

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Marcélia Gomes Machado

**Estudo Experimental da Ductilidade de Vigas em Concreto
Armado Reforçadas à Flexão Utilizando Compósitos
com Tecido de Fibras de Carbono**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre pelo Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.
Área de Concentração: Estruturas.

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

Rio de Janeiro

Julho de 2004



Marcélia Gomes Machado

**Estudo experimental da ductilidade de vigas em concreto
armado reforçadas à flexão utilizando compósitos
com tecido de fibras de carbono**

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

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

Prof. Emil de Souza Sánchez Filho, D.Sc.
Co-orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

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

Prof. Robson Luiz Gaiofatto, D.Sc.
Universidade Católica de Petrópolis

Prof. Ricardo Einsfeld, D.Sc.
Universidade Estadual do Rio de Janeiro

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

Rio de Janeiro, 9 de Julho de 2004.

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

Marcélia Gomes Machado

Graduou-se em Engenharia Civil na UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora). Na UFJF, desenvolveu projetos de Iniciação Científica na área de Viga de Concreto Armado Reforçado com Fibras de Carbono. Na PUC-Rio desenvolveu seu trabalho de pesquisa com ênfase em Concreto Armado.

Ficha Catalográfica

Machado, Marcélia Gomes

Estudo experimental da ductilidade de vigas em concreto armado reforçadas à flexão utilizando compósitos com tecido de fibras de carbono / Marcélia Gomes Machado; orientadores: Marta de Souza Lima Velasco, Emil de Souza Sánchez Filho. - Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2004.

301 f. : il. ; 29,7 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Reforço Estrutural, 3. Concreto Armado, 4. Fibra de Carbono. I. Velasco, Marta de Souza Lima. II. Sánchez Filho, Emil de Souza. III. Pontifícia Universidade Católica. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Para meus queridos pais, Rita e Paulo,
pelo amor, incentivo,
apoio e confiança.

Agradecimentos

À minha orientadora, professora Marta de Souza Lima Velasco, pela dedicação e compreensão.

Ao meu co-orientador, professor Emil de Souza Sanchez Filho, por compartilhar comigo seu conhecimento, pela paciência, compreensão e dedicação permanente.

Aos meus amados pais, pelo apoio, carinho e compreensão ao longo deste trabalho que só foi possível por acreditarem no meu sucesso e estarem sempre ao meu lado.

Aos funcionários Ana Roxo, Euclídes, José Nilson, Evandro e Haroldo por me oferecerem condições de percorrer esse caminho, concretizando este trabalho.

Aos meus amigos, por terem sido grandes companheiros durante esta jornada, em especial ao Flávio, Renato, Ramires, Júlio, Juliana e Marcela que contribuíram muito para a conclusão deste trabalho.

Ao João Batista do IBTS – Instituto Brasileiro de Telas Soldadas, pela atenção e generosidade ao me ajudar no período de aquisição dos materiais.

À GERDAU pela doação de todo aço necessário e à LAFARGE BRASIL S.A., empresa que forneceu o concreto utilizado nas vigas ensaiadas.

Ao Guilherme Andrade da ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland, pela ajuda na aquisição do concreto para a confecção das vigas.

À RHEOTEC, em especial ao Prof. Robson Luiz Gaiofatto, pelo fornecimento de todo o tecido de fibra de carbono necessário e essencial para essa pesquisa.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Ao meu namorado Mahomed, pelo amor, carinho e compreensão durante todos os momentos de execução deste trabalho.

Ao Cris Anderson por sermos amigos pelo destino, mas grandes irmãos por escolha. Pela verdadeira amizade, preocupação e carinho.

À Fernanda, Antônio, Lincoln e Tininha, pela amizade e carinho com que me acolheram aqui no Rio de Janeiro, e ao Mahteus e Mahrcello por me proporcionarem vários momentos de alegria e felicidade, ajudando-me a superar a distância e a saudade da minha família.

A Deus pela família maravilhosa que tenho, pelos amigos que conquistei, pela força e graça de poder realizar este trabalho.

Resumo

Machado, Marcélia Gomes; Velasco, Marta de Souza Lima; Sánchez Filho, Emil de Souza. **Estudo Experimental da Ductilidade de Vigas em Concreto Armado Reforçadas à Flexão Utilizando Compósitos com Tecido de Fibras de Carbono**. Rio de Janeiro, 2004. 301p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho experimental tem como objetivo estudar a ductilidade de vigas retangulares de concreto armado reforçadas à flexão utilizando compósitos com tecido de fibras de carbono.

No estudo realizado são apresentados os conceitos clássicos de ductilidade e é proposta uma nova sistemática para obtenção do índice de ductilidade, baseada nas considerações da energia elástica e da energia inelástica. A ductilidade é determinada por meio de um índice energético, que se caracteriza como uma forma mais eficiente para a determinação e análise da ductilidade em elementos estruturais.

O programa experimental consistiu no ensaio de sete vigas bi-apoiadas, sendo uma viga de referência e as demais reforçadas à flexão com tecido de fibras de carbono. Todas as vigas possuem as mesmas características mecânicas e geométricas e foram dimensionadas de modo a garantir a ruptura por flexão. A viga de referência, a primeira ensaiada, não foi reforçada e serviu para comparações de incremento de rigidez e resistência após a aplicação do reforço. As vigas reforçadas foram divididas em dois grupos. O grupo A é constituído de duas vigas, reforçadas inicialmente com uma e duas camadas de tecido de fibra de carbono. O grupo B é constituído por quatro vigas que foram reforçadas após um carregamento inicial. Neste grupo, duas vigas foram reforçadas com uma camada de tecido de fibra de carbono e as outras duas foram reforçadas com duas camadas de tecido de fibras de carbono, correspondendo à mesma área total de reforço das anteriores.

