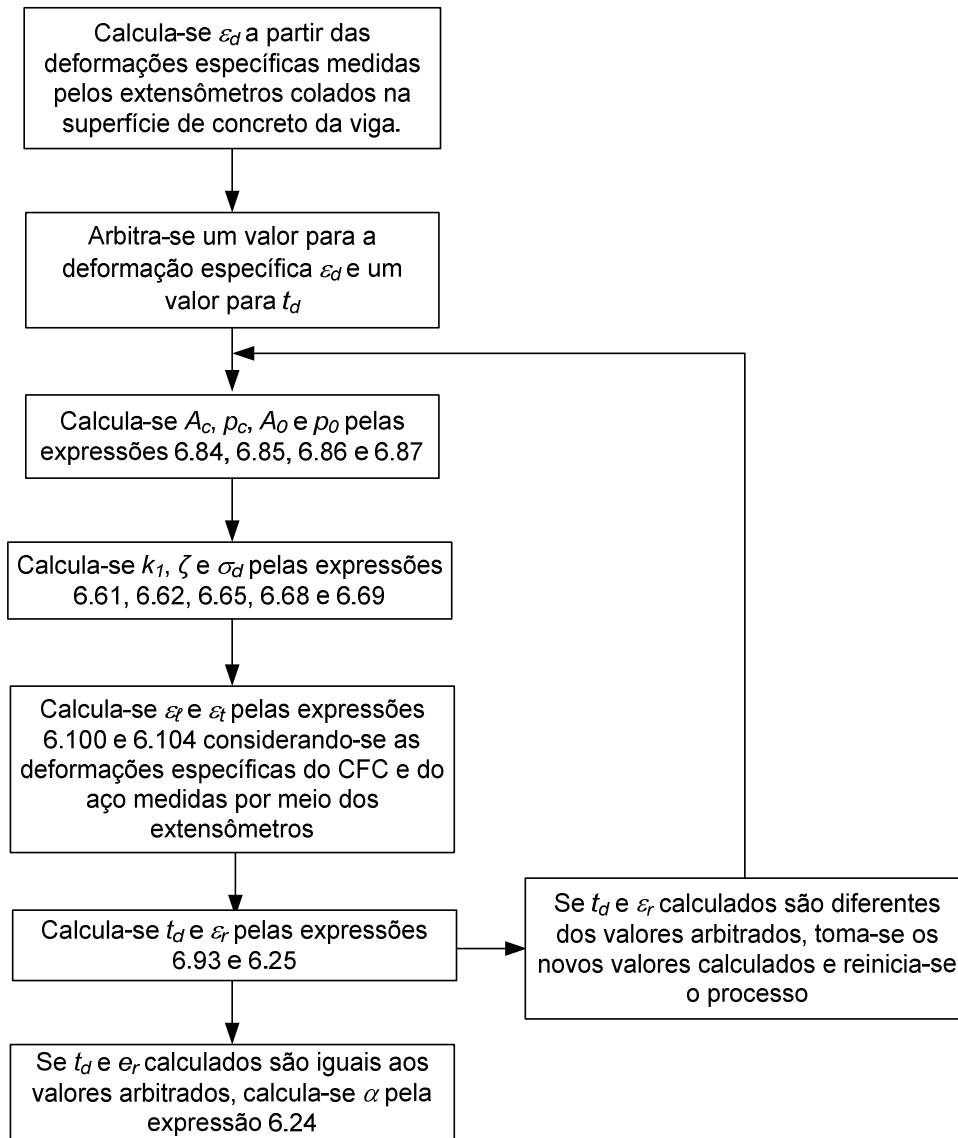


Figura 8.22 – Fluxograma.

Analisando-se os dados apresentados na Tabela 8.6 e na Figura 8.23 conclui-se que:

1. α_{Ap} é constante em cada grupo de vigas, pois depende apenas de parâmetros mecânicos;
2. com exceção da viga de VTL1, observa-se que $\alpha_\varepsilon > \alpha_f > \alpha_{Ap} > \alpha_\sigma$;
3. para a viga VTL1 obteve-se $\alpha_\varepsilon > \alpha_\sigma > \alpha_f > \alpha_{Ap}$;
4. nas quatro diferentes formas de determinação do ângulo de inclinação das fissuras, as vigas da série VT apresentaram valores maiores que as vigas da série VTL.

5. as vigas das séries VT e VTL apresentaram valores de ângulo de inclinação da biela superiores ao da viga de referência.

Tabela 8.6 – Ângulo de inclinação das bielas das vigas.

Viga		T_u (kNm)	α_ε (°)	α_f (°)	α_σ (°)	α_{Ap} (°)
VRef		22,4	46,1	42,6	35,7	-
Série VT	VT1	31,6	54,5	49,4	45,0	46,0
	VT2	29,9	56,4	48,5	43,8	46,0
	VT3	35	55,7	48,1	39,4	46,0
Série VTL	VTL1	28	50,6	45,9	46,5	44,0
	VTL2	32,9	49,6	46,1	38,7	44,0
	VTL3	31,7	49,2	46,7	40,5	44,0

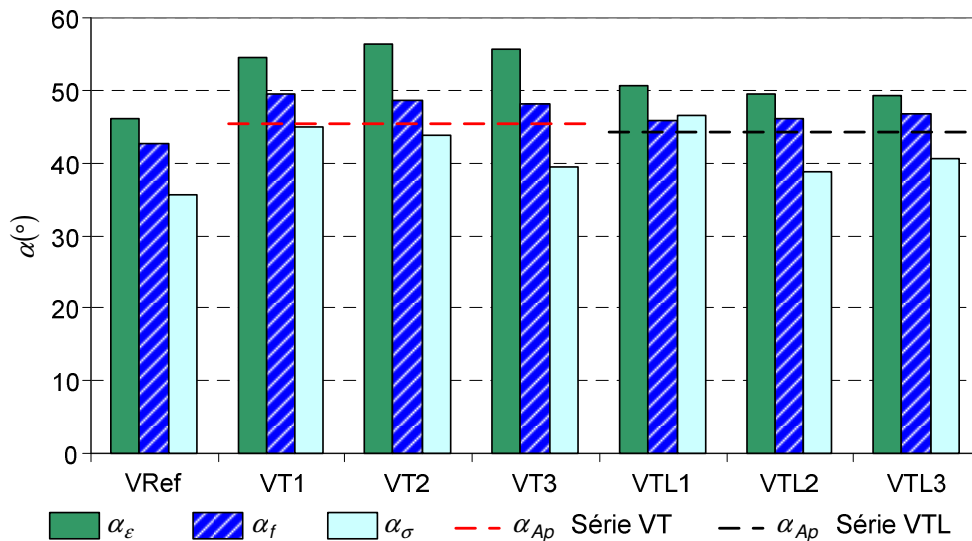


Figura 8.23 – Ângulo de inclinação das bielas.

As Figuras 8.24 e 8.25 mostram as comparações dos valores desses ângulos, marcando-se o limite de $\pm 20\%$ de diferença eles. Observa-se que:

- na comparação entre $\alpha_\varepsilon \times \alpha_\sigma$ duas vigas da série VT e uma viga da série VTL ficaram fora do limite de +20%;
- na comparação entre $\alpha_f \times \alpha_\sigma$ todas as vigas ficaram dentro dos limites de $\pm 20\%$.

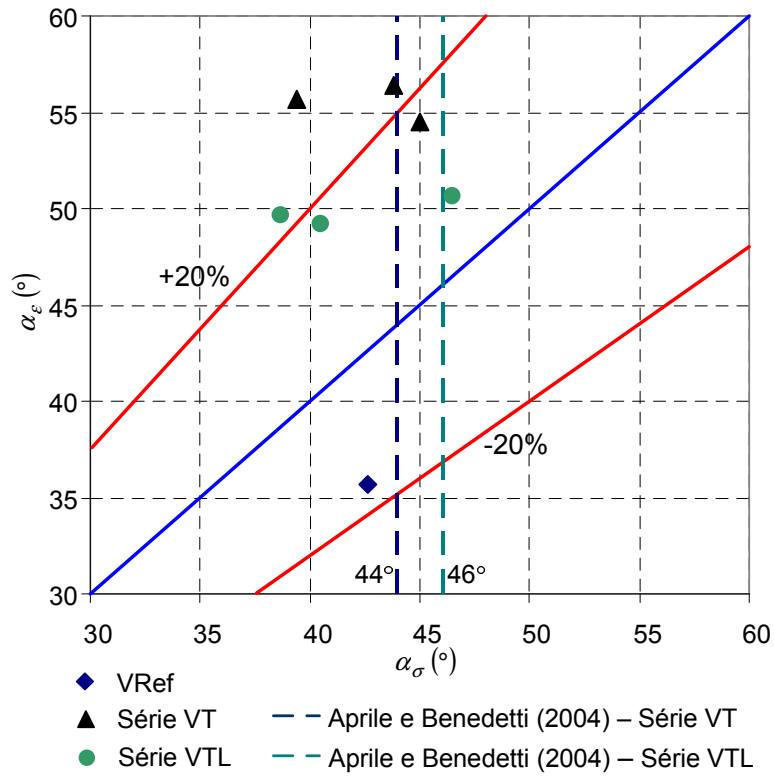


Figura 8.24 – Ângulo de inclinação das bielas.

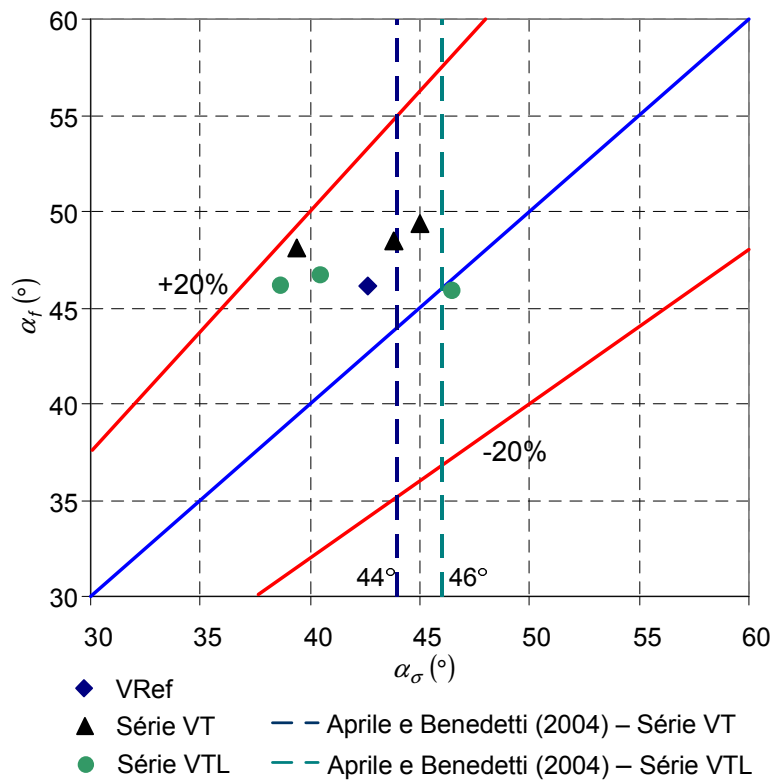


Figura 8.25 – Ângulo de inclinação das bielas.

As Figuras 8.26 e 8.27 apresentam as comparações entre $\frac{\epsilon_{st,exp}}{\epsilon_{ft,exp}} \times \alpha$ e

$\frac{\epsilon_{sl,exp}}{\epsilon_{ft,exp}} \times \alpha$, considerando-se α_ϵ , α_f , α_σ e α_{Ap} . Para a direção transversal

observa-se que relação $\frac{\epsilon_{st,exp}}{\epsilon_{ft,exp}}$ apresenta valores entre 0,396 e 0,615. Na

direção longitudinal os valores da razão $\frac{\epsilon_{sl,exp}}{\epsilon_{ft,exp}}$ variam entre 0,694 e 0,775

(Tabela 8.7).

Tabela 8.7 – Razões entre $\frac{\epsilon_{st,exp}}{\epsilon_{ft,exp}}$ e $\frac{\epsilon_{sl,exp}}{\epsilon_{ft,exp}}$.

Viga		$\epsilon_{st,exp}$	$\epsilon_{sl,exp}$	$\epsilon_{ft,exp}$	$\epsilon_{ft,exp}$	$\frac{\epsilon_{st,exp}}{\epsilon_{ft,exp}}$	$\frac{\epsilon_{sl,exp}}{\epsilon_{ft,exp}}$
Série VT	VT1	2,145	2,302	3,486	—	0,615	—
	VT2	2,428	2,587	4,064	—	0,597	—
	VT3	1,69	3,151	4,271	—	0,396	—
Série VTL	VTL1	1,713	2,408	3,247	3,302	0,528	0,729
	VTL2	2,275	3,397	5,253	4,382	0,433	0,775
	VTL3	2,151	2,475	4,090	3,566	0,526	0,694

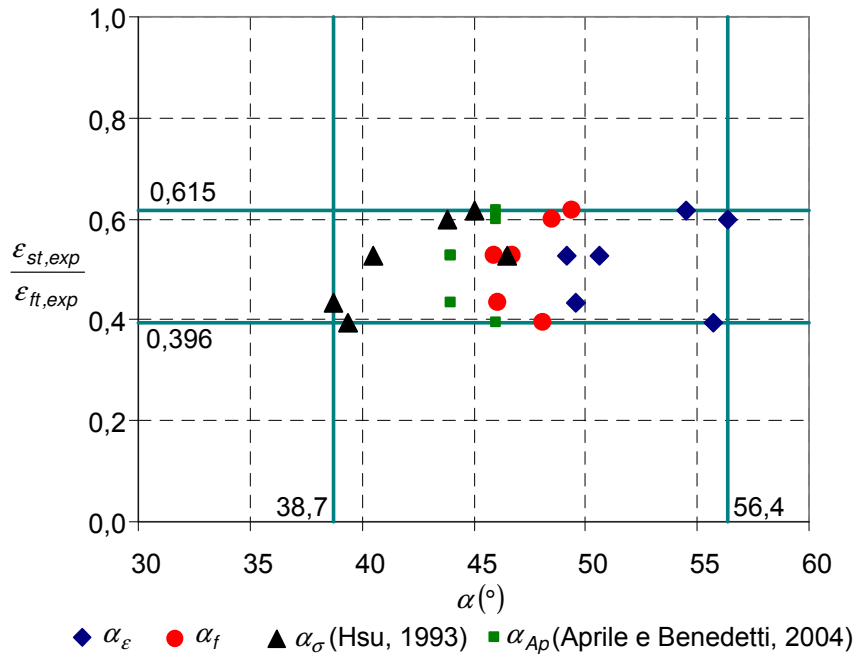


Figura 8.26 – Gráfico $\frac{\epsilon_{st,exp}}{\epsilon_{ft,exp}} \times \alpha$.

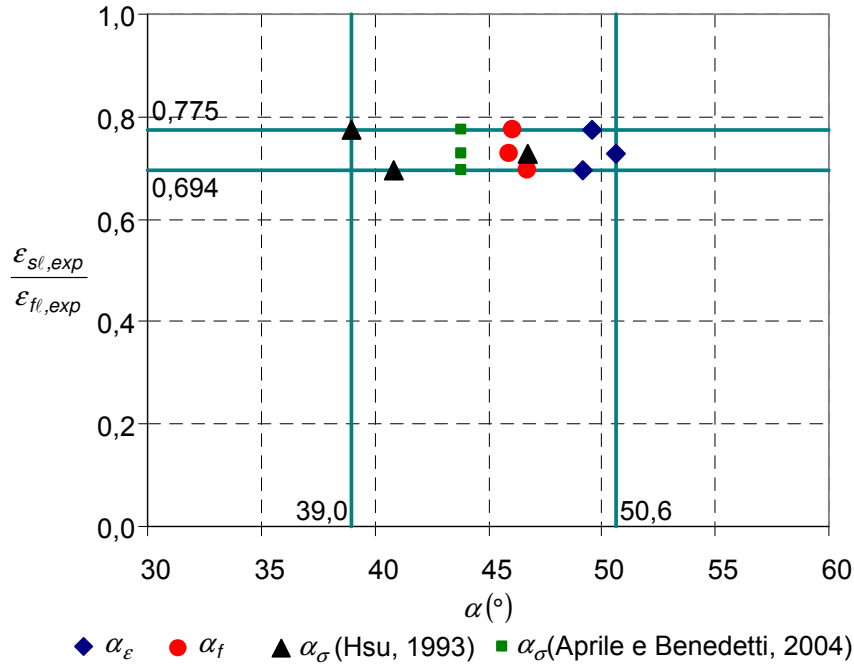


Figura 8.27 – Figura 8.16 – Gráfico $\frac{\epsilon_{sl,exp}}{\epsilon_{fl,exp}} \times \alpha$.

A tensão de compressão na biela foi determinada considerando-se os valores de α_ϵ , α_f e α_σ , e calculada a partir das seguintes expressões:

$$\sigma_{c,\epsilon} = \frac{T}{2tA_0 \text{sen} \alpha_\epsilon \text{cos} \alpha_\epsilon} \quad (8.12)$$

$$\sigma_{c,f} = \frac{T}{2tA_0 \text{sen} \alpha_f \text{cos} \alpha_f} \quad (8.13)$$

$$\sigma_{c,\sigma} = \frac{T}{2tA_0 \text{sen} \alpha_\sigma \text{cos} \alpha_\sigma} \quad (8.14)$$

$$\sigma_{c,Ap} = \frac{T}{2tA_0 \text{sen} \alpha_{Ap} \text{cos} \alpha_{Ap}} \quad (8.15)$$

onde

$\sigma_{c,\epsilon}$ – tensão de compressão na biela calculado a partir de α_ϵ ;

$\sigma_{c,f}$ – tensão de compressão na biela calculado a partir de α_f ;

$\sigma_{c,\sigma}$ – tensão de compressão na biela calculado a partir de α_σ ;

$\sigma_{c,Ap}$ – tensão de compressão na biela calculado a partir de α_{Ap} ;

Com os valores da tensão de compressão na biela e com a resistência média do concreto utilizado nas vigas, determinou-se o fator de efetividade do concreto, calculado pelas seguintes expressões (Tabela 8.8 e Figuras 8.28 e 8.29):

$$v_{\varepsilon} = \frac{\sigma_{c,\varepsilon}}{f_c} \quad (8.16)$$

$$v_f = \frac{\sigma_{c,f}}{f_c} \quad (8.17)$$

$$v_{\sigma} = \frac{\sigma_{c,\sigma}}{f_c} \quad (8.18)$$

$$v_{Ap} = \frac{\sigma_{c,Ap}}{f_c} \quad (8.19)$$

onde

- v_{ε} – fator de efetividade do concreto calculado a partir de $\sigma_{c,\varepsilon}$;
- v_f – fator de efetividade do concreto calculado a partir de $\sigma_{c,f}$;
- v_{σ} – fator de efetividade do concreto calculado a partir de $\sigma_{c,\sigma}$;
- v_{Ap} – fator de efetividade do concreto calculado a partir de $\sigma_{c,Ap}$;
- f_c – resistência à compressão do concreto;

Para o cálculo do coeficiente de efetividade utilizou-se a resistência média à compressão do concreto, pois as vigas foram ensaiadas com idades em torno de um ano.

A hipótese admitida pelos modelos teóricos de que o ângulo de inclinação das fissuras, o ângulo do campo de deformações e o ângulo do campo de tensões são iguais é adequada, e fornece resultados consistentes e próximos.

Contudo, recomenda-se a realização de mais ensaios com medições desses ângulos, considerando-se a variação da resistência à compressão do concreto e das taxas geométricas das armaduras de aço e de CFC.

Tabela 8.8 – Tensão de compressão na biela e fator de efetividade do concreto de acordo com os ângulos medidos e calculados.

Viga	f_c (MPa)	$\sigma_{c,\varepsilon}$ (MPa)	$\sigma_{c,f}$ (MPa)	$\sigma_{c,\sigma}$ (MPa)	$\sigma_{c,Ap}$ (MPa)	v_ε	v_f	v_σ	$v_{\sigma,Ap}$
Ref	36,6	10,31	10,34	10,87	–	0,282	0,282	0,297	–
Série VT	VT1	36,6	14,13	13,52	13,36	13,37	0,386	0,369	0,365
	VT2	36,6	13,71	12,73	12,65	12,65	0,375	0,348	0,346
	VT3	36,6	15,89	14,88	15,08	14,80	0,434	0,407	0,412
Série VTL	VTL1	36,6	12,08	11,85	11,86	11,85	0,330	0,324	0,324
	VTL2	36,6	14,10	13,93	14,26	13,93	0,385	0,381	0,390
	VTL3	36,6	13,56	13,44	13,58	13,42	0,370	0,367	0,371
Série VT	Média		14,58	13,71	13,70	13,61	0,398	0,375	0,374
	Des. Pad.		1,16	1,09	1,25	1,10	0,032	0,030	0,034
	Coef. Var. (%)		7,94	7,93	9,13	8,07	7,94	7,93	9,13
Série VTL	Média		13,25	13,07	13,24	13,07	0,362	0,357	0,362
	Des. Pad.		1,05	1,09	1,24	1,08	0,029	0,030	0,034
	Coef. Var. (%)		7,91	8,30	9,34	8,27	7,91	8,30	9,34
VT+VTL	Média		13,91	13,39	13,47	13,34	0,380	0,366	0,368
	Des. Pad.		1,15	0,95	1,05	0,94	0,031	0,026	0,029
	Coef. Var. (%)		8,25	7,09	7,76	7,01	8,25	7,09	7,76

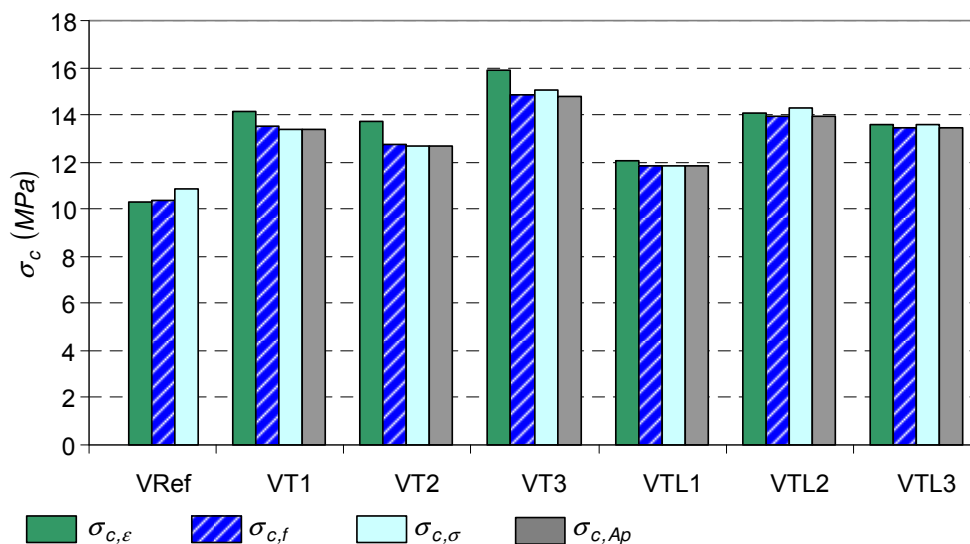


Figura 8.28 – Tensão de compressão na biela.

O cálculo dos ângulos de inclinação da biela segundo Aprile e Benedetti (2004) apresentadas resultados consistentes, o que indica que esse modelo pode ser usado para a análise do reforço à torção.

Os fatores de efetividade do concreto para as diversas formulações foram inferiores aos prescritos pelo Eurocode 2 e diversos autores para vigas de concreto armado.

Com exceção do valor calculado para a viga de referência e a viga VTL2, constatou-se que os valores da tensão de compressão na biela da treliça espacial $\sigma_{c,\varepsilon}$ são superiores aos valores de $\sigma_{c,\sigma}$, $\sigma_{c,f}$ e $\sigma_{c,Ap}$.

A tensão $\sigma_{c,f}$ só é maior do que a tensão $\sigma_{c,\sigma}$ nas vigas VT1 e VT2.

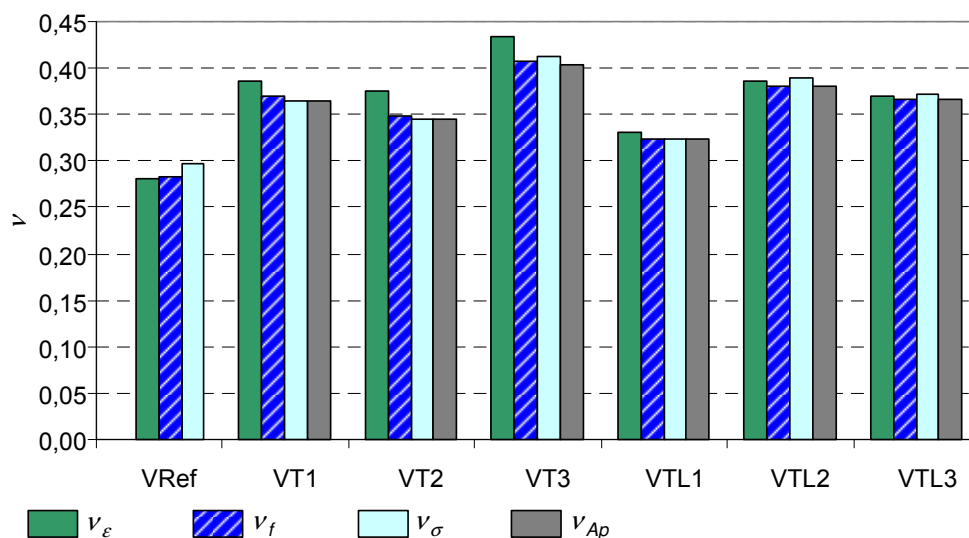


Figura 8.29 – Fator de efetividade do concreto.

Assim como no cálculo da tensão de compressão da biela verificou-se que os valores do fator de efetividade do concreto v_ε são maiores que os valores de v_σ e v_f , exceto na viga de referência e nas vigas VTL2 e VTL3 onde v_σ é maior que v_ε .

8.7.

Deformações Específicas Teóricas Calculadas de Acordo com o Bulletin 14 da FIB

A Tabela 8.9 e as Figuras 8.30, 8.31, 8.32 e 8.33 comparam as deformações específicas últimas no CFC obtidas nos ensaios das vigas reforçadas com as deformações específicas calculadas a partir do Bulletin 14 da FIB, considerando-se o acréscimo do momento torçor proporcionado pelo reforço com CFC. Verifica-se que as deformações específicas teóricas nas armaduras

do CFC transversal da série VT, são inferiores aos valores obtidos experimentalmente.

Na série VTL os valores das deformações específicas teóricas nas armaduras de CFC, tanto transversais como longitudinais, são em geral maiores que os valores obtidos no programa experimental.

Tabela 8.9 – Deformações específicas últimas calculadas de acordo com o Bulletin 14 da FIB.

Viga	$T_{u,exp}$	$\Delta T_{u,CFC}$	Bulletin 14 da FIB								
			α_ε		α_f		α_σ		α_{Ap}		
			ε_{ftu}	ε_{flu}	ε_{ftu}	ε_{flu}	ε_{ftu}	ε_{flu}	ε_{ftu}	ε_{flu}	
	kNm	kNm	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	($\times 10^{-3}$)	
VRef	22,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Série VT	VT1	31,6	9,2	2,561	–	2,131	–	1,833	–	1,892	–
	VT2	29,9	7,5	2,241	–	1,683	–	1,433	–	1,542	–
	VT3	35,0	12,6	3,667	–	2,788	–	2,062	–	2,591	–
Série VTL	VTL1	28,0	5,6	2,707	1,827	2,295	2,155	2,360	2,096	2,147	2,303
	VTL2	32,9	10,5	4,899	3,549	4,333	4,012	3,376	5,149	4,026	4,318
	VTL3	31,7	9,3	4,278	3,188	3,919	3,480	3,188	4,278	3,566	3,824
Série VT	Média		9,8	2,823	–	2,201	–	1,776	–	2,008	–
	Des. Pad.		2,6	0,748	–	0,556	–	0,318	–	0,534	–
	C. V. (%)		26,59	26,51	–	25,25	–	17,93	–	26,59	–
Série VTL	Média		8,5	3,962	2,854	3,515	3,216	2,975	3,841	3,247	3,482
	Des. Pad.		2,6	1,130	0,908	1,077	0,957	0,541	1,573	0,979	1,050
	C. V. (%)		30,17	28,52	31,82	30,6	29,74	18,18	40,95	30,17	30,17

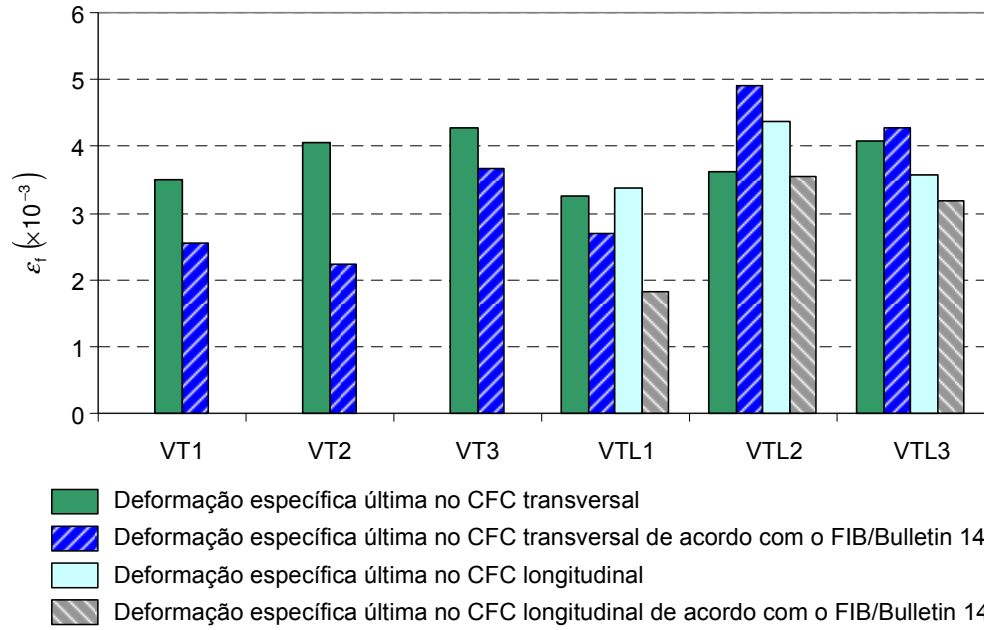


Figura 8.30 – Comparação entre deformações específicas últimas experimentais e deformações específicas calculadas a partir do Bulletin 14 da FIB considerando-se α_{ϵ} .

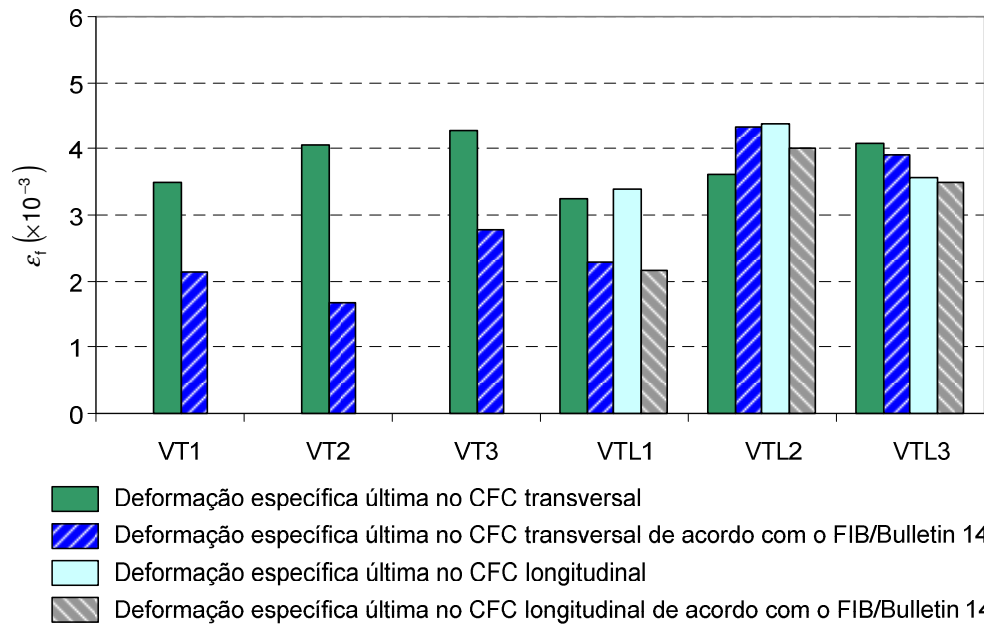


Figura 8.31 – Comparação entre deformações específicas últimas experimentais e deformações específicas calculadas a partir do Bulletin 14 da FIB considerando-se α_{ϵ} .

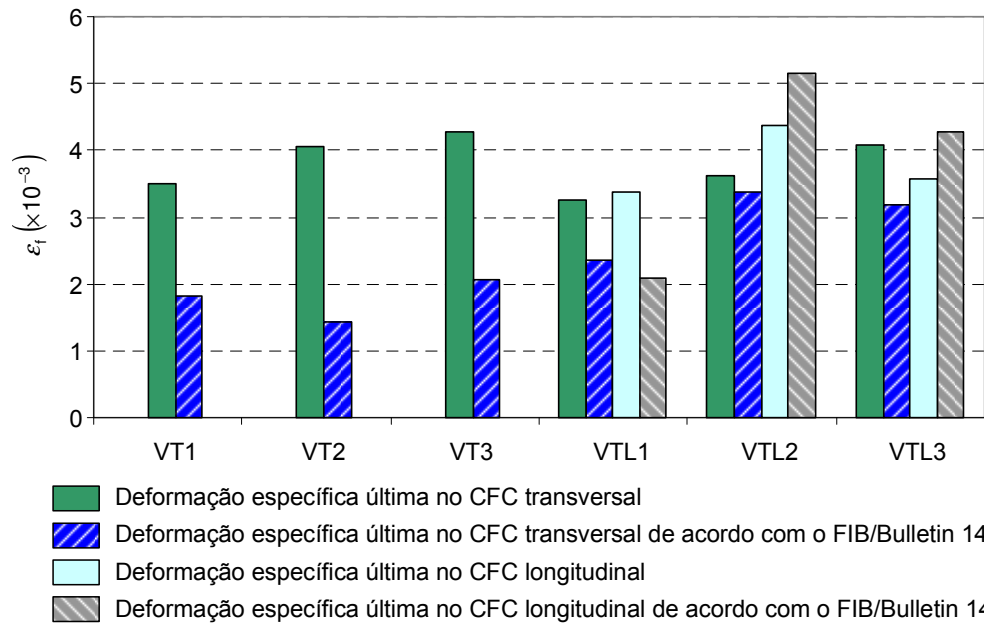


Figura 8.32 – Comparação entre deformações específicas últimas experimentais e deformações específicas calculadas a partir do Bulletin 14 da FIB considerando-se α_σ .

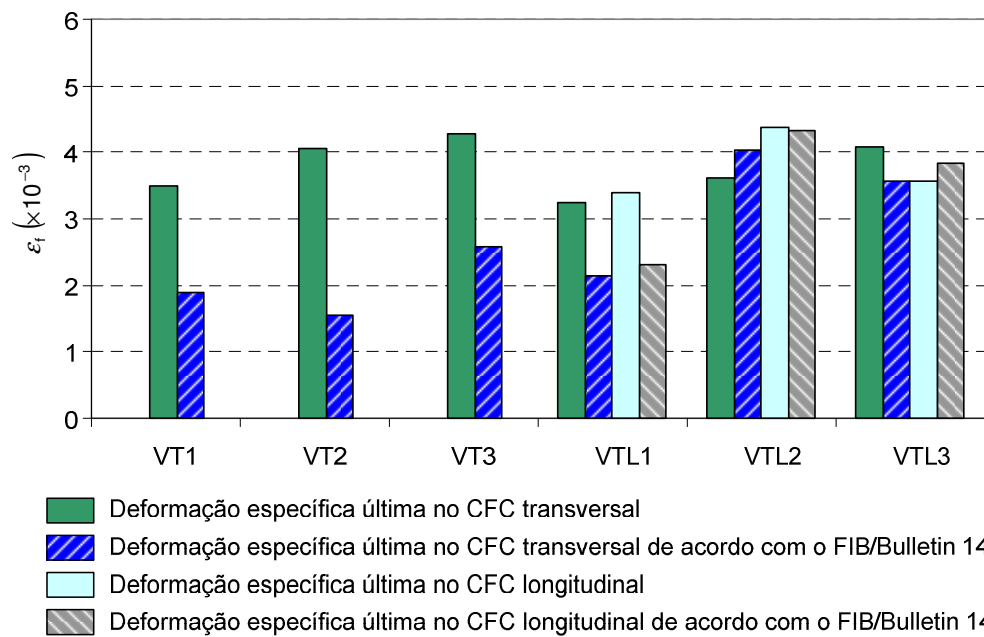


Figura 8.33 – Comparação entre deformações específicas últimas experimentais e deformações específicas calculadas a partir do Bulletin 14 da FIB considerando-se α_{Ap} .

Com as deformações específicas teóricas do CFC calculadas a partir dos ângulos α_ε , α_f , α_σ e α_{Ap} e as deformações específicas últimas obtidas nos ensaios das vigas, se tem as razões η_t e η_ℓ , que relacionam os valores das

deformações específicas teóricas calculadas a partir do FIB bulletin 14 com os valores das deformações específicas experimentais, apresentados na Tabela 8.10 e nas Figuras 8.34 e 8.35, sendo:

$$\eta_t = \frac{\varepsilon_{ft,teo}}{\varepsilon_{ft,exp}} \quad (8.20)$$

$$\eta_\ell = \frac{\varepsilon_{fl,teo}}{\varepsilon_{fl,exp}} \quad (8.21)$$

onde

$\varepsilon_{ft,teo}$ – deformação específica teórica do CFC na direção transversal;

$\varepsilon_{fl,teo}$ – deformação específica teórica do CFC na direção longitudinal;

$\varepsilon_{ft,exp}$ – deformação específica experimental do CFC na direção transversal;

$\varepsilon_{fl,exp}$ – deformação específica experimental do CFC na direção longitudinal;

Tabela 8.10 – Valores das razões η_t e η_ℓ para os ângulos α_ε , α_f , α_σ e α_{Ap} .

