

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Melissa Costa Joaquim

**Modelo Analítico para Dimensionamento de Reforço à
Flexão de Vigas em Concreto Armado Utilizando
Compósitos de Fibras de Carbono**

Dissertação de Mestrado

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

Orientadores: Marta de Souza Lima Velasco
Ricardo Amorim Einsfeld

Rio de Janeiro
Janeiro de 2004



Melissa Costa Joaquim

Modelo analítico para dimensionamento de reforço à flexão de vigas em concreto armado utilizando compósitos de fibras de carbono

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

Profa. Marta de Souza Lima Velasco

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Ricardo Amorim Einsfeld

Co-orientador

IPRJ/UERJ

Prof. Emil de Souza Sánchez Filho

UFJF

Profa. Cláudia Maria de Oliveira Campos

Pesquisador IME

Profa. Icléa Reys Ortiz

UFRJ

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial

do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de janeiro de 2004.

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

Melissa Costa Joaquim

Graduou-se em Engenharia Civil na PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2001. Na PUC-Rio, foi monitora do Laboratório de Materiais e Estruturas e desenvolveu projetos de Iniciação Científica na área de estruturas de concreto armado.

Ficha Catalográfica

Joaquim, Melissa Costa

Modelo analítico para dimensionamento de reforço à flexão de vigas em concreto armado utilizando compósitos de fibras de carbono / Melissa Costa Joaquim; orientadores: Marta de Souza Lima Velasco, Ricardo Amorim Einsfeld. - Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2004.

97 f. : il. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Concreto armado, 3. Fibras de Carbono. 4. Reforço Estrutural. I. Velasco, Marta de Souza Lima. II. Einsfeld, Ricardo Amorim. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD:624

Para meus pais, Decio e Lisete,
pelo apoio e confiança.

Agradecimentos

À professora Marta de Souza Lima Velasco pelos seus ensinamentos e incentivo permanente.

Ao professor Ricardo Amorim Einsfeld pelo seu conhecimento, dedicação e orientação segura durante todas as etapas deste trabalho.

Ao professor Emil de Souza Sánchez Filho pela colaboração e atenção dedicada.

Aos meus pais, Decio Pedro Joaquim e Lisete Costa Joaquim, pelo carinho e atenção de todas as horas e por me proporcionarem as principais direções nesta caminhada.

A todos os professores, funcionários e colegas do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio pelos ensinamentos e favores prestados.

À PUC-Rio pela estrutura oferecida e à CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

Joaquim, Melissa Costa; Velasco, Marta de Souza Lima; Einsfeld, Ricardo Amorim. **Modelo Analítico para Dimensionamento de Reforço à Flexão de Vigas em Concreto Armado Utilizando Compósitos de Fibras de Carbono**. Rio de Janeiro, 2004. 97p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O reforço de estruturas de concreto armado torna-se necessário por uma série de fatores, tais como: erros de projeto ou de execução que levam a sistemas estruturais inseguros; deterioração do concreto e do aço causada por envelhecimento natural; agentes agressivos ou acidentes como incêndio e choques; mudança no tipo de utilização original da estrutura através do aumento do carregamento e/ou modificações na sua geometria.

A aplicação de compósitos de fibra de carbono para reforço de estruturas de concreto armado representa o que há de mais moderno em engenharia estrutural. O uso deste material é bastante interessante devido à sua leveza, alta resistência mecânica, resistência à corrosão, neutralidade eletromagnética, fácil aplicação e manutenção das dimensões originais do elemento estrutural. A escolha deste tipo de reforço, em vez de sistemas tradicionais que utilizam chapas de aço, depende da viabilidade econômica e de restrições específicas feitas no projeto.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo analítico para o dimensionamento à flexão de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibras de carbono. Foi realizada uma revisão da literatura disponível de modo a se obter evidências experimentais acerca do assunto. Com o propósito de avaliar a eficiência do modelo analítico desenvolvido, os resultados numéricos calculados com este modelo são discutidos e comparados com os resultados experimentais e teóricos obtidos da literatura.

Palavras-chave

Concreto armado; fibras de carbono; reforço estrutural.