Todas as vigas foram concretadas, instrumentadas e ensaiadas no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio. Os ensaios das vigas do grupo B foram realizados com as vigas pré-ensaiadas, reforçadas sob deformação constante e em seguida levadas à ruptura. A deformação foi mantida constante durante a aplicação e o período de cura do reforço.

Os resultados obtidos em termos de carga, flecha, momento, curvatura, ductilidade energética e rotação plástica foram analisados. Os estudos realizados mostraram que o reforço com compósitos de fibras de carbono é uma técnica eficaz, que as vigas apresentam ductilidade adequada e que os índices energéticos propostos são adequados para este tipo de estudo.

Palavras-chave

Reforço Estrutural; Concreto Armado; Compósitos de Fibra de Carbono; Ductilidade.

Abstract

Machado, Marcélia Gomes; Velasco, Marta de Souza Lima; Sánchez Filho, Emil de Souza (Advisors). **Experimental Study on Ductility of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Flexure with Carbon Fiber Composites**. Rio de Janeiro, 2004. 301p. MSc. Dissertation – Civil Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The objective of this experimental work is to study the ductility of reinforced concrete beams strengthened in flexure using externally bonded carbon fiber fabric composites.

This study presents the classic concepts of ductility and proposes a new systematic to obtain the ductility index, which is based on the considerations of elastic and inelastic energy. The ductility was determined by an energetic index, which has seen to be a more efficient method to establish and analyze the ductility of structural elements.

The experimental program consisted of seven beams tests. One was used as a control beam without external reinforcement and the others were strengthened with carbon fibers in order to resist flexural load. All the beams had the same mechanical and geometrical characteristics and were designed to fail in flexure. The control beam was not strengthened and its purpose was to compare the stiffness' increase and resistance after the strength. The strengthened beams were divided in two groups. Group A was constituted by two beams, initially strengthened by one and two layers of carbon fiber fabric. Group B was formed by four beams which were strengthened after the application of an initial load. In this group, two beams were strengthened by one layer of carbon fiber fabric and the other two were strengthened by two layers, which corresponded to the same area of the others.

All the beams were cast, instrumented and tested in the Structural and Materials Laboratory at PUC-Rio. Group B tests were performed with the pre-tested beams strengthened under constant strain, and then loaded up to rupture. The strain was kept constant during the application and cure of the external reinforcement.

The results obtained in terms of load, deflection, resistant moment, curvature, energetic ductility indexes and plastic rotation were analyzed. The study showed that the reinforcement using carbon fiber fabric composites is an efficient technique, the beams presented adequate ductility and the proposed energetic ductility indexes are consistent formulae for this kind of study.

Keywords

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

Sumário

1 Introdução	34
1.1. Considerações Gerais	34
1.2. Objetivos	35
1.3. Organização do Trabalho	36
2 Reforço Estrutural com Tecidos de Fibras de Carbono	38
2.1. Introdução	38
2.2. Compósitos de Fibras de Carbono	39
2.3. Resina Epoxídica	46
2.4. Tipos de Ruptura de Vigas Reforçadas	48
2.5. Reforço à Flexão	52
2.5.1. Análise no Estado Limite Último	54
3 Conceitos Clássicos de Ductilidade	58
3.1. Introdução	58
3.2. Índices de Ductilidade	59
3.3. Energia de Deformação	60
3.4. Índice de Ductilidade Energética	62
3.5. Ductilidade de Vigas Reforçadas	67
3.5.1. Relação Momento Fletor x Curvatura	68
3.5.2. Vigas Reforçadas com Tecido de Fibra de Carbono	70
3.5.2.1. Homogeneização da Seção	71
3.5.2.2. Seção Fissurada	73
3.5.3. Determinação dos Índices de Ductilidade Energéticos	77
3.5.4. Rotação Plástica	81
4 Estudos sobre Ductilidade de Vigas Reforçadas	86
4.1. Introdução	86
4.2. Estudo de BENCARDINO (2002)	86

4.3. Estudo de MACHIDA e MARUYAMA (2002)	89
4.4. Estudo de DUTHINH e STARNES (2001)	90
4.5. Estudo de GRACE et al. (2002)	94
4.6. Estudo de PARRA e BENLLOCH (2001)	97
4.7. Estudo de EL MIHILMY e TEDESCO(2000)	100

5 Programa Experimental 107

5.1. Introdução	107
5.2. Materiais	108
5.2.1. Concreto	108
5.2.1.1. Resistência à Compressão Simples do Concreto	109
5.2.1.2. Resistência à Compressão Diametral do Concreto	110
5.2.1.3. Módulo de Elasticidade do Concreto	111
5.2.2. Aço	113
5.2.3. Tecido de Fibra de Carbono	114
5.2.4. Materiais Necessários para a Aplicação do Tecido de Fibra de Carbono	115
5.2.4.1. Resina de Imprimação	115
5.2.4.2. Resina Epoxídica	116
5.2.5. Ensaio de Resistência à Tração do Compósito de Fibra de Carbono	117
5.3. Descrição das Vigas	119
5.3.1. Características Mecânicas e Geométricas das Vigas	119
5.3.2. Cálculos Básicos	121
5.3.3. Dimensionamento à Flexão	121
5.3.4. Dimensionamento à Força Cortante	122
5.3.5. Reforço à Flexão	124
5.4. Confeção das vigas	126
5.4.1. Formas	126
5.4.2. Concretagem	129
5.4.3. Execução do Reforço	129
5.4.4. Instrumentação das Vigas	130
5.4.4.1. Extensômetro Mecânico	130