Viga	ε_{ftu}	ε_{flu}	α_ε		α_f		α_σ		α_{Ap}		
	‰	‰	η_t	η_ℓ	η_t	η_ℓ	η_t	η_ℓ	η_t	η_ℓ	
Série VT	VT1	3,486	–	1,36	–	1,64	–	1,90	–	1,84	–
	VT2	4,064	–	1,81	–	2,41	–	2,84	–	2,64	–
	VT3	4,271	–	1,16	–	1,53	–	2,07	–	1,65	–
Série VTL	VTL1	3,247	3,302	1,20	1,85	1,41	1,57	1,38	1,61	1,51	1,47
	VTL2	5,253	4,382	0,74	1,23	0,83	1,09	1,07	0,85	0,90	1,01
	VTL3	4,090	3,566	0,96	1,12	1,04	1,02	1,28	0,83	1,15	0,93
Série VT	Média			1,45	–	1,86	–	2,27	–	2,04	–
	Desvio Padrão			0,33	–	0,48	–	0,50	–	0,52	–
	Coef. de Var. (%)			23,0	–	25,9	–	21,9	–	25,6	–
Série VTL	Média			0,96	1,40	1,10	1,23	1,24	1,10	1,19	1,14
	Desvio Padrão			0,23	0,39	0,29	0,30	0,16	0,45	0,31	0,29
	Coef. de Var. (%)			24,0	28,1	26,8	24,2	12,6	40,5	26,1	25,4

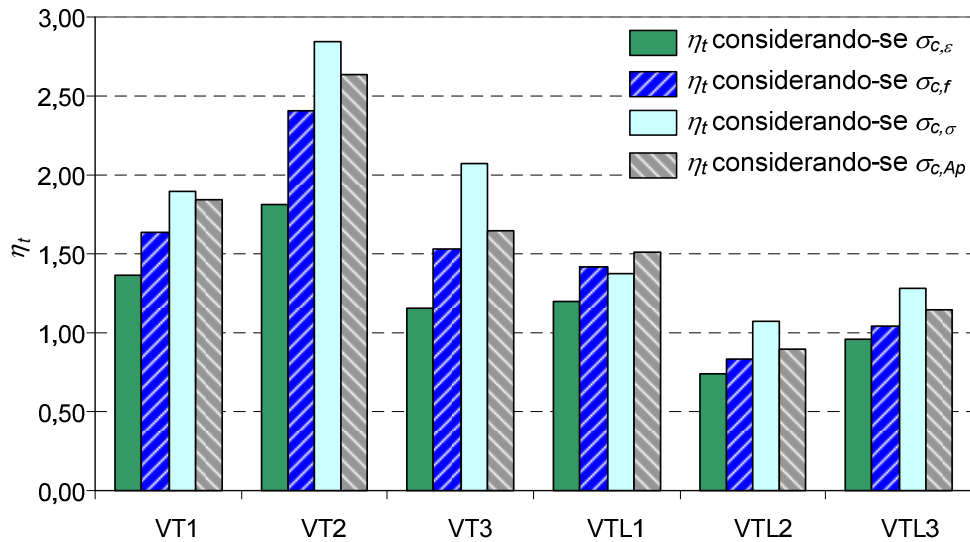


Figura 8.34 – Razões η_t do CFC longitudinal.

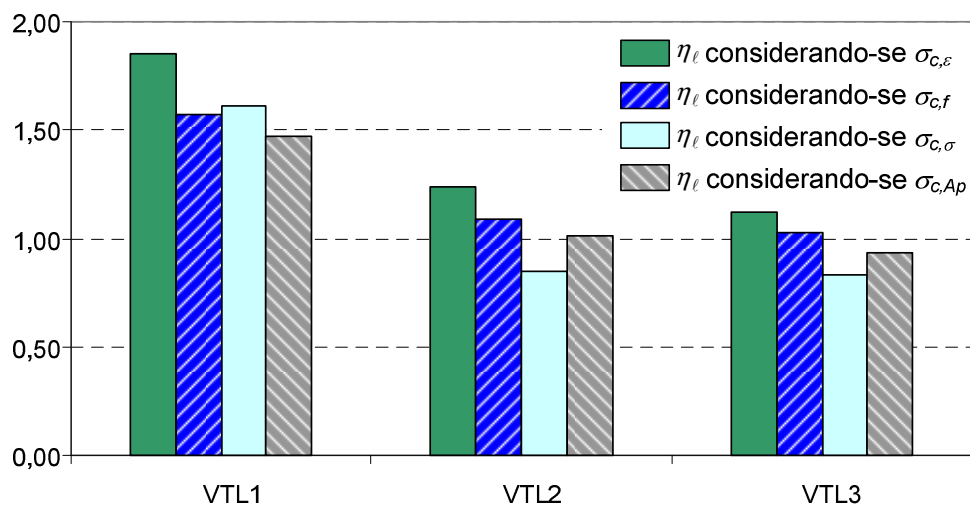


Figura 8.35 – Razões η_l do CFC transversal.

As expressões para a deformação específica do CFC fornecidas pelo Bulletin 14 da FIB devem ser usadas com cautela, pois foram estabelecidas para vigas ensaiadas a força cortante. Essa adaptação é um procedimento não recomendável e passível de críticas, pois o mecanismo resistente à torção não é o mesmo do mecanismo resistente à força cortante.

8.8.**Comparação Entre os Valores Experimentais e os Valores Obtidos com o Modelo da Treliça Espacial do Eurocode 2**

O momento torçor de ruptura da viga de referência foi calculado segundo a sistemática recomendada pelo Eurocode 2, que se baseia no modelo da treliça espacial generalizada. Verificou-se a resistência da biela de concreto T_{Rd1} e a resistência das armaduras. As parcelas resistentes das armaduras foram calculadas com os dados obtidos nos ensaios de tração do aço, e as deformações específicas dos estribos e barras longitudinais. Os resultados obtidos por intermédio da sistemática do Eurocode 2 foram bons, tanto os das vigas da série VT, como os das vigas da série VTL (Tabela 8.11 e Figura 8.36).

O momento torçor de ruptura experimental da série VT foi em média 8,9% menor que o momento torçor último obtido a partir do modelo do Eurocode 2. O desvio padrão foi de 0,074 kNm e o coeficiente de variação de 8,07%.

Para a série VTL o valor médio do momento torçor de ruptura foi 5,3% menor que o momento torçor teórico obtido a partir do modelo do Eurocode 2. O desvio padrão foi de 0,078 kNm e o coeficiente de variação 8,27%.

Considerando-se todas as vigas reforçadas, o momento torçor teórico médio de ruptura foi 7,1% menor que o obtido experimentalmente, apresentando um desvio padrão de 0,071 kNm e um coeficiente de variação de 7,61%.

A comparação entre os resultados experimentais e teóricos mostra que o modelo da Treliça Espacial Generalizada adotado pelo Eurocode2 e consistente.

Contudo, faz-se necessário a realização de mais ensaios para um estudo mais conclusivo sobre a deformação específica no CFC, de modo a se estabelecer um valor máximo para esse parâmetro de modo a se atender à aderência completa entre o reforço e o substrato de concreto.

Tabela 8.11 – Comparação entre os resultados experimentais e os valores obtidos por intermédio do modelo do Eurocode 2.

Viga	T_{Rd1}	T_{RdrcT}	T_{RdrcL}	ΔTsd_{aft}	ΔTsd_{afl}	$T_{RdrcT} + \Delta Tsd_{aft}$	$T_{RdrcL} + \Delta Tsd_{afl}$	$T_u / T_{teó}$	
	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	
Ref	38,2	23,7	23,7	–	–	–	–	0,945	
Série VT	VT1	39,2	25,4	44,6	9,9	0	35,3	44,6	0,895
	VT2								0,847
	VT3								0,992
Série VTL	VTL1	39,2	27,3	41,5	5,3	5,0	32,7	46,5	0,859
	VTL2								1,009
	VTL3								0,972
								Média	0,911
								Desvio Padrão	0,074
								Coef. de Var. (%)	8,07
								Média	0,947
								Desvio Padrão	0,078
								Coef. de Var. (%)	8,27
								Média	0,929
								Desvio Padrão	0,071
								Coef. de Var. (%)	7,61

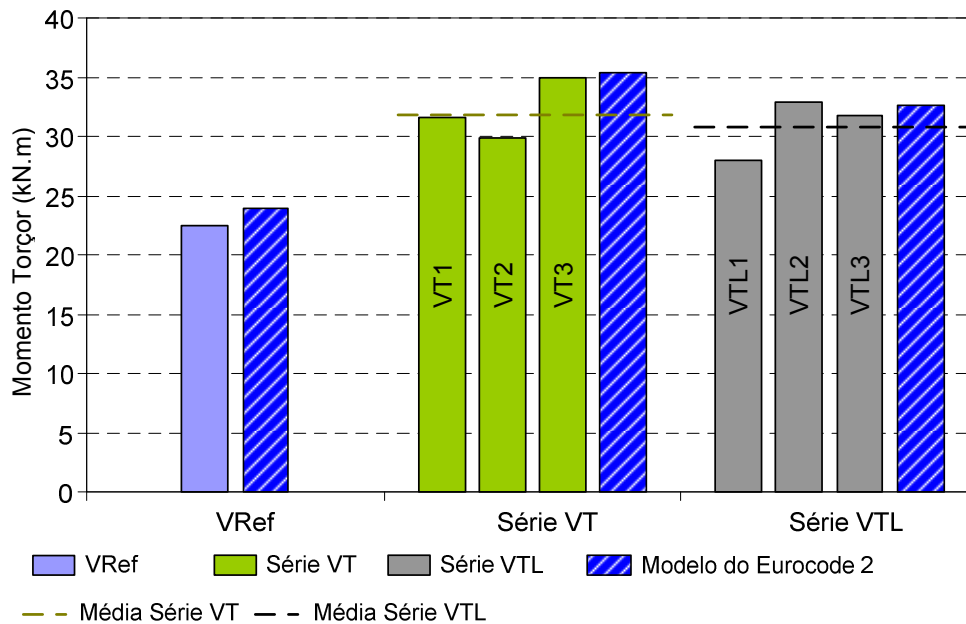


Figura 8.36 – Comparação entre os resultados experimentais e os valores obtidos por intermédio do modelo do Eurocode 2.

8.9.

Comparação entre os Valores Experimentais e os Valores Teóricos Obtidos com o Modelo da Trelça Espacial com Abrandamento de Tensões

O modelo de análise proposto mostrado no capítulo 6, apresentou resultados para os momentos torçores de ruptura e para os seus respectivos ângulos de torção por unidade de comprimento bem próximos à média dos valores experimentais. Esse modelo será denominado de forma abreviada por TEAT (Trelça Espacial com Abrandamento de Tensões).

8.9.1.

Momento Torçor de Ruptura

A Tabela 8.12 e a Figura 8.37 mostram os resultados experimentais para o momento torçor de ruptura e os respectivos valores teóricos obtidos com o modelo TEAT.

Tabela 8.12 – Comparação entre o momento torçor de ruptura experimental e o valor obtido por meio do modelo TEAT.

Viga	$T_{u,exp}$	$T_{u,teo}$	$T_u/T_{u,teo}$
	kNm	kNm	kNm
VRef	22,4	27,7	0,81
Série VT	VT1	31,6	1,03
	VT2	29,9	0,97
	VT3	35,0	1,14
Série VTL	VTL1	28,0	0,91
	VTL2	32,9	1,07
	VTL3	31,7	1,03
Série VT	Média		1,04
	Desvio Padrão		0,08
	Coef. de Var. (%)		8,07
Série VTL	Média		1,00
	Desvio Padrão		0,08
	Coef. de Var (%)		8,27
VT + VTL	Média		1,02
	Desvio Padrão		0,08
	Coef. de Var. (%)		7,65

Com os dados da Tabela 8.11 conclui-se que:

1. o momento torçor de ruptura da viga VRef foi 19% menor que o obtido a partir do modelo TEAT;
2. o momento torçor de ruptura da série VT foi em média 4% maior que o valor fornecido pelo modelo teórico de análise, com desvio padrão de 0,08 kNm e coeficiente de variação de 8,07%;
3. para a série VTL o valor médio do momento torçor de ruptura foi o mesmo que o fornecido pelo modelo de análise. O desvio padrão foi de 0,08 kNm e o coeficiente de variação foi de 8,27%;
4. considerando-se todas as vigas reforçadas, o momento torçor de ruptura experimental médio foi 2% maior que o fornecido pelo modelo TEAT. O desvio padrão foi de 0,08 kNm e o coeficiente de variação foi de 7,65%;

5. a análise estatística dos dados apresentados na Tabela 8.10 mostra que a relação entre valores experimentais e os valores fornecidos pelo modelo TEAT foram uniformes e bem próximos, tanto para as vigas da série VT quanto para as vigas da série VTL.

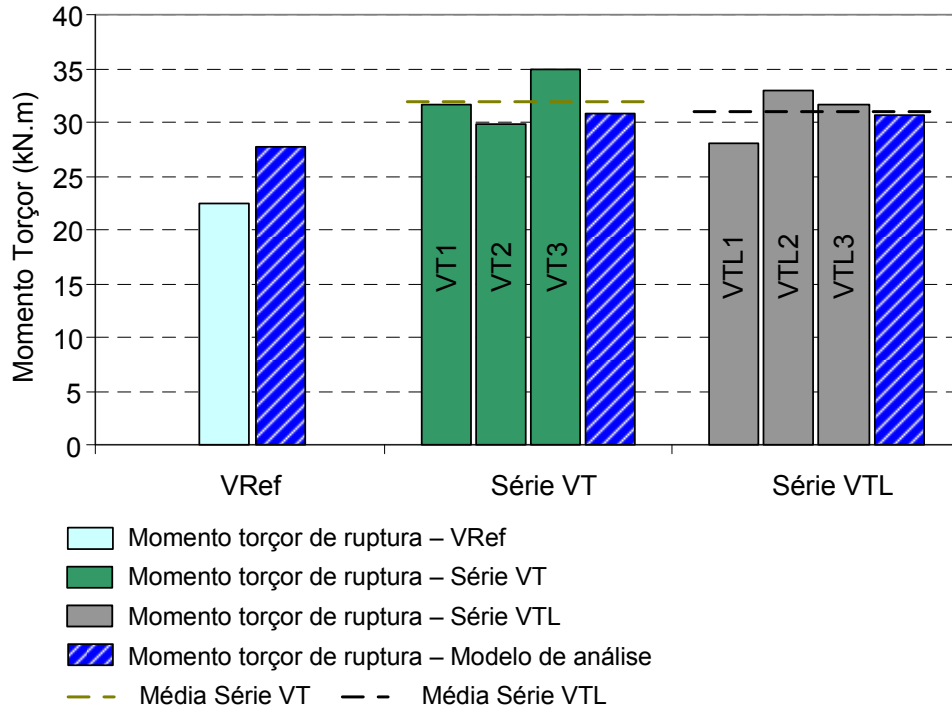


Figura 8.37 – Comparação entre o momento torçor de ruptura experimental e o valor obtido por meio do modelo TEAT.

8.9.2.

Ângulo de Torção por Unidade de Comprimento na Ruptura

Os valores dos ângulos de torção por unidade de comprimento, relativos à ruptura, fornecidos pelo modelo TEAT são mostrados na Tabela 8.13 e na Figura 8.38. A partir destes dados pode-se concluir que:

1. o ângulo de torção por unidade de comprimento θ_u , da viga de referência 12% menor que o valor fornecido pelo modelo de análise;
2. o ângulo de torção por unidade de comprimento θ_u , da série VT foi em média 5% menor que o valor fornecido pelo modelo de análise. O desvio padrão foi 0,17 ($^{\circ}/m$) e o coeficiente de variação 17,79%;
3. o ângulo de rotação por unidade de comprimento θ_u médio da série VTL foi 1 % maior que o valor fornecido pelo modelo de análise, com desvio padrão de 0,17 ($^{\circ}/m$) e coeficiente de variação 16,88%;

4. o ângulo de torção por unidade de comprimento θ_u médio, considerando-se todas as vigas reforçadas ensaiadas, foi 2% menor que o valor fornecido pelo modelo TEAT. O desvio padrão foi 0,15 (°/m) e o coeficiente de variação 15,81%;

O TEAT apresentou resultados consistentes e com boa dispersão em relação aos resultados experimentais. Recomenda-se a aplicação desse modelo a outros resultados experimentais de modo a aprimorá-lo.

Tabela 8.13 – Comparação entre o ângulo de torção por unidade de comprimento θ_u experimental e o valor obtido por meio do modelo TEAT.

Viga		$\theta_{u,exp}$	$\theta_{u,teo}$	$\theta_u / \theta_{u,teo}$
		(°/m)	(°/m)	(°/m)
VRef		2,29	2,603	0,88
Série VT	VT1	2,326	2,824	0,82
	VT2	2,494		0,88
	VT3	3,223		1,14
Série VTL	VTL1	2,392	2,83	0,85
	VTL2	3,352		1,18
	VTL3	2,811		0,99
Série VT	Média		0,95	
	Desvio Padrão		0,17	
	Coef. de Var. (%)		17,79	
Série VTL	Média		1,01	
	Desvio Padrão		0,17	
	Coef. de Var. (%)		16,88	
VT + VTL	Média		0,98	
	Desvio Padrão		0,15	
	Coef. de Var. (%)		15,81	

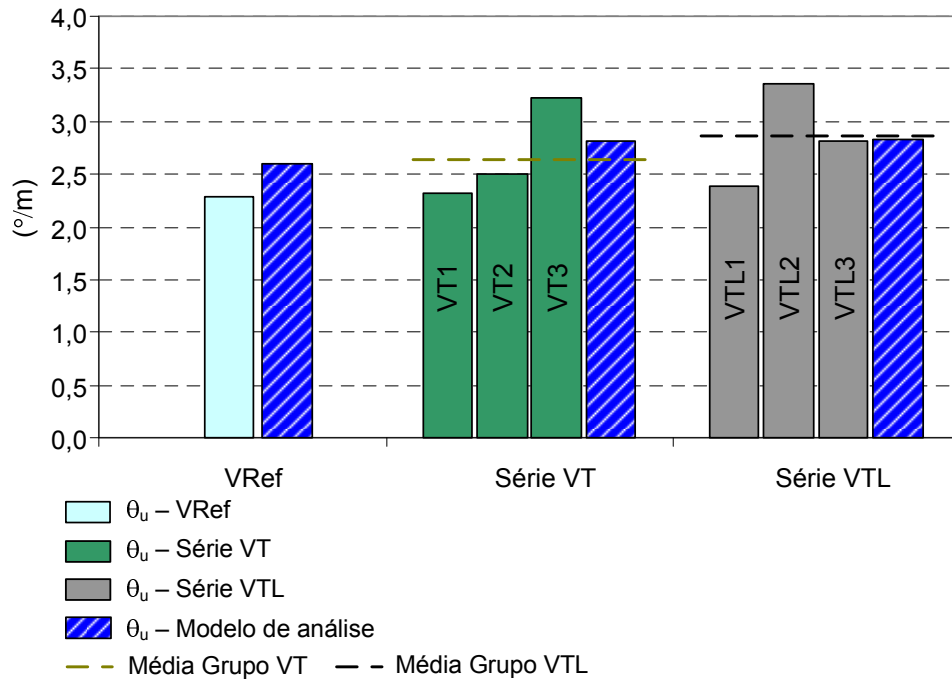


Figura 8.38 – Comparação entre o ângulo θ_u experimental e o valor obtido por meio do modelo TEAT.

8.9.3.

Curvas $T \times \theta$ Fornecidas pelo Modelo da Treliça Espacial com Abrandamento de Tensões

A curva fornecida pelo modelo TEAT para a viga VRef apresentou rigidez superior após a fissuração quando comparada com a curva experimental (Figuras 8.39).

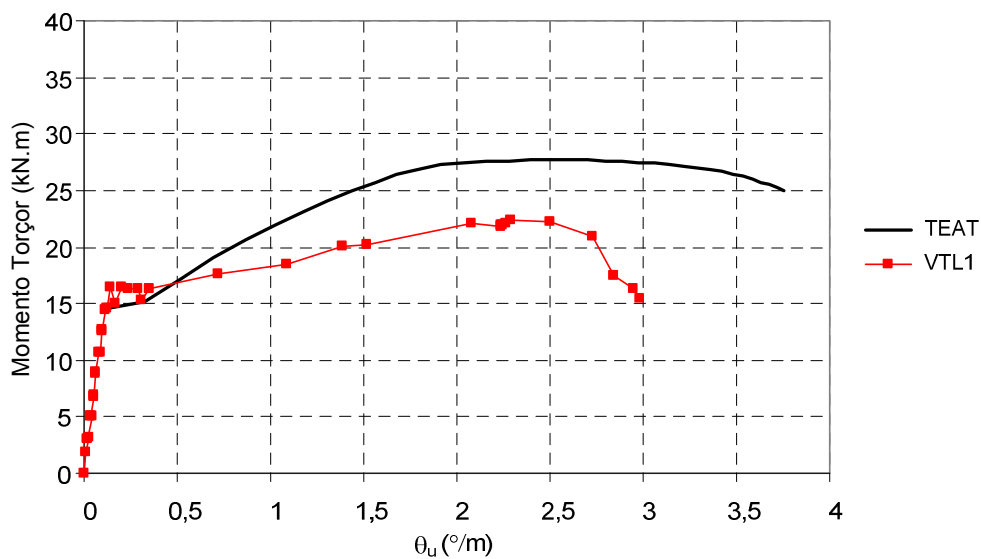


Figura 8.39 – Comparação entre as curvas $T \times \theta$ experimental e teórica da Viga VRef.

As curvas obtidas usando-se o TEAT baseado no modelo de Hsu (1993), apresentaram boa concordância quando comparadas com as curvas experimentais das vigas das séries VT e VTL (Figuras 8.40 e 8.41).

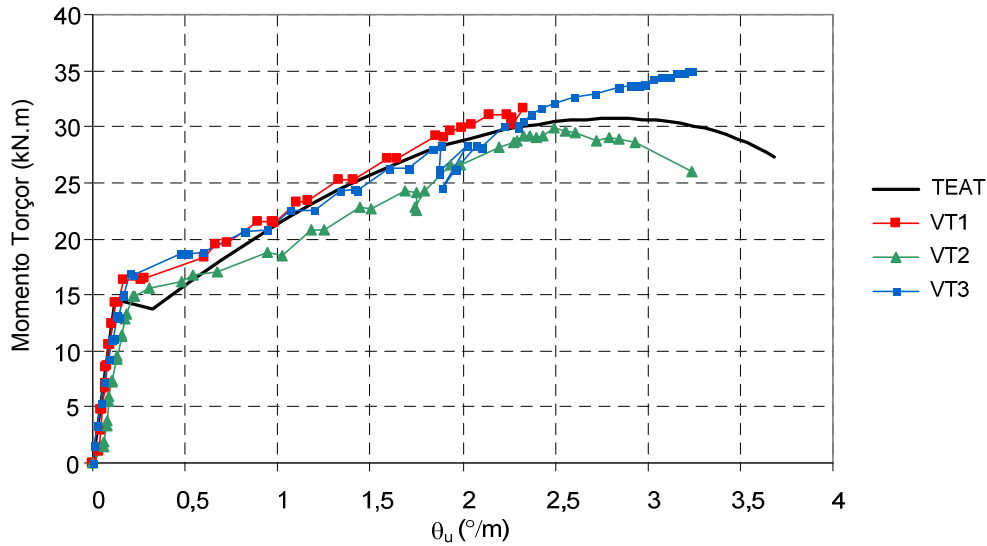


Figura 8.40 – Comparação entre as curvas $T \times \theta$ experimentais e teórica da série VT.

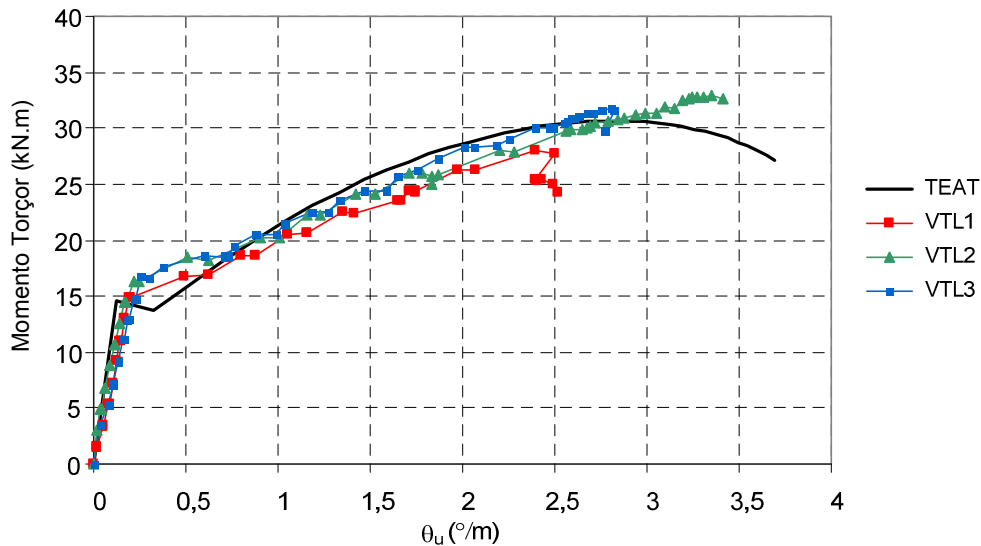


Figura 8.41 – Comparação entre as curvas $T \times \theta$ experimentais e teórica da série VTL.

A vinculação entre o TEAT e o modelo de aderência de Chen e Teng (2003) no processo iterativo indica que um aprimoramento dos dados de entrada no programa podem fornecer resultados mais precisos.

9 Conclusões

Neste trabalho foram apresentados os tópicos desenvolvidos num estudo teórico e experimental de vigas de concreto armado solicitadas à torção reforçadas com compósitos de fibras de carbono. O estudo teórico desenvolvido consta de dois modelos, um para análise e outro para dimensionamento deste tipo de solicitação. O estudo experimental foi composto por ensaios de sete vigas de concreto armado com mesma armadura de aço longitudinal e transversal e concreto de mesma resistência, realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. As vigas ensaiadas foram divididas em três séries, sendo uma viga de referência VRef, três vigas com reforço transversal de CFC da série VT, e três vigas com reforço transversal e longitudinal de CFC da série VTL.

A revisão bibliográfica mostrou que existem poucos trabalhos sobre esse assunto, e que é possível reforçar vigas de concreto armado solicitadas à torção com CFC. Nesta revisão verificou-se que os modelos utilizados não são consistentes em diversos aspectos, principalmente na verificação da aderência entre o material de reforço e o substrato de concreto. Como os modos de ruptura dos elementos devem ser considerados na elaboração dos modelos, pois os mecanismos resistentes das vigas devem ser considerados de maneira global, foi desenvolvida uma sistemática fundamentada no teorema estático da Teoria da Plasticidade (*lower-bound*) para analisar o comportamento global das vigas reforçadas à torção.

A partir da análise dos resultados experimentais e teóricos pode-se concluir que:

- as vigas reforçadas das séries VT e VTL apresentaram em média acréscimo de resistência à torção de 44% e 38%, respectivamente, quando comparados com a viga de referência;
- para as vigas da série VT tem-se $\rho_{TOTAL} = \rho_{ft} = 0,183\%$ e para as vigas da série VTL tem-se $\rho_{TOTAL} = \rho_{ft} + \rho_{fl} = 0,209\%$. Analisando-se estes valores, verifica-se que as vigas da série VT, cujo reforço foi aplicado em duas camadas na forma de estribos fechados,

apresenta-se como a melhor alternativa de reforço, pois além de as vigas desta série apresentarem resistência à torção superior à da série VTL, a taxa geométrica total de armadura de CFC aplicada é menor que a da série VTL;

- a dispersão dos resultados para momento torçor de ruptura para cada série foi baixa, sendo que a série VT apresentou coeficiente de variação de 8,07% e a série VTL apresentou coeficiente de variação de 8,27%;
- o momento torçor de fissuração considerando-se todas as vigas foi em média 16 kNm , e a dispersão dos resultados experimentais também foi baixa, sendo que o coeficiente de variação da série VT igual a 6,25% e para a série VTL o coeficiente de variação foi de 6,16%;
- o ângulo de torção por unidade de comprimento experimental quando da ruptura da viga, apresentou dispersão um pouco maior, entretanto, são valores aceitáveis, sendo de 17,79% para a série VT e 16,88% para a série VTL;
- após a fissuração todas as vigas apresentaram grande redução na rigidez à torção, sendo que essa redução foi de 97,52% para a viga VRef, 91,78% em média para a série VT e 90,74% em média para a série VTL;
- com relação ao ângulo de inclinação da biela, observou-se que com exceção da viga de VTL1, obteve-se $\alpha_\epsilon > \alpha_f > \alpha_{Ap} > \alpha_\sigma$;
- o ângulo de inclinação da biela calculado pela expressão 6.135 fornecida por Aprile Bendetti (2004) depende apenas de parâmetros mecânicos e não depende do estado de tensão e deformação do elemento estrutural, ou seja, as vigas pertencentes a uma determinada série apresentam mesmo ângulo de inclinação das bielas, pois têm mesmo concreto, aço e CFC com as mesmas taxas geométricas e características geométricas, mesmo assim, os valores fornecidos por esta expressão são consistentes e esse modelo pode ser usado para a análise do reforço à torção;
- as máximas deformações específicas obtidas nas armaduras de aço transversal e longitudinal foram 0,243% e 0,340%, que ocorreram respectivamente nas vigas VT2 e VTL2;

- as máximas deformações específicas obtidas nas armaduras de CFC transversal e longitudinal foram 0,525% e 0,438% na viga VTL2;
- para a direção transversal observa-se que a relação $\frac{\varepsilon_{st,exp}}{\varepsilon_{ft,exp}}$ apresenta valores entre 0,396 e 0,615 e na direção longitudinal os valores da relação $\frac{\varepsilon_{st,exp}}{\varepsilon_{ft,exp}}$ variam entre 0,694 e 0,775.
- o fator de efetividade das deformações específicas dos CFC foi em torno de 0,25, ou seja, mesmo que a deformação específica última indicada pelo fabricante seja de 1,4% verificou-se nos ensaios que a deformação específica foi no máximo de 0,525%, visto que o descolamento do CFC ocorre antes que ε_{fu} seja alcançada;
- os fatores de efetividade obtidos pelas diversas formulações foram inferiores aos prescritos pelo Eurocode 2 para vigas de concreto armado, concluindo-se que são necessárias mais pesquisas para se ter uma conclusão sobre o valor desse parâmetro;
- as deformações específicas calculadas a partir das expressões propostas pelo Bulletin 14 da FIB considerando-se os ângulos α_ε , α_f , α_σ e α_{Ap} , apresentaram-se quase sempre com alto coeficiente de variação, ou seja, superior a 25%; ressalta-se que essas expressões foram obtidas para o dimensionamento à força cortante, e sua aplicação para a torção é uma adaptação teoricamente inconsistente e não deve ser usada;
- a tensão de compressão na biela da viga de referência foi de 10,31 MPa, 10,34 MPa e 10,87 MPa considerado-se para o cálculo os ângulos α_ε , α_f e α_σ , respectivamente;
- o fator de efetividade do concreto da viga de referência foi de 0,282, 0,282 e 0,297, considerando-se para o cálculo os valores de $\sigma_{c\varepsilon}$, σ_{cf} e $\sigma_{c\sigma}$, respectivamente;
- na série VT a tensão de compressão na biela quando comparada com a da viga de referência aumentou, variando entre 12,65 MPa e 15,89 MPa, considerando-se para o cálculo os valores de α_ε , α_f , α_σ e α_{Ap} ;

- o fator de efetividade do concreto das vigas da série VT foi superior ao da viga de referência e variou entre 0,346 e 0,434;
- para a série VTL a tensão de compressão na biela também foi superior à da viga de referência, e variou entre 11,85 MPa e 14,26 MPa, considerando-se para o cálculo os valores de α_ε , α_f , α_σ e α_{Ap} ;
- o fator de efetividade do concreto das vigas da série VT foi superior ao da viga de referência e variou entre 0,324 e 0,390;
- o modelo da Treliça Espacial Generalizada prescrito pelo Eurocode 2 é consistente e pode ser adotado no cálculo do reforço à torção;
- com exceção da viga VRef, os valores obtidos com o modelo da Treliça Espacial com Abrandamento das Tensões (TEAT), quando comparados com os resultados obtidos a partir do programa experimental, apresentaram excelente aproximação para a curva momento torçor e ângulo de torção por unidade de comprimento, $T \times \theta$; esse modelo por sua consistência teórica e pelos resultados fornecidos, é adequado para análise do reforço à torção;
- o momento torçor de ruptura calculado por meio do modelo da treliça espacial generalizada do Eurocode 2 também apresentou boa aproximação, quando comparado com o valor do momento torçor de ruptura experimental;
- nos métodos iterativos utilizados os resultados estão vinculados ao modelo de aderência adotado, então a adoção de outro modelo pode alterar esses resultados, concluindo-se que o aprimoramento desse modelo leva a resultados mais precisos.

9.1. Sugestão para trabalhos futuros

Como sugestões para o prosseguimento dessa pesquisa podem ser citados:

1. o desenvolvimento de uma sistemática fundamentada no teorema cinemático da Teoria da Plasticidade (*upper-bound*) para previsão do momento torçor de ruptura de vigas de concreto armado reforçadas com CFC;

2. o desenvolvimento de um programa experimental para o estudo de vigas de concreto armado solicitadas à torção com pré-carregamento, com aplicação do reforço com CFC após a viga atingir o momento torçor de fissuração;
3. o desenvolvimento de um estudo teórico-experimental de vigas de concreto armado reforçadas à torção com CFC com a variação da razão $1 \leq h/b \leq 5$, onde h é a altura da viga e b a sua largura;
4. o desenvolvimento de um estudo experimental para avaliar a contribuição do engrenamento do agregado no valor do momento torçor de ruptura;
5. compilação dos resultados obtidos nas pesquisas descritas anteriormente, e elaboração de estudo estatístico para estabelecimento de expressões para a deformação específica no CFC;
6. pesquisa de uma expressão para a largura efetiva do fluxo de tensões tangenciais considerando-se as armaduras de aço e de CFC;
7. estudo do comportamento da biela flexo-comprimida nas arestas da seção transversal da viga, avaliando o confinamento devido ao CFC para evitar o fendilhamento dessas arestas;
8. estudar outros tipos de seções transversais, tais como, seções T e L.
9. o estudo de vigas de concreto armado reforçadas com CFC com variação da taxa de reforço nas direções transversal e longitudinal e variação da resistência à compressão do concreto;
10. o desenvolvimento de um modelo de análise para vigas de concreto armado reforçadas com CFC solicitadas à torção baseado no modelo do campo de compressão diagonal modificado;

Como sugestões para novas diretrizes de pesquisas sobre o reforço à torção citam-se:

- a. o estudo do comportamento de vigas de concreto armado com aberturas reforçadas com CFC solicitadas à torção;
- b. o desenvolvimento de um estudo teórico-experimental de vigas de concreto armado reforçadas com CFC solicitadas simultaneamente por força cortante e momento torçor;
- c. o desenvolvimento de implementações computacionais utilizando-se o Método dos Elementos Finitos para todos os estudos descritos anteriormente;

Referências Bibliográficas

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Building code requirements for structural concrete**. ACI Committee 318. Detroit, 1999.

ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures**. ACI Committee 440. Detroit, 2001.

AMELI, M.; RONAGH, H. R.; DUX, P. F. Experimental Investigations on FRP Strengthening of Beams in Torsion. **FRP Composites in Civil Engineering – CICE 2004**, Adelaide, Australia, p.587-592.

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

ALNUAIMI, A. S. M. **Direct Design of Reinforcement and Partially Prestressed Concrete Beams for Combined Torsion, Bending and Shear**. Glasgow, 1999. 416p. Thesis – Department of Civil Engineering, University of Glasgow.

APRILE, A.; BENEDETTI, A. Coupled Flexural-Shear Design of R/C Beams Strengthened with FRP. **Composites: Part B**, n. 35, p.1-25, 2004.

ARAÚJO, A. C. N. **Estudo Experimental do Reforço à Flexão de Vigas de Concreto Armado Utilizando Compósitos com Tecidos de Fibras de Carbono**. Rio de Janeiro, 2002a. 118p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.

ARAÚJO, C. M. **Reforço de Vigas de Concreto à Flexão e ao Cisalhamento com Tecidos de Fibra de Carbono**. Rio de Janeiro, 2002b. 153p. Dissertação de Mestrado – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR-6118: **Projeto de Estruturas de Concreto Armado**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR-5738: **Moldagem e Cura de Corpos de Prova Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR-5739: **Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova de Concreto Cilíndricos – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR-6152: **Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração de Materiais Metálicos – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 1980.

AVILÉS, G. L. **Estúdio Experimental sobre el Refuerzo a Cortante de Estructuras de Hormigón Mediante Materiales Compuestos**. Cataluña, 2002. 241p. Tese de Doctorado – Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Cataluña.

BASCHE, H. D.; FREITAG, N.; JAUCK, K. **Bond Behaviour of Carbon Fibres in Concrete**. LACER n° 5. 14p. 2000.