Abstract

Joaquim, Melissa Costa; Velasco, Marta de Souza Lima; Einsfeld, Ricardo Amorim (Advisors). **Analytical Model for Flexural Design of Reinforced Concrete Beams strengthened with Carbon Fibers Composites**. Rio de Janeiro, 2004. 97p. MSc. Dissertation – Civil Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The strengthening of reinforced concrete structures turns to be necessary due to a number of factors, such as: mistakes in the design or in the construction leading to unsafe structural systems; deterioration of concrete and steel caused by natural aging, aggressive agents or accidents like fire and shocks; the changing of the original use of the structure with the increase of loading and/or modifications in the geometry.

The application of carbon fiber composites for strengthening of reinforced concrete structures is a very new and modern issue in structural engineering. The use of this material is very interesting due to its lightness, high mechanical strength, resistance to corrosion, electromagnetic neutrality, easy application and maintenance of the original shape of the structural element. The choice of this type of reinforcement, instead of more traditional systems using steel plates, depends on the economical viability and specific restrictions made in the project.

The objective of this work is to develop analytical model for flexural design of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber composites. A literature review was carried out in order to obtain the experimental evidences on this subject. In order to evaluate the efficiency of the analytical model, the numerical results obtained with this model are discussed and compared with the experimental and numerical results obtained from literature.

Keywords

Reinforced concrete; carbon fibers; structural strengthening.

Sumário

1	Introdução	17
1.1.	Considerações Gerais	17
1.2.	Objetivos	19
1.3.	Organização do trabalho	20
2	Revisão Bibliográfica	21
2.1.	Introdução	21
2.2.	Métodos Convencionais de Reforço Estrutural	22
2.2.1.	Aumento da Seção Transversal	22
2.2.2.	Protensão Externa	22
2.2.3.	Chapa de Aço Colada com Resina Epóxi	23
2.3.	Materiais Compósitos Utilizados em Reforço	23
2.3.1.	Compósitos de Fibra de Carbono	25
2.3.2.	Resinas Epoxídicas	29
2.3.3.	Reforço Estrutural com Compósito de Fibras de Carbono Colado com Resinas Epóxi	30
2.4.	Estudos Experimentais sobre Vigas com Reforço Externo de CFC	31
2.4.1.	Estudo de Souza et al. (1998)	32
2.4.2.	Estudo de Gemert et al. (1999)	34
2.4.3.	Estudo de Matthys (2000)	35
2.4.4.	Estudo de Cerqueira (2000) e Pinto (2000)	37
2.4.5.	Estudo de Araújo (2002a)	39
2.4.6.	Estudo de Araújo (2002b)	40
2.4.7.	Estudo de Beber (2003)	43
2.5.	Estudos Teóricos sobre Vigas com Reforço Externo de CFC	46
2.5.1.	Estudo de Chaallal et al. (1998)	46
2.5.2.	Estudo do ISIS CANADA (2001)	47
2.5.3.	Estudo de Machado (2002)	48

3 Modelo de Dimensionamento à Flexão	50
3.1. Introdução	50
3.2. Estado Limite Último	50
3.3. Critérios de Cálculo	51
3.4. Domínios de Deformação	52
3.5. Dimensionamento à Flexão	54
3.5.1. Vigas de Seção Retangular Reforçadas com CFC	54
3.5.1.1. Algoritmo para Cálculo do Reforço à Flexão de CFC	60
3.5.1.2. Fluxograma de Cálculo	61
3.5.1.3. Implementação Computacional do Modelo Analítico	63
4 Comparação e Análise de Resultados	68
4.1. Análise dos Estudos Experimentais	69
4.1.1. Estudo de Souza et al. (1998)	69
4.1.2. Estudo de Gemert et al. (1999)	71
4.1.3. Estudo de Matthys (2000)	73
4.1.4. Estudo de Pinto (2000)	76
4.1.5. Estudo de Araújo (2002a)	78
4.1.6. Estudo de Araújo (2002b)	80
4.1.7. Estudo de Beber (2003)	82
4.2. Análise dos Estudos Teóricos	84
4.2.1. Estudo de Chaallal (1998)	84
4.2.2. Estudo do ISIS CANADA (2001)	86
4.2.3. Estudo de Machado (2002)	88
5 Conclusões e Sugestões	90
5.1. Conclusões	90
5.2. Sugestões	93
Referências Bibliográficas	94

