

Marcello Varella Souto Filho

**Modelagem Numérica de Reforço Estrutural
em Vigas de Concreto Armado**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Marta de Souza Lima Velasco

Rio de Janeiro
Agosto de 2002

Marcello Varella Souto Filho

**Modelagem Numérica de Reforço Estrutural
em Vigas de Concreto Armado**

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

Prof. Marta de Souza Lima Velasco, D.sc.

Orientador
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Luiz Fernando Martha, D.sc.

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Emil de Souza Sánchez Filho, D.sc.

Departamento de Estruturas – UFJF

Eng. Sérgio Brasil Figueredo

Sbrasil Engenharia Ltda.

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial
do Centro técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 09 de Agosto de 2002

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

Marcello Varella Souto Filho

Formou-se em técnico de programação de computadores em 1995. Monitor da cadeira de hiperestática em 1997 e 1998 na UERJ. Graduiu-se em Engenharia Civil na UERJ (Universidade do Estado do Rio de Janeiro) em 1998. Trabalhou de 1995 a 2000 na empresa de cálculo estrutural Caltec Engenharia Ltda. Prestou serviços na área de Engenharia Estrutural para Empresa Sbrasil Engenharia Ltda. Trabalhou como professor da cadeira de Resistência dos materiais no Departamento de Estruturas e Fundações da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Trabalha prestando consultoria e elaborando projetos estruturais em concreto armado e aço para construção civil e indústria naval-offshore.

Ficha Catalográfica

Souto Filho, Marcello Varella
Modelagem numérica de reforço estrutural em vigas de concreto armado / Marcello Varella Souto Filho; orientador: Marta de Souza Lima Velasco. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2002.

[17],110 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. Reforço estrutural. 4. Compósitos. 5. Fibra de carbono. 6. Método dos elementos finitos. 7. Modelos constitutivos. I. Velasco, Marta de Souza Lima. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título

CDD: 624

Agradecimentos

Aos professores Marta de Souza Lima Velasco e Ricardo Einsfeld pela compreensão, pelos ensinamentos prestados, atenção dedicada e orientação segura.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

A todos os professores deste departamento pelos ensinamentos científicos prestados.

Aos professores da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, em especial ao Departamento de Estruturas e Fundações pelos ensinamentos de graduação e apoio profissional.

A todos os amigos e familiares que de alguma forma participaram da elaboração deste trabalho incentivando, apoiando e em algumas vezes até criticando.

A todos os colegas de departamento que dividiram comigo alegrias e angústias.

Às amigas Cristina Travessa Pinto e Ana Carolina Neves de Araújo pelo apoio e pelo fornecimento de detalhes e experiências obtidas em seus trabalhos experimentais.

À empresa Sbrasil Engenharia Ltda, todos seus funcionários e em especial ao seu diretor Eng^o Sergio Brasil pelo suporte profissional.

Resumo

Souto Filho, Marcello Varella; Velasco, Marta de Souza Lima. **Modelagem Numérica de Reforço Estrutural em Vigas de Concreto Armado**. Rio de Janeiro, 2002. 127pp. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A necessidade cada vez mais freqüente de reforço em estruturas de concreto armado, exige um completo conhecimento do comportamento da estrutura reforçada devido a alterações de rigidez do conjunto, aumento da carga de ruptura, alterações na distribuição de fissuras, modificação de comportamento e posição da linha neutra, entre outros. Nos últimos anos diversos estudos experimentais têm sido conduzidos, fornecendo parâmetros cada vez mais confiáveis à elaboração de projetos e ao dimensionamento seguro em relação aos estados limites de utilização e de ruptura. No desenvolvimento deste trabalho, utiliza-se um programa computacional baseado no método dos elementos finitos, capaz de descrever o comportamento de elementos estruturais prismáticos em concreto armado reforçados à flexão. Descreve-se o modelo hipoeelástico de Elwi e Murray (1979) para o concreto simples e um modelo multilinear para simulação dos reforços. Tais relações resultam de estudos analíticos e experimentais sobre o concreto armado e estão originalmente implementadas no programa FEPARCS (Elwi e Murray, 1980), que neste trabalho é modificado e adaptado de acordo com a realidade da execução de reforços em estruturas em serviço. O programa FEPACS, capaz de realizar análises numéricas não-lineares, é acoplado a um programa de pré e pós-processamento gráfico especialmente desenvolvido para geração, gerenciamento do processo de cálculo e para análise de resultados obtidos. Os resultados obtidos utilizando o programa proposto são validados através de uma comparação com resultados experimentais obtidos na literatura.