BEBER, A. J. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**. Porto Alegre, 2003. 317p. Tese de Doutorado. UFRGS.

CÁNOVAZ, M. F. **Patologia e Terapia do Concrete Armado**. 1.ed. São Paulo: Editora Pini Ltda, 1988. 522p.

CHEN, J. F.; TENG, J. G. Shear Capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding. **Construction and Building Materials**, v. 17, p.27-41, fev. 2003.a.

CHEN, J. F.; TENG, J. G. Shear Capacity of FRP-Strengthened RC Beams: FRP Rupture. **Journal of Structural Engineering**, ASCE, v. 129, n. 5, p.615-625, 2003.b.

DEIFALLA, A.; GHOARAH, A. Calculating the Thickness of FRP Jacket for shear and Torsion Strengthening of RC T-Girders. **Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2006)**. Miami, Florida, EUA, p.581-584, Dec. 2006.

EMMONS, P. H.; VAYSBURD, A. M.; THOMAS, J. Strengthening Concrete Structures, Part I. **Concrete International**, Detroit, v. 20, n. 3, p.53-58, abr. 1998.a.

EMMONS, P. H.; VAYSBURD, A. M.; THOMAS, J. Strengthening Concrete Structures, Part II. **Concrete International**, Detroit, v. 20, n. 4, p.56-60, abr. 1998.b.

Eurocode 2: Design of concrete structures. Beton-Kalender, p.90-183. 1991.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **Externally bonded FRP reinforcement for RC Structures**. Lausanne, 2001 (FIB Bulletin 14).

FIORELLI, J. **Utilização de Fibras de Carbono e de Fibras de Vidro para Reforço de Vigas de Madeira**. São Carlos Dissertação de Mestrado. São Carlos. 2002.

GABRIELSSON, H. **Ductility in High Performance Concrete Structures – An Experimental Investigation and a Theoretical Study of Prestressed Hollow Core Slabs and Prestressed Cylindrical Pole Elements**. Lulea, 1999. 265p. Doctoral Thesis – Department of Civil and Mining Engineering, Division of Structural Engineering, Lulea University of Technology.

GHOBARAH, A; GHORBEL, M. N; CHIDIAC, S. E. Upgrading Torsional Resistance of Reinforced Concrete Beams Using Fiber-Reinforced Polymer. **Journal of Composites for Construction**, v. 6, n. 4, p.257-263, nov. 2002.

GIBSON, R. F. **Principles of Composite Material Mechanics**. New York: McGraw-Hill, New York, 1993. 421p.

HII, A. K. Y.; AL-MAHAIDI, R. An Experimental and Numerical Investigation on Torsional Strengthening of Solid and Box-section RC Beams Using CFRP Laminates. **Composites Structures**, v. 75, n. 1 p.213-221, set. 2006.a.

HII, A. K. Y.; AL-MAHAIDI, R. Experimental Investigation on Torsional Behavior of Solid and Box-Section RC Beams Strengthened with CFRP Using Photogrammetry. **Journal of Composites for Construction**, v. 10, n. 4, p.321-329, jul. 2006.b.

HII, A. K. Y.; AL-MAHAIDI, R. Torsion Design of CFRP Plated RC Members. **Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2006)**. Miami, Florida, EUA, p.235-238, dez. 2006.c.

HII, A. K. Y.; AL-MAHAIDI, R. Torsion Capacity of CFRP Strengthened Reinforced Concrete Beams. **Journal of Composites for Construction**, v. 11, n. 1, p.71-80, jan. 2007.

Hsu T. T. C. **Torsion of Reinforced Concrete**. 1ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1984. 544p.

HSU, T. T. C. **Torsion of Structural Concrete – A Summary of Pure Torsion**. American Concrete Institute, Publication SP-18, p.165-178. 1968.

HSU, T. T. C. **Unified Theory of Reinforced Concrete**. 1.ed. Florida: CRC Press, 1993. 313p.

Hsu, T. T. C.; MO, Y. L. **Softening of Concrete in Torsional Members**. Research Report n°. ST-TH-001-83. Department of Civil Engineering, University of Houston. Houston, Texas. 107. 1983.

Hsu, T. T. C.; MO, Y. L. Softening of Concrete in Torsional Members – Theory and Test. **ACI Structural Journal**, v. 82, n. 3, p.290-303. 1985.

Hsu, T. T. C. Softening truss model theory for shear and torsion. **ACI Structural Journal**, v. 85, n. 6, p.624-635. 1988.

Hsu, T. T. C. Shear flow zone in torsion of reinforced concrete. **Journal Structural Engineering**, ASCE, v.116, n. 11, p.3206-3226. 1990.

Hsu, T. T. C. Nonlinear analysis of concrete membrane elements. **ACI Structural Journal**, v. 88, n. 5, p.552-561. 1991a.

Hsu, T. T. C.. Nonlinear analysis of concrete torsional members. **ACI Structural Journal**, v. 88, n. 6, p.674-682. 1991b.

Hsu, T. T. C.; Zhang, L. X. Tension Stiffening in Reinforced Concrete Membrane Elements. **ACI Structural Journal**, v. 93, n.1, p.108-115. 1996.

Hsu, T. T. C.. ACI shear and torsion provision for prestressed hollow girders. **ACI Structural Journal**, v. 94, n.6, p.787-799. 1997.

JOAQUIM, M. C. **Modelo Analítico para Dimensionamento de Reforço à Flexão de Vigas em Concreto Armado Utilizando Compósitos de Fibra de Carbono**. Rio de Janeiro, 2004. 97p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.

LAMPERT, P.; THÜRLMANN, B. **Ultimate Strength and Design of Reinforced Concrete Beams in Torsion and Bending**. IABSE, No. 31-I, p.107-131. 1971.

LEONHARDT, F.; SCHELLIN, G. **Torsionsversuche na Stahlbetonbalken**. Deutscher Ausschuss Für Stahlbeton, Heft 239, 122p. Universität Stuttgart, Berlin. 1974.

LIMA, R. C. A. **Investigação dos Efeitos de Temperaturas Elevadas em Reforços Estruturais com Tecidos de Fibra de Carbono**. Porto Alegre, 2001. 140p. Dissertação de Mestrado, UFRGS.

KARBHARI, V. M. **Use of Composites Materials in Civil Infrastructure in Japan**. Japan, 1998. 221p. Monografia – WTEC.

MACHADO, M, G. **Estudo Experimental da Ductilidade de Vigas em Concreto Armado Reforçadas à Flexão Utilizando Compósitos com Tecidos de Fibra de Carbono**. Rio de Janeiro, 2004. 301p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.

MENEGHEL, J. M. **Análise Experimental da Aderência entre o Concreto e Compósitos com Tecido de Fibras de Carbono**. Rio de Janeiro, 2005. 203p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.

MEIER, U. Strengthening of Structures Using Carbon Fibre/Epoxy Composites. **Construction and Building Materials**, v. 9, n. 6, p.341-351. 1995.

MITCHELL, D.; COLLINS, M. P. The Behaviour of Structural Concrete Beams in Pure Torsion. Publication n°. 74-06, Department of Civil Engineering, University of Toronto. 88p. 1974.

COLLINS, M. P. ; MITCHELL, D. Shear and Torsion Design of Prestressed and Non-Prestressed Concrete Beams. **PCI Journal**, v. 25, n. 5, p.32-100. 1980.

NORDIN, HAKAN. **Fibre Reinforced Polymers in Civil Engineering. Flexural Strengthening of Concrete Structures with Prestressed Near Surface Mounted CFRP Rods**. Lulea, 2003. 143p. Licentiate Thesis – Department of Civil and Mining Engineering, Division of Structural Engineering, Lulea University of Technology.

PACHECO, C. O. **Verificação Experimental da Aderência CFC-Concreto por meio de Ensaios Tração-Compressão**. Rio de Janeiro, 2006. 175p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.

PANCHACHARAM, S.; BELARBI, A. Torsional Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Composites. **Proceedings First FIB Congress on Concrete Structures in the 21st Century**. Osaka, Japão, p.13-19, out. 2002.

PEREIRA, B. S. C. S. **Estudo do Reforço Externo à Força Cortante em Vigas de Concreto Armado Utilizando Compósitos de Fibras de Carbono**. Rio de Janeiro, 2005. 150p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.

RAHAL, K. N. Torsional Strength of Reinforced Concrete Beams. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 27, p.445-453. 2000.

SALOM, P. R.; GERGELY, J; YOUNG, D. T. Torsional Strengthening of Spandrel Beams with Fiber-Reinforced Polymer Laminates. **Journal of Composites for Construction**, v. 8, n. 2, p.157-162. 2004a.

SALOM, P. R.; GERGELY, J; YOUNG, D. T. Torsional Retrofit of Spandrel Beams with Composites Laminates. **Structures e Buildings**, v. 157, p.69-76. 2004b.

SÁNCHEZ FILHO, E. S. Reforço de Vigas de Concreto Estrutural Através de Chapas Metálicas Coladas com Epóxi. **REIBRAC**. CD-ROM. 18p. 1998.

SÁNCHEZ FILHO, E. S. Análise do Comportamento Mecânico das Peças de Seção Transversal Plena de Concreto Armado Sujeitas à Torção de Saint-Venant. **Encarte Técnico da Revista Construção**. São Paulo, p.11-14. 1989.

SÁNCHEZ FILHO, E. S.; SILVA FILHO, J. J. H. Strengthening Design of Rectangular Reinforced Concrete Beams in Torsion with Carbon Fiber Composites. In: **IV HPC - IV INTERNATIONAL ACI/CANMET CONFERENCE on Quality of Concrete Structures and Recent Advances in Concrete Materials and Testing**, Olinda. p.688-699. 2005.

SIKA. Manual Técnico. 214p. 2005.

SILVA FILHO, J. J. H.; SÁNCHEZ FILHO, E. S.; VELASCO, M. S. L. Análise de Vigas de Concreto Armado Reforçadas à Torção com Compósitos de Fibra de Carbono. In: **Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas**, Rio de Janeiro. Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. p.1-16. 2005.

SILVA FILHO, J. J. H.; SÁNCHEZ FILHO, E. S.; VELASCO, M. S. L. Dimensionamento e Análise do Comportamento de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono Solicitadas à Torção. In: **VI Simpósio EPUSP Estruturas de Concreto**, São Paulo. p.1117-1131. 2006.a.

SILVA FILHO, J. J. H.; SÁNCHEZ FILHO, E. S.; VELASCO, M. S .L. Estudo Experimental de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibras de Carbono à Torção. **Engenharia Estudo e Pesquisa**. v. 8, n. 2, p.56-62. 2006.b.

SOUTO FILHO, M. V. **Modelagem Numérica de Reforço Estrutural em Vigas de Concreto Armado**. Rio de Janeiro, 2002. 127p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio.

TÄLJSTEN, B. Strengthening of Concrete Structures in Torsion with FRP. **Proceedings of FRPRCS-6**. v. 2, p.1667-1176. 2003.

TECGRAF. **iup: Portable user interface - v 2.5**. Disponível em <<http://www.tecgraf.puc-rio.br/iup/>>.

TECHNICAL REPORT N°55. **Design Guidance for Strengthening Concrete Structures Using Fibre Composite Materials**. Concrete Society. 71p. 2000.

Anexo A – Dados

VRef

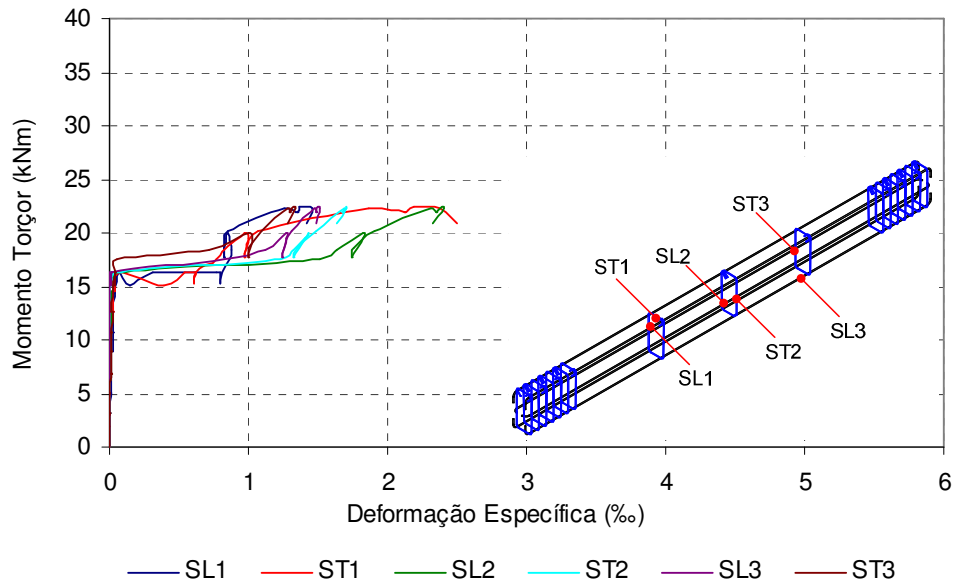


Figura A.1 – Gráfico momento torçor x deformação específica das armaduras de aço transversal e longitudinal da viga VRef.

Tabela A1 – Ângulo de torção por unidade de comprimento e leituras dos LVDT da viga VRef.

Torçor (kNm)	θ/m	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)	LVDT5 (mm)
0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,9	0,013	0,077	0,073	0,068	0,072	0,045
3,1	0,022	0,143	0,136	0,131	0,121	0,087
3,1	0,022	0,143	0,136	0,131	0,124	0,088
3,0	0,021	0,143	0,136	0,131	0,125	0,090
5,1	0,040	0,251	0,232	0,225	0,202	0,149
5,0	0,038	0,251	0,232	0,226	0,208	0,156
5,1	0,038	0,251	0,232	0,227	0,209	0,156
6,8	0,051	0,345	0,319	0,306	0,274	0,217
6,8	0,051	0,345	0,319	0,306	0,275	0,217
6,9	0,051	0,345	0,329	0,312	0,280	0,217
8,9	0,062	0,446	0,419	0,397	0,353	0,290
9,0	0,065	0,466	0,440	0,414	0,368	0,302
10,7	0,081	0,561	0,513	0,484	0,425	0,356
10,7	0,085	0,575	0,526	0,494	0,433	0,361
12,7	0,096	0,659	0,616	0,566	0,491	0,416
12,6	0,099	0,672	0,629	0,576	0,502	0,422
14,4	0,116	0,760	0,704	0,643	0,549	0,466
14,6	0,123	0,790	0,729	0,663	0,569	0,478
16,4	0,142	0,880	0,824	0,734	0,619	0,520
15,1	0,167	0,954	0,760	0,757	0,646	0,531
16,4	0,201	1,051	0,754	0,757	0,670	0,542
16,3	0,234	1,145	0,783	0,758	0,671	0,551
16,3	0,287	1,287	0,910	0,797	0,672	0,559
15,2	0,309	1,344	0,978	0,732	0,702	0,560
16,3	0,347	1,443	1,053	0,735	0,724	0,561
17,6	0,717	2,369	1,675	0,889	0,908	0,540
18,4	1,088	3,345	2,576	1,710	1,176	0,552
20,0	1,382	4,154	3,160	2,095	1,371	0,590
19,5	1,399	4,207	3,189	2,103	1,376	0,598
17,8	1,399	4,207	3,189	2,103	1,376	0,598
17,7	1,399	4,207	3,189	2,103	1,376	0,598
18,6	1,415	4,251	3,226	2,104	1,387	0,598
20,2	1,517	4,539	3,423	2,202	1,460	0,616
22,2	2,082	6,131	4,307	2,838	1,808	0,692
21,9	2,236	6,571	4,474	3,013	1,899	0,713
21,9	2,240	6,581	4,474	3,013	1,899	0,713
22,0	2,246	6,599	4,493	3,019	1,899	0,713
22,1	2,266	6,653	4,526	3,041	1,924	0,713
22,4	2,293	6,726	4,562	3,068	1,944	0,713
22,2	2,499	7,290	4,864	3,139	1,995	0,713
20,9	2,728	7,894	5,136	3,012	1,922	0,684
17,5	2,846	8,210	5,275	2,949	1,910	0,675
16,4	2,945	8,486	5,515	2,886	1,872	0,673
15,5	2,978	8,579	5,615	2,844	1,844	0,672
14,4	2,958	8,490	5,524	2,756	1,780	0,643
15,3	2,996	8,595	5,651	2,756	1,780	0,643
3,8	2,427	6,676	4,429	1,898	1,301	0,326

Tabela A2 – Leituras dos extensômetros colados na superfície de concreto da viga VRef.

Torçor (kNm)	C1 (‰)	C2 (‰)	C3 (‰)	C4 (‰)	C5 (‰)	C6 (‰)	C7 (‰)	C8 (‰)	C9 (‰)
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1,9	-0,0014	-0,0169	-0,0003	-0,0001	-0,0170	-0,0004	0,0014	-0,0164	0,0000
3,1	-0,0044	-0,0294	-0,0008	0,0000	-0,0294	-0,0010	0,0040	-0,0284	-0,0001
3,1	-0,0040	-0,0283	-0,0004	0,0004	-0,0282	-0,0007	0,0053	-0,0273	0,0005
3,0	-0,0037	-0,0277	-0,0010	0,0012	-0,0275	-0,0007	0,0079	-0,0266	0,0012
5,1	-0,0032	-0,0481	-0,0001	0,0022	-0,0480	-0,0008	0,0105	-0,0469	0,0016
5,0	-0,0037	-0,0475	-0,0005	0,0018	-0,0477	-0,0010	0,0117	-0,0466	0,0021
5,1	-0,0034	-0,0477	0,0000	0,0027	-0,0473	-0,0001	0,0132	-0,0462	0,0026
6,8	-0,0012	-0,0671	0,0006	0,0035	-0,0664	-0,0003	0,0156	-0,0655	0,0027
6,8	-0,0003	-0,0653	0,0006	0,0045	-0,0649	0,0005	0,0182	-0,0638	0,0034
6,9	-0,0005	-0,0675	0,0001	0,0039	-0,0676	0,0000	0,0179	-0,0664	0,0028
8,9	-0,0022	-0,0889	0,0014	0,0062	-0,0869	0,0012	0,0226	-0,0862	0,0045
9,0	-0,0021	-0,0925	0,0014	0,0072	-0,0898	0,0018	0,0255	-0,0891	0,0053
10,7	0,0001	-0,1109	0,0030	0,0084	-0,1083	0,0030	0,0281	-0,1081	0,0057
10,7	-0,0013	-0,1148	0,0028	0,0086	-0,1119	0,0030	0,0303	-0,1114	0,0054
12,7	-0,0035	-0,1385	0,0055	0,0112	-0,1340	0,0036	0,0338	-0,1345	0,0057
12,6	-0,0037	-0,1439	0,0040	0,0081	-0,1430	0,0012	0,0335	-0,1422	0,0018
14,4	-0,0046	-0,1662	0,0092	0,0126	-0,1621	0,0050	0,0400	-0,1631	0,0045
14,6	-0,0079	-0,1756	0,0132	0,0161	-0,1692	0,0070	0,0464	-0,1718	0,0065
16,4	-0,0130	-0,2050	0,0244	0,0362	-0,1900	0,0081	0,0563	-0,1967	0,0099
15,1	-0,0290	-0,2183	0,0290	0,0522	-0,1817	0,0102	0,0631	-0,1920	0,0139
16,4	-0,0369	-0,2464	0,0311	0,0546	-0,1955	0,0104	0,0644	-0,2059	0,0142
16,3	-0,0439	-0,2645	0,0316	0,0595	-0,1951	0,0117	0,0655	-0,2054	0,0144
16,3	-0,0457	-0,2808	0,0237	0,0831	-0,2593	-0,0205	0,0679	-0,2083	0,0143
15,2	-0,0463	-0,2731	0,0218	0,0654	-0,2634	-0,0381	0,0673	-0,1972	0,0150
16,3	-0,0484	-0,2957	0,0146	0,0568	-0,2933	-0,0503	0,0692	-0,2130	0,0130
17,6	-0,0408	-0,5698	–	-0,2208	-0,6602	-0,0644	0,0800	-0,2346	0,0419
18,4	0,1166	-0,6284	–	-0,2566	-0,7191	-0,0579	–	-0,5138	–
20,0	–	-0,7710	–	-0,3047	-0,8829	-0,0464	–	-0,8047	–
19,5	–	-0,7827	–	-0,3113	-0,8935	-0,0329	–	-0,8597	–
17,8	–	-0,7638	–	-0,3069	-0,8745	-0,0299	–	-0,8565	–
17,7	–	-0,7645	–	-0,3087	-0,8762	-0,0311	–	-0,8580	–
18,6	–	-0,7777	–	-0,3140	-0,8929	-0,0353	–	-0,8736	–
20,2	–	-0,8266	–	-0,3369	-0,9565	-0,0459	–	-0,9522	–
22,2	–	-1,0727	–	-0,4233	-1,1804	-0,1891	–	-1,4143	–
21,9	–	-1,1547	–	-0,4516	-1,2586	-0,2417	–	-1,5331	–
21,9	–	-1,1561	–	-0,4523	-1,2603	-0,2431	–	-1,5353	–
22,0	–	-1,1591	–	-0,4532	-1,2635	-0,2447	–	-1,5399	–
22,1	–	-1,1672	–	-0,4563	-1,2725	-0,2503	–	-1,5519	–
22,4	–	-1,1788	–	-0,4601	-1,2844	-0,2576	–	-1,5672	–
22,2	–	-1,3020	–	-0,4682	-1,3143	-0,3992	–	-1,6035	–
20,9	–	-1,2988	–	-0,4747	-1,2956	-0,4141	–	-1,5756	–
17,5	–	-1,2365	–	-0,4545	-1,2126	-0,4190	–	-1,4606	–
16,4	–	-1,2179	–	-0,4460	-1,1997	-0,4084	–	-1,4388	–
15,5	–	-1,1838	–	-0,4376	-1,1704	-0,3958	–	-1,4024	–
14,4	–	-1,1600	–	-0,4261	-1,1265	-0,3842	–	-1,3399	–
15,3	–	-1,1485	–	-0,4279	-1,1434	-0,3876	–	-1,3705	–
3,8	–	-0,8084	–	-0,3172	-0,8046	-0,2704	–	-0,9211	–

Tabela A3 – Leituras dos extensômetros colados na armadura de aço transversal e longitudinal da viga VRef.

Torçor (kNm)	SL1 (‰)	ST1 (‰)	SL2 (‰)	ST2 (‰)	SL3 (‰)	ST3 (‰)
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1,9	0,0022	0,0019	0,0012	-0,0011	-0,0008	0,0008
3,1	0,0043	0,0027	0,0024	-0,0027	-0,0014	0,0019
3,1	0,0047	0,0027	0,0027	-0,0018	-0,0010	0,0020
3,0	0,0047	0,0031	0,0030	-0,0015	-0,0004	0,0026
5,1	0,0092	0,0054	0,0054	-0,0024	-0,0005	0,0045
5,0	0,0092	0,0053	0,0054	-0,0023	-0,0005	0,0046
5,1	0,0102	0,0060	0,0064	-0,0014	-0,0001	0,0053
6,8	0,0137	0,0079	0,0077	-0,0022	0,0000	0,0070
6,8	0,0145	0,0084	0,0084	-0,0007	0,0001	0,0077
6,9	0,0141	0,0080	0,0076	-0,0016	-0,0007	0,0070
8,9	0,0198	0,0115	0,0117	-0,0011	0,0001	0,0110
9,0	0,0222	0,0134	0,0126	-0,0001	0,0004	0,0114
10,7	0,0267	0,0163	0,0148	0,0008	0,0007	0,0146
10,7	0,0272	0,0176	0,0145	0,0005	0,0004	0,0146
12,7	0,0321	0,0219	0,0168	0,0012	0,0005	0,0206
12,6	0,0324	0,0241	0,0138	0,0005	-0,0011	0,0202
14,4	0,0402	0,0302	0,0188	0,0043	0,0005	0,0263
14,6	0,0459	0,0393	0,0211	0,0066	0,0015	0,0307
16,4	0,0615	0,0619	0,0267	0,0126	0,0049	0,0372
15,1	0,1551	0,3888	0,0297	0,0158	0,0099	0,0395
16,4	0,3143	0,5385	0,0320	0,0172	0,0106	0,0419
16,3	0,7673	0,6101	0,0324	0,0163	0,0110	0,0420
16,3	0,7976	0,6150	0,0287	0,0183	0,0111	0,0412
15,2	0,7917	0,6090	0,0432	0,0283	0,0122	0,0402
16,3	0,8135	0,6188	0,0578	0,0451	0,0126	0,0405
17,6	0,8614	0,7728	1,5123	1,2326	0,8208	0,0557
18,4	0,8747	0,8270	1,6346	1,3193	1,1158	0,7176
20,0	0,8461	0,9754	1,8261	1,4316	1,2709	1,0059
19,5	0,8358	0,9959	1,8197	1,4035	1,2681	1,0218
17,8	0,8256	0,9765	1,7417	1,3219	1,2421	0,9949
17,7	0,8233	0,9747	1,7381	1,3189	1,2405	0,9934
18,6	0,8272	0,9826	1,7625	1,3487	1,2505	1,0043
20,2	0,8489	1,0609	1,9072	1,4803	1,3128	1,0966
22,2	1,2631	1,8669	2,3132	1,6925	1,4670	1,2899
21,9	1,3506	2,1199	2,3491	1,6695	1,4843	1,2956
21,9	1,3522	2,1218	2,3498	1,6706	1,4849	1,2958
22,0	1,3548	2,1271	2,3514	1,6730	1,4857	1,2969
22,1	1,3617	2,1489	2,3645	1,6866	1,4913	1,3071
22,4	1,3701	2,1875	2,3875	1,7081	1,5002	1,3238
22,2	1,4557	2,3787	2,4094	1,7089	1,5118	1,3320
20,9	1,4242	2,4934	2,3187	1,6383	1,4830	1,2846
17,5	1,5051	2,8483	2,0896	1,4182	1,3859	1,1491
16,4	1,5755	3,1066	2,0435	1,3655	1,3612	1,1100
15,5	1,6521	3,0137	1,9904	1,3108	1,3343	1,0736
14,4	1,6101	2,8121	1,9025	1,2236	1,2877	1,0132
15,3	1,6983	2,9012	1,9336	1,2577	1,2953	1,0329
3,8	0,9613	1,4965	1,2679	0,6232	0,9134	0,5466

VT1

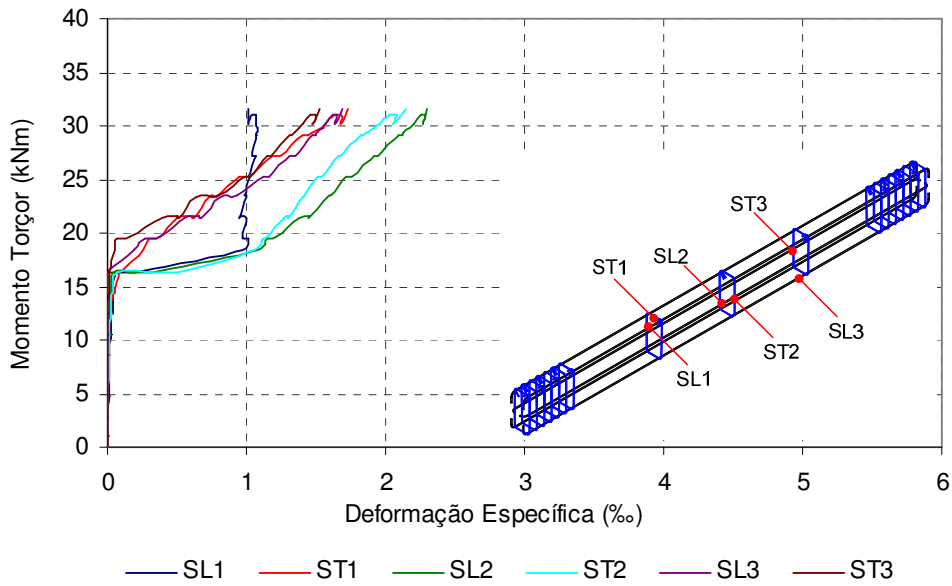


Figura A.2 – Gráfico momento torção x deformação específica das armaduras de aço transversal e longitudinal da viga VT1.

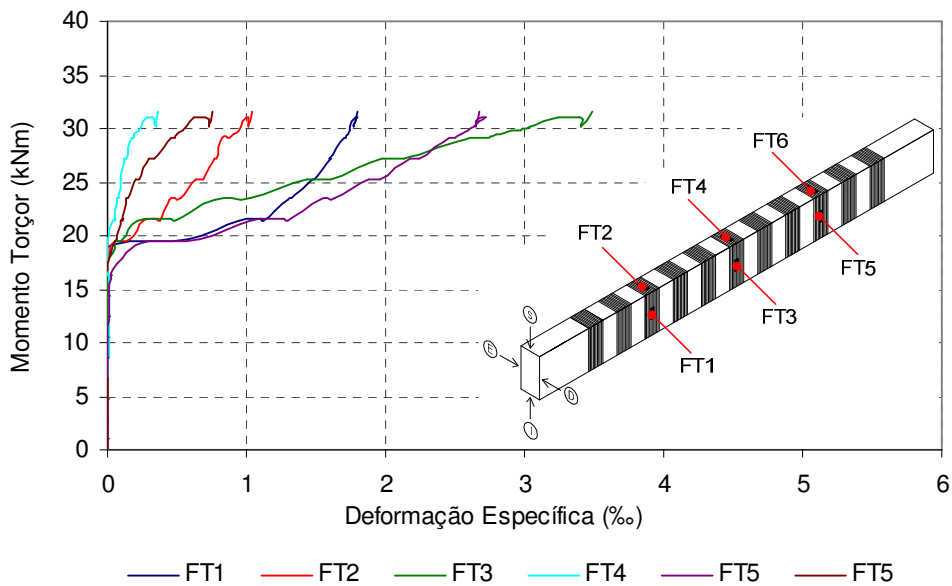


Figura A.3 – Gráfico momento torção x deformação específica da armadura de CFC transversal da viga VT1.

Tabela A4 – Ângulo de torção por unidade de comprimento e leituras dos LVDT da viga VT1.

Torçor (kNm)	θ/m	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)	LVDT5 (mm)
0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,98	0,032	2,37	2,19	2,30	1,75	1,50
1,03	0,033	3,20	2,74	2,87	2,54	2,28
2,99	0,043	3,74	3,47	3,14	2,92	2,54
2,87	0,043	3,82	3,54	3,20	2,98	2,62
4,82	0,050	4,94	4,77	4,31	4,03	3,53
4,76	0,047	4,94	4,83	4,46	4,09	3,61
6,68	0,068	6,31	6,09	5,52	5,18	4,42
7,07	0,071	6,63	6,37	5,81	5,43	4,64
8,65	0,082	7,61	7,39	6,69	6,30	5,33
8,57	0,073	7,73	7,54	6,96	6,41	5,67
10,57	0,088	8,92	8,69	7,83	7,39	6,44
10,58	0,093	9,12	8,84	8,01	7,53	6,52
12,43	0,108	10,26	9,90	8,93	8,34	7,23
12,41	0,109	10,46	10,10	9,66	8,57	7,40
14,31	0,123	11,67	11,13	10,31	9,31	8,21
14,31	0,137	12,25	11,70	10,80	9,58	8,42
16,36	0,167	13,74	13,15	12,24	10,58	9,12
16,30	0,266	16,63	15,62	13,91	10,94	9,39
16,47	0,277	17,43	16,39	14,35	11,42	9,89
18,35	0,603	27,30	25,71	21,73	15,72	11,09
19,49	0,663	29,35	27,49	23,07	16,55	11,52
19,63	0,730	31,53	29,33	24,66	17,36	11,90
21,45	0,895	36,34	33,50	27,92	18,98	12,26
21,52	0,972	38,54	35,45	29,26	19,74	12,40
21,51	0,978	38,74	35,52	29,27	19,70	12,42
21,37	0,978	38,74	35,52	29,27	19,70	12,42
23,26	1,103	42,47	38,80	29,28	20,89	12,77
23,44	1,168	44,72	40,84	30,28	21,49	13,22
25,27	1,334	49,83	45,68	33,56	23,14	13,77
25,34	1,409	52,11	47,91	34,81	23,84	14,00
27,18	1,593	57,95	53,00	38,30	25,75	14,72
27,14	1,650	59,87	54,70	39,41	26,35	15,04
29,13	1,852	66,16	60,35	43,52	28,34	15,65
29,06	1,901	67,55	61,68	44,19	28,69	15,66
29,54	1,933	68,75	62,66	44,87	29,08	15,93
29,87	1,999	70,82	64,38	46,22	29,71	16,15
30,13	2,046	72,32	65,67	47,15	30,21	16,31
31,03	2,144	75,61	68,48	49,05	31,23	16,77
31,09	2,244	78,54	71,43	50,94	32,29	16,85
30,83	2,269	79,70	72,46	51,90	32,81	17,26
30,15	2,269	79,69	72,46	51,84	32,75	17,25
31,57	2,326	81,40	74,09	53,02	33,31	17,33

Tabela A5 – Leituras dos extensômetros colados na superfície de concreto da viga VT1.

Torçor (kNm)	C1 (‰)	C2 (‰)	C3 (‰)	C4 (‰)	C5 (‰)	C6 (‰)	C7 (‰)	C8 (‰)	C9 (‰)
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,98	0,0014	-0,0089	0,0006	0,0006	-0,0088	0,0001	0,0008	-0,0112	0,0014
1,03	0,0016	-0,0097	0,0005	0,0003	-0,0094	0,0001	0,0004	-0,0133	0,0017
2,99	0,0035	-0,0294	-0,0007	-0,0001	-0,0288	0,0003	-0,0004	-0,0344	0,0027
2,87	0,0036	-0,0301	0,0003	0,0005	-0,0290	0,0014	-0,0003	-0,0360	0,0039
4,82	0,0061	-0,0508	-0,0004	0,0001	-0,0500	0,0022	-0,0004	-0,0608	0,0058
4,76	0,0066	-0,0518	-0,0003	0,0004	-0,0512	0,0023	-0,0004	-0,0628	0,0061
6,68	0,0103	-0,0731	-0,0005	0,0005	-0,0736	0,0039	-0,0010	-0,0904	0,0087
7,07	0,0125	-0,0788	-0,0005	0,0012	-0,0796	0,0039	-0,0013	-0,0984	0,0102
8,65	0,0155	-0,0983	-0,0004	0,0012	-0,0994	0,0054	-0,0017	-0,1225	0,0129
8,57	0,0186	-0,0992	0,0006	0,0027	-0,1002	0,0063	-0,0012	-0,1247	0,0166
10,57	0,0223	-0,1243	0,0005	0,0021	-0,1246	0,0083	-0,0034	-0,1548	0,0215
10,58	0,0263	-0,1269	0,0027	0,0036	-0,1278	0,0096	-0,0027	-0,1588	0,0252
12,43	0,0321	-0,1513	0,0040	0,0021	-0,1528	0,0128	-0,0055	-0,1891	0,0344
12,41	0,0390	-0,1568	0,0086	0,0028	-0,1595	0,0147	-0,0066	-0,1965	0,0432
14,31	0,0477	-0,1823	0,0160	0,0009	-0,1857	0,0194	-0,0102	-0,2244	0,0601
14,31	0,0679	-0,1920	0,0319	-0,0009	-0,1992	0,0243	-0,0143	-0,2346	0,0844
16,36	0,1138	-0,2286	0,0445	-0,0115	-0,2410	0,0370	-0,0230	-0,2705	0,1214
16,30	–	-0,2732	-0,0213	-0,0427	-0,3462	-0,0391	-0,0383	-0,3040	0,2756
16,47	–	-0,2793	-0,0191	-0,0604	-0,3965	-0,0615	-0,0442	-0,3262	0,4124
18,35	–	-0,4233	-0,0672	-0,3369	-0,7276	-0,0361	–	-0,7143	–
19,49	–	-0,4790	-0,0672	-0,3609	-0,7731	-0,0429	–	-0,8168	–
19,63	–	-0,5353	-0,0672	-0,3849	-0,8111	-0,0493	–	-0,9026	–
21,45	–	-0,6145	-0,0672	-0,4339	-0,8961	-0,0735	–	-1,1038	–
21,52	–	-0,6347	-0,0672	-0,4551	-0,9044	-0,0914	–	-1,1823	–
21,51	–	-0,6296	-0,0286	-0,4534	-0,8997	-0,0929	–	-1,1801	–
21,37	–	-0,6275	-0,0286	-0,4560	-0,8975	-0,0962	–	-1,1872	–
23,26	–	-0,6747	-0,1060	-0,4860	-0,9487	-0,1385	–	-1,3380	–
23,44	–	-0,6837	-0,1446	-0,4949	-0,9723	-0,1722	–	-1,4591	–
25,27	–	-0,7228	-0,1446	-0,5203	-1,0373	-0,2627	–	-1,6863	–
25,34	–	-0,7269	-0,1446	-0,5218	-1,0716	-0,3404	–	-1,7685	–
27,18	–	-0,7612	-0,1833	-0,5325	-1,1655	-0,4853	–	-1,9930	–
27,14	–	-0,7541	-0,1704	-0,5249	-1,1964	-0,5538	–	-2,0241	–
29,13	–	-0,7747	-0,1833	-0,5203	-1,3060	-0,7110	–	-2,2529	–
29,06	–	-0,7746	-0,2220	-0,5130	-1,3344	-0,7509	–	-2,3048	–
29,54	–	-0,7738	-0,1833	-0,5119	-1,3531	-0,7725	–	-2,3433	–
29,87	–	-0,7707	-0,2220	-0,5079	-1,3892	-0,8158	–	-2,4185	–
30,13	–	-0,7691	-0,2220	-0,5038	-1,4139	-0,8453	–	-2,4695	–
31,03	–	-0,7777	-0,2607	-0,4976	-1,4691	-0,9066	–	-2,5848	–
31,09	–	-0,7755	-0,1446	-0,4839	-1,5214	-0,9690	–	-2,6914	–
30,83	–	-0,7660	-0,1060	-0,4768	-1,5317	-0,9901	–	-2,7205	–
30,15	–	-0,7564	-0,0286	-0,4731	-1,5239	-0,9904	–	-2,7083	–
31,57	–	-0,7414	-0,0286	-0,4738	-1,5422	-1,0200	–	-2,7560	–

Tabela A6 – Leituras dos extensômetros colados na armadura de aço transversal e longitudinal da viga VT1.