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Diagrama tensão-deformação específica de diversos tipos de fibras e metais; adaptado de MATTHYS (2000).	24
Figura 2.2 – Diagramas “tensão x deformação” de compósitos de fibra de carbono comercializados pela Sika (à esquerda) e por Master Builders Technologies (à direita); adaptado de Souto Filho(2002).	26
Figura 2.3– Sistema pré-fabricado de CFC unidirecional, laminado ; adaptado de JUVANDES (1999).	28
Figura 2.4– Sistema de CFC curados “in situ” ; adaptado de JUVANDES (1999).	28
Figura 2.5–Características geométricas das vigas reforçadas à flexão (dimensões em cm)	32
Figura 2.6- Características geométricas e de carregamento das vigas (dimensões em cm).	34
Figura 2.7 – Geometria e carregamento das vigas (dimensões em cm)	35
Figura 2.8 – Geometria e carregamento das vigas ensaiadas (dimensões em cm).	37
Figura 2.9 – Geometria e carregamento da VC-2 (dimensões em cm).	40
Figura 2.10 – Características geométricas e de carregamento das vigas testadas (dimensões em cm).	41
Figura 2.11 - Características geométricas e de carregamento das vigas ensaiadas (dimensões em cm).	43
Figura 3.1– Ruptura por alongamento da armadura; adaptada de LOPES (2002).	51
Figura 3.2– Ruptura por esmagamento do concreto; adaptada de LOPES (2002).	51
Figura 3.3 – Domínios de deformação na flexão simples	53
Figura 3.4 – Distribuição de tensões numa seção	53
Figura 3.5 - Distribuição de tensões e deformações numa seção de concreto armado com armadura dupla, reforçada externamente com CFC.	55
Figura 3.6 – Fluxograma de cálculo	62

Figura 3.7 –Tela do programa Maple, 1ª parte	64
Figura 3.8 - Tela do programa Maple, 2ª parte	65
Figura 3.9 - Tela do programa Maple, 3ª parte	66
Figura 3.10 - Tela do programa Maple, 4ª parte	67

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades típicas de algumas fibras, Kendall (1999)	25
Tabela 2.2 – Dados das vigas ensaiadas por SOUZA et al.	33
Tabela 2.3- Dados das vigas ensaiadas por GEMERT et al.	35
Tabela 2.4 – Dados das vigas reforçadas à flexão de MATTHYS	36
Tabela 2.5 – Características do compósito de fibra de carbono utilizado	38
Tabela 2.6 – Reforço utilizado nas vigas	38
Tabela 2.7 – Dados das vigas de PINTO (2000)	39
Tabela 2.8 – Características do compósito de fibra de carbono N-300	42
Tabela 2.9 – Valores de carga e modo de ruptura das vigas ensaiadas	42
Tabela 2.10 – Dados experimentais e geométricos das vigas ensaiadas	42
Tabela 2.11 – Esquema de reforço das vigas do grupo F; adaptado de BEBER (2003)	44
Tabela 2.12 – Cargas e modos de rupturas das vigas do grupo F; adaptado de BEBER (2003)	45
Tabela 2.13 - Dados da viga estudada por CHAALLAL et al. (2001)	46
Tabela 2.14- Dados da V1 estudada em ISIS CANADA (2001)	47
Tabela 2.15 - Dados da V2 estudada em ISIS CANADA (2001)	48
Tabela 2.16 – Dados da viga estudada por Machado (2002).	49
Tabela 3.1 - Resistências de cálculo e coeficientes de segurança empregados.	57
Tabela 4.1 – Dados de entrada para dimensionamento do reforço, comuns a todas as vigas	69
Tabela 4.2 – Valores experimentais e numéricos de SOUZA et al.(1998)	71
Tabela 4.3- Dados de entrada para dimensionamento do reforço, comuns a todas as vigas	72
Tabela 4.4 - Valores experimentais e numéricos de GEMERT et al.(1999)	73
Tabela 4.5 - Dados de entrada para dimensionamento do reforço, comuns a todas as vigas	74
Tabela 4.6 - Valores experimentais e numéricos de MATTHYS(2000)	75