5.4.4.2. Extensômetros Elétricos de Resistência	131
5.4.4.3. Deflectômetros Elétricos	131
5.5. Execução dos Ensaios das Vigas	132
5.6. Descrição dos Ensaios	134
5.6.1. Viga de Referência	134
5.6.2. Viga AI	135
5.6.3. Viga AII	136
5.6.4. Viga BI-1	137
5.6.5. Viga BI-2	139
5.6.6. Viga BII-1	140
5.6.7. Viga BII-2	141
6 Análise dos Resultados	143
6.1. Introdução	143
6.2. Capacidade Resistente das Vigas	143
6.3. Gráficos Obtidos nos Ensaios	147
6.4. Índices de Ductilidade	147
6.4.1. Índices de Ductilidade de Flecha	148
6.4.2. Índices de Ductilidade de Curvatura	149
6.5. Índices de Ductilidade Energética	151
6.5.1. Índices de Ductilidade Energética de Flecha	151
6.5.2. Índices de Ductilidade Energética de Curvatura	152
6.6. Análise das Cargas	153
6.6.1. Cargas de Fissuração	154
6.6.2. Cargas de Escoamento	154
6.6.3. Cargas de Ruptura	155
6.7. Análise das Flechas	156
6.8. Curvas Experimentais Momento x Curvatura	158
6.9. Análise da Rigidez das Vigas	160
6.9.1. Rigidez de fissuração	161
6.9.2. Rigidez de escoamento	162
6.9.3. Rigidez de ruptura	162
6.10. Análise Comparativa dos Índices de Ductilidade	163

6.11. Rotação Plástica	170
7 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	172
Referências Bibliográficas	177
Anexo A - Fotos	183
Anexo B - Resultados dos Ensaios das Barras de Aço	207
Anexo C - Dados obtidos pelo Extensômetro Mecânico	214
Anexo D - Gráfico dos Ensaios das Vigas	236
Anexo E - Determinação dos Momentos e Curvaturas	263
Anexo F - Determinação da Energia Total e Energia Elástica	272
Anexo G - Determinação dos Índices de Ductilidade Energética	291
Anexo H - Determinação da Rotação Plástica	296

Lista de figuras

- FIGURA 2.1 - Diagrama tensão-deformação específica de fibras e metais; adaptada de BEBER (2003). 41
- Figura 2.2 – Compósito de epóxi com fibras de carbono; www.rheotec.com.br (2002). 42
- Figura 2.3 - Reforço em vigas de concreto armado utilizando os PRFC; www.masterbuilders.com.br (2003) 44
- Figura 2.4 – Tecido de fibra de carbono; www.masterbuilders.com.br (2003) 44
- Figura 2.5 – Diagrama tensão-deformação específica de tecidos de fibras de carbono (MASTER BUILDERS TECHNOLOGIES, 1996). 45
- Figura 2.7 – Efeito de *peeling off* na interface concreto/compósito; adaptada de BEBER (2003) 52
- Figura 2.8 – Diagrama esquemático dos parâmetros da seção transversal reforçada. 54
- Figura 2.9. – Hipóteses para o comportamento mecânico da armadura de flexão consideradas no dimensionamento do reforço à flexão. a) quando a armadura negativa atinge o escoamento; b) quando a armadura negativa não atinge o escoamento. 55
- Figura 2.10 – Fluxograma da metodologia de determinação da resistência à flexão; adaptada de ARAÚJO (2002). 56
- Figura 3.1 – Diagramas tipo que permitem analisar a energia potencial de deformação de elementos de concreto armado: a) carga x flecha; b) momento x curvatura; c) momento x rotação; adaptados de NAAMAN e JEONG (2001). 61
- Figura 3.2 – Diagrama carga x flecha ($P \times \delta$) real e teórico para obtenção das parcelas de energia; adaptada de ARAÚJO (2002). 63
- Figura 3.3 – Comparação das parcelas da energia elástica e energia inelástica; adaptada de NAAMAN e JEONG (2001) 64
- Figura 3.4 – Esquema para a obtenção do índice de ductilidade energética: (a) curva teórica $P \times \delta$; (b) determinação da inclinação da

linha de fechamento do triângulo que define a área da energia elástica; adaptada de ARAÚJO (2002).	66
Figura 3.5 - Parâmetros básicos de uma viga solicitada à flexão.	68
Figura 3.6 – Estágios básicos da relação momento x curvatura.	69
Figura 3.7 – Parâmetros geométricos da seção reforçada com CFC.	71
Figura 3.8 - Relação tri-linear $M \times k$.	74
Figura 3.9 - Consideração do momento no estágio de ruptura da seção.	75
Figura 3.10 - Relação bi-linear $M \times k$.	75
Figura 3.11 – Gráfico carga x flecha teórico.	78
Figura 3.12– Gráfico teórico da relação momento x curvatura.	81
Figura 3.14 – Esquema das curvaturas das vigas.	81
Figura 3.15 – Área delimitada pela curvatura de fissuração.	82
Figura 3.16 – Esquema para obtenção de triângulos analisando-se a curvatura relativa ao escoamento.	83
Figura 3.17 – Esquema para obtenção da relação de triângulos analisando-se a curvatura relativa à ruptura.	84
Figura 4.1 – Índice de Ductilidade pela norma da JSCE; adaptada de MACHIDA e MARUYAMA (2002).	90
Figura 4.2 – Momento x curvatura para os valores experimentais e valores teóricos; adaptada de DUTHINH e STARNES (2001)	93
Figura 4.3 – Parâmetros geométricos das vigas ensaiadas; adaptada de GRACE et al. (2002).	96
Figura 4.4 – Detalhamento das vigas ensaiadas; adaptada de PARRA e BENLLOCH (2001).	98
Figura 4.5 – Curva carga x flecha teórica para vigas de concreto armado reforçadas com polímeros reforçados com fibras (PRF); adaptada de EL MIHILMY e TEDESCO (2000).	102
Figura 4.6 – Relação de momento x curvatura para vigas reforçadas com PRF; adaptada de EL MIHILMY e TEDESCO (2000).	105
Figura 5.1 – Diagrama tensão x idade do concreto utilizado.	110
Figura 5.2 – Gráfico tensão x deformação específica dos corpos-de-prova de concreto.	113
Figura 5.3. – Dimensões dos corpos-de-prova para ensaio de tração;	