Torçor (kNm)	SL1 (‰)	ST1 (‰)	SL2 (‰)	ST2 (‰)	SL3 (‰)	ST3 (‰)
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,98	0,0014	0,0000	-0,0003	0,0007	-0,0005	-0,0012
1,03	0,0008	-0,0001	0,0001	0,0010	-0,0012	-0,0010
2,99	0,0031	0,0007	0,0012	0,0023	-0,0019	-0,0030
2,87	0,0047	0,0005	0,0016	0,0034	-0,0010	-0,0030
4,82	0,0077	0,0020	0,0030	0,0050	-0,0016	-0,0042
4,76	0,0077	0,0019	0,0027	0,0052	-0,0026	-0,0043
6,68	0,0114	0,0039	0,0045	0,0077	-0,0039	-0,0050
7,07	0,0127	0,0054	0,0050	0,0085	-0,0042	-0,0039
8,65	0,0164	0,0075	0,0062	0,0110	-0,0045	-0,0042
8,57	0,0186	0,0108	0,0083	0,0131	-0,0031	-0,0020
10,57	0,0221	0,0138	0,0100	0,0160	-0,0046	-0,0011
10,58	0,0240	0,0184	0,0100	0,0167	-0,0049	0,0010
12,43	0,0290	0,0228	0,0127	0,0217	-0,0057	0,0023
12,41	0,0344	0,0306	0,0137	0,0249	-0,0053	0,0053
14,31	0,0394	0,0367	0,0169	0,0312	-0,0068	0,0080
14,31	0,0459	0,0542	0,0223	0,0390	-0,0049	0,0130
16,36	0,0563	0,0780	0,0383	0,0633	-0,0046	0,0159
16,30	0,0761	0,0983	0,1834	0,3654	0,0084	0,0219
16,47	0,2648	0,1046	0,3974	0,5634	0,0104	0,0196
18,35	0,9762	0,2525	1,0759	1,0507	0,1837	0,0531
19,49	1,0198	0,2916	1,1501	1,1225	0,2636	0,0725
19,63	0,9759	0,3816	1,2130	1,1505	0,3729	0,1655
21,45	1,0011	0,4996	1,3825	1,2697	0,5488	0,3971
21,52	0,9668	0,5991	1,4498	1,3031	0,6536	0,4952
21,51	0,9541	0,6031	1,4433	1,2971	0,6576	0,4989
21,37	0,9498	0,6159	1,4508	1,3009	0,6696	0,5109
23,26	1,0049	0,7347	1,5768	1,4016	0,8053	0,6370
23,44	0,9899	0,8022	1,6084	1,4170	0,9372	0,7974
25,27	1,0328	0,9471	1,7217	1,5191	1,1194	0,9823
25,34	1,0109	1,0176	1,7608	1,5368	1,1656	1,0241
27,18	1,0698	1,1862	1,9123	1,6655	1,3172	1,1482
27,14	1,0388	1,2414	1,9433	1,6795	1,3474	1,1773
29,13	1,0738	1,4085	2,0906	1,8219	1,4788	1,3049
29,06	1,0723	1,4498	2,1152	1,8432	1,4966	1,3233
29,54	1,0802	1,4824	2,1391	1,8753	1,5197	1,3476
29,87	1,0840	1,5344	2,1776	1,9235	1,5538	1,3814
30,13	1,0691	1,5648	2,2026	1,9555	1,5728	1,4016
31,03	1,0740	1,6335	2,2610	2,0330	1,6247	1,4558
31,09	1,0526	1,6798	2,2858	2,0764	1,6524	1,4878
30,83	1,0313	1,6900	2,2864	2,0826	1,6547	1,4938
30,15	1,0133	1,6805	2,2714	2,0587	1,6392	1,4790
31,57	1,0073	1,7268	2,3020	2,1455	1,6831	1,5285

Tabela A7 – Leituras dos extensômetros colados na armadura transversal de CFC da viga VT1.

Torçor (kNm)	FT1 (‰)	FT2 (‰)	FT3 (‰)	FT4 (‰)	FT5 (‰)	FT6 (‰)
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,98	-0,0009	0,0003	0,0005	0,0008	0,0005	-0,0005
1,03	-0,0022	-0,0005	-0,0004	0,0007	-0,0007	-0,0019
2,99	-0,0057	0,0008	0,0001	0,0022	-0,0011	-0,0024
2,87	-0,0062	0,0005	-0,0004	0,0020	-0,0003	-0,0026
4,82	-0,0092	0,0015	-0,0001	0,0038	0,0001	-0,0031
4,76	-0,0110	0,0008	-0,0007	0,0035	-0,0007	-0,0046
6,68	-0,0137	0,0011	0,0001	0,0054	0,0003	-0,0046
7,07	-0,0173	0,0005	-0,0011	0,0051	-0,0020	-0,0068
8,65	-0,0188	0,0015	0,0000	0,0062	-0,0003	-0,0068
8,57	-0,0186	0,0014	0,0000	0,0072	-0,0001	-0,0077
10,57	-0,0228	0,0014	0,0005	0,0081	0,0023	-0,0084
10,58	-0,0210	0,0016	0,0014	0,0091	0,0030	-0,0088
12,43	-0,0234	0,0022	0,0033	0,0107	0,0068	-0,0092
12,41	-0,0255	0,0011	0,0030	0,0107	0,0075	-0,0098
14,31	-0,0270	0,0018	0,0043	0,0122	0,0118	-0,0110
14,31	-0,0280	-0,0007	0,0041	0,0118	0,0142	-0,0122
16,36	-0,0309	-0,0014	0,0039	0,0137	0,0205	-0,0142
16,30	-0,0589	-0,0064	-0,0572	0,0093	0,0268	-0,0152
16,47	-0,0502	-0,0066	-0,0910	0,0007	0,0329	-0,0154
18,35	-0,0500	0,0180	0,0364	-0,0007	0,1295	0,0301
19,49	0,1635	0,0500	0,0505	0,0001	0,2935	0,0481
19,63	0,5797	0,1627	0,1046	0,0065	0,6627	0,0656
21,45	0,9429	0,2507	0,2215	0,0356	1,0258	0,0947
21,52	1,1001	0,3498	0,4521	0,0568	1,2584	0,1117
21,51	1,1082	0,3579	0,4624	0,0587	1,2681	0,1127
21,37	1,1256	0,3738	0,4857	0,0599	1,2908	0,1140
23,26	1,2976	0,4489	0,7728	0,0681	1,5317	0,1350
23,44	1,3279	0,5275	1,0327	0,0772	1,6346	0,1516
25,27	1,4714	0,6338	1,4307	0,0914	1,8776	0,1961
25,34	1,4802	0,6933	1,6110	0,1001	1,9595	0,2329
27,18	1,6076	0,7683	1,9673	0,1243	2,1817	0,2954
27,14	1,5951	0,7831	2,1340	0,1379	2,2400	0,3411
29,13	1,7064	0,8290	2,6033	0,1728	2,4639	0,4540
29,06	1,7115	0,8847	2,7357	0,1852	2,5032	0,4855
29,54	1,7246	0,9114	2,8007	0,1937	2,5377	0,5028
29,87	1,7418	0,9452	2,9455	0,2243	2,5984	0,5367
30,13	1,7472	0,9607	3,0373	0,2468	2,6331	0,5652
31,03	1,7851	0,9958	3,2399	0,2850	2,7207	0,6243
31,09	1,7959	1,0140	3,3896	0,3276	2,7136	0,7093
30,83	1,7878	1,0198	3,4241	0,3432	2,6646	0,7349
30,15	1,7700	1,0140	3,4118	0,3451	2,6450	0,7356
31,57	1,7997	1,0344	3,4866	0,3604	2,6761	0,7587

VT2

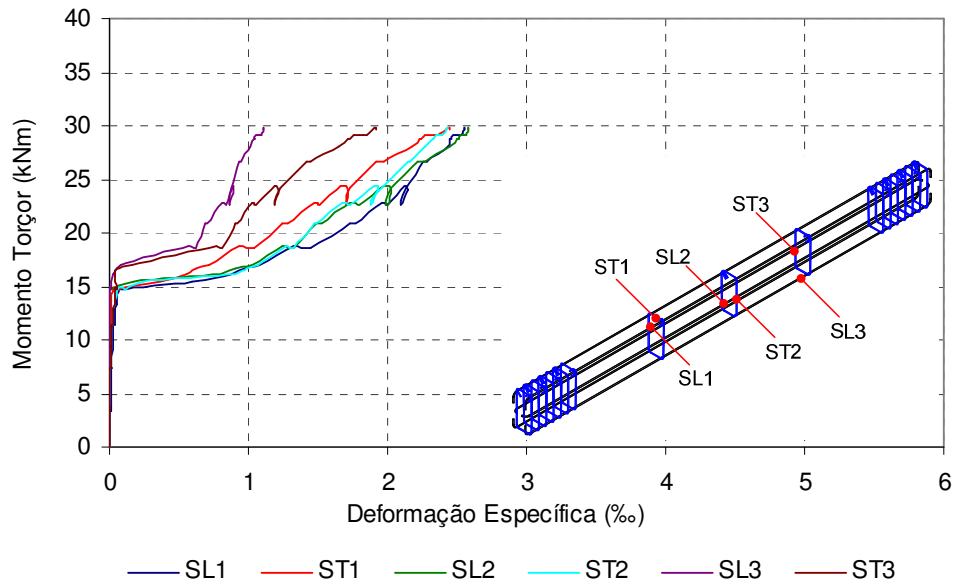


Figura A.4 – Gráfico momento torçor x deformação específica das armaduras de aço transversal e longitudinal da viga VT2.

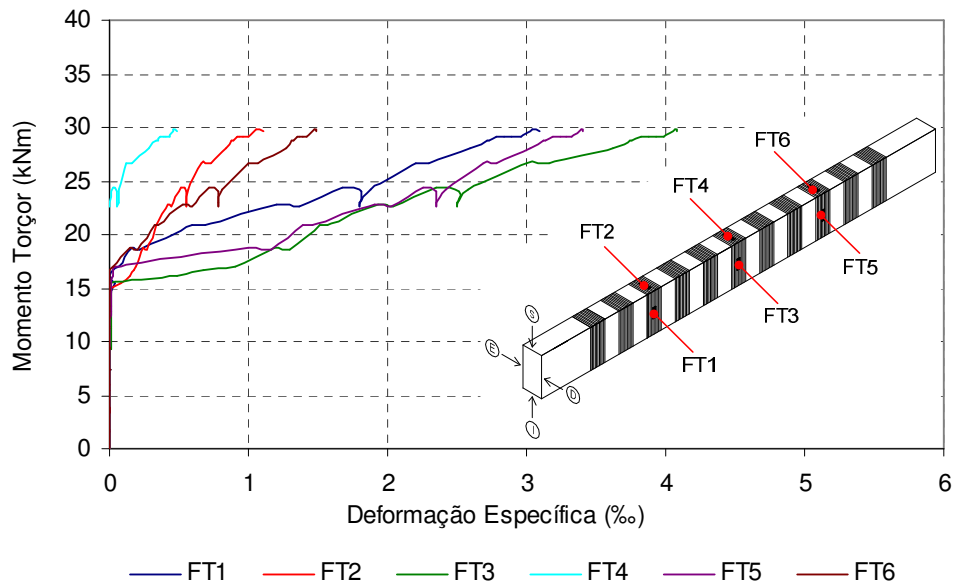


Figura A.5 – Gráfico momento torçor x deformação específica da armadura de CFC transversal da viga VT2.

Tabela A8 – Ângulo de torção por unidade de comprimento e leituras dos LVDT da viga VT2.

Torçor	θ/m	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)	LVDT5 (mm)
0,0	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,5	0,058	2,12	2,12	0,85	1,88	0,83
1,8	0,058	2,12	2,13	0,86	1,88	0,83
3,8	0,075	3,02	2,98	1,52	2,52	1,34
3,4	0,075	3,02	3,01	1,55	2,56	1,34
5,5	0,087	3,97	3,91	2,26	3,23	2,01
5,9	0,091	4,13	4,13	2,49	3,38	2,10
7,4	0,104	5,08	4,99	3,27	4,20	2,74
7,3	0,106	5,23	5,16	3,50	4,35	2,85
9,5	0,130	6,37	6,25	4,25	5,16	3,45
9,3	0,135	6,50	6,40	4,40	5,23	3,46
11,3	0,155	7,61	7,46	5,13	6,03	4,12
11,4	0,160	7,79	7,63	5,34	6,16	4,19
12,8	0,179	8,70	8,48	5,97	6,79	4,66
13,3	0,187	8,95	8,75	6,32	6,95	4,74
14,9	0,219	10,25	9,79	7,27	7,62	5,31
14,8	0,231	10,67	10,17	7,72	7,78	5,46
15,5	0,305	12,79	12,61	9,56	8,39	5,90
16,2	0,486	17,31	15,42	11,29	8,76	6,30
16,7	0,546	18,94	16,74	12,45	9,96	6,55
17,1	0,672	22,05	19,91	14,95	11,40	6,75
18,7	0,946	29,07	26,76	21,15	15,42	7,40
18,6	1,027	30,97	28,28	22,10	15,71	7,43
20,8	1,186	35,17	32,09	25,01	17,41	7,90
20,8	1,248	36,77	32,81	25,57	17,72	8,02
22,8	1,442	41,95	37,51	29,23	19,43	8,60
22,7	1,508	43,68	40,82	30,50	20,05	8,75
24,3	1,693	48,56	45,09	33,64	21,58	9,19
24,1	1,755	50,20	46,52	34,73	22,14	9,33
22,6	1,755	50,20	46,52	34,73	22,14	9,33
22,9	1,741	50,09	46,67	34,82	24,09	9,54
24,2	1,795	51,39	47,92	34,93	24,44	9,55
26,6	1,932	55,37	53,00	38,86	25,78	10,17
26,6	1,985	56,84	54,73	40,18	26,40	10,34
28,1	2,201	62,98	60,80	44,91	29,00	11,15
28,7	2,278	65,13	64,00	46,79	29,88	11,37
28,7	2,295	65,64	64,58	47,22	30,03	11,47
29,2	2,331	66,67	66,46	48,29	30,44	11,60
29,2	2,366	67,62	67,29	49,03	30,81	11,67
29,1	2,399	68,63	68,21	49,67	31,30	11,83
29,2	2,435	69,84	69,71	50,75	32,14	12,13
29,9	2,494	71,89	71,64	52,49	33,45	12,66
29,6	2,552	73,95	74,45	54,80	35,63	13,22

Tabela A9 – Leituras dos extensômetros colados na superfície de concreto da viga VT2.

Torçor (kNm)	C1 (‰)	C2 (‰)	C3 (‰)	C4 (‰)	C5 (‰)	C6 (‰)	C7 (‰)	C8 (‰)	C9 (‰)
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1,5	-0,0001	-0,0148	0,0008	-0,0006	-0,0169	0,0005	0,0010	-0,0005	-0,0144
1,8	0,0005	-0,0148	0,0009	0,0000	-0,0164	0,0017	0,0018	0,0000	-0,0144
3,8	0,0000	-0,0356	0,0025	-0,0012	-0,0409	0,0016	0,0031	-0,0004	-0,0350
3,4	0,0000	-0,0360	0,0030	-0,0012	-0,0418	0,0016	0,0026	-0,0009	-0,0361
5,5	-0,0003	-0,0565	0,0050	-0,0014	-0,0648	0,0026	0,0039	-0,0008	-0,0560
5,9	-0,0001	-0,0601	0,0063	-0,0001	-0,0686	0,0040	0,0058	0,0005	-0,0589
7,4	-0,0004	-0,0778	0,0084	-0,0003	-0,0887	0,0053	0,0079	0,0009	-0,0757
7,3	0,0008	-0,0809	0,0097	0,0004	-0,0925	0,0063	0,0088	0,0013	-0,0785
9,5	0,0010	-0,1033	0,0125	0,0013	-0,1178	0,0077	0,0114	0,0028	-0,1001
9,3	0,0021	-0,1060	0,0146	0,0027	-0,1216	0,0085	0,0125	0,0043	-0,1027
11,3	0,0031	-0,1296	0,0191	0,0041	-0,1481	0,0114	0,0156	0,0072	-0,1242
11,4	0,0052	-0,1331	0,0236	0,0075	-0,1533	0,0134	0,0170	0,0098	-0,1273
12,8	0,0064	-0,1548	0,0289	0,0098	-0,1785	0,0164	0,0188	0,0127	-0,1469
13,3	0,0134	-0,1625	0,0339	0,0164	-0,1876	0,0197	0,0213	0,0161	-0,1510
14,9	0,0691	-0,1865	0,0346	0,0356	-0,2250	0,0157	–	0,0210	-0,1706
14,8	0,1836	-0,1919	0,0259	0,0667	-0,2448	0,0092	–	0,0329	-0,1711
15,5	0,1911	-0,2081	0,0433	0,0611	-0,2823	-0,0208	–	0,0323	-0,1782
16,2	0,6629	-0,4564	-0,1227	-0,0898	-0,6015	-0,2432	–	0,0384	-0,1881
16,7	0,7932	-0,5093	-0,1546	-0,0771	-0,6827	-0,3048	–	0,0520	-0,1858
17,1	1,7260	-0,5570	-0,1750	0,0310	-0,7905	-0,3983	–	0,1398	-0,1958
18,7	–	-0,6552	-0,2206	0,2387	-0,9757	-0,5854	–	0,3009	-0,6021
18,6	–	-0,7080	-0,2481	0,2304	-1,0390	-0,6420	–	–	-0,6331
20,8	–	-0,8068	-0,3117	0,1988	-1,1655	-0,7297	–	–	-0,7389
20,8	–	-0,8220	-0,3230	0,1899	-1,1889	-0,7458	–	–	-0,7523
22,8	–	-0,9224	-0,4203	0,1391	-1,3240	-0,8289	–	–	-0,7950
22,7	–	-0,9583	-0,4535	0,1142	-1,3724	-0,8570	–	–	-0,8239
24,3	–	-1,0714	-0,5464	0,0751	-1,4966	-0,9377	–	–	-0,9162
24,1	–	-1,1140	-0,5797	0,0516	-1,5440	-0,9691	–	–	-0,9325
22,6	–	-1,0887	-0,5757	0,0596	-1,5202	-0,9623	–	–	-0,9059
22,9	–	-1,0885	-0,5761	0,0588	-1,5196	-0,9614	–	–	-0,9050
24,2	–	-1,1263	-0,5993	0,0516	-1,5663	-0,9856	–	–	-0,9430
26,6	–	-1,2406	-0,6878	0,0058	-1,7126	-1,0789	–	–	-1,0293
26,6	–	-1,2679	-0,7151	-0,0199	-1,7631	-1,1053	–	–	-1,0422
28,1	–	-1,3559	-0,8395	-0,0845	-1,9564	-1,2235	–	–	-1,1355
28,7	–	-1,3848	-0,9001	-0,1034	-2,0212	-1,2637	–	–	-1,1636
28,7	–	-1,3943	-0,9141	-0,1078	-2,0336	-1,2707	–	–	-1,1699
29,2	–	-1,4193	-0,9461	-0,1156	-2,0601	-1,2867	–	–	-1,1840
29,2	–	-1,4417	-0,9730	-0,1233	-2,0826	-1,2992	–	–	-1,1957
29,1	–	-1,4562	-1,0044	-0,1312	-2,1052	-1,3106	–	–	-1,2076
29,2	–	-1,4848	-1,0383	-0,1399	-2,1281	-1,3215	–	–	-1,2193
29,9	–	-1,5330	-1,0848	-0,1536	-2,1653	-1,3415	–	–	-1,2401
29,6	–	-1,5538	-1,1126	-0,1594	-2,1771	-1,3465	–	–	-1,2431

Tabela A10 – Leituras dos extensômetros colados na armadura de aço transversal e longitudinal da viga VT2.

Torçor (kNm)	SL1 (‰)	ST1 (‰)	SL2 (‰)	ST2 (‰)	SL3 (‰)	ST3 (‰)
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1,5	0,0024	-0,0001	0,0001	0,0000	-0,0004	-0,0009
1,8	0,0029	0,0008	0,0005	0,0007	0,0005	0,0006
3,8	0,0066	0,0011	0,0001	0,0008	-0,0007	-0,0001
3,4	0,0071	0,0005	-0,0003	0,0010	-0,0012	0,0000
5,5	0,0113	0,0022	-0,0003	0,0015	-0,0015	0,0012
5,9	0,0129	0,0038	0,0001	0,0030	-0,0011	0,0039
7,4	0,0173	0,0052	0,0004	0,0043	-0,0007	0,0057
7,3	0,0199	0,0061	0,0012	0,0075	0,0000	0,0083
9,5	0,0240	0,0075	0,0000	0,0083	-0,0012	0,0111
9,3	0,0271	0,0085	-0,0008	0,0106	-0,0008	0,0146
11,3	0,0326	0,0104	0,0000	0,0149	-0,0010	0,0202
11,4	0,0382	0,0141	0,0019	0,0226	0,0016	0,0261
12,8	0,0444	0,0146	0,0012	0,0264	0,0007	0,0298
13,3	0,0524	0,0184	0,0020	0,0345	0,0022	0,0370
14,9	0,0660	0,0221	0,0001	0,0680	0,0039	0,0454
14,8	0,0866	0,0340	0,0138	0,1238	0,0079	0,0527
15,5	0,6005	0,3630	0,1700	0,2376	0,0096	0,0454
16,2	0,8776	0,5521	0,7964	0,9075	0,0326	0,0457
16,7	0,9686	0,6236	0,9007	0,9830	0,0570	0,0509
17,1	1,0769	0,7191	1,0231	1,0624	0,0865	0,1661
18,7	1,3276	0,9381	1,2390	1,2740	0,5695	0,7648
18,6	1,4452	1,0423	1,3219	1,3177	0,6151	0,8051
20,8	1,7320	1,2487	1,4918	1,4691	0,6924	0,9017
20,8	1,7684	1,2801	1,5240	1,4924	0,7051	0,9155
22,8	1,9562	1,4713	1,7311	1,6816	0,8112	1,0241
22,7	2,0008	1,5187	1,7922	1,7247	0,8330	1,0552
24,3	2,1227	1,6671	1,9719	1,9080	0,8931	1,1845
24,1	2,1509	1,7119	2,0284	1,9382	0,8898	1,2106
22,6	2,0991	1,6983	1,9935	1,8821	0,8630	1,1840
22,9	2,0972	1,6976	1,9927	1,8802	0,8622	1,1830
24,2	2,1337	1,7330	2,0315	1,9623	0,8811	1,2282
26,6	2,2555	1,9239	2,2170	2,1430	0,9299	1,4162
26,6	2,2868	1,9791	2,2670	2,1638	0,9457	1,4460
28,1	2,4273	2,1760	2,4514	2,2729	1,0115	1,6543
28,7	2,4511	2,2306	2,4970	2,3182	1,0378	1,7179
28,7	2,4579	2,2432	2,5071	2,3307	1,0435	1,7323
29,2	2,4760	2,2749	2,5267	2,3521	1,0546	1,7622
29,2	2,4920	2,3039	2,5406	2,3673	1,0663	1,7924
29,1	2,5060	2,3356	2,5505	2,3790	1,0789	1,8266
29,2	2,5222	2,3699	2,5626	2,3940	1,0903	1,8531
29,9	2,5527	2,4277	2,5868	2,4279	1,1067	1,9060
29,6	2,5498	2,4473	2,5810	2,4219	1,1119	1,9139

Tabela A11 – Leituras dos extensômetros colados na armadura transversal de CFC da viga VT2.

Torçor (kNm)	FT1 (‰)	FT2 (‰)	FT3 (‰)	FT4 (‰)	FT5 (‰)	FT6 (‰)
0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1,5	-0,0019	-0,0014	0,0001	-0,0007	-0,0003	-0,0003
1,8	-0,0008	-0,0019	0,0000	-0,0004	-0,0004	-0,0007
3,8	-0,0009	-0,0029	0,0008	-0,0010	0,0000	-0,0011
3,4	-0,0020	-0,0037	0,0001	-0,0015	-0,0001	-0,0022
5,5	-0,0019	-0,0049	0,0016	-0,0020	0,0005	-0,0026
5,9	-0,0005	-0,0052	0,0023	-0,0018	0,0011	-0,0019
7,4	-0,0005	-0,0062	0,0038	-0,0023	0,0018	-0,0023
7,3	-0,0018	-0,0081	0,0034	-0,0031	0,0016	-0,0035
9,5	-0,0007	-0,0095	0,0057	-0,0035	0,0033	-0,0039
9,3	-0,0023	-0,0102	0,0068	-0,0041	0,0037	-0,0045
11,3	-0,0007	-0,0119	0,0103	-0,0049	0,0060	-0,0042
11,4	0,0001	-0,0130	0,0126	-0,0057	0,0066	-0,0049
12,8	0,0015	-0,0146	0,0163	-0,0066	0,0093	-0,0047
13,3	0,0045	-0,0156	0,0199	-0,0073	0,0115	-0,0037
14,9	0,0125	-0,0177	0,0187	-0,0100	0,0160	-0,0022
14,8	0,0188	-0,0187	0,0118	-0,0118	0,0196	0,0001
15,5	0,0397	0,0857	0,0026	-0,0112	0,0190	0,0010
16,2	0,0018	0,1520	0,4802	-0,0256	0,0211	0,0018
16,7	0,0237	0,1690	0,6721	-0,0244	0,0237	0,0039
17,1	0,0722	0,1953	0,9021	-0,0255	0,0359	0,0299
18,7	0,1642	0,2400	1,1839	-0,0295	1,0059	0,1551
18,6	0,2204	0,2724	1,3006	-0,0267	1,1563	0,2077
20,8	0,5923	0,3326	1,5166	-0,0264	1,3890	0,3195
20,8	0,6928	0,3438	1,5676	-0,0232	1,4608	0,3533
22,8	1,1979	0,4161	1,9262	-0,0083	1,9073	0,5251
22,7	1,3628	0,4516	2,0416	0,0049	2,0232	0,5938
24,3	1,6740	0,5099	2,3466	0,0249	2,2517	0,7130
24,1	1,8042	0,5492	2,5086	0,0516	2,3533	0,7842
22,6	1,8030	0,5572	2,5011	0,0607	2,3485	0,7858
22,9	1,8032	0,5575	2,5005	0,0614	2,3480	0,7853
24,2	1,8783	0,5705	2,5857	0,0615	2,4175	0,8074
26,6	2,2009	0,6601	3,0065	0,1176	2,6938	0,9937
26,6	2,3007	0,7233	3,1654	0,1653	2,7847	1,0721
28,1	2,5958	0,8389	3,6240	0,2890	3,0213	1,2643
28,7	2,7133	0,8834	3,7381	0,3390	3,1202	1,3147
28,7	2,7340	0,8915	3,7604	0,3468	3,1409	1,3237
29,2	2,7901	0,9134	3,8216	0,3669	3,1940	1,3478
29,2	2,8400	0,9368	3,8767	0,3868	3,2432	1,3705
29,1	2,8959	0,9641	3,9306	0,4075	3,2841	1,3954
29,2	2,9564	1,0043	3,9840	0,4296	3,3278	1,4248
29,9	3,0421	1,0539	4,0645	0,4589	3,3899	1,4683
29,6	3,0922	1,1092	4,0772	0,4812	3,4108	1,4879

VT3

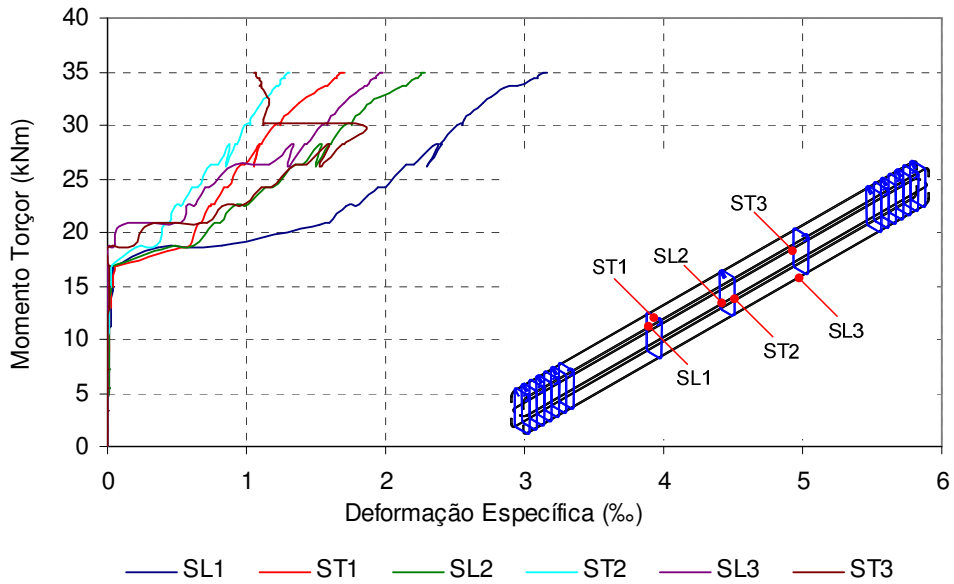


Figura A.6 – Gráfico momento torçor x deformação específica das armaduras de aço transversal e longitudinal da viga VT3.

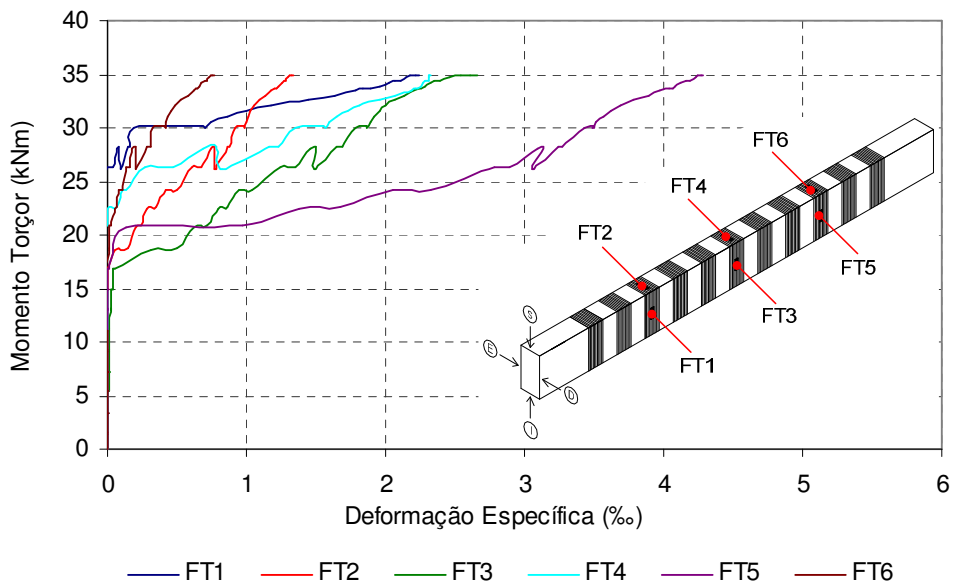


Figura A.7 – Gráfico momento torçor x deformação específica da armadura de CFC transversal da viga VT3.

Tabela A12 – Ângulo de torção por unidade de comprimento e leituras dos LVDT da viga VT3.

Torçor (kN/m)	θ/m	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)	LVDT5 (mm)
0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,47	0,012	0,06	0,12	0,00	0,03	0,04
1,62	0,012	0,06	0,12	0,00	0,03	0,04
3,37	0,024	0,12	0,17	0,00	0,06	0,06
3,37	0,024	0,12	0,17	0,00	0,06	0,07
5,42	0,041	0,19	0,23	0,00	0,10	0,10
5,41	0,044	0,20	0,23	0,00	0,10	0,10
7,23	0,064	0,27	0,30	0,04	0,14	0,13
7,19	0,064	0,27	0,30	0,05	0,14	0,13
9,19	0,087	0,35	0,37	0,10	0,18	0,16
9,23	0,090	0,36	0,38	0,11	0,18	0,16
11,00	0,107	0,43	0,44	0,18	0,23	0,19
11,15	0,113	0,45	0,46	0,19	0,24	0,20
13,14	0,133	0,52	0,53	0,24	0,28	0,23
12,99	0,138	0,54	0,54	0,25	0,28	0,23
14,99	0,162	0,63	0,61	0,31	0,33	0,26
14,84	0,168	0,65	0,63	0,33	0,34	0,27
16,89	0,197	0,77	0,72	0,40	0,40	0,33
16,80	0,223	0,85	0,76	0,43	0,43	0,35
18,61	0,473	1,58	1,44	0,95	0,83	0,51
18,81	0,596	1,91	1,73	1,19	0,85	0,55
20,72	0,825	2,50	2,17	1,41	1,00	0,61
20,79	0,941	2,77	2,38	1,59	1,08	0,62
22,47	1,068	3,12	2,68	1,80	1,24	0,68
22,55	1,199	3,45	2,97	2,06	1,32	0,70
24,27	1,342	3,85	3,27	2,29	1,43	0,76
24,27	1,428	4,07	3,50	2,46	1,48	0,77
26,28	1,604	4,56	3,92	2,79	1,60	0,84
26,32	1,704	4,81	4,13	2,96	1,63	0,85
28,01	1,836	5,18	4,44	3,19	1,72	0,90
28,26	1,880	5,30	4,76	3,25	1,74	0,91
28,33	2,072	5,81	5,06	3,44	1,81	0,95
28,22	2,100	5,88	5,12	3,49	1,83	0,95
30,06	2,220	6,20	5,37	3,65	1,86	0,98
30,12	2,299	6,41	5,57	3,80	1,93	0,99
29,96	2,304	6,42	5,57	3,80	1,93	0,99
30,50	2,326	6,48	5,63	3,84	1,94	1,00
31,08	2,371	6,61	5,73	3,91	1,98	1,02
31,63	2,421	6,75	5,84	3,98	1,99	1,03
32,09	2,492	6,95	6,07	4,08	2,03	1,05
32,57	2,602	7,25	6,35	4,20	2,09	1,07
32,94	2,713	7,55	6,65	4,33	2,13	1,10
33,52	2,842	7,90	6,96	4,49	2,20	1,12
33,70	2,908	8,08	7,15	4,56	2,22	1,13
33,70	2,949	8,20	7,24	4,60	2,23	1,14
33,82	2,985	8,30	7,33	4,65	2,26	1,15
34,16	3,025	8,42	7,49	4,71	2,28	1,16
34,38	3,072	8,55	7,62	4,78	2,30	1,17
34,44	3,119	8,68	7,78	4,82	2,33	1,18
34,74	3,153	8,78	7,90	4,89	2,36	1,19
34,83	3,192	8,89	8,02	4,94	2,37	1,21
34,97	3,224	8,98	8,21	4,99	2,40	1,22
34,95	3,239	9,04	8,31	5,02	2,42	1,23

Tabela A13 – Leituras dos extensômetros colados na superfície de concreto da viga VT3.