Tabela 4.7 - Dados de entrada para dimensionamento do reforço, comuns a todas as vigas	76
Tabela 4.8 - Valores experimentais e numéricos de PINTO (2000)	77
Tabela 4.9 - Dados de entrada para dimensionamento do reforço	78
Tabela 4.10- Valores experimentais e numéricos de ARAÚJO (2002a)	79
Tabela 4.11 - Dados de entrada para dimensionamento do reforço, comuns a todas as vigas	80
Tabela 4.12 - Valores experimentais e numéricos de ARAÚJO (2002b)	81
Tabela 4.13 - Dados de entrada para dimensionamento do reforço, comuns a todas as vigas	82
Tabela 4.14 - Valores experimentais e numéricos de BEBER (2003)	83
Tabela 4.15 - Dados de entrada para dimensionamento do reforço	84
Tabela 4.16 - Valores teóricos e numéricos de CHAALLAL (1998)	85
Tabela 4.17 - Dados de entrada para dimensionamento do reforço da V1	86
Tabela 4.18- Dados de entrada para dimensionamento do reforço da V2	86
Tabela 4.19 - Valores teóricos e numéricos de V1 e V2 do ISIS CANADA(2001).	87
Tabela 4.20- Dados de entrada para dimensionamento do reforço	88
Tabela 4.21 - Valores teóricos e numéricos de MACHADO (2002)	89

Lista de Símbolos

Romanos

A_f	Área da seção transversal do reforço externo
A_s	Área da seção transversal da armadura longitudinal tracionada
A'_s	Área da seção transversal da armadura longitudinal comprimida
b	Largura da seção
b_f	Largura do reforço externo
C	Força de compressão no concreto
CFC	Compósito de fibra de carbono
d	Distância do bordo mais comprimido até o centro de gravidade da armadura tracionada – altura útil
d'	Distância entre o bordo mais tracionado e o centróide da armadura longitudinal tracionada
d''	Distância entre o bordo mais comprimido e o centróide da armadura longitudinal comprimida
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
E_f	Módulo de elasticidade do compósito de fibra de carbono
E_s	Módulo de elasticidade da armadura de tração
E'_s	Módulo de elasticidade da armadura de compressão
f_{cd}	Resistência à compressão do concreto de cálculo
f_{cm}	Resistência à compressão média do concreto
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
f_{fk}	Resistência característica à tração do compósito de fibra de carbono
f_{fd}	Resistência à tração do compósito de fibra de carbono de cálculo
f_{sk}	Resistência característica à tração do aço

f_{sd}	Resistência à tração do aço de cálculo
f'_{sk}	Resistência característica à compressão do aço
f'_{sd}	Resistência à compressão do aço de cálculo
f_{yk}	Resistência característica de escoamento do aço tracionado
f_{yd}	Resistência de escoamento do aço tracionado de cálculo
f'_{yk}	Resistência característica de escoamento do aço comprimido
f'_{yd}	Resistência de escoamento do aço comprimido de cálculo
F	Força de tração no reforço externo à seção
h	Altura total da seção transversal
M_d	Momento fletor resistente de cálculo
M_u	Momento fletor de ruptura
P	Carga concentrada
P_{exp}	Carga concentrada experimental
P_u	Carga de ruptura
S	Força de tração na armadura positiva
S'	Força de compressão na armadura negativa
x	Distância do bordo mais comprimido à linha neutra da seção
z	Braço de alavanca

Gregos

ε_{bi}	Deformação específica inicial na base da viga
ε_c	Deformação específica do concreto na fibra mais comprimida
ε_{cf}	Deformação específica no concreto após carregamento
ε_{ci}	Deformação específica inicial no concreto
ε_f	Deformação específica no reforço
ε_s	Deformação específica do aço da armadura solicitada à tração
ε_{sf}	Deformação específica no aço tracionado após carregamento
ε_{si}	Deformação específica inicial na armadura tracionada
ε'_s	Deformação específica do aço comprimido
ε'_{sf}	Deformação específica do aço comprimido após carregamento
ε'_{si}	Deformação específica inicial na armadura comprimida
γ_c	Coefficiente de segurança do concreto
γ_f	Coefficiente de segurança do compósito de fibra de carbono
γ_s	Coefficiente de segurança do aço
ρ_l	Taxa geométrica da armadura longitudinal
ρ_t	Taxa geométrica do reforço
ρ_f	Taxa geométrica da armadura transversal
ϕ_f	Inverso do coeficiente de segurança do compósito de fibra de carbono ($1/\gamma_f$)
ϕ_s	Inverso do coeficiente de segurança do aço ($1/\gamma_s$)
ϕ_c	Inverso do coeficiente de segurança do concreto ($1/\gamma_c$)
σ_{cd}	Tensão de cálculo no concreto
σ_{sd}	Tensão de cálculo na armadura tracionada
σ'_{sd}	Tensão de cálculo na armadura comprimida