ASTM D 3039.	118
Figura 5.4- Esquema de carregamento e seção transversal das vigas (cotas em cm).	120
Figura 5.5 – Diagramas de esforços solicitantes das vigas; a) digrama de momento fletor; b) diagrama de força cortante.	120
Figura 5.6 – Detalhamento das armaduras das vigas.	123
Figura 5.7 – Disposição do tecido de fibra de carbono; a) disposição ao longo do comprimento para todas as vigas; b) vigas AI, BI-1, BI-2; c) vigas AII,BII-1,BII-2. (cotas em cm)	124
Figura 5.8 – Seção transversal das formas (cotas em cm).	126
Figura 5.9 – Detalhamento das formas – vista superior;	127
Figura 5.10 – Detalhamento das formas – vista lateral.	128
Figura 5.11 - Posicionamento das placas de alumínio para medição da deformação do concreto com deflectômetro mecânico. (cotas em cm).	129
Figura 5.12 – Posicionamento dos deflectômetros elétricos e dos extensômetros elétricos de resistência.	132
Figura 5.13- Sistema de aplicação de carga.	133
Figura 6.1 – Gráfico comparativo entre as cargas de ruptura teóricas e experimentais das vigas ensaiadas.	144
Figura 6.2 - Gráfico comparativo entre as cargas de ruptura e experimentais para as vigas do grupo A.	145
Figura 6.3 - Gráfico comparativo entre as cargas de ruptura experimentais para as vigas do grupo B.	145
Figura 6.4 - Gráfico comparativo entre as cargas de ruptura e experimentais das vigas reforçadas e da viga de referência.	146
Figura 6.5 – Gráfico comparativo do índice de ductilidade de flecha das vigas reforçadas em relação à VR.	149
Figura 6.6 – Gráfico comparativo do índice de ductilidade de curvatura das vigas reforçadas em relação à VR.	150
Figura 6.7– Gráfico comparativo do índice de ductilidade energético de flecha das vigas reforçadas em relação à VR.	152
Figura 6.8 – Gráfico comparativo do índice de ductilidade energético de curvatura das vigas reforçadas em relação à VR.	153

Figura 6.9 – Gráfico carga x flecha de todas as vigas ensaiadas.	157
Figura 6.10 – Gráfico momento x curvatura das vigas ensaiadas.	159
Figura 6.11 – Gráfico comparativo da rigidez de fissuração entre as vigas reforçadas e a viga VR.	161
Figura 6.12 – Gráfico comparativo da rigidez de escoamento entre as vigas reforçadas e a viga VR.	162
Figura 6.13 – Gráfico comparativo da rigidez de ruptura entre as vigas reforçadas e a viga VR.	162
Figura 6.14 – Gráfico comparativo dos índices de ductilidade para a viga VR.	164
Figura 6.15 - Gráfico comparativo dos índices de ductilidade para a viga AI.	164
Figura 6.16 - Gráfico comparativo dos índices de ductilidade para a viga AII.	165
Figura 6.17 - Gráfico comparativo dos índices de ductilidade para a viga BI-1.	165
Figura 6.18 - Gráfico comparativo dos índices de ductilidade para a viga BI-2.	166
Figura 6.19 - Gráfico comparativo dos índices de ductilidade para a viga BII-1.	166
Figura 6.20 - Gráfico comparativo dos índices de ductilidade para a viga BII-2.	167
Foto A.1- Ensaio de compressão diametral do concreto.	183
Foto A.2 – Corpos-de-prova de concreto antes e depois do ensaio.	184
Foto A.3 – Sistema de aplicação de carga e realização do ensaio.	184
Foto A.4 – Tecido de fibra de carbono utilizado no sistema de reforço das vigas.	185
Foto A.5 – Tecido de fibra de carbono com destaque para (a) sentido das fibras e (b) costura no verso do tecido (b).	185
Foto A.6– Corpos-de-prova de compósitos de fibra de carbono com placas de alumínio nas extremidades.	186
Foto A.7– Ensaio dos corpos-de-prova de compósitos de fibra de carbono	