Torçor (kNm)	C1 (‰)	C2 (‰)	C3 (‰)	C4 (‰)	C5 (‰)	C6 (‰)	C7 (‰)	C8 (‰)	C9 (‰)
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1,47	-0,0009	-0,0151	0,0000	-0,0005	-0,0141	0,0007	0,0023	-0,0196	0,0001
1,62	-0,0001	-0,0137	0,0003	0,0001	-0,0134	0,0013	0,0037	-0,0161	0,0007
3,37	-0,0021	-0,0339	-0,0008	-0,0006	-0,0317	0,0017	0,0053	-0,0370	-0,0012
3,37	-0,0008	-0,0325	0,0004	0,0003	-0,0314	0,0027	0,0067	-0,0317	-0,0003
5,42	-0,0008	-0,0522	0,0007	0,0004	-0,0494	0,0043	0,0102	-0,0497	-0,0001
5,41	-0,0012	-0,0529	-0,0003	0,0003	-0,0499	0,0043	0,0101	-0,0515	0,0000
7,23	-0,0032	-0,0752	-0,0006	-0,0009	-0,0703	0,0046	0,0124	-0,0713	-0,0013
7,19	-0,0045	-0,0773	-0,0023	-0,0017	-0,0718	0,0037	0,0108	-0,0766	-0,0039
9,19	-0,0043	-0,0987	-0,0012	-0,0009	-0,0916	0,0059	0,0161	-0,0998	-0,0022
9,23	-0,0046	-0,1001	-0,0021	-0,0010	-0,0933	0,0052	0,0163	-0,0913	-0,0031
11,00	-0,0046	-0,1212	-0,0008	0,0000	-0,1126	0,0085	0,0218	-0,1112	-0,0012
11,15	-0,0039	-0,1241	-0,0003	0,0010	-0,1156	0,0093	0,0232	-0,1234	-0,0003
13,14	-0,0032	-0,1470	0,0016	0,0031	-0,1368	0,0129	0,0294	-0,1472	0,0021
12,99	-0,0037	-0,1499	0,0030	0,0044	-0,1395	0,0146	0,0303	-0,1519	0,0045
14,99	-0,0034	-0,1749	0,0061	0,0066	-0,1621	0,0187	0,0330	-0,1741	0,0107
14,84	-0,0034	-0,1805	0,0097	0,0103	-0,1659	0,0209	0,0286	-0,1772	0,0219
16,89	-0,0030	-0,2105	0,0128	0,0138	-0,1900	0,0266	0,0236	-0,2036	0,0444
16,80	-0,0055	-0,2221	0,0338	0,0243	-0,1973	0,0319	0,0177	-0,2111	0,0581
18,61	-0,0324	-0,3022	0,1367	0,0194	-0,4239	-0,1862	0,0809	-0,2653	0,1468
18,81	0,0329	0,6589	0,4480	0,0154	-0,5727	-0,2698	–	-0,4610	-0,0179
20,72	-0,1201	-0,8720	–	0,0161	-0,6967	-0,3199	–	-0,5403	-0,0303
20,79	0,1878	-0,9412	–	0,0142	-0,7470	-0,3457	–	-0,5944	-0,0699
22,47	–	-1,0683	–	0,0132	-0,8346	-0,3992	–	-0,7000	-0,1232
22,55	–	-1,1458	–	-0,0114	-0,9086	-0,4425	–	-0,7587	-0,1602
24,27	–	-1,2490	–	-0,1863	-1,0000	-0,4916	–	-0,8200	-0,1891
24,27	–	-1,3071	–	-0,2105	-1,0512	-0,5203	–	-0,8411	-0,2052
26,28	–	-1,4352	–	-0,2589	-1,1591	-0,5744	–	-0,9504	-0,2596
26,32	–	-1,4945	–	-0,2641	-1,1894	-0,5954	–	-1,0131	-0,3111
28,01	–	-1,5884	–	-0,2636	-1,2553	-0,6423	–	-1,0879	-0,3597
28,26	–	-1,6129	–	-0,2449	-1,2710	-0,6530	–	-1,1055	-0,3774
28,33	–	-1,6861	–	-0,1767	-1,3102	-0,6994	–	-1,1552	-0,4577
28,22	–	-1,7024	–	-0,1562	-1,3149	-0,7064	–	-1,1574	-0,4702
30,06	–	-1,7834	–	-0,1549	-1,3739	-0,7482	–	-1,2144	-0,5155
30,12	–	-1,8824	–	-0,1590	-1,4067	-0,7694	–	-1,2447	-0,5601
29,96	–	-1,8859	–	-0,0834	-1,4059	-0,7695	–	-1,2453	-0,5622
30,50	–	-1,9049	–	-0,0223	-1,4170	-0,7778	–	-1,2539	-0,5725
31,08	–	-1,9413	–	-0,0393	-1,4379	-0,7928	–	-1,2691	-0,5928
31,63	–	-1,9752	–	-0,0672	-1,4588	-0,8091	–	-1,2837	-0,6132
32,09	–	-2,0271	–	-0,0722	-1,4827	-0,8297	–	-1,3016	-0,6436
32,57	–	-2,1009	–	-0,0850	-1,5080	-0,8562	–	-1,3259	-0,6928
32,94	–	-2,1596	–	-0,1013	-1,5277	-0,8790	–	-1,3534	-0,7420
33,52	–	-2,2201	–	-0,1210	-1,5488	-0,9010	–	-1,3806	-0,7922
33,70	–	-2,2479	–	-0,1414	-1,5600	-0,9081	–	-1,3963	-0,8198
33,70	–	-2,2649	–	-0,1645	-1,5678	-0,9146	–	-1,4073	-0,8342
33,82	–	-2,2795	–	-0,1784	-1,5760	-0,9221	–	-1,4192	-0,8450
34,16	–	-2,2998	–	-0,1894	-1,5859	-0,9322	–	-1,4318	-0,8487
34,38	–	-2,3229	–	-0,1854	-1,5971	-0,9435	–	-1,4442	-0,8364
34,44	–	-2,3415	–	-0,2016	-1,6046	-0,9601	–	-1,4529	-0,8301
34,74	–	-2,3592	–	-0,2135	-1,6145	-0,9797	–	-1,4610	-0,8310
34,83	–	-2,3764	–	-0,2038	-1,6330	-1,0044	–	-1,4676	-0,8329
34,97	–	-2,3926	–	-0,2206	-1,6521	-1,0270	–	-1,4728	-0,8356
34,95	–	-2,4067	–	-0,1863	-1,6778	-1,0570	–	-1,4769	-0,8370

Tabela A14 – Leituras dos extensômetros colados na armadura de aço transversal e longitudinal da viga VT3.

Torçor (kNm)	SL1 (‰)	ST1 (‰)	SL2 (‰)	ST2 (‰)	SL3 (‰)	ST3 (‰)
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1,47	0,0019	0,0012	0,0019	0,0003	-0,0007	0,0001
1,62	0,0019	0,0024	0,0026	0,0000	-0,0004	0,0011
3,37	0,0042	0,0024	0,0038	0,0003	-0,0024	-0,0005
3,37	0,0053	0,0038	0,0047	0,0010	-0,0010	0,0010
5,42	0,0084	0,0060	0,0072	0,0015	-0,0015	0,0018
5,41	0,0084	0,0064	0,0072	0,0015	-0,0022	0,0015
7,23	0,0110	0,0057	0,0084	0,0020	-0,0045	0,0000
7,19	0,0100	0,0041	0,0069	0,0018	-0,0062	-0,0008
9,19	0,0144	0,0075	0,0106	0,0038	-0,0061	0,0011
9,23	0,0150	0,0080	0,0099	0,0039	-0,0066	0,0010
11,00	0,0196	0,0115	0,0138	0,0069	-0,0066	0,0030
11,15	0,0218	0,0145	0,0149	0,0081	-0,0060	0,0053
13,14	0,0267	0,0186	0,0187	0,0112	-0,0062	0,0076
12,99	0,0293	0,0211	0,0198	0,0134	-0,0066	0,0084
14,99	0,0352	0,0284	0,0244	0,0176	-0,0061	0,0126
14,84	0,0395	0,0386	0,0264	0,0210	-0,0050	0,0137
16,89	0,0454	0,0481	0,0314	0,0249	-0,0058	0,0171
16,80	0,0523	0,0698	0,0352	0,0290	-0,0042	0,0186
18,61	0,3678	0,5257	0,4351	0,2033	0,0026	0,0054
18,81	0,8215	0,5883	0,6277	0,3472	0,0595	0,1905
20,72	1,5217	0,6491	0,7553	0,4120	0,1145	0,3029
20,79	1,5994	0,6695	0,8138	0,4426	0,5213	0,7165
22,47	1,7226	0,7316	0,9067	0,4816	0,5678	0,8303
22,55	1,8134	0,7643	1,0130	0,5394	0,6384	0,9861
24,27	1,9485	0,8366	1,1286	0,6045	0,7057	1,1122
24,27	1,9934	0,8622	1,1856	0,6521	0,7361	1,1723
26,28	2,1496	0,9644	1,3474	0,7476	0,9177	1,3529
26,32	2,2016	0,9908	1,4118	0,7940	1,1655	1,4379
28,01	2,3381	1,0752	1,5175	0,8610	1,3041	1,5733
28,26	2,3737	1,0968	1,5460	0,8800	1,3392	1,5881
28,33	2,4039	1,1009	1,5941	0,9162	1,4228	1,6840
28,22	2,3932	1,1126	1,6092	0,9277	1,4345	1,7013
30,06	2,5178	1,2041	1,7014	0,9919	1,5353	1,8428
30,12	2,5554	1,2430	1,7577	1,0229	1,5775	1,1295
29,96	2,5517	1,2413	1,7580	1,0216	1,5756	1,1166
30,50	2,5735	1,2600	1,7743	1,0326	1,5948	1,1241
31,08	2,6140	1,2948	1,8087	1,0564	1,6319	1,1348
31,63	2,6565	1,3314	1,8464	1,0808	1,6658	1,1477
32,09	2,7043	1,3785	1,8961	1,1120	1,7028	1,1563
32,57	2,7580	1,4365	1,9639	1,1460	1,7459	1,1502
32,94	2,8036	1,4900	2,0251	1,1780	1,7898	1,1320
33,52	2,8466	1,5418	2,0952	1,2091	1,8354	1,1146
33,70	2,8951	1,5714	2,1260	1,2221	1,8558	1,1103
33,70	2,9422	1,5815	2,1457	1,2308	1,8690	1,0989
33,82	2,9952	1,5963	2,1634	1,2391	1,8807	1,1019
34,16	3,0362	1,6165	2,1858	1,2497	1,8976	1,0964
34,38	3,0732	1,6384	2,2136	1,2656	1,9199	1,0941
34,44	3,0907	1,6541	2,2347	1,2740	1,9329	1,0788
34,74	3,1135	1,6677	2,2510	1,2835	1,9464	1,0708
34,83	3,1332	1,6793	2,2600	1,2953	1,9575	1,0620
34,97	3,1511	1,6897	2,2710	1,3033	1,9677	1,0562
34,95	3,1666	1,6964	2,2783	1,3102	1,9755	1,0572

Tabela A15 – Leituras dos extensômetros colados na armadura transversal de CFC da viga VT3.

Torçor (kNm)	FT1 (‰)	FT2 (‰)	FT3 (‰)	FT4 (‰)	FT5 (‰)	FT6 (‰)
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1,47	-0,0022	-0,0007	0,0015	-0,0004	-0,0018	-0,0012
1,62	-0,0026	-0,0011	0,0016	-0,0001	-0,0019	-0,0011
3,37	-0,0045	-0,0008	0,0034	-0,0018	-0,0028	-0,0022
3,37	-0,0046	-0,0005	0,0037	-0,0011	-0,0031	-0,0020
5,42	-0,0068	-0,0005	0,0065	-0,0012	-0,0045	-0,0024
5,41	-0,0073	-0,0008	0,0069	-0,0012	-0,0045	-0,0030
7,23	-0,0096	-0,0003	0,0095	-0,0030	-0,0052	-0,0037
7,19	-0,0100	-0,0015	0,0088	-0,0037	-0,0054	-0,0050
9,19	-0,0125	-0,0005	0,0133	-0,0039	-0,0056	-0,0042
9,23	-0,0133	-0,0014	0,0133	-0,0049	-0,0062	-0,0056
11,00	-0,0150	-0,0008	0,0173	-0,0050	-0,0060	-0,0062
11,15	-0,0175	-0,0014	0,0183	-0,0052	-0,0058	-0,0069
13,14	-0,0194	-0,0005	0,0229	-0,0060	-0,0046	-0,0075
12,99	-0,0205	-0,0008	0,0244	-0,0061	-0,0030	-0,0084
14,99	-0,0222	0,0001	0,0303	-0,0065	-0,0007	-0,0089
14,84	-0,0248	-0,0008	0,0341	-0,0079	0,0015	-0,0108
16,89	-0,0290	-0,0008	0,0446	-0,0089	0,0065	-0,0127
16,80	-0,0306	-0,0010	0,0532	-0,0098	0,0094	-0,0142
18,61	-0,0196	0,0504	0,3108	-0,0259	0,0352	0,0200
18,81	-0,0177	0,1500	0,4972	-0,0186	0,0456	0,0127
20,72	-0,0474	0,2008	0,6268	-0,0145	0,1298	0,0134
20,79	-0,0475	0,2466	0,7126	-0,0027	0,9758	0,0241
22,47	-0,0649	0,2883	0,8015	0,0064	1,3783	0,0585
22,55	-0,0569	0,3468	0,8685	0,0657	1,6821	0,0684
24,27	-0,0524	0,4231	0,9521	0,1044	2,0509	0,0845
24,27	-0,0293	0,4951	1,0401	0,1406	2,3200	0,1050
26,28	0,0034	0,6036	1,2390	0,2770	2,7781	0,1308
26,32	0,0443	0,6802	1,3544	0,4681	2,8887	0,1581
28,01	0,0637	0,7453	1,4644	0,6951	3,0932	0,1807
28,26	0,0780	0,7674	1,4996	0,7868	3,1311	0,1972
28,33	0,1455	0,8629	1,6534	1,1570	3,2488	0,2865
28,22	0,1663	0,8820	1,6933	1,2342	3,2652	0,3041
30,06	0,1947	0,9254	1,7779	1,3485	3,4303	0,3277
30,12	0,6727	0,9864	1,8667	1,5536	3,4972	0,4109
29,96	0,7046	0,9891	1,8711	1,5642	3,4922	0,4147
30,50	0,7453	0,9964	1,8878	1,5914	3,5189	0,4218
31,08	0,8584	1,0120	1,9225	1,6539	3,5680	0,4386
31,63	1,0010	1,0290	1,9591	1,7241	3,6253	0,4562
32,09	1,1795	1,0568	2,0050	1,8161	3,6893	0,4810
32,57	1,4496	1,0982	2,0725	1,9594	3,7815	0,5321
32,94	1,6338	1,1357	2,1311	2,0734	3,8986	0,5762
33,52	1,7871	1,1809	2,2052	2,1839	3,9763	0,6194
33,70	1,8437	1,2008	2,2387	2,2147	4,0365	0,6388
33,70	1,8925	1,2155	2,2610	2,2334	4,0612	0,6517
33,82	1,9631	1,2337	2,2863	2,2511	4,0868	0,6653
34,16	2,0239	1,2532	2,3192	2,2680	4,1184	0,6824
34,38	2,0666	1,2705	2,3544	2,2884	4,1563	0,7001
34,44	2,1094	1,2876	2,3970	2,3057	4,1922	0,7165
34,74	2,1439	1,3009	2,4574	2,3047	4,2234	0,7310
34,83	2,1807	1,3147	2,5401	2,3080	4,2486	0,7458
34,97	2,2147	1,3265	2,6088	2,3162	4,2713	0,7603
34,95	2,2458	1,3377	2,6682	2,3198	4,2855	0,7738

VTL1

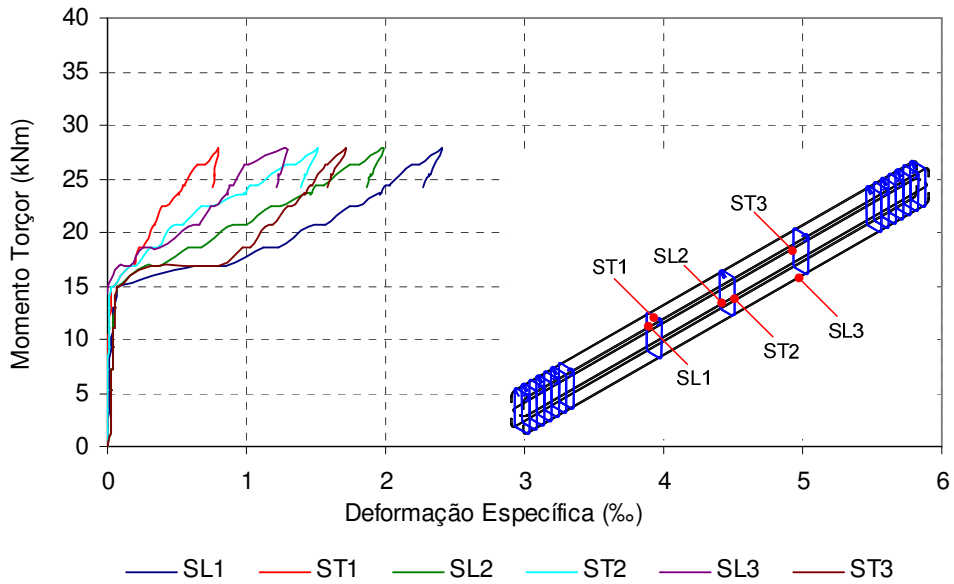


Figura A.8 – Gráfico momento torçor x deformação específica das armaduras de aço transversal e longitudinal da viga VTL1.

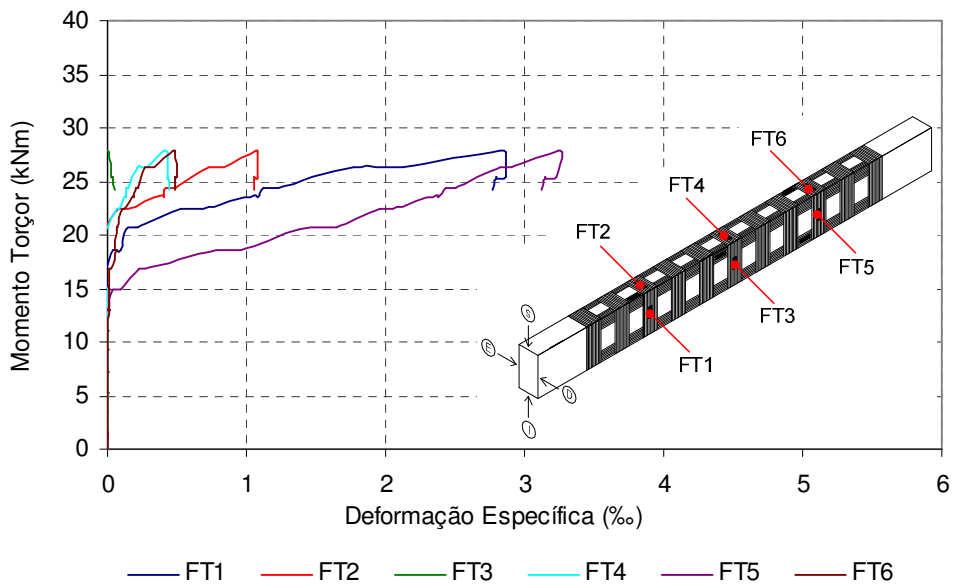


Figura A.9 – Gráfico momento torçor x deformação específica da armadura de CFC transversal da viga VTL1.

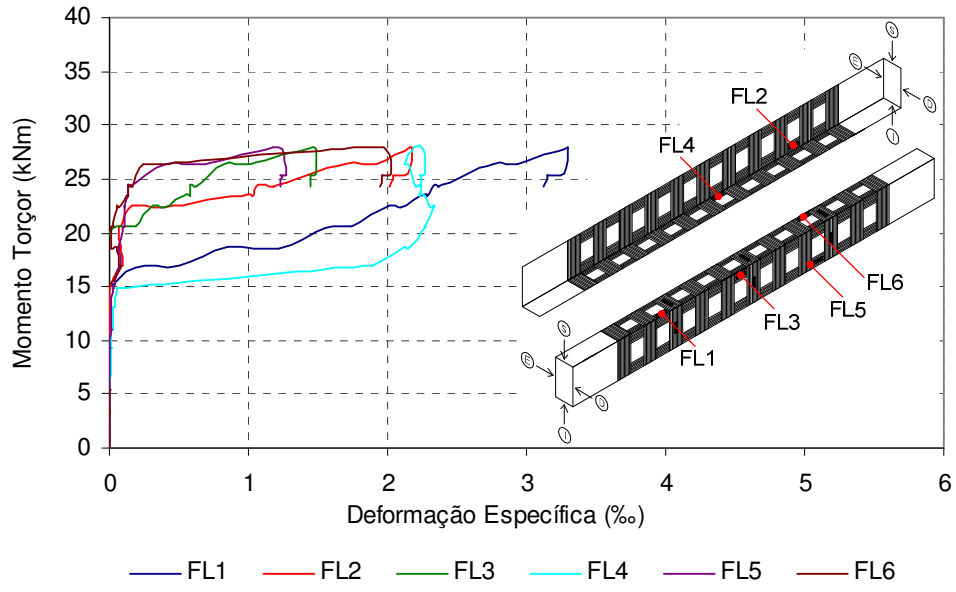


Figura A.10 – Gráfico momento torçor x deformação específica da armadura de CFC longitudinal da viga VTL1.

Tabela A16 – Ângulo de torção por unidade de comprimento e leituras dos LVDT da viga VTL1.

Torçor (kN/m)	θ/m	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)	LVDT5 (mm)
0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,58	0,019	0,95	1,18	1,09	0,78	0,50
1,45	0,019	0,96	1,20	1,12	0,78	0,50
3,48	0,052	1,94	2,09	1,73	1,36	0,73
3,38	0,054	2,00	2,12	1,75	1,37	0,73
5,35	0,082	3,02	3,09	2,49	2,04	1,10
5,35	0,085	3,09	3,19	2,56	2,11	1,11
7,24	0,102	3,98	4,07	3,20	2,70	1,59
7,26	0,102	3,98	4,11	3,26	2,74	1,59
9,22	0,123	4,89	4,88	3,81	3,27	1,99
9,24	0,124	4,90	4,99	3,91	3,33	1,99
11,01	0,144	5,92	5,86	4,49	3,91	2,53
11,04	0,150	6,06	5,93	4,57	3,99	2,53
13,00	0,167	7,17	6,96	5,31	4,70	3,22
13,03	0,169	7,37	7,12	5,49	4,85	3,36
14,88	0,193	8,57	8,18	6,24	5,56	4,00
14,90	0,204	9,00	8,61	6,55	5,70	4,16
16,78	0,495	16,38	16,82	11,00	8,70	4,73
16,87	0,624	19,42	19,56	12,74	9,37	4,73
18,68	0,796	24,27	23,09	15,85	11,22	5,48
18,59	0,881	26,28	24,97	17,20	11,76	5,48
20,47	1,050	30,86	29,25	20,10	13,07	6,00
20,66	1,154	33,35	31,39	21,62	13,65	6,00
20,65	1,154	33,35	31,39	21,62	13,65	6,00
22,51	1,347	38,03	35,57	21,62	13,71	6,02
22,43	1,414	39,63	37,20	22,40	14,15	6,02
23,61	1,650	45,40	43,36	25,67	15,76	6,03
23,49	1,664	45,75	43,70	26,14	16,05	6,03
24,43	1,709	46,86	44,88	26,49	16,25	6,04
24,33	1,744	47,69	45,86	27,00	16,46	6,03
24,34	1,749	47,81	45,99	27,06	16,46	6,03
26,29	1,976	53,43	52,78	30,55	18,31	6,04
26,30	2,073	55,84	55,37	32,00	19,01	6,04
27,98	2,392	63,79	57,26	37,20	22,31	6,02
27,78	2,496	65,41	59,16	38,92	23,84	5,12
25,43	2,398	68,73	62,50	42,61	27,53	10,27
25,25	2,404	70,85	65,02	45,30	31,08	12,03
25,36	2,427	73,84	68,44	48,22	34,01	14,15
25,05	2,492	79,83	74,96	54,19	39,85	17,96
24,21	2,517	85,20	80,54	59,79	45,17	22,12

Tabela A17 – Leituras dos extensômetros colados na superfície de concreto da viga VTL1.

Torçor (kNm)	C1 (‰)	C2 (‰)	C3 (‰)	C4 (‰)	C5 (‰)	C6 (‰)	C7 (‰)	C8 (‰)	C9 (‰)
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1,58	-0,0001	-0,0179	-0,0021	-0,0010	-0,0203	-0,0012	0,0004	-0,0212	0,0003
1,45	-0,0008	-0,0185	-0,0026	-0,0018	-0,0208	-0,0013	0,0000	-0,0218	-0,0021
3,48	0,0003	-0,0413	-0,0031	-0,0003	-0,0449	0,0010	0,0016	-0,0450	-0,0035
3,38	0,0001	-0,0410	-0,0034	-0,0007	-0,0450	0,0005	0,0012	-0,0450	-0,0041
5,35	0,0016	-0,0640	-0,0040	0,0009	-0,0699	0,0034	0,0031	-0,0690	-0,0050
5,35	0,0018	-0,0651	-0,0040	0,0009	-0,0713	0,0040	0,0035	-0,0702	-0,0054
7,24	0,0034	-0,0882	-0,0046	0,0026	-0,0969	0,0080	0,0065	-0,0936	-0,0054
7,26	0,0040	-0,0882	-0,0040	0,0036	-0,0966	0,0098	0,0072	-0,0939	-0,0050
9,22	0,0065	-0,1131	-0,0040	0,0067	-0,1246	0,0159	0,0120	-0,1198	-0,0053
9,24	0,0072	-0,1159	-0,0044	0,0064	-0,1286	0,0157	0,0117	-0,1243	-0,0053
11,01	0,0117	-0,1395	-0,0037	0,0104	-0,1550	0,0232	0,0181	-0,1491	-0,0058
11,04	0,0151	-0,1410	-0,0017	0,0125	-0,1577	0,0276	0,0209	-0,1509	-0,0054
13,00	0,0244	-0,1660	0,0016	0,0200	-0,1870	0,0406	0,0299	-0,1778	-0,0039
13,03	0,0361	-0,1711	0,0034	0,0244	-0,1942	0,0450	0,0328	-0,1847	-0,0027
14,88	0,0552	-0,2017	0,0071	0,0333	-0,2288	0,0597	0,0477	-0,2165	-0,0046
14,90	0,0731	-0,2105	0,0117	0,0377	-0,2400	0,0712	0,0492	-0,2289	-0,0130
16,78	1,1814	-0,4249	-0,0439	-0,0227	-0,5376	0,5418	-0,0845	-0,4554	-0,1633
16,87	–	-0,4814	0,0864	-0,1033	-0,2383	1,1426	-0,1630	-0,7191	-0,1769
18,68	–	-0,5531	0,3272	-0,1880	0,3156	–	-0,2146	-0,9042	-0,1916
18,59	–	-0,5833	0,5664	-0,2138	0,5149	–	-0,2442	-0,9622	-0,2615
20,47	–	-0,6673	1,0312	-0,2524	0,7905	–	-0,3012	-1,1064	-0,3677
20,66	–	-0,6986	–	-0,2823	0,9301	–	-0,3346	-1,0773	-0,3533
20,65	–	-0,7013	–	-0,2867	0,9471	–	-0,3403	-1,0703	-0,3681
22,51	–	-0,7743	–	-0,2150	1,0941	–	-0,3872	-1,1592	-0,4405
22,43	–	-0,7901	–	-0,1619	1,2557	–	-0,3988	-1,1589	-0,4632
23,61	–	-0,8633	–	0,0191	–	–	-0,4405	-1,1996	-0,5359
23,49	–	-0,8548	–	0,0282	–	–	-0,4416	-1,1808	-0,5427
24,43	–	-0,8736	–	0,0468	–	–	-0,4542	-1,1987	-0,5600
24,33	–	-0,8799	–	0,0815	–	–	-0,4578	-1,1977	-0,5749
24,34	–	-0,8812	–	0,0840	–	–	-0,4586	-1,1966	-0,5766
26,29	–	-0,9579	–	0,3987	–	–	-0,4909	-1,2737	-0,6284
26,30	–	-0,9744	–	–	–	–	-0,4883	-1,2801	-0,6635
27,98	–	-1,0378	–	–	–	–	-0,5060	-1,3495	-0,7854
27,78	–	-1,0381	–	–	–	–	-0,4958	-1,3441	-0,7944
25,43	–	-1,0006	–	–	–	–	-0,4613	-1,2774	-0,7659
25,25	–	-0,9884	–	–	–	–	-0,4538	-1,2776	-0,7618
25,36	–	-0,9902	–	–	–	–	-0,4537	-1,2791	-0,7622
25,05	–	-0,9829	–	–	–	–	-0,4475	-1,2692	-0,7582
24,21	–	-0,9731	–	–	–	–	-0,4390	-1,2539	-0,7511

Tabela A18 – Leituras dos extensômetros colados na armadura de aço transversal e longitudinal da viga VTL1.

Torçor (kNm)	SL1 (‰)	ST1 (‰)	SL2 (‰)	ST2 (‰)	SL3 (‰)	ST3 (‰)
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1,58	0,0023	-0,0022	0,0234	0,0020	-0,0122	0,0291
1,45	0,0020	-0,0034	0,0225	0,0019	-0,0126	0,0282
3,48	0,0072	-0,0029	0,0260	0,0026	-0,0123	0,0290
3,38	0,0075	-0,0027	0,0261	0,0023	-0,0127	0,0291
5,35	0,0123	-0,0027	0,0295	0,0027	-0,0123	0,0298
5,35	0,0137	-0,0020	0,0302	0,0034	-0,0123	0,0298
7,24	0,0183	-0,0018	0,0337	0,0039	-0,0125	0,0325
7,26	0,0201	0,0008	0,0355	0,0053	-0,0111	0,0366
9,22	0,0266	0,0034	0,0387	0,0068	-0,0111	0,0393
9,24	0,0290	0,0053	0,0404	0,0079	-0,0119	0,0412
11,01	0,0354	0,0098	0,0433	0,0096	-0,0123	0,0447
11,04	0,0383	0,0142	0,0444	0,0113	-0,0106	0,0473
13,00	0,0469	0,0209	0,0503	0,0159	-0,0085	0,0539
13,03	0,0528	0,0272	0,0546	0,0201	-0,0093	0,0592
14,88	0,0642	0,0337	0,0647	0,0295	-0,0060	0,0688
14,90	0,0714	0,0390	0,0734	0,0345	-0,0037	0,0765
16,78	0,6222	0,1643	0,2732	0,1661	0,0820	0,3148
16,87	0,8567	0,1926	0,3723	0,1993	0,1592	0,7911
18,68	1,1204	0,2297	0,5784	0,3143	0,2635	0,9693
18,59	1,2342	0,2575	0,6708	0,3630	0,3733	1,0286
20,47	1,4502	0,3180	0,8678	0,4595	0,5752	1,1381
20,66	1,5540	0,3395	0,9839	0,5342	0,6479	1,1800
20,65	1,5710	0,3426	1,0009	0,5453	0,6573	1,1889
22,51	1,7476	0,3932	1,1704	0,6696	0,7483	1,2999
22,43	1,7941	0,4159	1,2384	0,7380	0,7770	1,3176
23,61	1,9620	0,5129	1,4519	0,9845	0,8603	1,4174
23,49	1,9605	0,5177	1,4580	0,9927	0,8630	1,4189
24,43	1,9998	0,5348	1,4989	1,0237	0,8843	1,4604
24,33	2,0239	0,5522	1,5498	1,0696	0,8961	1,4653
24,34	2,0274	0,5539	1,5558	1,0751	0,8987	1,4675
26,29	2,1899	0,6499	1,7445	1,2793	0,9805	1,5709
26,30	2,2477	0,6966	1,8129	1,3541	1,0187	1,5821
27,98	2,4079	0,7963	1,9797	1,5119	1,2683	1,7131
27,78	2,4102	0,8012	1,9858	1,5122	1,2922	1,7097
25,43	2,3273	0,7751	1,9095	1,4361	1,2404	1,6181
25,25	2,3102	0,7702	1,8942	1,4231	1,2335	1,6080
25,36	2,3088	0,7705	1,8925	1,4229	1,2349	1,6105
25,05	2,2955	0,7675	1,8814	1,4145	1,2243	1,6031
24,21	2,2717	0,7618	1,8606	1,3967	1,2111	1,5756

Tabela A19 – Leituras dos extensômetros colados na armadura transversal de CFC da viga VTL1.

Torçor (kNm)	FT1 (‰)	FT2 (‰)	FT3 (‰)	FT4 (‰)	FT5 (‰)	FT6 (‰)
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1,58	-0,0026	-0,0035	-0,0022	0,0009	-0,0040	-0,0017
1,45	-0,0034	-0,0042	-0,0029	0,0004	-0,0056	-0,0020
3,48	-0,0030	-0,0056	-0,0021	0,0010	-0,0074	-0,0004
3,38	-0,0038	-0,0050	-0,0027	0,0012	-0,0085	-0,0005
5,35	-0,0031	-0,0060	-0,0020	0,0017	-0,0102	0,0010
5,35	-0,0035	-0,0056	-0,0020	0,0018	-0,0111	0,0007
7,24	-0,0025	-0,0073	-0,0016	0,0021	-0,0120	0,0022
7,26	-0,0025	-0,0077	-0,0013	0,0021	-0,0130	0,0023
9,22	-0,0008	-0,0090	-0,0009	0,0022	-0,0137	0,0046
9,24	-0,0003	-0,0122	-0,0017	0,0025	-0,0139	0,0042
11,01	0,0020	-0,0137	-0,0022	0,0027	-0,0133	0,0061
11,04	0,0035	-0,0141	-0,0029	0,0025	-0,0139	0,0061
13,00	0,0090	-0,0149	-0,0037	0,0020	-0,0099	0,0085
13,03	0,0119	-0,0155	-0,0055	0,0014	-0,0066	0,0082
14,88	0,0149	-0,0168	-0,0095	0,0001	0,0366	0,0095
14,90	0,0126	-0,0189	-0,0126	-0,0009	0,0890	0,0089
16,78	-0,0276	-0,0106	-0,0356	-0,0741	0,2238	0,0145
16,87	-0,0122	-0,0772	-0,0517	-0,0738	0,2648	0,0327
18,68	0,0344	-0,0928	-0,0738	-0,0431	0,7787	0,0645
18,59	0,0907	-0,0879	-0,0856	-0,0313	0,9651	0,0491
20,47	0,1382	-0,0802	-0,1232	-0,0180	1,3831	0,0636
20,66	0,2055	-0,0443	-0,1487	0,0004	1,6134	0,0714
20,65	0,2210	-0,0317	-0,1520	0,0039	1,6436	0,0740
22,51	0,5208	0,0815	-0,1859	0,0663	1,9553	0,1052
22,43	0,6894	0,1499	-0,1975	0,0873	2,0480	0,1245
23,61	1,0476	0,3867	-0,2220	0,1342	2,3644	0,1912
23,49	1,0787	0,4045	-0,2211	0,1385	2,3724	0,1946
24,43	1,1199	0,4212	-0,2247	0,1416	2,4277	0,2001
24,33	1,2196	0,4871	-0,2165	0,1532	2,4936	0,2106
24,34	1,2263	0,4886	-0,2172	0,1540	2,4977	0,2117
26,29	1,7715	0,7271	-0,2139	0,2195	2,8210	0,2711
26,30	2,1244	0,8408	-0,1953	0,2859	2,9069	0,3396
27,98	2,8249	1,0717	-0,0164	0,4110	3,2472	0,4765
27,78	2,8682	1,0843	0,0124	0,4289	3,2645	0,4913
25,43	2,8614	1,0806	0,0289	0,4367	3,2258	0,4939
25,25	2,7952	1,0627	0,0415	0,4368	3,1510	0,4891
25,36	2,7953	1,0600	0,0422	0,4383	3,1510	0,4892
25,05	2,7891	1,0557	0,0447	0,4396	3,1408	0,4877
24,21	2,7741	1,0502	0,0475	0,4400	3,1228	0,4834

Tabela A20 – Leituras dos extensômetros colados na armadura longitudinal de CFC da viga VTL1.

Torçor (kNm)	FL1 (‰)	FL2 (‰)	FL3 (‰)	FL4 (‰)	FL5 (‰)	FL6 (‰)
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1,58	-0,0026	-0,0010	-0,0022	-0,0018	-0,0009	-0,0029
1,45	-0,0040	-0,0017	-0,0029	-0,0023	-0,0016	-0,0033
3,48	-0,0076	-0,0008	-0,0044	0,0000	-0,0005	-0,0047
3,38	-0,0076	-0,0009	-0,0047	0,0004	-0,0007	-0,0051
5,35	-0,0103	0,0003	-0,0060	0,0029	0,0003	-0,0066
5,35	-0,0096	0,0003	-0,0063	0,0037	0,0010	-0,0072
7,24	-0,0130	0,0004	-0,0078	0,0068	0,0025	-0,0089
7,26	-0,0121	0,0010	-0,0072	0,0080	0,0030	-0,0081
9,22	-0,0148	0,0018	-0,0090	0,0122	0,0057	-0,0095
9,24	-0,0152	0,0020	-0,0092	0,0139	0,0063	-0,0100
11,01	-0,0175	0,0020	-0,0107	0,0188	0,0090	-0,0113
11,04	-0,0162	0,0025	-0,0103	0,0220	0,0109	-0,0109
13,00	-0,0177	0,0033	-0,0113	0,0290	0,0145	-0,0119
13,03	-0,0167	0,0037	-0,0109	0,0358	0,0177	-0,0103
14,88	-0,0185	0,0030	-0,0132	0,0526	0,0255	-0,0102
14,90	-0,0182	0,0004	-0,0135	0,0664	0,0319	-0,0077
16,78	0,1882	0,0742	-0,1025	1,6904	0,0652	0,0875
16,87	0,4982	0,0910	-0,1122	1,8956	0,0750	0,0702
18,68	0,8459	0,0877	-0,0901	2,1151	0,0697	0,0505
18,59	1,2125	0,0765	-0,0412	2,1465	0,0693	0,0074
20,47	1,5557	0,0621	0,0315	2,2723	0,0919	0,0072
20,66	1,7259	0,0641	0,1551	2,2666	0,1048	0,0268
20,65	1,7429	0,0749	0,1825	2,2650	0,1041	0,0260
22,51	2,0199	0,1685	0,3158	2,3433	0,1043	0,0516
22,43	2,0937	0,3966	0,3884	2,3044	0,1065	0,0677
23,61	2,2751	1,0047	0,5605	2,2621	0,1331	0,1383
23,49	2,2802	1,0270	0,5744	2,2301	0,1374	0,1383
24,43	2,3388	1,0650	0,5873	2,2468	0,1416	0,1413
24,33	2,3656	1,1724	0,6143	2,2023	0,1525	0,1586
24,34	2,3694	1,1813	0,6165	2,1999	0,1542	0,1599
26,29	2,7567	1,6939	0,8231	2,1550	0,4075	0,2497
26,30	2,9352	1,9149	1,0111	2,1256	0,6844	0,3705
27,98	3,3020	2,1615	1,4602	2,1855	1,1785	1,8118
27,78	3,3003	2,1746	1,4851	2,2522	1,2487	1,9930
25,43	3,2695	2,1538	1,4828	2,2753	1,2670	2,0224
25,25	3,1511	2,0500	1,4419	2,2249	1,2346	1,9569
25,36	3,1493	2,0470	1,4448	2,2407	1,2367	1,9586
25,05	3,1450	2,0352	1,4465	2,2484	1,2357	1,9529
24,21	3,1234	2,0098	1,4419	2,2357	1,2295	1,9407

VTL2

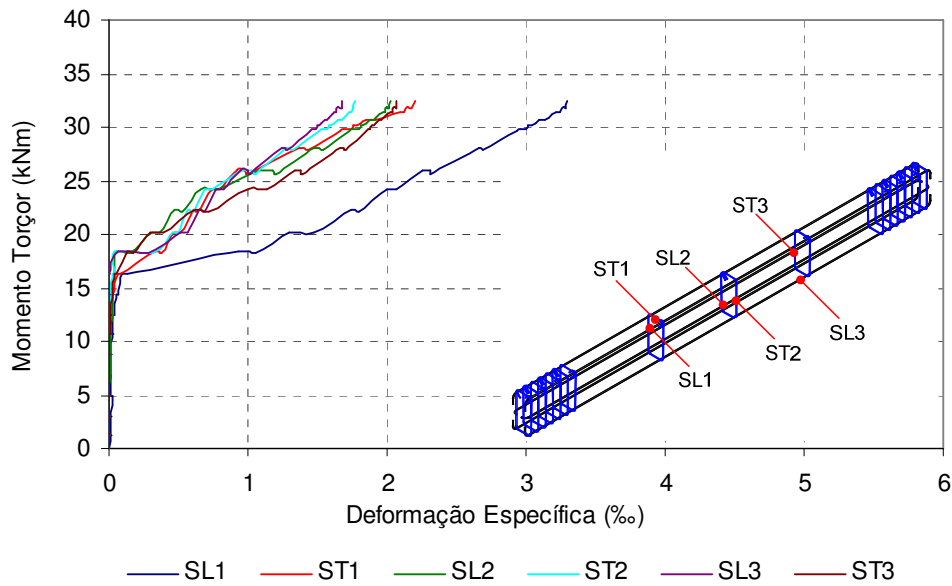


Figura A.11 – Gráfico momento torção x deformação específica das armaduras de aço transversal e longitudinal da viga VTL2.

