



**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.



**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 $\varepsilon_\ell$ como Função de $f_{s\ell}$ e $f_{f\ell}$	113
6.2.9. Deformação Específica $\varepsilon_t$ 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 <a href="http://www.balvac.co.uk/upload/news">http://www.balvac.co.uk/upload/news</a> ).	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 <b>T</b> (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 $\alpha_\epsilon$ .	186
Figura 8.31 – Comparação entre deformações específicas últimas experimentais e deformações específicas calculadas a partir do Bulletin 14 da FIB considerando-se $\alpha_f$ .	186
Figura 8.32 – Comparação entre deformações específicas últimas experimentais e deformações específicas calculadas a partir do Bulletin 14 da FIB considerando-se $\alpha_G$ .	187
Figura 8.33 – Comparação entre deformações específicas últimas experimentais e deformações específicas calculadas a partir do Bulletin 14 da FIB considerando-se $\alpha_{Ap}$ .	187



Figura 8.34 – Razões $\eta_t$ do CFC longitudinal.	189
Figura 8.35 – Razões $\eta_t$ 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 $\theta_u$ 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 $\eta$ e $\beta$ .	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 $\eta_t$ e $\eta_\ell$ para os ângulos $\alpha_\epsilon$ , $\alpha_f$ , $\alpha_\sigma$ e $\alpha_{Ap}$ .	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 $\theta_u$ 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
$A_\ell$	Área de uma barra da armadura longitudinal
$A_f$	Área do reforço
$A_\ell$	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
$f_\ell$	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
$f_\ell$	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
$\ell$	Perímetro da seção
$\ell$	Direção
$\ell_q$	Largura do painel
$N_\ell$	Resultante das forças na armadura longitudinal
$N_{\ell y}$	Força resultante para o escoamento da armadura longitudinal
$n_\ell$	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
$s_\ell$	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

$\alpha$	Ângulo de inclinação das bielas de concreto
$\beta$	Constante adimensional obtida por meio da solução da teoria da elasticidade
$\gamma$	Distorção na seção transversal
$\gamma_{lt}$	Distorção
$\varepsilon$	Deformação específica
$\varepsilon_0$	Deformação específica última do concreto
$\varepsilon_d$	Deformação específica na direção do eixo da fissura
$\varepsilon_d$	Deformação específica média na biela
$\varepsilon_{ds}$	Deformação específica máxima na superfície
$\varepsilon_f$	Deformação específica do reforço
$\varepsilon_{f,e}$	Deformação específica efetiva no reforço
$\varepsilon_{ke,f}$	Deformação específica efetiva característica do compósito de fibras;
$\varepsilon_\ell$	Deformação específica na direção do eixo longitudinal
$\varepsilon_{ly}$	deformação específica de escoamento da armadura de aço longitudinal;
$\varepsilon_{ty}$	deformação específica de escoamento da armadura de aço transversal;
$\varepsilon_r$	Deformação específica na direção perpendicular ao eixo das fissuras
$\varepsilon_t$	Deformação específica na direção do eixo transversal
$\phi$	Ângulo de torção
$\phi(z)$	Ângulo de torção em função de $z$
$\rho_\ell$	Taxa geométrica de armadura longitudinal
$\rho_t$	Taxa geométrica de armadura transversal
$\rho_{s\ell}$	Taxa geométrica de armadura longitudinal de aço
$\rho_{st}$	Taxa geométrica de armadura transversal de aço
$\rho_{f\ell}$	Taxa geométrica de armadura longitudinal de reforço
$\rho_{ft}$	Taxa geométrica de armadura transversal de reforço
$\sigma_d$	Tensão de compressão na biela de concreto
$\sigma_d$	Tensão na direção do eixo das fissuras
$\sigma_\ell$	Tensão na direção longitudinal

$\sigma_p$	Tensão máxima de compressão na biela
$\sigma_r$	Tensão na direção perpendicular ao eixo das fissuras
$\sigma_t$	Tensão na direção transversal
$\tau$	Tensão cisalhante
$\tau_{m\acute{a}x}$	Tensão cisalhante máxima
$\tau(r)$	Tensão cisalhante em função de $r$
$\eta$	Constante adimensional obtida por meio da solução da teoria da elasticidade
$\omega_\ell$	Taxa mecânica de armadura longitudinal
$\omega_t$	Taxa mecânica de armadura transversal
$\psi$	Curvatura
$\zeta$	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