com placas de alumínio nas extremidades com destaque para a (a) frente e o (b) verso.	186
Foto A.8 – Equipamentos utilizados para a realização e aquisição dos dados do ensaio nos corpos-de-prova de fibra de carbono.	187
Foto A.9 – Detalhe da ruptura de um dos corpos-de-prova de compósito de fibra de carbono durante a realização do ensaio.	187
Foto A.10 – Resina de Imprimação (a) preparação e (b) mistura pronta para a aplicação.	188
Foto A.11 – Resina epóxi (a) componentes A e B da resina; (b) preparação da resina para a aplicação.	188
Foto A.12 - Armadura das vigas ensaiadas.	189
Foto A.13 - Formas das vigas.	189
Foto A.14 – Preparação das vigas para a concretagem; posicionamento das armaduras nas formas das vigas.	190
Foto A.15 – Vigas Concretadas.	190
Foto A.16 – Extensômetro usado nas barras de aço da armadura.	191
Foto A.17 – Extensômetro elétrico usado no compósito de fibra de carbono.	191
Foto A.18 – Extensômetro mecânico utilizado na leitura das deformações do concreto durante o ensaio das vigas.	191
Foto A.19 – Posicionamento dos deflectômetros elétricos usados para medir as flechas nos ensaios das vigas VR, AI e AII.	192
Foto A.20 – Posicionamento dos deflectômetros elétricos usados para medir as flechas nos ensaios das vigas BI-1, BI-2, BII-1 e BII-2.	192
Foto A.21 – Pórtico utilizado para a realização dos ensaios.	193
Foto A.22 – Sistema de aquisição de dados.	194
Foto A.23 – (a) aplicação da resina epóxi na superfície que receberá o tecido; b)duas camadas de tecido preparadas para serem aplicadas.	194
Foto A.24 – Ruptura da viga VR por esmagamento da zona de compressão.	195
Foto A.25 – Detalhes do esmagamento do concreto na zona de compressão. (a) vista da parte da frente da viga; (b) vista do outro lado da viga.	195

Foto A.26 – Ruptura do compósito entre o meio do vão e ponto de aplicação de carga.(vista lateral direita)	196
Foto A.27 – Detalhes da parte do compósito após a ruptura com destaque para a camada de concreto arrancada; (a) frente e (b) verso.	196
Foto A.28 – Ruptura do compósito entre o meio do vão e ponto de aplicação de carga.(vista lateral esquerda)	197
Foto A.29 – Detalhe do meio da viga após a ruptura mostrando a fissuração ocorrida durante a realização do ensaio.	197
Foto A.30 – Viga logo após a ruptura por flexão seguida do rompimento do compósito de fibra de carbono.	198
Foto A.31 – Detalhe do compósito de fibra de carbono após a ruptura. (vista frontal esquerda da viga)	198
Foto A.32 – Detalhe do compósito de fibra de carbono após a ruptura. (vista frontal direita da viga)	199
Foto A.33 – Compósito de fibra de carbono após a ruptura, com destaque para as partes de concreto.	199
Foto A.34 – Viga logo após a ruptura por flexão seguida do rompimento do compósito de fibra de carbono, com arrancamento da camada de concreto.	200
Foto A.35 – Detalhe da ruptura com destaque para a ruptura do tecido de fibra de carbono.	200
Foto A.36 – Detalhe do compósito após a ruptura arrancando a camada de cobertura de concreto.	201
Foto A.37 – Parte central da viga após a ruptura do compósito de fibra de carbono.	201
Foto A.38 – Detalhes da fissuração antes da ruptura da viga; (a) vista frontal – lado esquerdo e (b) vista frontal lado direito.	202
Foto A.39 – Viga após a ruptura do compósito de fibra de carbono.	202
Foto A.40 – Detalhes da fissuração da viga e da ruptura do compósito.	203
Foto A.41 – Parte central da viga após a ruptura explosiva do compósito de fibra de carbono.	203
Foto A.42 – Detalhe da ruptura da viga com descolamento quase total do compósito de fibra de carbono.	204

Foto A.43 – Detalhe das duas camadas de compósito de fibra de carbono colados na viga.	205
Foto A.44 – Descolamento do compósito de fibra de carbono.	205
Foto A.45 – Viga após a ruptura do compósito.	206
Foto A.46 – Detalhe da ruptura do compósito de fibra de carbono.	206

Figura B.1 - Diagrama tensão x deformação específica da primeira barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 5,0 mm .	207
---	-----

Figura B.2 - Diagrama tensão x deformação específica da segunda barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 5,0 mm .	207
--	-----

Figura B.3 - Diagrama tensão x deformação específica da terceira barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 5,0 mm .	207
---	-----

Figura B.4 - Diagrama tensão x deformação específica da primeira barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 6,3 mm .	208
---	-----

Figura B.5 - Diagrama tensão x deformação específica da segunda barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 6,3 mm .	208
--	-----

Figura B.6 - Diagrama tensão x deformação específica da terceira barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 6,3 mm .	208
---	-----

Figura B.7 - Diagrama tensão x deformação específica da primeira barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 6,3 mm .	209
---	-----

Figura B.8 - Diagrama tensão x deformação específica da segunda barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 6,3 mm .	209
--	-----

Figura B.9 - Diagrama tensão x deformação específica da terceira barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 6,3 mm .	209
---	-----

Figura B.10 - Diagrama tensão x deformação específica da primeira barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 6,3 mm .	210
--	-----

Figura B.11 - Diagrama tensão x deformação específica da segunda barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 6,3 mm .	210
---	-----

Figura B.12 - Diagrama tensão x deformação específica da terceira barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 6,3 mm .	210
--	-----