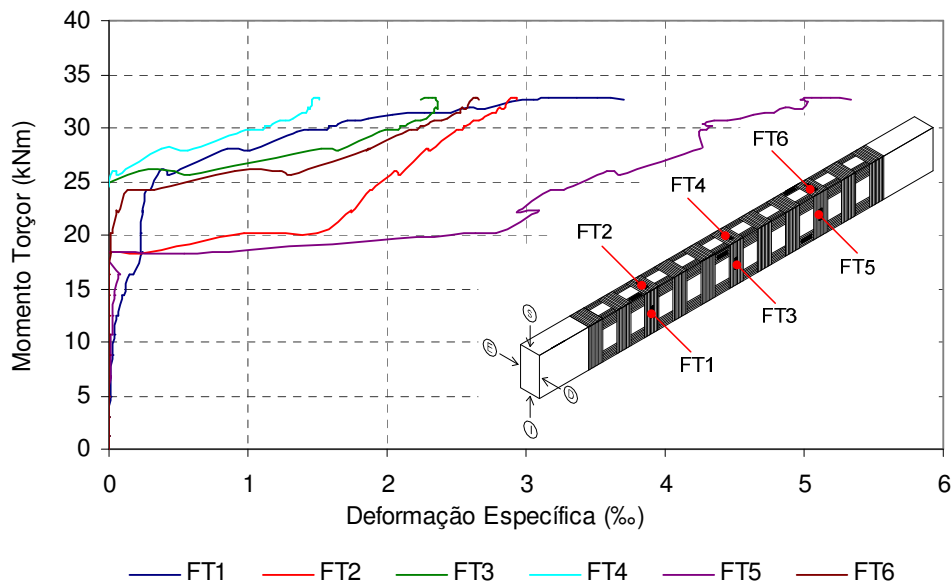


Figura A.12 – Gráfico momento torção x deformação específica da armadura de CFC transversal da viga VTL2.

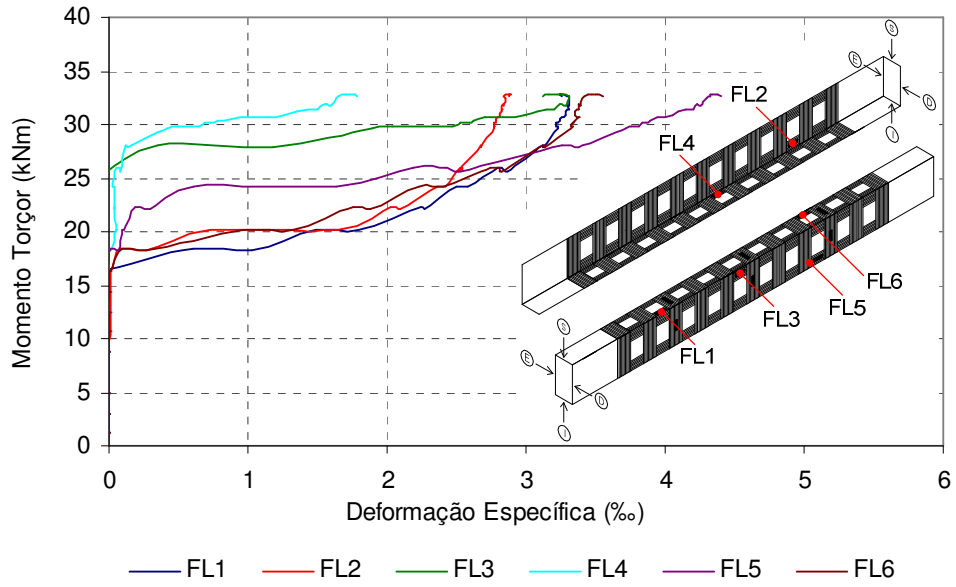


Figura A.13 – Gráfico momento torçor x deformação específica da armadura de CFC longitudinal da viga VTL2.

Tabela A21 – Ângulo de torção por unidade de comprimento e leituras dos LVDT da viga VTL2.

Torçor (kN/m)	θ/m	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)	LVDT5 (mm)
0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,31	0,004	0,25	0,34	0,00	0,13	0,34
1,28	0,004	0,25	0,34	0,00	0,13	0,34
3,03	0,018	1,01	0,94	0,60	0,14	0,58
2,96	0,019	1,04	0,95	0,61	0,14	0,58
4,92	0,039	1,87	1,66	1,16	0,46	0,95
4,95	0,043	1,96	1,71	1,19	0,46	0,95
6,77	0,061	2,78	2,39	1,81	0,90	1,34
6,75	0,065	2,87	2,42	1,84	0,93	1,34
8,75	0,086	3,76	3,20	2,49	1,43	1,73
8,78	0,091	3,92	3,31	2,61	1,47	1,77
10,67	0,112	4,81	4,08	3,24	1,99	2,16
10,66	0,116	4,92	4,17	3,32	2,03	2,19
12,54	0,137	5,84	4,99	3,98	2,58	2,61
12,54	0,141	6,01	5,15	4,12	2,67	2,68
14,46	0,170	7,19	6,04	4,88	3,31	3,18
14,47	0,173	7,31	6,15	4,98	3,39	3,22
16,29	0,223	9,03	7,27	6,00	4,31	3,76
16,28	0,245	9,58	7,67	6,30	4,61	3,79
18,42	0,508	16,50	13,46	10,57	8,06	4,56
18,26	0,627	20,01	16,29	12,56	8,97	5,24
20,25	0,904	27,24	21,75	17,00	11,12	5,87
20,18	1,012	29,81	23,21	18,27	11,69	5,88
22,24	1,157	33,80	27,17	21,52	13,55	6,35
22,18	1,231	35,58	28,38	22,56	14,08	6,36
24,13	1,421	40,67	33,12	26,29	16,02	6,82
24,19	1,523	43,16	35,21	27,99	16,86	6,82
25,94	1,709	48,58	39,88	31,74	18,89	7,63
26,04	1,782	50,38	41,63	33,04	19,47	7,63
25,70	1,835	51,69	42,51	33,70	20,09	7,63
27,99	2,199	60,76	51,08	39,99	22,93	7,64
27,82	2,279	62,75	52,86	41,19	23,48	7,63
29,73	2,564	69,97	59,68	46,51	25,69	7,64
29,87	2,590	70,64	60,62	47,25	26,01	7,64
29,89	2,650	72,17	61,99	48,27	26,59	7,64
30,10	2,671	72,72	62,91	48,66	26,61	7,64
30,21	2,693	73,28	63,26	49,16	26,67	7,64
30,42	2,719	73,93	64,04	49,63	26,80	7,64
30,66	2,786	75,67	65,28	50,52	27,12	7,64
30,78	2,838	76,99	66,53	51,33	27,46	7,64
30,95	2,878	78,03	67,46	52,08	27,72	7,64
31,15	2,937	79,56	68,51	53,00	28,13	7,64
31,34	2,993	81,01	69,69	53,83	28,45	7,64
31,34	3,055	82,63	70,53	54,50	28,85	7,64
31,91	3,097	83,70	71,40	55,14	29,10	7,64
31,82	3,148	85,04	72,66	55,95	29,52	7,64
32,50	3,191	86,17	73,20	56,65	29,68	7,64
32,63	3,227	87,10	74,07	57,23	29,85	7,64
32,76	3,243	87,54	74,67	57,82	30,00	7,64
32,77	3,276	88,40	75,25	58,39	30,38	7,64
32,84	3,305	89,15	75,90	58,94	30,53	7,64
32,89	3,352	90,41	76,83	59,74	30,75	7,64
32,59	3,410	91,93	78,24	61,14	31,96	7,63

Tabela A22 – Leituras dos extensômetros colados na superfície de concreto da viga VTL2.

Torçor (kNm)	C1 (‰)	C2 (‰)	C3 (‰)	C4 (‰)	C5 (‰)	C6 (‰)	C7 (‰)	C8 (‰)	C9 (‰)
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1,31	0,0023	-0,0143	-0,0004	0,0013	-0,0130	-0,0003	0,0015	-0,0138	0,0179
1,28	0,0022	-0,0138	-0,0005	0,0004	-0,0119	0,0001	0,0009	-0,0133	0,0215
3,03	0,0027	-0,0348	-0,0012	0,0010	-0,0300	-0,0008	0,0009	-0,0311	0,0238
2,96	0,0023	-0,0342	-0,0005	0,0009	-0,0299	0,0008	0,0010	-0,0318	0,0289
4,92	0,0042	-0,0594	-0,0012	0,0019	-0,0505	-0,0013	0,0017	-0,0526	0,0263
4,95	0,0027	-0,0620	-0,0013	0,0001	-0,0524	-0,0003	0,0006	-0,0557	0,0279
6,77	0,0061	-0,0855	-0,0003	0,0022	-0,0721	-0,0010	0,0022	-0,0755	0,0277
6,75	0,0064	-0,0875	0,0001	0,0020	-0,0732	-0,0006	0,0023	-0,0765	0,0288
8,75	0,0093	-0,1141	0,0015	0,0046	-0,0953	-0,0006	0,0032	-0,0990	0,0295
8,78	0,0119	-0,1184	0,0024	0,0043	-0,0980	0,0013	0,0036	-0,1028	0,0326
10,67	0,0143	-0,1465	0,0045	0,0059	-0,1212	0,0008	0,0045	-0,1265	0,0325
10,66	0,0157	-0,1500	0,0063	0,0075	-0,1234	0,0021	0,0056	-0,1284	0,0339
12,54	0,0173	-0,1805	0,0095	0,0092	-0,1490	0,0015	0,0042	-0,1536	0,0302
12,54	0,0178	-0,1869	0,0128	0,0110	-0,1544	0,0050	0,0023	-0,1584	0,0296
14,46	0,0183	-0,2215	0,0155	0,0155	-0,1825	0,0079	-0,0063	-0,1848	0,0210
14,47	0,0192	-0,2270	0,0194	0,0187	-0,1864	0,0091	-0,0100	-0,1869	0,0190
16,29	0,0201	-0,2712	0,0293	0,0054	-0,2191	-0,0027	-0,0267	-0,2152	0,0014
16,28	0,0121	-0,2870	0,0440	0,0015	-0,2276	-0,0083	-0,0327	-0,2265	-0,0026
18,42	-0,0658	-0,6471	-	-0,0184	-0,2907	-0,0355	-0,0124	-0,5206	0,0926
18,26	-0,0579	-0,7250	-	-0,0348	-0,4334	-0,1104	-0,0589	-0,6748	0,1854
20,25	-0,0337	-0,8985	-	-0,1063	-0,5615	-0,1880	-0,0980	-0,9811	0,2291
20,18	-0,0769	-1,0291	-	-0,1189	-0,5860	-0,1914	-0,0976	-1,0725	0,2325
22,24	-0,1324	-1,2449	-	-0,1131	-0,6661	-0,2163	-0,1072	-1,2753	0,2546
22,18	-0,1617	-1,3027	-	-0,0851	-0,6961	-0,2205	-0,0864	-1,3501	0,2652
24,13	-0,2334	-1,4831	-	-0,0070	-0,7985	-0,2343	-0,0613	-1,5307	0,3314
24,19	-0,2666	-1,5701	-	0,1597	-0,8662	-0,2317	-0,0152	-1,6295	0,3621
25,94	-0,3115	-1,7352	-	0,0523	-1,0228	-0,2313	-	-1,8341	0,3937
26,04	-0,3268	-1,7866	-	0,0935	-1,0667	-0,2214	-	-1,9160	0,3867
25,70	-0,3228	-1,7945	-	0,1162	-1,0713	-0,2172	-	-1,9404	0,3831
27,99	-0,3953	-2,0647	-	0,2631	-1,2711	-0,2016	-	-2,3510	0,3521
27,82	-0,4167	-2,1254	-	0,3089	-1,3188	-0,1962	-	-2,4384	0,3135
29,73	-0,4737	-2,3164	-	0,3516	-1,4558	-0,1912	-	-2,6574	0,2762
29,87	-0,4803	-2,3379	-	0,3551	-1,4788	-0,1940	-	-2,6858	0,2718
29,89	-0,4936	-2,3712	-	0,3615	-1,5246	-0,2072	-	-2,7349	0,2602
30,10	-0,4971	-2,3840	-	0,3643	-1,5377	-0,2122	-	-2,7516	0,2592
30,21	-0,5026	-2,4005	-	0,3676	-1,5542	-0,2165	-	-2,7744	0,2583
30,42	-0,5077	-2,4155	-	0,3650	-1,5716	-0,2238	-	-2,7983	0,2724
30,66	-0,5159	-2,4407	-	0,3671	-1,6055	-0,2399	-	-2,8351	0,2729
30,78	-0,5297	-2,4646	-	0,3681	-1,6371	-0,2518	-	-2,8737	0,2784
30,95	-0,5454	-2,4871	-	0,3668	-1,6638	-0,2599	-	-2,9091	0,2686
31,15	-0,5680	-2,5134	-	0,3645	-1,6887	-0,2657	-	-2,9366	0,2514
31,34	-0,5914	-2,5401	-	0,3575	-1,7118	-0,2723	-	-2,9621	0,2325
31,34	-0,6107	-2,5664	-	0,3552	-1,7356	-0,2791	-	-2,9816	0,2125
31,91	-0,6249	-2,5885	-	0,3500	-1,7553	-0,2836	-	-2,9971	0,1920
31,82	-0,6396	-2,6142	-	0,3431	-1,7776	-0,2896	-	-3,0147	0,1417
32,50	-0,6509	-2,6349	-	0,3378	-1,7945	-0,2934	-	-3,0256	0,0909
32,63	-0,6708	-2,6583	-	0,3259	-1,8135	-0,2958	-	-3,0406	0,0626
32,76	-0,6818	-2,6786	-	0,3202	-1,8300	-0,3008	-	-3,0479	0,0457
32,77	-0,6894	-2,6947	-	0,3134	-1,8444	-0,3062	-	-3,0582	0,0279
32,84	-0,6957	-2,7090	-	0,3078	-1,8556	-0,3078	-	-3,0637	0,0064
32,89	-0,7022	-2,7218	-	0,3023	-1,8647	-0,3085	-	-3,0647	0,0001
32,59	-0,7072	-2,7279	-	0,2982	-1,8685	-0,3085	-	-3,0586	-0,0081

Tabela A23 – Leituras dos extensômetros colados na armadura de aço transversal e longitudinal da viga VTL2.

Torçor (kNm)	SL1 (‰)	ST1 (‰)	SL2 (‰)	ST2 (‰)	SL3 (‰)	ST3 (‰)
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1,31	0,0119	-0,0011	-0,0005	-0,0007	-0,0010	-0,0016
1,28	0,0149	-0,0020	0,0005	-0,0003	-0,0018	-0,0011
3,03	0,0180	-0,0024	0,0035	-0,0001	-0,0018	-0,0012
2,96	0,0167	-0,0031	0,0031	0,0010	-0,0019	-0,0018
4,92	0,0203	-0,0034	0,0052	0,0003	-0,0016	-0,0015
4,95	0,0148	-0,0042	0,0047	0,0010	-0,0038	-0,0024
6,77	0,0175	-0,0038	0,0080	0,0012	-0,0019	-0,0004
6,75	0,0159	-0,0034	0,0083	0,0020	-0,0020	0,0000
8,75	0,0188	-0,0033	0,0122	0,0028	-0,0022	0,0027
8,78	0,0199	-0,0028	0,0144	0,0050	-0,0022	0,0037
10,67	0,0221	-0,0019	0,0171	0,0058	-0,0022	0,0061
10,66	0,0251	0,0007	0,0176	0,0064	-0,0022	0,0085
12,54	0,0324	0,0057	0,0209	0,0081	-0,0018	0,0126
12,54	0,0373	0,0127	0,0233	0,0118	-0,0005	0,0153
14,46	0,0527	0,0242	0,0297	0,0161	0,0010	0,0236
14,47	0,0645	0,0332	0,0303	0,0173	0,0005	0,0272
16,29	0,1012	0,0641	0,0397	0,0270	0,0035	0,0425
16,28	0,1292	0,0875	0,0466	0,0340	0,0056	0,0534
18,42	0,9382	0,3413	0,0600	0,0461	0,0610	0,1321
18,26	1,0481	0,3742	0,1433	0,3045	0,2827	0,1730
20,25	1,2956	0,4700	0,3112	0,4609	0,5173	0,3020
20,18	1,4707	0,5107	0,3688	0,4954	0,5695	0,3925
22,24	1,7425	0,6143	0,4767	0,5659	0,6528	0,6165
22,18	1,7917	0,6391	0,5289	0,6014	0,6825	0,7149
24,13	1,9964	0,7456	0,6616	0,6840	0,7700	1,0035
24,19	2,0690	0,7968	0,7774	0,7367	0,8206	1,1385
25,94	2,2616	0,9249	1,0805	0,9546	0,9508	1,3322
26,04	2,3093	0,9737	1,1757	1,0252	0,9961	1,3844
25,70	2,3129	0,9967	1,1992	1,0488	1,0108	1,3980
27,99	2,6670	1,3595	1,4729	1,2760	1,2370	1,6588
27,82	2,6877	1,4307	1,5444	1,3243	1,2817	1,7012
29,73	2,9330	1,6658	1,7319	1,5084	1,4413	1,8458
29,87	2,9603	1,6922	1,7596	1,5339	1,4606	1,8613
29,89	3,0012	1,7365	1,7994	1,5680	1,4862	1,8840
30,10	3,0196	1,7563	1,8136	1,5824	1,4983	1,8986
30,21	3,0424	1,7786	1,8292	1,5994	1,5119	1,9116
30,42	3,0628	1,8042	1,8477	1,6161	1,5258	1,9253
30,66	3,0971	1,8534	1,8736	1,6518	1,5493	1,9468
30,78	3,1298	1,9130	1,9005	1,6760	1,5685	1,9606
30,95	3,1609	1,9729	1,9238	1,6938	1,5866	1,9734
31,15	3,1917	2,0377	1,9458	1,7108	1,6074	1,9979
31,34	3,2201	2,0883	1,9683	1,7287	1,6255	2,0211
31,34	3,2449	2,1249	1,9858	1,7404	1,6411	2,0350
31,91	3,2653	2,1532	2,0010	1,7510	1,6529	2,0479
31,82	3,2898	2,1817	2,0150	1,7629	1,6700	2,0629
32,50	3,3029	2,2034	2,0247	1,7701	1,6800	2,0732
32,63	3,3425	2,2213	2,0475	1,7798	1,6997	2,0780
32,76	3,3610	2,2376	2,0589	1,7838	1,7097	2,0889
32,77	3,3778	2,2525	2,0697	1,7922	1,7218	2,1049
32,84	3,3885	2,2639	2,0770	1,7966	1,7315	2,1162
32,89	3,3966	2,2752	2,0836	1,7997	1,7408	2,1237
32,59	3,3949	2,2748	2,0830	1,7933	1,7423	2,1171

Tabela A24 – Leituras dos extensômetros colados na armadura transversal de CFC da viga VTL2.

Torçor (kNm)	FT1 (‰)	FT2 (‰)	FT3 (‰)	FT4 (‰)	FT5 (‰)	FT6 (‰)
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1,31	0,0009	-0,0007	-0,0027	-0,0012	-0,0005	-0,0004
1,28	0,0008	-0,0009	-0,0026	-0,0004	-0,0009	-0,0016
3,03	0,0034	-0,0013	-0,0051	-0,0007	0,0014	-0,0012
2,96	0,0034	-0,0014	-0,0064	-0,0009	0,0009	-0,0023
4,92	0,0077	-0,0010	-0,0079	-0,0018	0,0038	-0,0014
4,95	0,0074	-0,0023	-0,0096	-0,0030	0,0039	-0,0030
6,77	0,0132	-0,0013	-0,0111	-0,0031	0,0073	-0,0022
6,75	0,0141	-0,0014	-0,0120	-0,0037	0,0081	-0,0022
8,75	0,0228	-0,0012	-0,0138	-0,0038	0,0126	-0,0021
8,78	0,0255	-0,0025	-0,0149	-0,0043	0,0134	-0,0031
10,67	0,0361	-0,0023	-0,0165	-0,0050	0,0193	-0,0031
10,66	0,0395	-0,0027	-0,0167	-0,0051	0,0208	-0,0031
12,54	0,0526	-0,0030	-0,0185	-0,0066	0,0272	-0,0035
12,54	0,0612	-0,0043	-0,0191	-0,0076	0,0305	-0,0038
14,46	0,0922	-0,0049	-0,0199	-0,0087	0,0416	-0,0040
14,47	0,1025	-0,0070	-0,0199	-0,0095	0,0436	-0,0047
16,29	0,1491	-0,0087	-0,0193	-0,0113	0,0651	-0,0051
16,28	0,1822	-0,0119	-0,0210	-0,0124	0,0827	-0,0065
18,42	0,2391	-0,0020	-0,0323	-0,0190	0,0052	0,0094
18,26	0,2234	0,2259	-0,0590	-0,0194	0,5406	0,0111
20,25	0,2329	0,9673	-0,1122	-0,0350	2,6359	0,0087
20,18	0,2259	1,5040	-0,1182	-0,0414	2,7777	0,0246
22,24	0,2449	1,7480	-0,1211	-0,0445	3,0996	0,0544
22,18	0,2487	1,7499	-0,1368	-0,0445	2,9288	0,0662
24,13	0,2699	1,8776	-0,1464	-0,0327	3,1701	0,1288
24,19	0,2940	1,8957	-0,1232	-0,0168	3,2728	0,3297
25,94	0,3679	2,0488	0,2115	0,0313	3,5861	0,9037
26,04	0,4143	2,0740	0,4608	0,0557	3,6384	1,2276
25,70	0,4306	2,0886	0,5788	0,0724	3,6807	1,3164
27,99	0,8493	2,2801	1,5273	0,3844	4,2531	1,8754
27,82	1,0169	2,3150	1,6457	0,5731	4,2766	1,8519
29,73	1,3535	2,4928	1,9463	0,9516	4,2465	2,1399
29,87	1,4283	2,5126	1,9880	1,0135	4,2716	2,1725
29,89	1,5661	2,5426	2,0787	1,1046	4,2955	2,2183
30,10	1,5862	2,5553	2,1003	1,1230	4,3181	2,2365
30,21	1,6151	2,5735	2,1274	1,1470	4,3416	2,2625
30,42	1,6552	2,5917	2,1553	1,1765	4,2679	2,2926
30,66	1,7097	2,6251	2,1987	1,2232	4,3562	2,3425
30,78	1,7732	2,6613	2,2484	1,2716	4,4420	2,3936
30,95	1,8622	2,6939	2,2892	1,3189	4,5416	2,4345
31,15	2,0419	2,7309	2,3142	1,3604	4,6326	2,4665
31,34	2,2695	2,7615	2,3296	1,3949	4,7140	2,4953
31,34	2,4653	2,7893	2,3432	1,4186	4,7795	2,5224
31,91	2,5949	2,8122	2,3529	1,4333	4,8588	2,5448
31,82	2,7079	2,8363	2,3659	1,4438	4,9920	2,5686
32,50	2,8884	2,8593	2,3633	1,4572	5,0218	2,5927
32,63	3,0587	2,8747	2,3575	1,4651	4,9702	2,6061
32,76	3,1633	2,8878	2,3464	1,4767	5,0532	2,6154
32,77	3,3678	2,9026	2,3296	1,4875	5,1165	2,6286
32,84	3,5125	2,9159	2,2999	1,4990	5,1939	2,6379
32,89	3,6127	2,9280	2,2676	1,5093	5,2531	2,6491
32,59	3,7036	2,9377	2,2428	1,5180	5,3325	2,6590

Tabela A25 – Leituras dos extensômetros colados na armadura longitudinal de CFC da viga VTL2.

Torçor (kNm)	FL1 (‰)	FL2 (‰)	FL3 (‰)	FL4 (‰)	FL5 (‰)	FL6 (‰)
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1,31	-0,0014	0,0004	-0,0012	-0,0095	-0,0007	-0,0016
1,28	-0,0016	-0,0003	0,0003	-0,0103	-0,0012	-0,0009
3,03	-0,0070	0,0008	-0,0017	-0,0121	-0,0025	-0,0016
2,96	-0,0083	-0,0001	-0,0025	-0,0143	-0,0029	-0,0029
4,92	-0,0115	0,0020	-0,0030	-0,0158	-0,0020	-0,0030
4,95	-0,0124	0,0009	-0,0034	-0,0168	-0,0038	-0,0038
6,77	-0,0173	0,0033	-0,0040	-0,0182	-0,0029	-0,0039
6,75	-0,0173	0,0030	-0,0042	-0,0184	-0,0033	-0,0043
8,75	-0,0211	0,0056	-0,0040	-0,0193	-0,0034	-0,0050
8,78	-0,0218	0,0061	-0,0035	-0,0198	-0,0038	-0,0030
10,67	-0,0258	0,0086	-0,0038	-0,0218	-0,0040	-0,0034
10,66	-0,0262	0,0093	-0,0033	-0,0215	-0,0044	-0,0034
12,54	-0,0309	0,0120	-0,0038	-0,0229	-0,0040	-0,0034
12,54	-0,0320	0,0130	-0,0030	-0,0214	-0,0043	-0,0072
14,46	-0,0385	0,0160	-0,0027	-0,0223	-0,0050	-0,0057
14,47	-0,0405	0,0177	-0,0029	-0,0223	-0,0053	-0,0043
16,29	-0,0504	0,0188	-0,0005	-0,0221	-0,0066	-0,0013
16,28	-0,0535	0,0199	0,0020	-0,0215	-0,0091	0,0081
18,42	0,6067	0,0878	-0,0010	-0,0210	0,0122	0,0942
18,26	1,0280	0,2653	-0,0306	0,0182	0,0629	0,2670
20,25	1,4851	0,7311	-0,0271	0,0563	0,0923	0,9722
20,18	1,7907	1,6542	-0,0372	0,0507	0,1136	1,3215
22,24	2,2460	2,0234	-0,0375	0,0471	0,1850	1,7522
22,18	2,2761	2,0981	-0,0379	0,0440	0,2932	1,8838
24,13	2,4952	2,3588	-0,0362	0,0382	0,6080	2,2245
24,19	2,5762	2,4180	-0,0322	0,0305	1,6320	2,4099
25,94	2,7927	2,5298	-0,0260	0,0608	2,1893	2,7413
26,04	2,8263	2,5379	-0,0178	0,0771	2,4201	2,8077
25,70	2,8604	2,5176	-0,0087	0,0778	2,5275	2,8212
27,99	3,1260	2,6748	0,3553	0,1211	3,2576	3,1180
27,82	3,1265	2,6786	1,1715	0,1331	3,3786	3,1315
29,73	3,2280	2,7660	1,8906	0,4123	3,7229	3,3293
29,87	3,2277	2,7703	2,0421	0,4961	3,7571	3,3389
29,89	3,2118	2,7647	2,4749	0,6525	3,8099	3,3242
30,10	3,2221	2,7713	2,5332	0,6843	3,8332	3,3314
30,21	3,2320	2,7804	2,5883	0,7268	3,8647	3,3410
30,42	3,2434	2,7876	2,6259	0,7878	3,8912	3,3518
30,66	3,2556	2,7988	2,7074	1,0009	3,9420	3,3731
30,78	3,2702	2,8084	2,8362	1,1549	3,9967	3,3820
30,95	3,2805	2,8139	2,9867	1,2549	4,0504	3,3516
31,15	3,2905	2,8188	3,0847	1,3563	4,0988	3,3579
31,34	3,3002	2,8219	3,1516	1,4378	4,1545	3,3701
31,34	3,3058	2,8266	3,2066	1,5034	4,2003	3,3762
31,91	3,2990	2,8375	3,2465	1,5496	4,2326	3,3817
31,82	3,3098	2,8380	3,2824	1,5924	4,2615	3,3920
32,50	3,3098	2,8447	3,3074	1,6333	4,2926	3,4120
32,63	3,3111	2,8355	3,3135	1,6510	4,3194	3,4216
32,76	3,2420	2,8764	3,2617	1,6975	4,3210	3,4503
32,77	3,2419	2,8807	3,2484	1,7292	4,3437	3,4703
32,84	3,2404	2,8867	3,2307	1,7543	4,3607	3,4940
32,89	3,2476	2,8850	3,1563	1,7710	4,3829	3,5166
32,59	3,2502	2,8819	3,1242	1,7855	4,4051	3,5522

VTL3

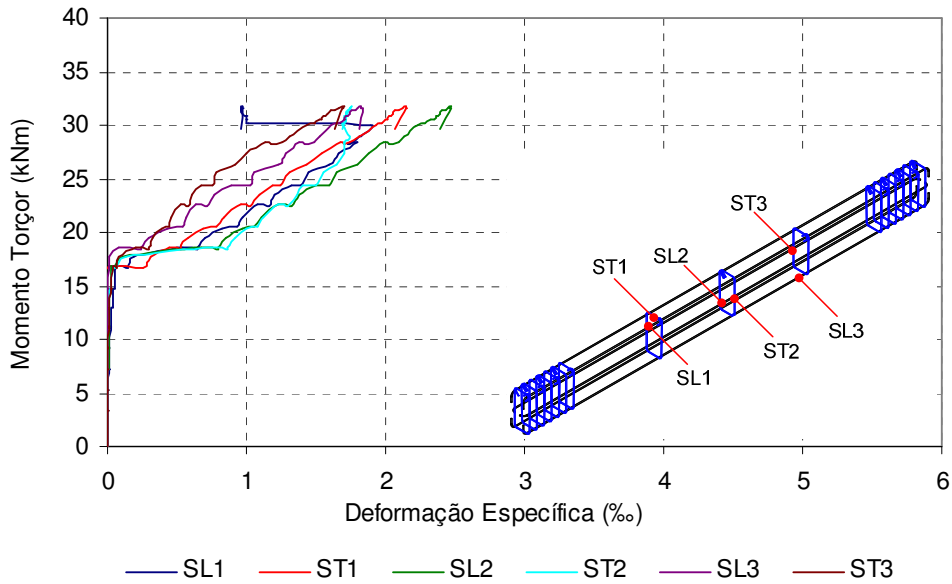


Figura A.14 – Gráfico momento torçor x deformação específica das armaduras de aço transversal e longitudinal da viga VTL3.

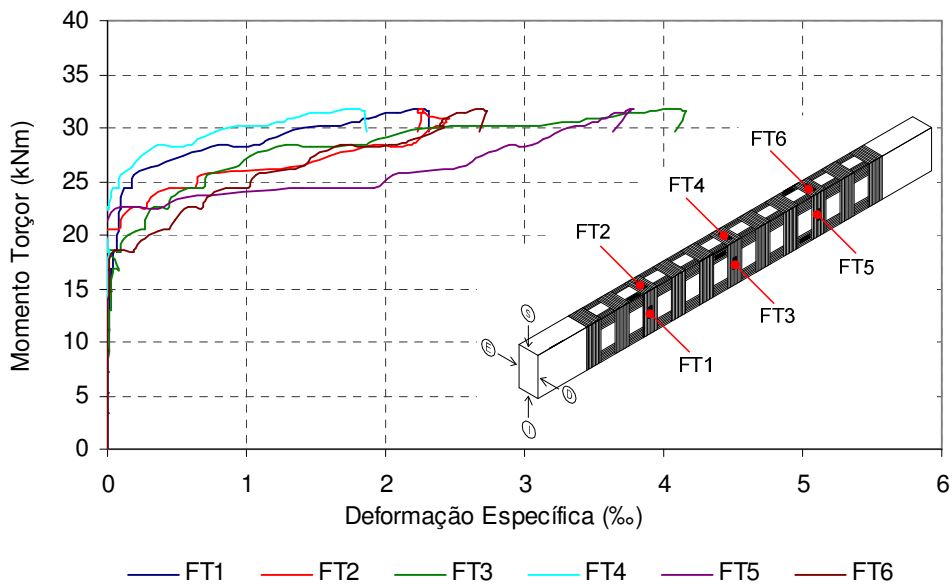


Figura A.15 – Gráfico momento torçor x deformação específica da armadura de CFC transversal da viga VTL3.

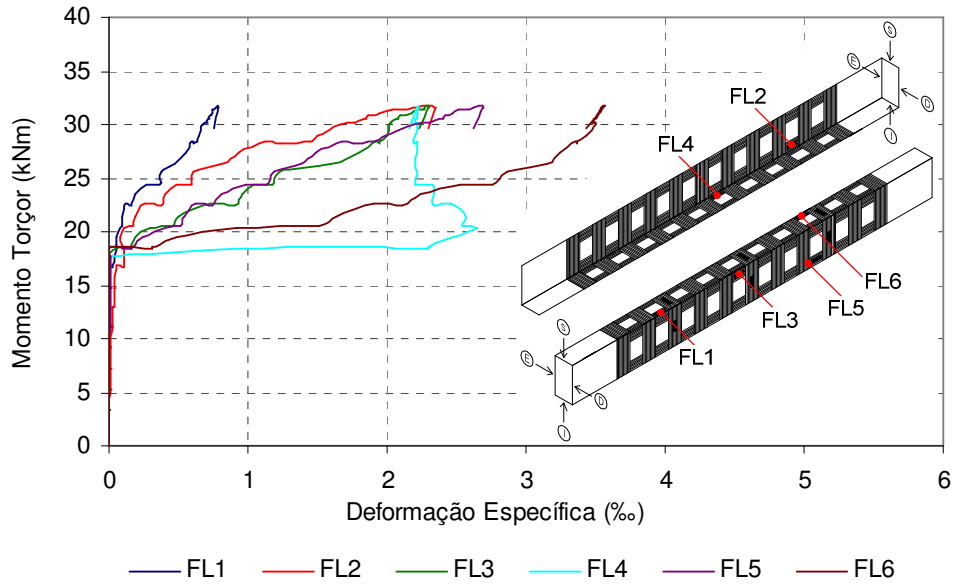


Figura A.16 – Gráfico momento torção x deformação específica da armadura de CFC longitudinal da viga VTL3.

Tabela A26 – Ângulo de torção por unidade de comprimento e leituras dos LVDT da viga VTL3.

Torçor (kN/m)	θ/m	LVDT1 (mm)	LVDT2 (mm)	LVDT3 (mm)	LVDT4 (mm)	LVDT5 (mm)
0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,40	0,037	0,29	0,76	0,66	0,32	0,02
3,41	0,037	0,29	0,78	0,68	0,33	0,02
5,33	0,076	1,35	1,98	1,55	1,14	0,64
5,31	0,079	1,35	2,10	1,64	1,22	0,72
7,12	0,103	2,56	3,27	2,65	2,03	1,47
7,18	0,109	2,56	3,45	2,77	2,14	1,58
9,22	0,131	3,77	4,61	3,80	2,95	2,32
9,16	0,135	3,77	4,76	3,93	3,06	2,40
11,15	0,157	4,96	5,81	4,84	3,79	3,07
11,12	0,163	5,28	5,98	4,95	3,89	3,15
12,81	0,186	6,11	6,87	5,72	4,46	3,62
12,93	0,192	6,11	7,05	5,84	4,55	3,71
14,79	0,221	7,65	8,04	6,62	5,17	4,23
14,75	0,226	7,91	8,27	6,85	5,31	4,34
16,77	0,251	9,43	9,43	7,88	6,18	5,01
16,67	0,295	11,57	10,57	8,72	7,27	5,42
17,66	0,376	13,23	12,27	9,85	8,04	5,77
18,66	0,593	18,28	16,83	13,33	9,81	6,30
18,49	0,707	21,57	19,32	15,42	10,43	6,50
18,57	0,707	21,57	19,32	15,42	10,43	6,50
18,69	0,724	21,65	19,60	15,57	10,49	6,50
19,50	0,767	23,22	20,66	16,40	10,90	6,76
20,43	0,877	26,55	23,13	18,37	12,13	7,09
20,55	0,993	29,60	25,38	19,91	12,86	7,28
21,45	1,037	31,15	26,46	20,75	13,31	7,53
22,56	1,183	34,43	29,42	22,74	14,50	7,92
22,46	1,269	37,16	31,43	24,47	15,37	8,11
23,52	1,333	38,58	32,86	25,59	16,06	8,29
24,46	1,467	42,47	35,78	27,69	17,12	8,75
24,35	1,590	45,66	38,36	29,58	17,90	8,98
25,65	1,653	47,41	39,84	30,71	18,54	9,24
26,23	1,751	48,91	41,16	30,71	19,03	9,44
27,30	1,866	51,49	43,59	32,43	19,96	9,72
28,37	2,011	55,72	47,21	35,18	21,46	10,52
28,29	2,061	57,08	48,38	36,06	21,85	10,69
28,39	2,183	59,62	50,95	37,80	22,67	11,01
29,03	2,250	61,39	52,51	38,88	23,25	11,31
30,02	2,398	65,01	55,85	41,18	24,44	11,87
30,11	2,476	67,12	57,58	42,44	24,95	12,05
30,10	2,487	67,38	57,84	42,65	25,05	12,08
30,51	2,549	68,32	59,35	43,78	25,57	12,35
30,58	2,566	68,85	59,76	44,10	25,73	12,39
30,84	2,587	69,22	60,26	44,44	25,87	12,50
30,91	2,605	69,54	60,68	44,78	26,05	12,53
31,11	2,630	70,56	61,25	45,21	26,54	12,59
31,33	2,672	70,67	62,21	45,92	26,87	12,71
31,34	2,712	71,05	63,21	46,71	27,19	12,85
31,64	2,752	71,05	64,04	47,30	27,45	12,89
31,73	2,811	70,46	65,33	48,16	27,84	13,05
31,64	2,816	65,40	65,50	48,28	27,94	13,13
31,59	2,822	63,89	65,64	48,39	27,99	13,15
29,73	2,769	57,66	64,94	48,35	28,16	13,15

Tabela A27 – Leituras dos extensômetros colados na superfície de concreto da viga VTL3.

Torçor (kNm)	C1 (‰)	C2 (‰)	C3 (‰)	C4 (‰)	C5 (‰)	C6 (‰)	C7 (‰)	C8 (‰)	C9 (‰)
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3,40	0,0009	-0,0276	-0,0012	0,0017	-0,0282	-0,0017	0,0003	-0,0279	-0,0032
3,41	0,0015	-0,0280	-0,0015	0,0012	-0,0286	-0,0019	-0,0004	-0,0284	-0,0037
5,33	0,0015	-0,0474	-0,0008	0,0028	-0,0484	-0,0028	0,0008	-0,0479	-0,0061
5,31	0,0035	-0,0475	-0,0001	0,0035	-0,0488	-0,0018	0,0013	-0,0487	-0,0061
7,12	0,0036	-0,0667	0,0005	0,0050	-0,0680	-0,0032	0,0024	-0,0676	-0,0079
7,18	0,0054	-0,0676	0,0024	0,0061	-0,0689	-0,0022	0,0043	-0,0689	-0,0073
9,22	0,0054	-0,0898	0,0049	0,0092	-0,0906	-0,0032	0,0068	-0,0905	-0,0102
9,16	0,0060	-0,0914	0,0060	0,0096	-0,0922	-0,0031	0,0073	-0,0916	-0,0110
11,15	0,0066	-0,1138	0,0111	0,0134	-0,1150	-0,0032	0,0093	-0,1141	-0,0144
11,12	0,0068	-0,1175	0,0125	0,0143	-0,1189	-0,0032	0,0100	-0,1177	-0,0166
12,81	0,0054	-0,1384	0,0189	0,0184	-0,1399	-0,0036	0,0120	-0,1385	-0,0210
12,93	0,0077	-0,1403	0,0230	0,0213	-0,1424	-0,0028	0,0141	-0,1405	-0,0225
14,79	0,0052	-0,1659	0,0343	0,0293	-0,1691	-0,0050	0,0201	-0,1650	-0,0294
14,75	0,0082	-0,1689	0,0426	0,0344	-0,1726	-0,0059	0,0226	-0,1665	-0,0340
16,77	-0,0012	-0,2225	0,0606	0,0509	-0,2011	-0,0107	0,0198	-0,1907	-0,0477
16,67	-0,0616	-0,4456	0,3849	0,0783	-0,2209	-0,0181	0,0055	-0,1969	-0,0566
17,66	-0,0382	-0,5274	0,6413	0,3841	-0,2626	-0,0528	-0,0089	-0,2122	-0,0639
18,66	-0,0129	-0,6230	–	1,3434	-0,3962	-0,1243	-0,1141	-0,2433	-0,0708
18,49	0,0037	-0,6531	–	–	-0,4402	-0,1219	-0,1524	-0,3106	-0,1092
18,57	0,0043	-0,6532	–	–	-0,4403	-0,1223	-0,1523	-0,3110	-0,1097
18,69	0,0077	-0,6550	–	–	-0,4421	-0,1205	-0,1530	-0,3162	-0,1109
19,50	0,0165	-0,6870	–	–	-0,4680	-0,1226	-0,1636	-0,3448	-0,1226
20,43	0,0695	-0,7517	–	–	-0,5184	-0,1173	-0,1991	-0,4521	-0,1744
20,55	0,1205	-0,8031	–	–	-0,5318	-0,1063	-0,2336	-0,5834	-0,2426
21,45	0,1326	-0,8356	–	–	-0,5534	-0,1105	-0,2431	-0,6172	-0,2593
22,56	0,1822	-0,9050	–	–	-0,5999	-0,1233	-0,2533	-0,6972	-0,2977
22,46	0,2472	-0,9459	–	–	-0,6332	-0,1302	-0,2486	-0,7389	-0,3187
23,52	0,2753	-0,9837	–	–	-0,6634	-0,1373	-0,2547	-0,7669	-0,3376
24,46	0,4093	-1,0463	–	–	-0,7303	-0,1523	-0,2432	-0,8124	-0,3691
24,35	0,5399	-1,0989	–	–	-0,7998	-0,1721	-0,2283	-0,8610	-0,4046
25,65	0,5808	-1,1356	–	–	-0,8346	-0,1814	-0,2330	-0,8922	-0,4217
26,23	0,8042	-1,2241	–	–	-0,9698	-0,2103	-0,2575	-0,9932	-0,4844
27,30	0,9518	-1,2824	–	–	-1,0459	-0,2311	-0,2710	-1,0431	-0,5101
28,37	–	-1,3358	–	–	-1,1690	-0,2634	-0,2894	-1,1171	-0,5399
28,29	–	-1,3533	–	–	-1,2229	-0,2832	-0,2945	-1,1474	-0,5483
28,39	–	-1,3938	–	–	-1,3173	-0,3342	-0,3073	-1,2074	-0,5655
29,03	–	-1,4254	–	–	-1,3644	-0,3558	-0,3122	-1,2386	-0,5778
30,02	–	-1,4841	–	–	-1,4701	-0,4084	-0,3245	-1,2948	-0,5972
30,11	–	-1,5074	–	–	-1,5327	-0,4429	-0,3318	-1,3408	-0,6051
30,10	–	-1,5135	–	–	-1,5432	-0,4472	-0,3341	-1,3491	-0,6073
30,51	–	-1,5366	–	–	-1,5946	-0,4796	-0,3410	-1,3892	-0,6161
30,58	–	-1,5433	–	–	-1,6075	-0,4862	-0,3428	-1,4003	-0,6187
30,84	–	-1,5516	–	–	-1,6215	-0,4937	-0,3446	-1,4120	-0,6226
30,91	–	-1,5599	–	–	-1,6374	-0,5031	-0,3469	-1,4253	-0,6260
31,11	–	-1,5706	–	–	-1,6587	-0,5155	-0,3493	-1,4444	-0,6301
31,33	–	-1,5880	–	–	-1,6892	-0,5313	-0,3531	-1,4717	-0,6360
31,34	–	-1,6057	–	–	-1,7216	-0,5464	-0,3599	-1,5143	-0,6534
31,64	–	-1,6205	–	–	-1,7475	-0,5565	-0,3646	-1,5433	-0,6656
31,73	–	-1,6428	–	–	-1,7925	-0,5705	-0,3700	-1,5874	-0,6836
31,64	–	-1,6425	–	–	-1,8043	-0,5782	-0,3697	-1,5990	-0,6859
31,59	–	-1,6462	–	–	-1,8097	-0,5803	-0,3706	-1,6041	-0,6869
29,73	–	-1,6015	–	–	-1,7720	-0,5743	-0,3575	-1,5690	-0,6721

Tabela A28 – Leituras dos extensômetros colados na armadura de aço transversal e longitudinal da viga VTL3.

Torçor (kNm)	SL1 (‰)	ST1 (‰)	SL2 (‰)	ST2 (‰)	SL3 (‰)	ST3 (‰)
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3,40	0,0022	-0,0046	0,0014	-0,0016	-0,0014	-0,0015
3,41	0,0019	-0,0049	0,0005	-0,0020	-0,0020	-0,0018
5,33	0,0056	-0,0072	0,0033	-0,0018	-0,0014	-0,0014
5,31	0,0064	-0,0073	0,0026	-0,0014	-0,0012	-0,0012
7,12	0,0099	-0,0095	0,0049	-0,0012	-0,0012	-0,0001
7,18	0,0141	-0,0076	0,0080	0,0015	0,0004	0,0016
9,22	0,0177	-0,0114	0,0093	0,0015	0,0001	0,0034
9,16	0,0202	-0,0108	0,0106	0,0038	0,0007	0,0042
11,15	0,0252	-0,0134	0,0130	0,0052	0,0004	0,0077
11,12	0,0271	-0,0134	0,0125	0,0068	0,0014	0,0087
12,81	0,0329	-0,0154	0,0159	0,0100	0,0014	0,0125
12,93	0,0377	-0,0130	0,0183	0,0142	0,0030	0,0157
14,79	0,0455	-0,0154	0,0210	0,0186	0,0042	0,0234
14,75	0,0512	-0,0085	0,0224	0,0237	0,0057	0,0286
16,77	0,0683	0,0089	0,0320	0,0345	0,0089	0,0454
16,67	0,1478	0,2632	0,0508	0,0547	0,0135	0,0664
17,66	0,1937	0,3173	0,1115	0,1379	0,0158	0,0754
18,66	0,5396	0,4483	0,6725	0,7557	0,0775	0,2075
18,49	0,6482	0,5248	0,7978	0,8664	0,2471	0,3005
18,57	0,6524	0,5267	0,7983	0,8667	0,2498	0,3016
18,69	0,6615	0,5333	0,8079	0,8752	0,2621	0,3083
19,50	0,7093	0,5763	0,8572	0,9234	0,3020	0,3287
20,43	0,8292	0,6917	0,9663	1,0029	0,4281	0,3880
20,55	0,9294	0,7842	1,0584	1,0775	0,5377	0,4481
21,45	0,9690	0,8438	1,1134	1,1241	0,5638	0,4645
22,56	1,0746	0,9631	1,2300	1,2260	0,6381	0,5280
22,46	1,1559	1,0265	1,3203	1,2945	0,7192	0,5862
23,52	1,2028	1,0898	1,3806	1,3603	0,7672	0,6135
24,46	1,3220	1,1921	1,4980	1,4065	0,8945	0,6791
24,35	1,3970	1,2463	1,5886	1,5021	1,0208	0,7522
25,65	1,4395	1,3135	1,6475	1,5581	1,0602	0,7797
26,23	1,5895	1,4362	1,8024	1,6495	1,2289	0,9216
27,30	1,6660	1,5387	1,8814	1,6980	1,2885	0,9979
28,37	1,8021	1,6790	1,9893	1,6975	1,3806	1,1302
28,29	1,7230	1,7022	2,0221	1,6971	1,4179	1,1818
28,39	1,7616	1,7448	2,0926	1,7067	1,4903	1,2620
29,03	1,8093	1,8093	2,1417	1,7414	1,5259	1,3086
30,02	1,8861	1,9272	2,2349	1,6896	1,6078	1,4282
30,11	1,0121	1,9606	2,2768	1,6930	1,6532	1,4816
30,10	1,0058	1,9689	2,2863	1,6988	1,6608	1,4908
30,51	0,9969	1,9994	2,3310	1,7131	1,6977	1,5291
30,58	0,9992	2,0098	2,3450	1,6960	1,7073	1,5412
30,84	1,0037	2,0233	2,3587	1,7039	1,7180	1,5543
30,91	1,0067	2,0339	2,3720	1,7107	1,7285	1,5672
31,11	0,9789	2,0494	2,3893	1,7190	1,7429	1,5851
31,33	0,9656	2,0723	2,4092	1,7272	1,7612	1,6094
31,34	0,9621	2,0965	2,4318	1,7380	1,7802	1,6397
31,64	0,9638	2,1180	2,4499	1,7474	1,7991	1,6662
31,73	0,9682	2,1507	2,4753	1,7565	1,8262	1,6976
31,64	0,9688	2,1457	2,4653	1,7437	1,8305	1,6919
31,59	0,9690	2,1471	2,4684	1,7442	1,8324	1,6944
29,73	0,9592	2,0725	2,3880	1,6873	1,8080	1,6318

Tabela A29 – Leituras dos extensômetros colados na armadura transversal de CFC da viga VTL3.

Torçor (kNm)	FT1 (‰)	FT2 (‰)	FT3 (‰)	FT4 (‰)	FT5 (‰)	FT6 (‰)
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3,40	0,0008	-0,0009	0,0012	0,0004	-0,0020	0,0016
3,41	0,0001	-0,0010	0,0009	0,0005	-0,0023	0,0012
5,33	0,0018	-0,0017	0,0030	0,0005	-0,0040	0,0022
5,31	0,0018	-0,0014	0,0033	0,0008	-0,0035	0,0027
7,12	0,0033	-0,0022	0,0059	0,0004	-0,0047	0,0035
7,18	0,0030	-0,0025	0,0059	-0,0004	-0,0052	0,0031
9,22	0,0047	-0,0034	0,0095	-0,0004	-0,0061	0,0044
9,16	0,0047	-0,0038	0,0098	-0,0009	-0,0066	0,0038
11,15	0,0081	-0,0055	0,0139	-0,0014	-0,0076	0,0052
11,12	0,0091	-0,0060	0,0147	-0,0013	-0,0069	0,0053
12,81	0,0124	-0,0076	0,0186	-0,0014	-0,0079	0,0065
12,93	0,0139	-0,0080	0,0203	-0,0020	-0,0074	0,0063
14,79	0,0172	-0,0108	0,0259	-0,0029	-0,0086	0,0074
14,75	0,0212	-0,0124	0,0297	-0,0029	-0,0072	0,0077
16,77	0,0203	-0,0228	0,0421	-0,0047	-0,0089	0,0085
16,67	0,0341	-0,1086	0,0744	-0,0059	-0,0099	0,0068
17,66	0,0357	-0,1206	0,0582	-0,0051	-0,0092	0,0073
18,66	0,0533	-0,1280	0,0048	0,0090	-0,0398	0,0598
18,49	0,0625	-0,1163	0,0952	0,0004	-0,0598	0,1857
18,57	0,0619	-0,1164	0,0959	0,0000	-0,0600	0,1866
18,69	0,0621	-0,1143	0,0987	-0,0016	-0,0602	0,2002
19,50	0,0655	-0,1146	0,1074	-0,0048	-0,0634	0,2382
20,43	0,0796	-0,0715	0,1968	-0,0138	-0,0658	0,3635
20,55	0,0792	0,0841	0,2644	-0,0107	-0,0107	0,4520
21,45	0,0781	0,1009	0,2713	-0,0098	-0,0042	0,4815
22,56	0,0916	0,1881	0,3377	0,0038	0,0996	0,5849
22,46	0,0982	0,2748	0,4274	0,0198	0,3667	0,6741
23,52	0,0990	0,3078	0,4596	0,0245	0,5645	0,7179
24,46	0,1261	0,4426	0,5801	0,0457	1,4015	0,8515
24,35	0,1775	0,6338	0,6904	0,0843	1,9183	1,0176
25,65	0,1848	0,6767	0,7097	0,0925	2,0492	1,0613
26,23	0,3125	1,3087	0,9239	0,1731	2,5255	1,3754
27,30	0,5412	1,5987	1,0255	0,2428	2,6922	1,4809
28,37	0,7946	1,9155	1,2806	0,3678	2,8917	1,6815
28,29	0,9279	2,0464	1,4539	0,4557	2,9540	1,8444
28,39	1,0957	2,1875	1,8218	0,6016	3,0499	2,0867
29,03	1,1572	2,2439	1,9463	0,6509	3,1393	2,2026
30,02	1,4010	2,3444	2,3044	0,8692	3,3160	2,4126
30,11	1,6278	2,3954	2,9560	1,0968	3,3976	2,4011
30,10	1,6505	2,4088	3,0389	1,1216	3,4171	2,3939
30,51	1,7877	2,4365	3,3353	1,2497	3,4991	2,4032
30,58	1,8152	2,4358	3,3896	1,2709	3,5211	2,4064
30,84	1,8431	2,4445	3,4449	1,2944	3,5481	2,4187
30,91	1,8782	2,4647	3,5346	1,3250	3,5708	2,4384
31,11	1,9301	2,3114	3,6322	1,3764	3,6026	2,4656
31,33	2,0009	2,2902	3,7444	1,4654	3,6530	2,5131
31,34	2,0863	2,2404	3,8272	1,5728	3,7022	2,5663
31,64	2,1466	2,2284	3,9086	1,6492	3,7359	2,6089
31,73	2,2537	2,2620	4,0907	1,7756	3,7804	2,6916
31,64	2,2981	2,2637	4,1381	1,8392	3,7548	2,7170
31,59	2,3141	2,2701	4,1618	1,8576	3,7557	2,7251
29,73	2,3074	2,2247	4,0806	1,8716	3,6330	2,6790

Tabela A30 – Leituras dos extensômetros colados na armadura longitudinal de CFC da viga VTL3.

Torçor (kNm)	FL1 (‰)	FL2 (‰)	FL3 (‰)	FL4 (‰)	FL5 (‰)	FL6 (‰)
0,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
3,40	-0,0036	0,0038	-0,0022	-0,0014	0,0012	-0,0008
3,41	-0,0031	0,0035	-0,0027	-0,0013	0,0004	-0,0007
5,33	-0,0064	0,0077	-0,0053	-0,0016	0,0017	-0,0013
5,31	-0,0038	0,0090	-0,0046	-0,0008	0,0023	-0,0009
7,12	-0,0068	0,0130	-0,0076	-0,0009	0,0035	-0,0009
7,18	-0,0090	0,0146	-0,0086	-0,0005	0,0035	-0,0016
9,22	-0,0119	0,0190	-0,0120	-0,0012	0,0053	-0,0017
9,16	-0,0122	0,0190	-0,0128	-0,0009	0,0051	-0,0020
11,15	-0,0151	0,0245	-0,0158	-0,0017	0,0070	-0,0026
11,12	-0,0156	0,0268	-0,0163	-0,0008	0,0078	-0,0017
12,81	-0,0180	0,0315	-0,0182	-0,0008	0,0090	-0,0021
12,93	-0,0156	0,0352	-0,0182	0,0007	0,0104	-0,0010
14,79	-0,0207	0,0408	-0,0221	0,0001	0,0121	-0,0017
14,75	-0,0184	0,0461	-0,0218	0,0025	0,0138	0,0001
16,77	-0,0294	0,0522	-0,0288	0,0052	0,0145	-0,0003
16,67	0,0224	0,1035	-0,0425	0,0120	0,0132	0,0017
17,66	0,0399	0,1095	-0,0298	0,0307	0,0138	0,0027
18,66	0,0479	0,1061	0,0789	1,4553	-0,0104	0,0093
18,49	0,0521	0,0899	0,1598	2,2981	0,1657	0,3082
18,57	0,0527	0,0900	0,1605	2,2995	0,1684	0,3163
18,69	0,0522	0,0899	0,1666	2,3241	0,1864	0,3667
19,50	0,0546	0,0854	0,1933	2,4694	0,2386	0,4869
20,43	0,0794	0,1074	0,2919	2,6445	0,4040	0,9123
20,55	0,0952	0,1727	0,4538	2,5466	0,5201	1,5144
21,45	0,1008	0,1830	0,4985	2,5652	0,5438	1,6313
22,56	0,1216	0,2532	0,7328	2,4567	0,6282	1,9056
22,46	0,1663	0,3796	0,9013	2,3421	0,7447	2,1137
23,52	0,1898	0,4076	0,9582	2,3443	0,8058	2,2413
24,46	0,2728	0,4826	1,0450	2,3188	0,9803	2,5292
24,35	0,3607	0,5926	1,1781	2,1964	1,1378	2,7577
25,65	0,3762	0,6148	1,2348	2,2150	1,1844	2,8677
26,23	0,4771	0,8167	1,6006	2,2070	1,3851	3,1457
27,30	0,5551	0,9352	1,7906	2,2155	1,4847	3,2477
28,37	0,5984	1,1245	1,9227	2,2097	1,6693	3,3513
28,29	0,6141	1,2466	1,9398	2,2009	1,7605	3,3636
28,39	0,6300	1,4395	1,9495	2,1886	1,9036	3,3704
29,03	0,6428	1,4974	1,9980	2,2053	1,9834	3,4318
30,02	0,6752	1,6570	2,0165	2,2148	2,1947	3,5007
30,11	0,6977	1,7560	2,0218	2,1985	2,2956	3,4784
30,10	0,7011	1,7695	2,0328	2,2015	2,3122	3,4836
30,51	0,7174	1,8350	2,0613	2,2068	2,3804	3,4886
30,58	0,7212	1,8493	2,0766	2,2110	2,3990	3,4949
30,84	0,7260	1,8686	2,0947	2,2146	2,4206	3,5072
30,91	0,7312	1,8961	2,1337	2,2165	2,4445	3,5160
31,11	0,7370	1,9510	2,1744	2,2187	2,4753	3,5264
31,33	0,7454	2,0358	2,2144	2,2204	2,5182	3,5432
31,34	0,7550	2,1241	2,2520	2,2206	2,5753	3,5400
31,64	0,7638	2,1927	2,2758	2,2220	2,6191	3,5482
31,73	0,7813	2,3080	2,3037	2,2256	2,6842	3,5663
31,64	0,7821	2,3411	2,2914	2,2119	2,6826	3,5381
31,59	0,7821	2,3474	2,2965	2,2119	2,6875	3,5373
29,73	0,7554	2,2935	2,2240	2,1583	2,6176	3,4281

Anexo B – Fotografias

Aplicação do carregamento



Figura B.1 – Aplicação da força.



Figura B.2 – Elemento de reação.

Montagem do Sistema de Apoio

a

b



c

Figura B.3 – Montagem do sistema de apoios: a) marcas para posicionamento das peças; b) montagem do sistema de apoio; c) aplicação de massa plástica para fixação das peças.

Ensaio da Viga VRef



Figura B.4 – Vista superior da viga VRef.

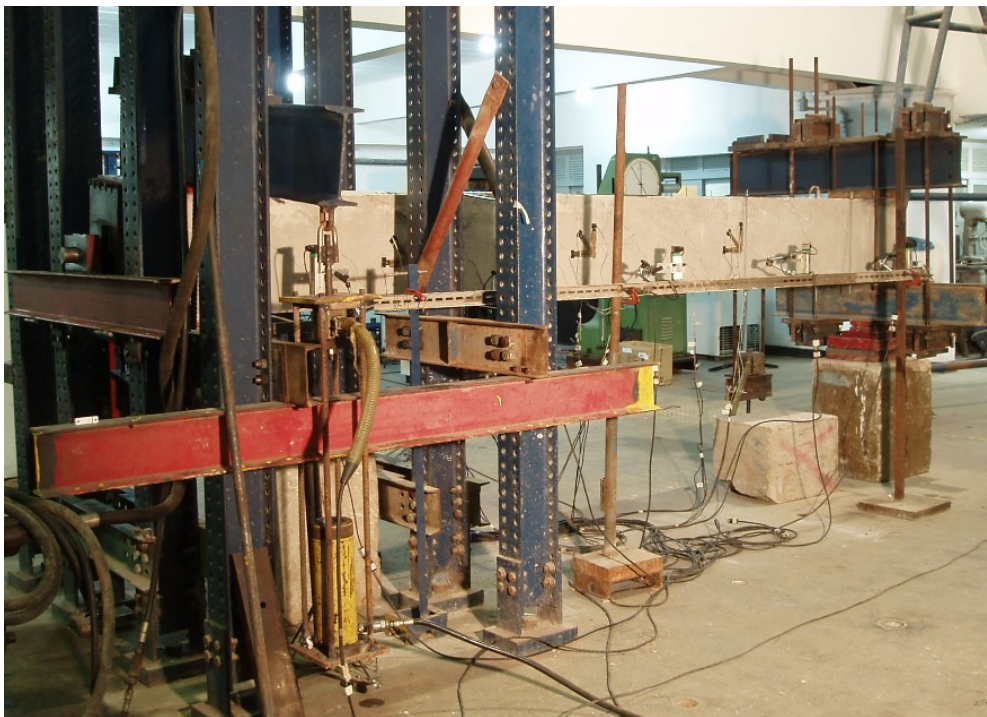


Figura B.5 – Vista lateral da viga VRef.

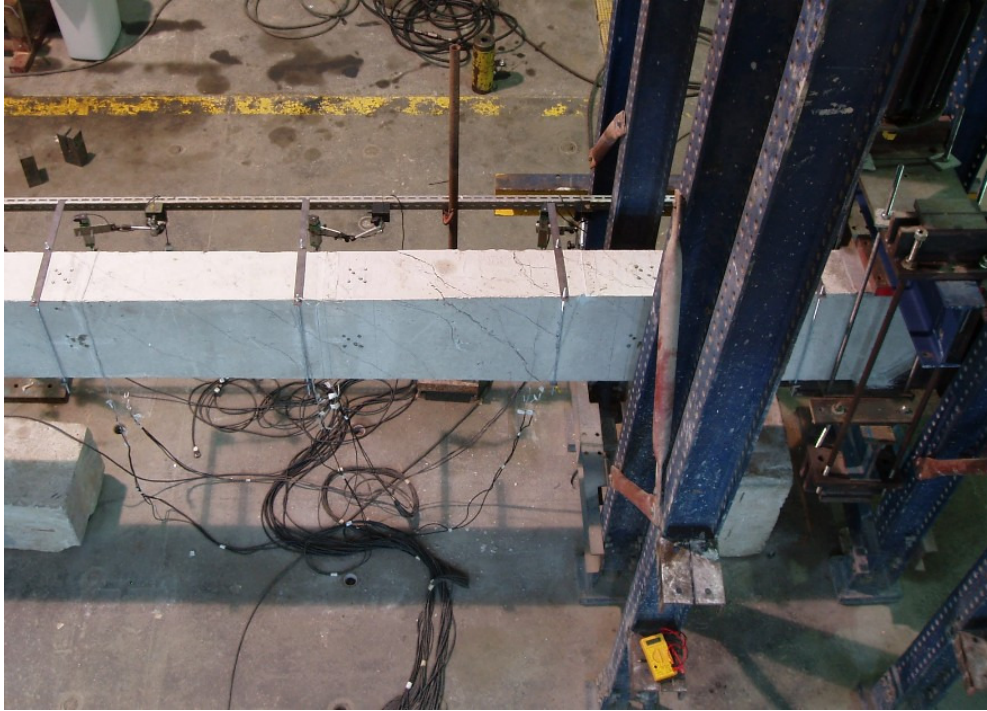


Figura B.6 – Vista superior da viga VRef após a ruptura.

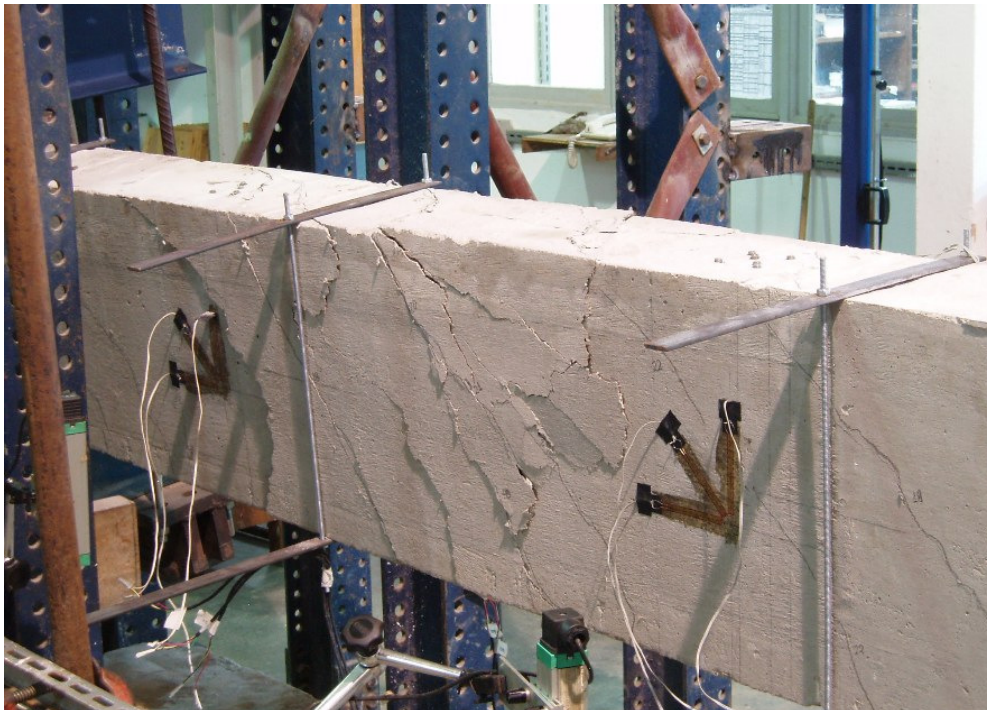


Figura B.7 – Detalhe da ruptura da viga VRef.



Figura B.8 – Detalhe da ruptura da viga VRef vista da face esquerda.



Figura B.9 – Detalhe da torção aplicada na viga VRef.



Figura B.10 – Configuração das fissuras da viga VRef.

Ensaio da Viga VT1

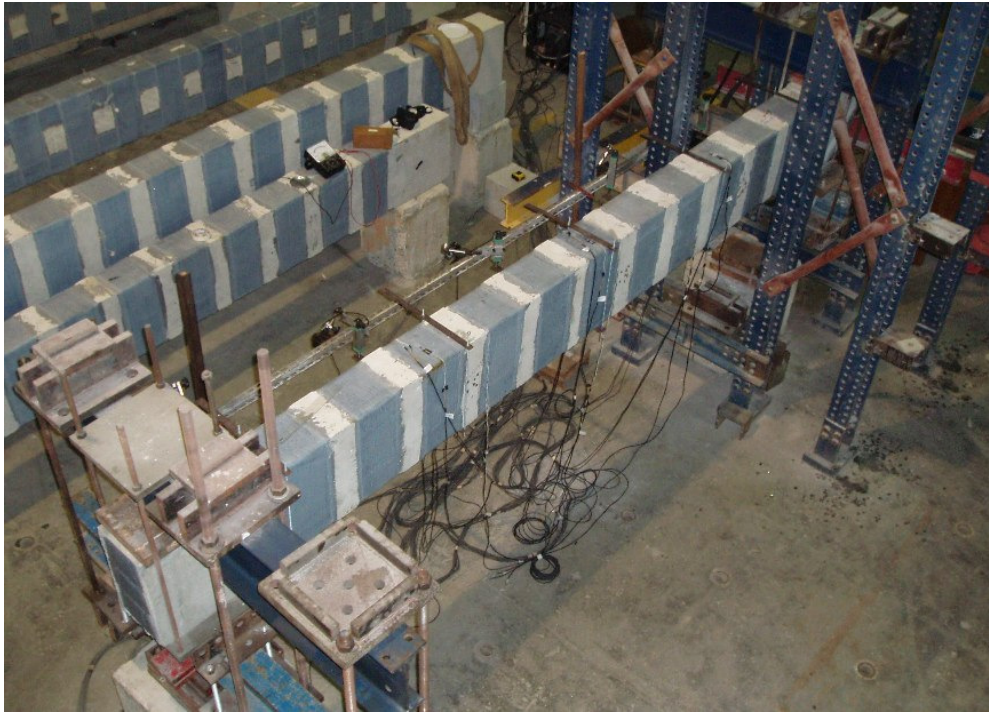


Figura B.11 – Vista superior da viga VT1.



Figura B.12 – Vista frontal da viga VT1.



Figura B.13 – Detalhe da torção aplicada na viga VT1.



Figura B.14 – Detalhe da ruptura da viga VT1 vista da direita.



Figura B.15 – Detalhe da ruptura da viga VT1 vista da esquerda.



Figura B.16 – Detalhe da ruptura da viga VT1 vista da face inferior.

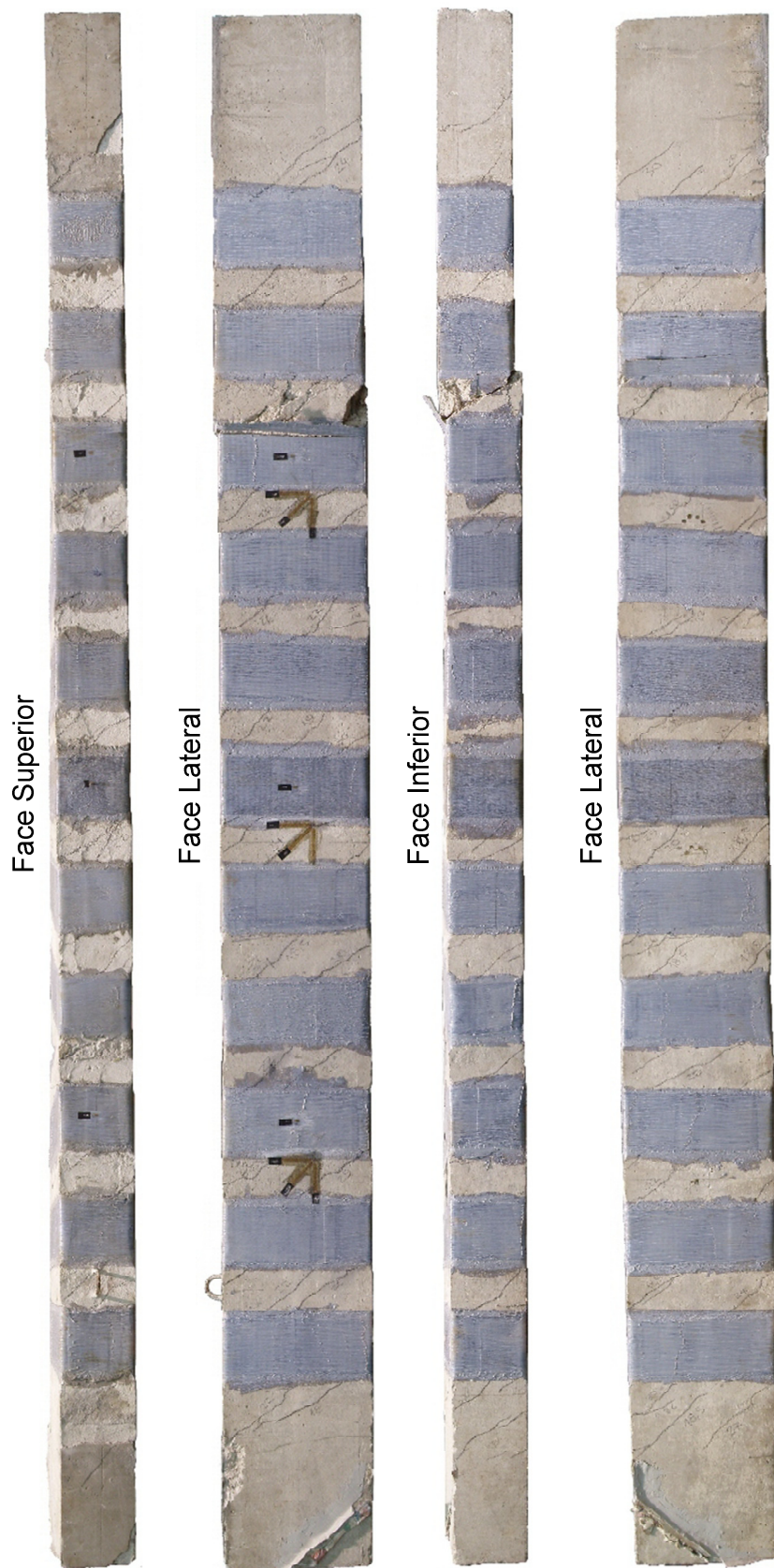


Figura B.17 – Configuração das fissuras da viga VT1.

Ensaio VT2

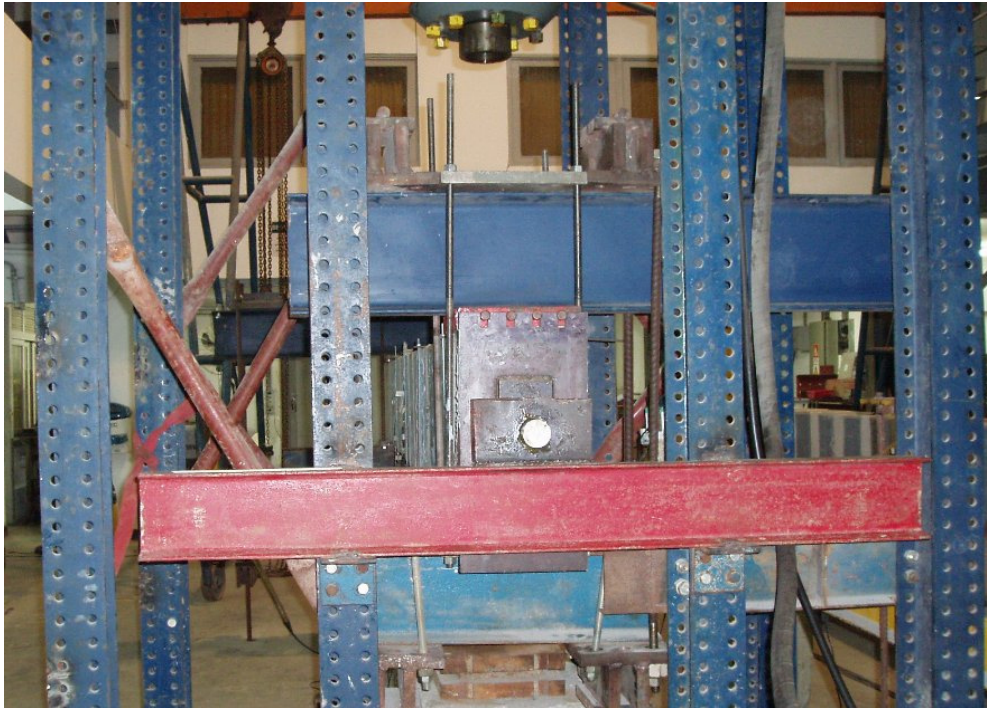


Figura B.18 – Vista frontal da viga VT2.