Figura B.13 - Diagrama tensão x deformação específica da primeira barra	
---	--

de aço ensaiada com diâmetro nominal de 10mm.	211
Figura B.14 - Diagrama tensão x deformação específica da segunda barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 10mm.	211
Figura B.15 - Diagrama tensão x deformação específica da terceira barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 10mm.	211
Figura B.16 - Diagrama tensão x deformação específica da primeira barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 12,5 mm.	212
Figura B.17 - Diagrama tensão x deformação específica da segunda barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 12,5 mm.	212
Figura B.18 - Diagrama tensão x deformação específica da terceira barra de aço ensaiada com diâmetro nominal de 12,5 mm.	212
Figura C.1 – Gráfico seção transversal x deformação específica da viga VR.	217
Figura C.2 – Gráfico seção transversal x deformação específica da viga AI.	220
Figura C.3 – Gráfico seção transversal x deformação específica da viga AII.	223
Figura C.4 – Gráfico seção transversal x deformação específica da viga BI-1.	226
Figura C.5 – Gráfico seção transversal x deformação específica da viga BI-2.	229
Figura C.6 – Gráfico seção transversal x deformação específica da viga BII-1.	232
Figura C.7 – Gráfico seção transversal x deformação específica da viga BII-2.	235
Figura D.1 – Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 1 da viga VR.	236
Figura D.2 – Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 2 da viga VR.	236
Figura D.3 – Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao	

extensômetro 3 da viga VR.	236
Figura D.4 – Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 4 da viga VR.	237
Figura D.5 – Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 5 da viga VR.	237
Figura D.6 – Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 6 da viga VR.	237
Figura D.7 – Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 1 da viga VR.	238
Figura D.8 – Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 2 da viga VR.	238
Figura D.9 – Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 3 da viga VR.	238
Figura D.10 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 1 da viga AI.	239
Figura D.11 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 2 da viga AI.	239
Figura D.12 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 3 da viga AI.	239
Figura D.13 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 4 da viga AI.	240
Figura D.14 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 5 da viga AI.	240
Figura D.15 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 6 da viga AI.	240
Figura D.16 - Diagrama carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono referente ao extensômetro 7 da viga AI.	241
Figura D.17 - Diagrama carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono referente ao extensômetro 8 da viga AI.	241
Figura D.18 - Diagrama carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono referente ao extensômetro 9 da viga AI.	241
Figura D.19 – Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 1 da viga AI.	242

Figura D.20 – Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 2 da viga AI.	242
Figura D.21 – Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 3 da viga AI.	242
Figura D.22 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 1 da viga All.	243
Figura D.23 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 2 da viga All.	243
Figura D.24 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 3 da viga All.	243
Figura D.25 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 4 da viga All.	244
Figura D.26 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 5 da viga All.	244
Figura D.27 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 6 da viga All.	244
Figura D.28 - Diagrama carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono referente ao extensômetro 7 da viga All.	245
Figura D.29 - Diagrama carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono referente ao extensômetro 8 da viga All.	245
Figura D.30 - Diagrama carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono referente ao extensômetro 9 da viga All.	245
Figura D.31 – Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 1 da viga All.	246
Figura D.32 – Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 2 da viga All.	246
Figura D.33– Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 3 da viga All.	246
Figura D.34 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 1 da viga BI-1.	247
Figura D.35 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 2 da viga BI-1.	247
Figura D.36 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente	

ao extensômetro 3 da viga BI-1.	247
Figura D.37 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 4 da viga BI-1.	248
Figura D.38 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 5 da viga BI-1.	248
Figura D.39 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 6 da viga BI-1.	248
Figura D.40 - Diagrama carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono referente ao extensômetro 7 da viga BI-1.	249
Figura D.41 - Diagrama carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono referente ao extensômetro 8 da viga BI-1.	249
Figura D.42 - Diagrama carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono referente ao extensômetro 9 da viga BI-1.	249
Figura D.43– Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 1 da viga BI-1.	250
Figura D.44– Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 2 da viga BI-1.	250
Figura D.45– Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 3 da viga BI-1.	250
Figura D.46 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 1 da viga BI-2.	251
Figura D.47 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 2 da viga BI-2.	251
Figura D.48 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 3 da viga BI-2.	251
Figura D.49 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 4 da viga BI-2.	252
Figura D.50 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 5 da viga BI-2.	252
Figura D.51 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 6 da viga BI-2.	252
Figura D.52 - Diagrama carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono referente ao extensômetro 7 da viga BI-2.	253

Figura D.53 - Diagrama carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono referente ao extensômetro 8 da viga BI-2.	253
Figura D.54 - Diagrama carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono referente ao extensômetro 9 da viga BI-2.	253
Figura D.55– Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 1 da viga BI-2	254
Figura D.56– Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 2 da viga BI-2.	254
Figura D.57– Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 3 da viga BI-2.	254
Figura D.58 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 1 da viga BII-1.	255
Figura D.59- Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 2 da viga BII-1.	255
Figura D.60 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 3 da viga BII-1.	255
Figura D.61 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 4 da viga BII-1.	256
Figura D.62 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 5 da viga BII-1.	256
Figura D.63- Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 6 da viga BII-1.	256
Figura D.64 - Diagrama carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono referente ao extensômetro 7 da viga BII-1.	257
Figura D.65 - Diagrama carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono referente ao extensômetro 8 da viga BII-1.	257
Figura D.66 - Diagrama carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono referente ao extensômetro 9 da viga BII-1.	257
Figura D.67– Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 1 da viga BII-1.	258
Figura D.68– Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 2 da viga BII-1.	258
Figura D.69 *– Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 3 da	