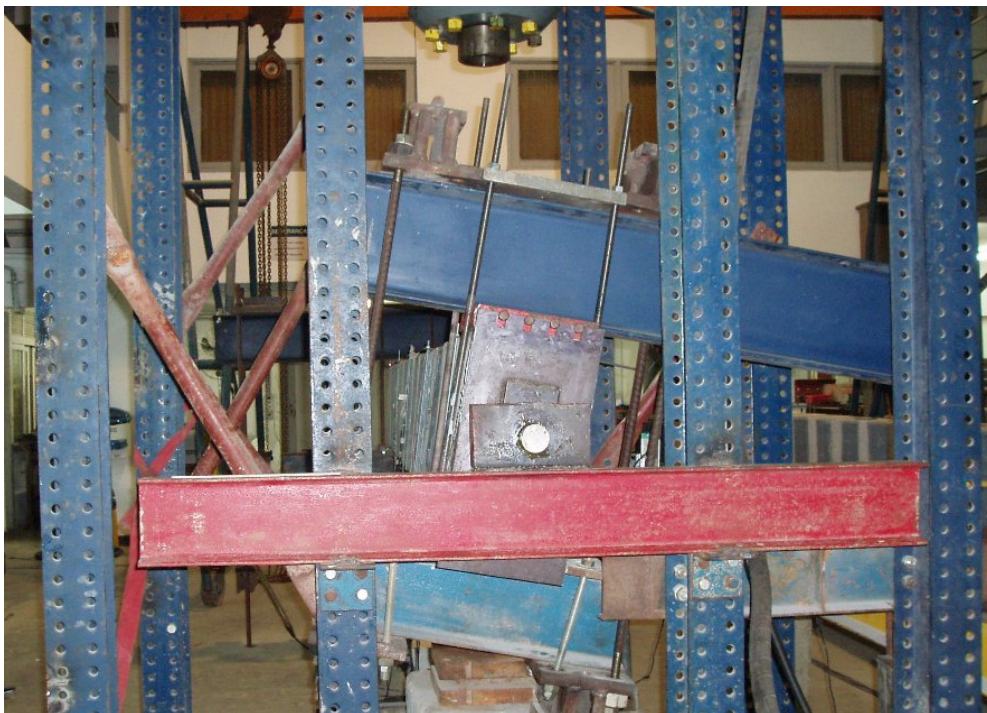


Figura B.19 – Vista frontal da viga VT2 solicitada à torção.

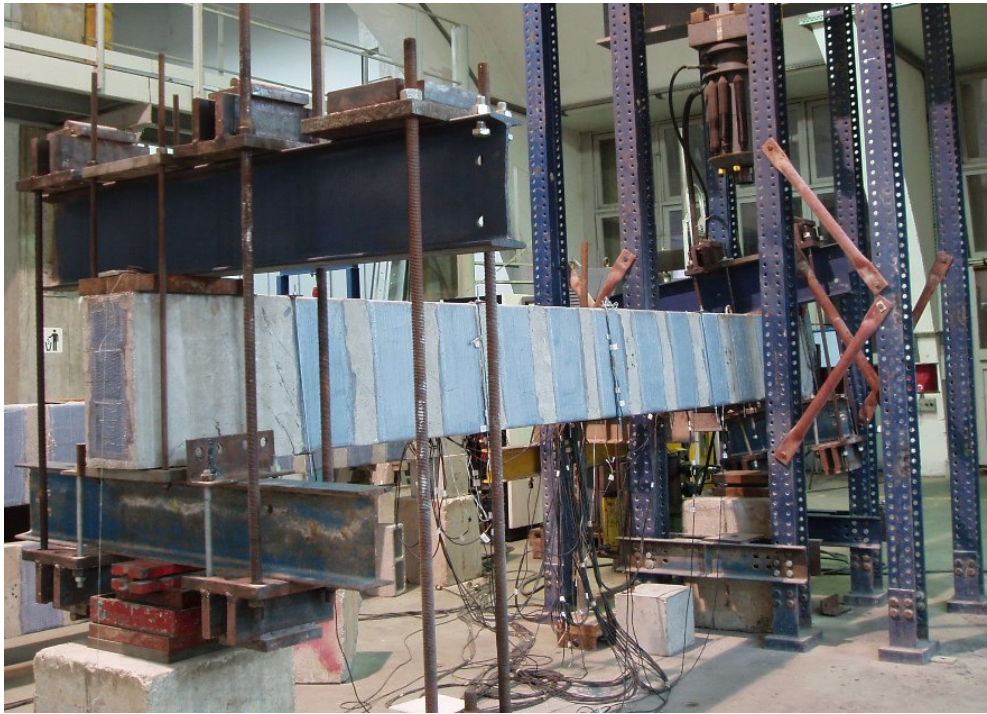


Figura B.20 – Vista da esquerda da viga VT2.



Figura B.21 – Detalhe da viga VT2 solicitada à torção.



Figura B.22 – Detalhe da ruptura da viga VT2 vista da direita.



Figura B.23 – Detalhe da ruptura da viga VT2 vista da esquerda.

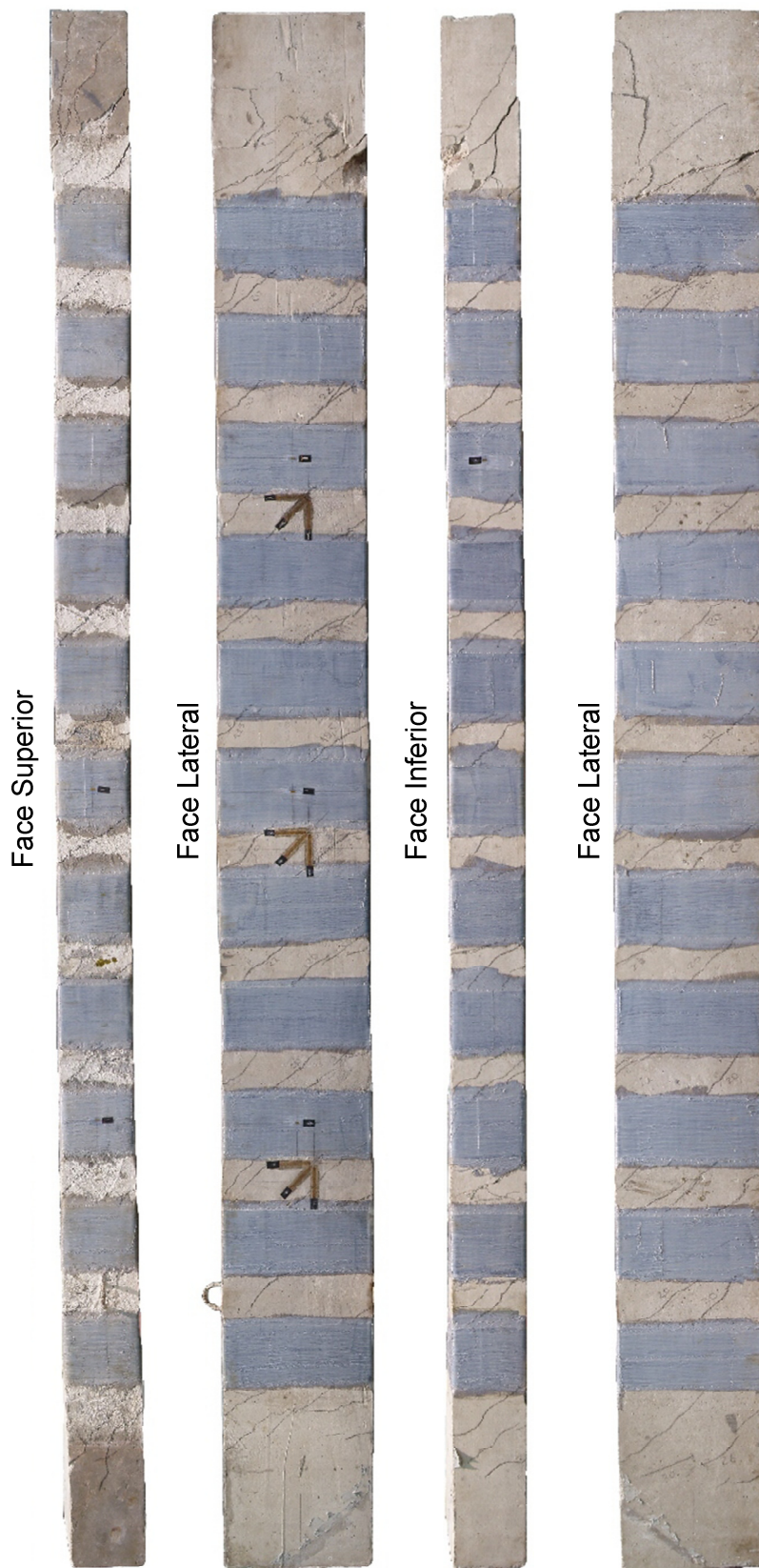


Figura B.24 – Configuração das fissuras da viga VT2.

Ensaio VT3



Figura B.25 – Viga VT3 solicitada à torção.

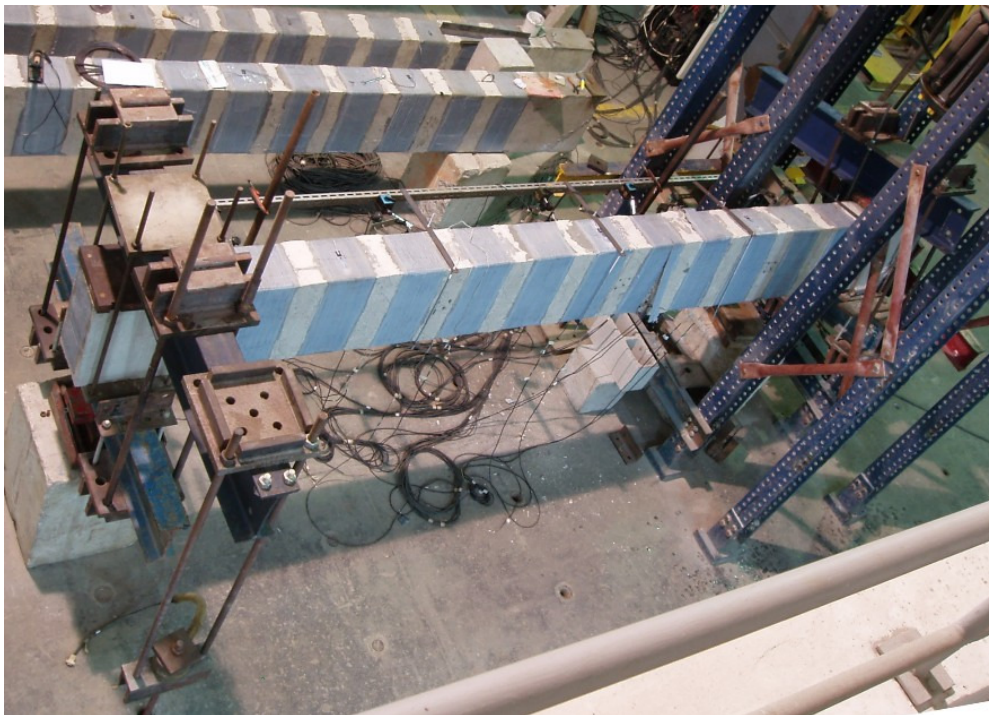


Figura B.26 – Vista superior da viga VT3.



Figura B.27 – Detalhe da viga VT3 solicitada à torção.

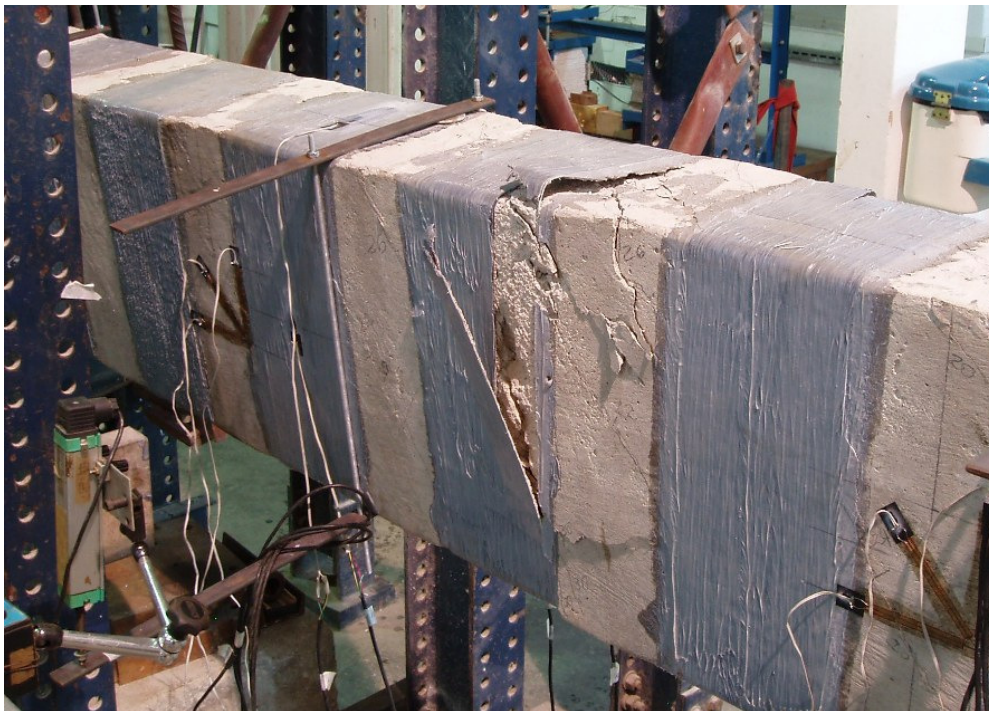


Figura B.28 – Detalhe da ruptura da viga VT3.



Figura B.29 – Detalhe da ruptura da viga VT3 vista da direita.



Figura B.30 – Detalhe da ruptura da viga VT3 vista inferior.

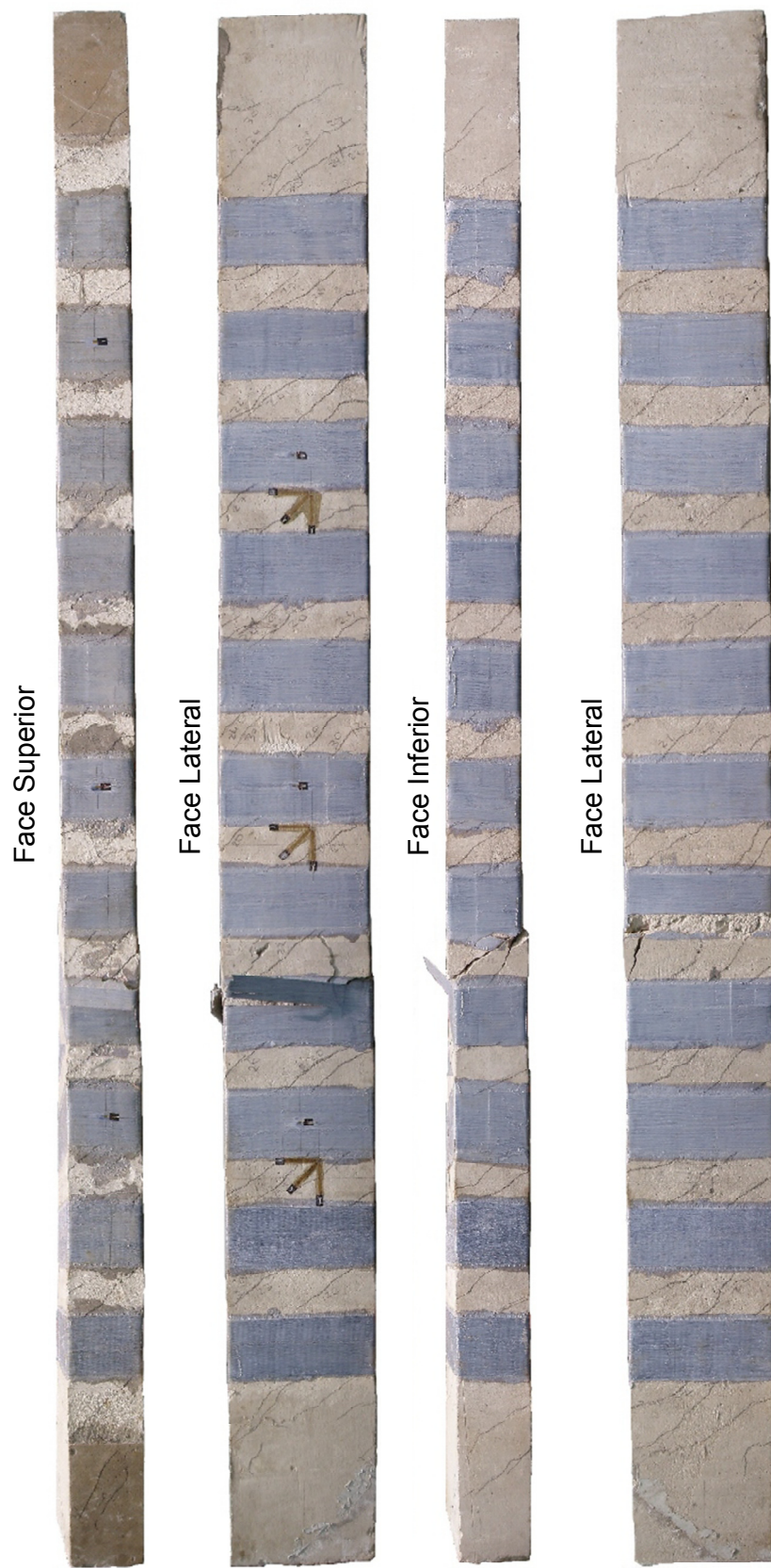


Figura B.31 – Configuração das fissuras da viga VT3.

Ensaio VTL1



Figura B.32 – Vista lateral do ensaio da viga VTL1.



Figura B.33 – Vista superior do ensaio da viga VTL1.



Figura B.34 – Detalhe da viga VTL1 solicitada à torção.



Figura B.35 – Detalhe da ruptura da viga VTL1 vista da direita.



Figura B.36 – Detalhe da ruptura da viga VTL1 vista da esquerda.



Figura B.37 – Detalhe do descolamento da CFC.

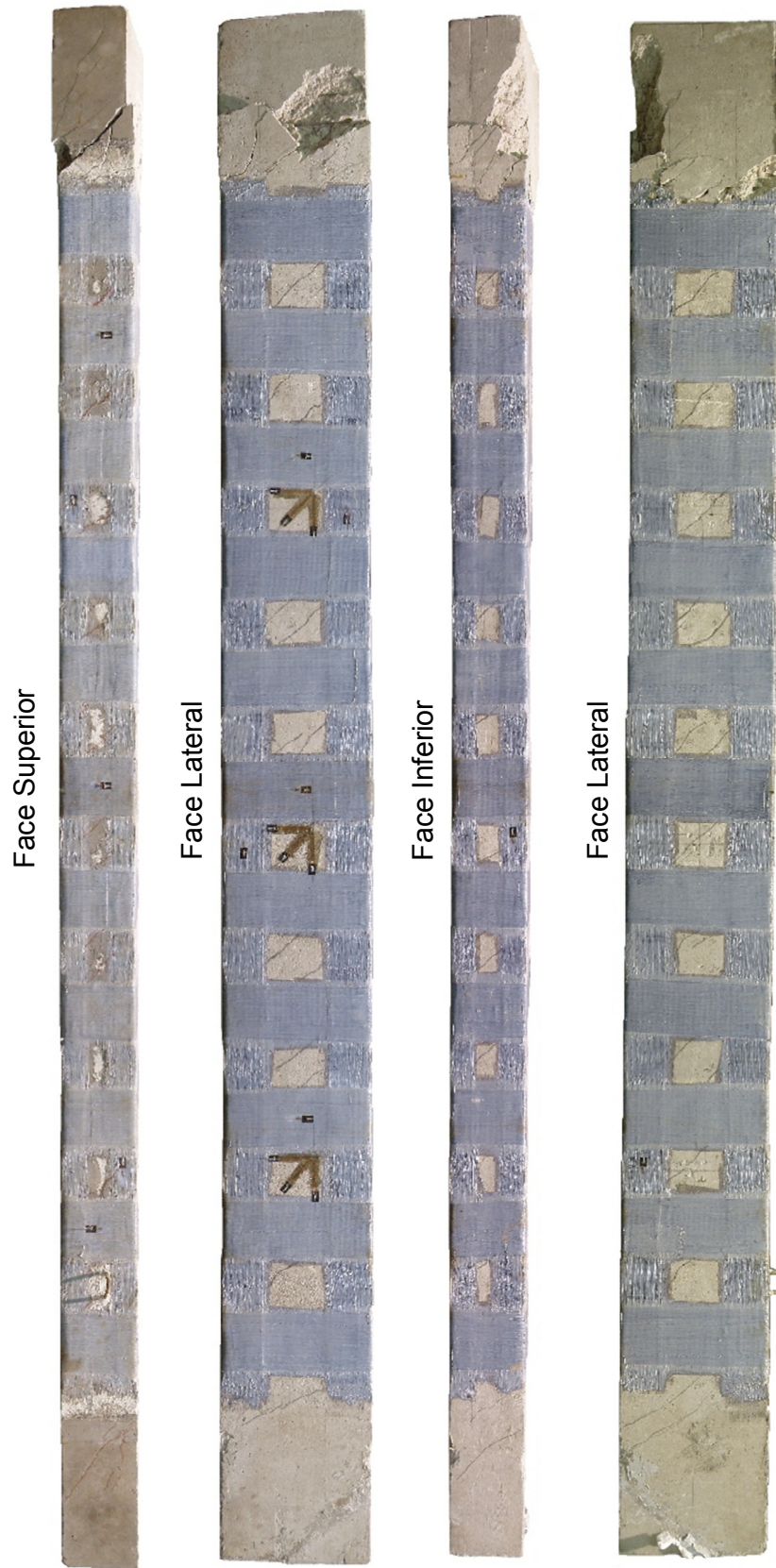


Figura B.38 – Configuração das fissuras da viga VTL1.

Ensaio VTL2



Figura B.39 – Ensaio da viga VTL2.



Figura B.40 – Detalhe da viga VTL2 solicitada à torção.

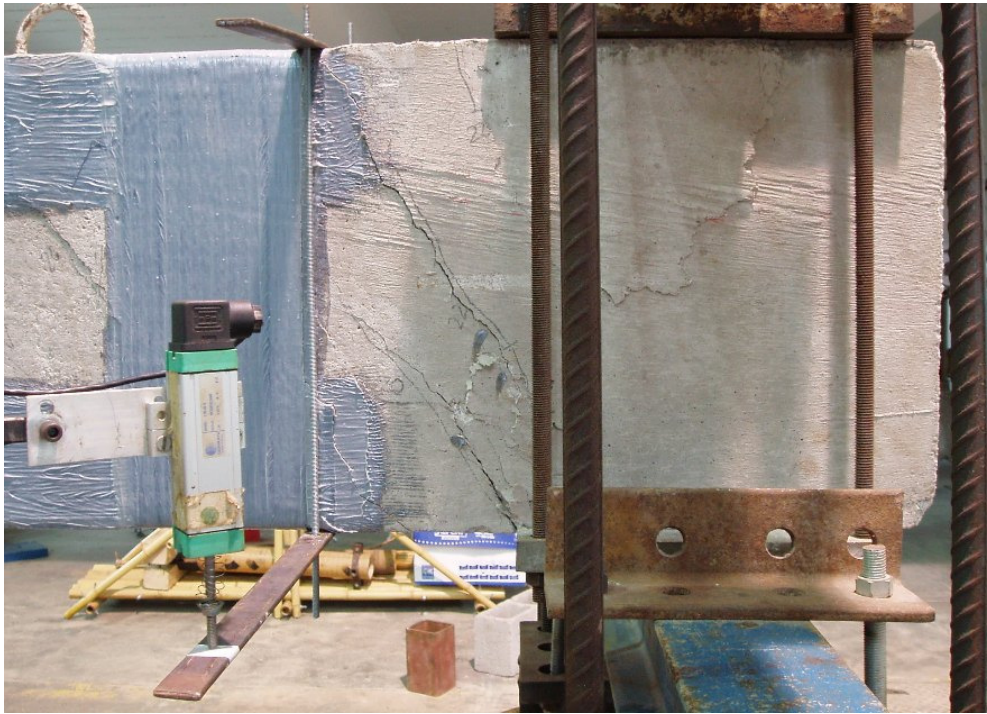


Figura B.41 – Detalhe da ruptura da viga VTL2 vista da direita.

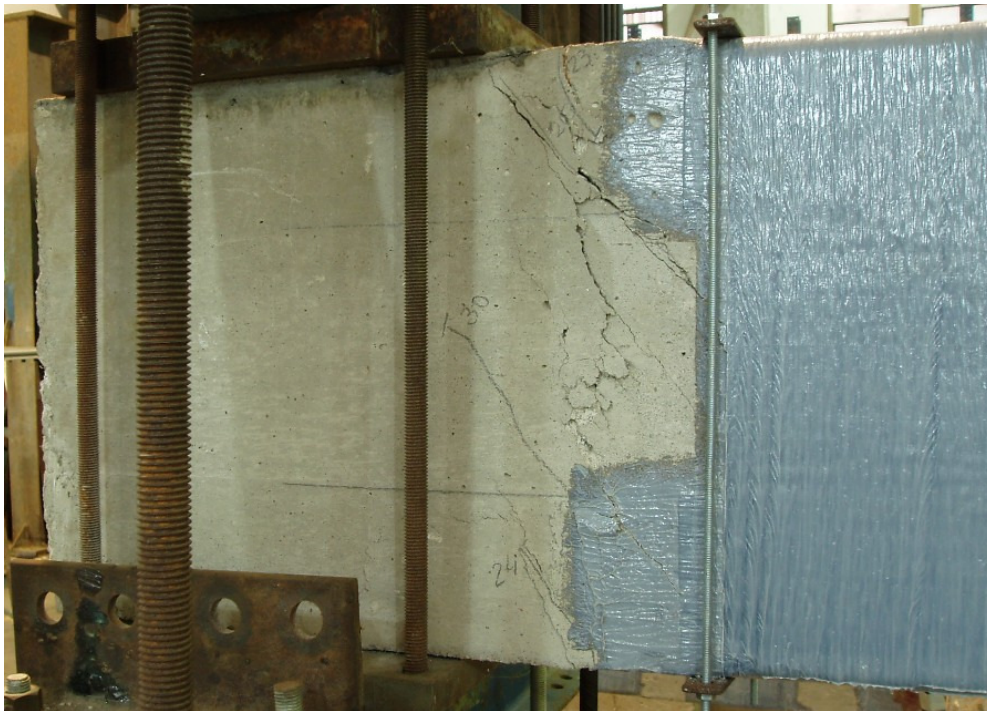


Figura B.42 – Detalhe da ruptura da viga VTL2 vista da esquerda.



Figura B.43 – Detalhe do descolamento do CFC da viga VTL2 vista da direita.



Figura B.44 – Detalhe do descolamento do CFC da viga VTL2 vista da esquerda.

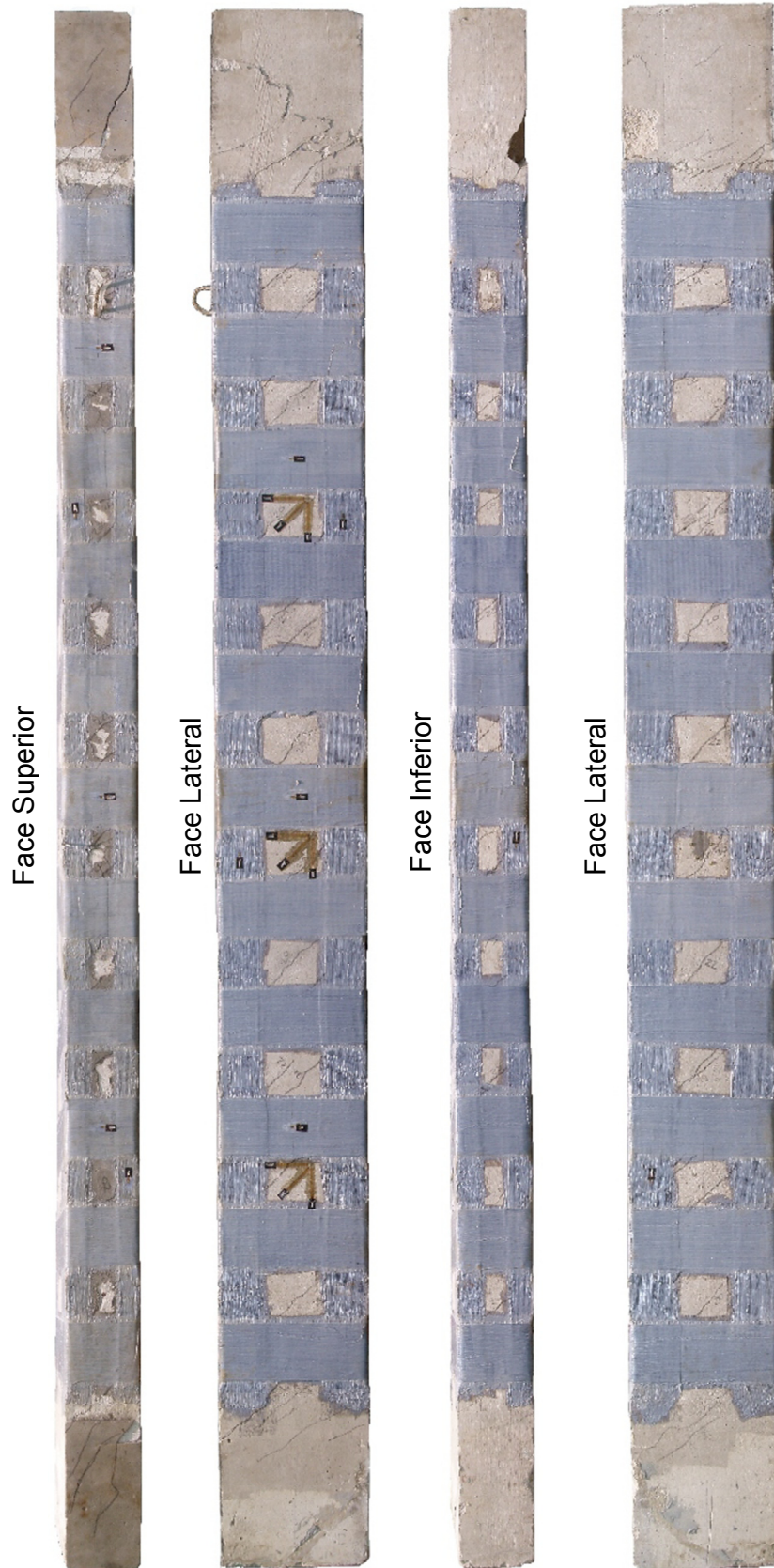


Figura B.45 – Configuração das fissuras da viga VTL2.

Ensaio VTL3



Figura B.46 – Ensaio da viga VTL3.



Figura B.47 – Ensaio da viga VTL3 vista da direita.



Figura B.48 – Detalhe da viga VTL3 solicitada à torção.



Figura B.49 – Detalhe da ruptura da viga VTL3 vista da direita.



Figura B.50 – Detalhe das fissuras da viga VTL3 vista da direita.

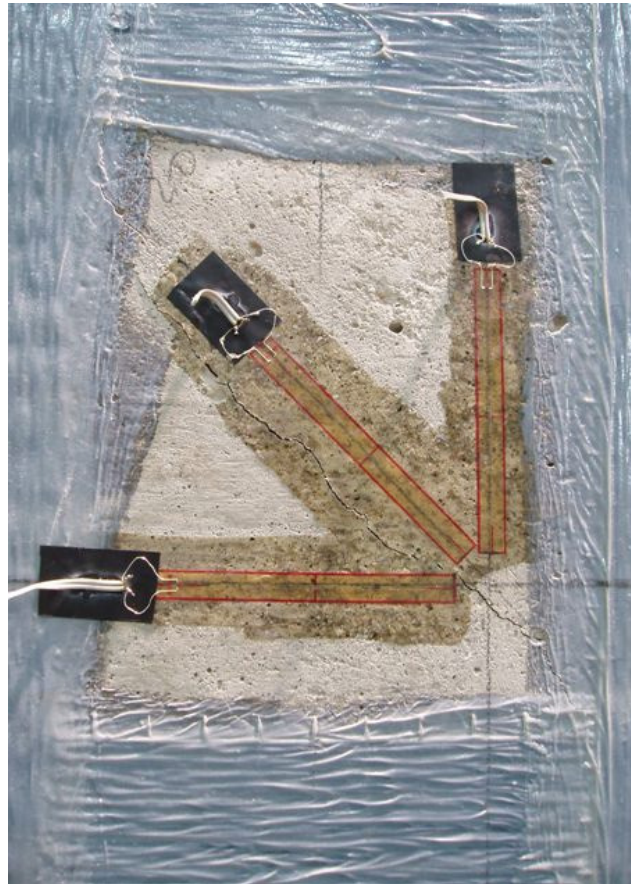


Figura B.51 – Detalhe dos extensômetros colados no concreto da viga VTL3.

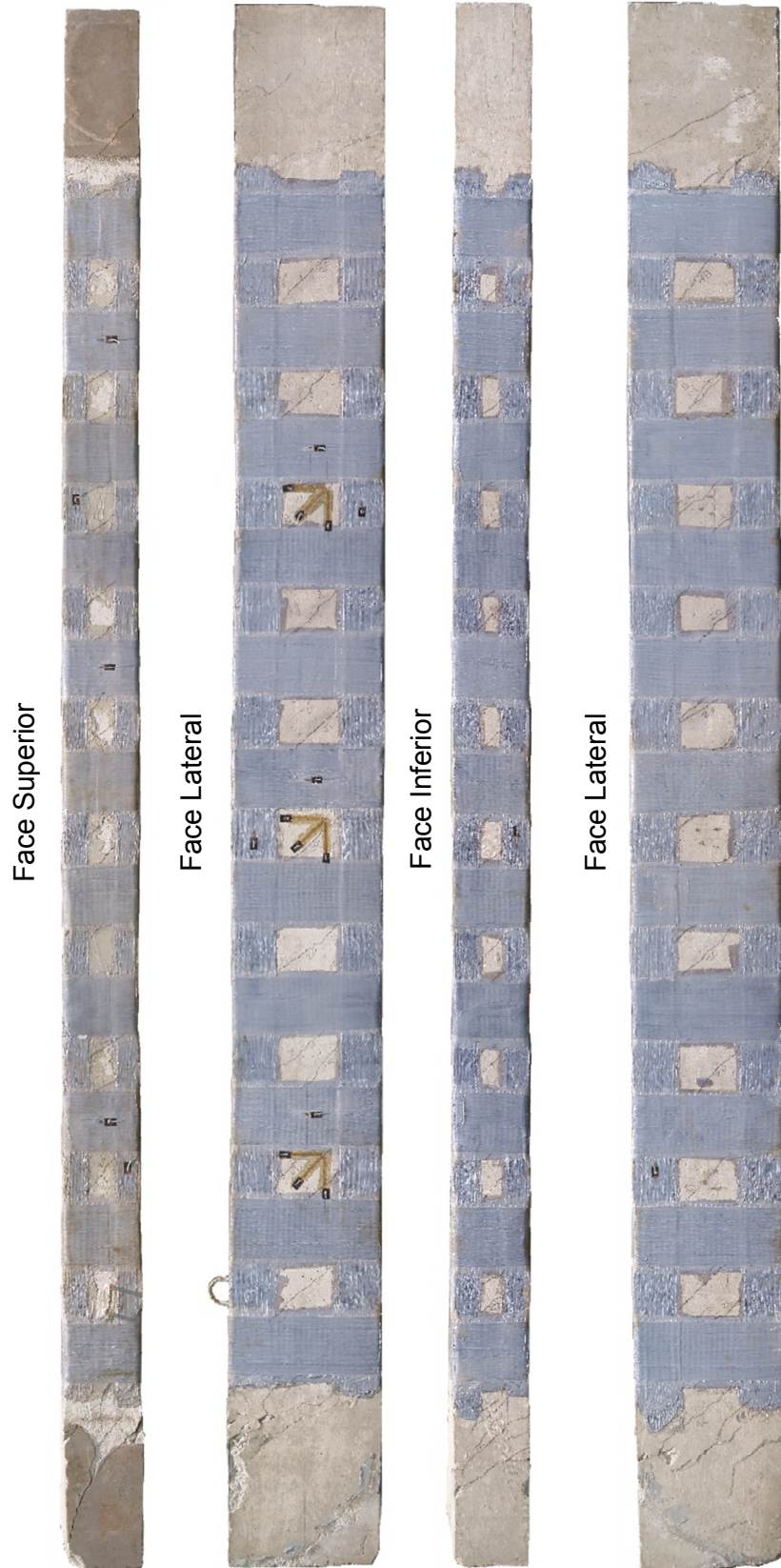


Figura B.52 – Configuração das fissuras da viga VTL3.

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](#)