viga BII-1.	258
Figura D.70- Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 1 da viga BII-2.	259
Figura D.71- Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 2 da viga BII-2.	259
Figura D.72- Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 3 da viga BII-2.	259
Figura D.73 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 4 da viga BII-2.	260
Figura D.74 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 5 da viga BII-2.	260
Figura D.75 - Diagrama carga x deformação específica do aço referente ao extensômetro 6 da viga BII-2.	260
Figura D.76 - Diagrama carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono referente ao extensômetro 7 da viga BII-2.	261
Figura D.77 - Diagrama carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono referente ao extensômetro 8 da viga BII-2.	261
Figura D.78 - Diagrama carga x deformação específica do tecido de fibra de carbono referente ao extensômetro 9 da viga BII-2.	261
Figura D.79– Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 1 da viga BII-2.	262
Figura D.80– Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 2 da viga BII-2.	262
Figura D.81– Diagrama carga x flecha referente ao deflectômetro 3 da viga BII-2.	262
Figura F.1 – Diagrama teórico $P \times \delta$.	272
Figura F.2 – Diagrama teórico $M \times k$.	277
Figura F.3 – Diagrama $P \times \delta$ da viga VR.	281
Figura F.4 – Diagrama $P \times \delta$ da viga AI	282
Figura F.5 – Diagrama $P \times \delta$ da viga AII	283
Figura F.6 – Diagrama $P \times \delta$ da viga BI-1.	283

Figura F.7– Diagrama $P \times \delta$ da viga BI-2	284
Figura F.8 – Diagrama $P \times \delta$ da viga BII -1.	285
Figura F.9 – Diagrama $P \times \delta$ da viga BII-2.	285
Figura F.10 – Diagrama $M \times k$ da viga VR.	286
Figura F.11 – Diagrama $M \times k$ da viga AI.	287
Figura F.12 – Diagrama $M \times k$ da viga AII.	287
Figura F.13 – Diagrama $M \times k$ da viga BI-1.	288
Figura F.14 – Diagrama $M \times k$ da viga BI-2.	288
Figura F.15 – Diagrama $M \times k$ da viga BII-1.	289
Figura F.16 – Diagrama $M \times k$ da viga BII-2.	289

Lista de Tabelas

Tabela 2.1- Propriedades típicas dos principais tipos de fibra; adaptada de Matthys-2000, apud ARAÚJO (2002).	41
Tabela 2.2 – Características e aspectos de instalação de mantas e tecidos de fibra de carbono.	45
Tabela 2.3 – Modos de ruptura possíveis, adaptado de BEBER (2003).	49
Tabela 4.1 - Índices de ductilidade.	88
Tabela 4.2 – Relação de ductilidade entre as vigas reforçadas e a viga de referência.	88
Tabela 4.3 – Propriedades do laminado de carbono.	91
Tabela 4.4 – Propriedades do adesivo.	92
Tabela 4.5 – Resultados de DUTHINH e STARNES (2001).	94
Tabela 4.6- Propriedades mecânicas* das fibras utilizadas.	95
Tabela 4.7 - Propriedades das resinas epóxi.	95
Tabela 4.8 – Comparação dos resultados das vigas ensaiadas.	97
Tabela 4.9 – Propriedades mecânicas dos materiais de reforço.	98
Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios das vigas e os índices de ductilidade.	100
Tabela 5.1 – Consumo de material por m^3 de concreto.	109
Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios de resistência do concreto à compressão.	109
Tabela 5.3 – Resultados do ensaio de resistência à compressão diametral.	111
Tabela 5.4 – Resultado dos ensaios de corpos-de-prova de concreto.	112
Tabela 5.5 – Módulo de elasticidade do concreto.	113
Tabela 5.6 - Geometria dos corpos-de-prova recomendada para ensaio de tração em materiais compósitos com matriz polimérica (ASTM D3039/3039M).	118
Tabela 5.7 – Resultados dos ensaios de resistência à tração dos corpos-de-prova de tecido de fibra de carbono revestidos com resina epóxi.	119
Tabela 5.8 – Verificação do reforço à flexão.	125

Tabela 5.9 – Dados obtidos no ensaio da viga VR.	134
Tabela 5.10 - Dados obtidos no ensaio da viga AI.	136
Tabela 5.11 - Dados obtidos no ensaio da viga AII.	137
Tabela 5.12 - Dados obtidos no ensaio da viga BI -1.	138
Tabela 5.13 - Dados obtidos no ensaio da viga BI-2.	140
Tabela 5.14 - Dados obtidos no ensaio da viga BII-1.	141
Tabela 5.15 - Dados obtidos no ensaio da viga BII-2.	142
Tabela 6.1 – Valores das cargas e modos de ruptura das vigas ensaiadas.	144
Tabela 6.2 – Valores das cargas e flechas para as vigas ensaiadas.	148
Tabela 6.3 – Valores de momento e curvatura calculados.	148
Tabela 6.4 – Índices de ductilidade de flecha.	149
Tabela 6.5 – Índices de ductilidade de curvatura.	150
Tabela 6.6 - Índices de ductilidade energética de flecha.	151
Tabela 6.7- Índice de ductilidade energética de curvatura.	153
Tabela 6.8 – Dados experimentais relativos à fissuração das vigas ensaiadas.	154
Tabela 6.9 – Dados experimentais relativos ao escoamento da armadura longitudinal das vigas.	154
Tabela 6.10 – Dados experimentais relativos à ruptura das vigas	155
Tabela 6.11 – Dados experimentais de carga e flecha para o LVDT2.	156
Tabela 6.12 - Dados das flechas obtidas nos ensaios e suas respectivas variações em relação à VR.	157
Tabela 6.13 – Momentos e curvaturas das vigas.	158
Tabela 6.14 - Dados das curvaturas obtidas e suas respectivas variações em relação à VR.	159
Tabela 6.15 – Rigidezes das vigas.	160
Tabela 6.16 - Índices de ductilidade calculados.	163
Tabela 6.17 - Análise estatística dos índices de ductilidade para todas as vigas reforçadas em relação à VR.	168
Tabela 6.18 - Análise estatística dos índices de ductilidade para as vigas do grupo A.	168
Tabela 6.19 - Análise estatística dos índices de ductilidade para as vigas	

do grupo B.	168
Tabela 6.20 - Rotação Plástica das vigas	170
Tabela B.1- Resumo dos dados obtidos nos ensaios à tração nas barras de aço.	213
Tabela C.1 – Leitura do extensômetro mecânico durante o ensaio da viga VR.	214
Tabela C.2 – Determinação da deformação específica do concreto.	215
Tabela C.3 - Dados para obtenção do gráfico seção transversal x deformação específica.	217
Tabela C.4 – Leitura do extensômetro mecânico durante o ensaio da viga AI.	218
Tabela C.5 – Determinação da deformação específica do concreto.	218
Tabela C.6 - Dados para obtenção do gráfico seção transversal x deformação específica.	220
Tabela C.7 – Leitura do extensômetro mecânico durante o ensaio da viga AII.	221
Tabela C.8 – Determinação da deformação específica do concreto.	221
Tabela C.9 - Dados para obtenção do gráfico seção transversal x deformação específica.	223
Tabela C.10 – Leitura do extensômetro mecânico durante o ensaio da viga BI-1.	224
Tabela C.11 – Determinação da deformação específica do concreto.	224
Tabela C.12 - Dados para obtenção do gráfico seção transversal x deformação específica.	226
Tabela C.13 – Leitura do extensômetro mecânico durante o ensaio da viga BI-2.	227
Tabela C.14 – Determinação da deformação específica do concreto.	227
Tabela C.15 - Dados para obtenção do gráfico seção transversal x deformação específica.	229
Tabela C.16 – Leitura do extensômetro mecânico durante o ensaio da viga BII-1.	230

Tabela C.17 – Determinação da deformação específica do concreto.	230
Tabela C.18 - Dados para obtenção do gráfico seção transversal x deformação específica.	232
Tabela C.19 – Leitura do extensômetro mecânico durante o ensaio da viga BII-2.	233
Tabela C.20 – Determinação da deformação específica do concreto.	233
Tabela C.21 - Dados para obtenção do gráfico seção transversal x deformação específica.	235

Lista de Símbolos

Romanos

A_f	Área da seção transversal do tecido de fibra de carbono
A_s	Área da seção da armadura longitudinal de tração
A'_s	Área da seção da armadura longitudinal de compressão
A_{sw}	Área da seção de um estribo
b	Largura da seção
b_f	Largura do compósito de fibra de carbono
c	Cobrimento
CFC	Compósito de fibra de carbono
d	Altura útil da seção
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
E_f	Módulo de elasticidade do compósito de fibra de carbono
E_s	Módulo de elasticidade do aço
E_{tot}	Energia total
E_{el}	Energia elástica
E_{inel}	Energia inelástica
f_c	Resistência do concreto à compressão
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
f_{ct}	Resistência do concreto à tração
f_{fu}	Resistência última à tração do compósito de fibra de carbono
f_{tf}	Resistência do compósito de fibra de carbono à tração

f_y	Resistência de escoamento da armadura longitudinal
f_{yk}	Resistência característica à tração do aço
R_C	Força de compressão no concreto
R_{CS}	Força de compressão no aço
R_{tf}	Força de tração no compósito de fibra de carbono
R_{TS}	Força de tração no aço
h	Altura da viga
J_{CR}	Momento de inércia da seção fissurada
M	Momento fletor
M_{CR}	Momento fletor de fissuração
M_y	Momento fletor quando do escoamento da armadura longitudinal
M_u	Momento fletor de ruptura
M_R	Momento fletor resistente
M_{Sd}	Momento fletor de cálculo
P	Carga
P_{CR}	Carga de fissuração
P_y	Carga de escoamento da armadura longitudinal
P_u	Carga de ruptura
s	Espaçamento entre os estribos
t_f	Espessura do compósito de fibra de carbono
x_0	Distância da linha neutra à borda comprimida do concreto
z	Braço de alavanca

Gregos

δ_{CR}	Flecha para a carga de fissuração
δ_y	Flecha para a tensão de escoamento do aço da armadura longitudinal
δ_u	Flecha para a carga de ruptura
ε_C	Deformação específica do concreto
ε_{C0}	Deformação específica prévia do concreto
ε_{Cu}	Deformação específica última do concreto
ε_f	Deformação específica do compósito de fibra de carbono
ε_{fe}	Deformação específica efetiva do compósito de fibra de carbono
ε_{fu}	Deformação específica última do compósito de fibra de carbono
ε_S	Deformação específica do aço
γ_C	Coefficiente de segurança do concreto
γ_S	Coefficiente de segurança do aço
γ_f	Coefficiente de segurança do compósito de fibra de carbono
k_{CR}	Curvatura para a carga de fissuração
k_y	Curvatura quando da tensão de escoamento da armadura longitudinal
k_u	Curvatura para a carga de ruptura
φ_{pl}	Rotação plástica
μ	Índice de ductilidade
μ_δ	Índice de ductilidade energética de flecha
μ_k	Índice de ductilidade energética de curvatura
ρ_S	Taxa geométrica de armadura do aço tracionado

ρ'_s	Taxa geométrica de armadura do aço comprimido
ρ_f	Taxa geométrica de armadura do compósito de fibra de carbono
ξ	Coeficiente adimensional
ω_s	Taxa mecânica da armadura longitudinal de tração
ω'_s	Taxa mecânica da armadura longitudinal de compressão
ω_f	Taxa mecânica do reforço em compósito de fibra de carbono