Palavras-chave

Concreto Armado; Reforço Estrutural; Compósitos; Fibra de Carbono; Método dos Elementos Finitos; Modelos Constitutivos.

Abstract

Souto Filho, Marcello Varella; Velasco, Marta de Souza Lima. **Numerical Modeling of Structural Strengthening of Reinforced Concrete Beams**. Rio de Janeiro, 2002. 127pp. Master of Science – Civil Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The frequent use of composite materials, in the strengthening of reinforced concrete structures requires complete knowledge of the structural behavior because of the changes that such strengthening will cause to the overall stiffness, the collapse load, the cracks distribution and the behavior and position of the neutral axis. Over the last few years experimental studies have been performed, bringing out more trustworthy parameters for ultimate strength design. In this work, a computational program was implemented based on the finite element method, which is able to describe the flexural strengthening of reinforced concrete beams. The model used in this program is that of Elwi & Murray (1979), which assumes a so-called hypo elastic theory for concrete and a approach to simulate the reinforcement. These relationships were derived from reinforced concrete analytical and experimental studies and are originally implemented in the FEPARCS program (Elwi e Murray, 1980), which has been modified in order to obtain a more realistic approach to in-service structural strengthening. The program developed, which is able to perform non-linear numerical analyses, is coupled to pre and pos-processing graphic programs specially developed for model generation, management of the calculation sequence and presentation of final results. The results produced by this program have been validated by comparison with experimental results available in literature.

Keywords

Reinforced Concrete; Strengthening; Composites; composites; Finite Element Method; Constitutive models.

Sumário

1. Introdução	18
1.1. Considerações Gerais	18
1.2. Objetivo	19
1.3. Organização deste trabalho	21
2. Reforço Externo à Flexão e ao Cisalhamento de Elementos Estruturais em Concreto Armado	23
2.1. Introdução	23
2.2. Utilização de Reforços Estruturais	23
2.2.1. Problemas Estruturais	23
2.2.2. Mudanças na Utilização Definida em Projeto	24
2.3. Técnicas de Reparo e Reforço	24
2.3.1. Adição de Chapas de Aço	25
2.3.2. Adição de Compósitos de Fibras	27
2.3.3. Técnica de Estribos Externos Pré-tracionados	31
2.3.4. Técnica de Vergalhões Colados	32
2.4. Propriedades de materiais Utilizados em Reforço	32
2.5. Estudos Experimentais sobre Técnicas de Reforço Externo	33
2.5.1. Estudos de Cerqueira (2000) e Pinto (2000)	33
2.5.2. Estudo de Araújo (2002)	39
3. O Método dos Elementos Finitos Aplicado a Análise Não-Linear	47
3.1. Introdução	47
3.2. Método dos Elementos Finitos	47
3.2.1. Método dos Elementos Finitos – Modelo da Rigidez	48
3.2.2. Elementos Finitos Bidimensionais Planos	51
3.2.3. Considerações Sobre o MEF e Não Linearidade	56
3.3. Modelos Adotados	56
3.3.1. Modelo Constitutivo Hipoelástico	57
3.3.1.1. Relação Constitutiva Incremental	57
3.3.1.2. Deformação Uniaxial Equivalente	58

3.3.1.3. Coeficiente de Poisson	62
3.3.1.4. Superfície de Ruptura de William-Warnke	62
3.3.2. Modelo Elasto-Plástico Multilinear	67
3.3.3. Modelo Elasto-Plástico Multilinear Modificado	68
3.4. Estratégias de Solução Para Análise Não-Linear	69
3.4.1. O Método de Newton-Raphson	69
3.4.2. O Método do Comprimento de Arco	73
3.4.3. Critérios de Convergência	76
4. Pré e Pós-Processamento de Dados Para Análise por Elementos Finitos	77
4.1. Introdução	77
4.2. Conceitos de Computação Gráfica Utilizados no Programa PREPOS	78
4.2.1. Inserção de Reforço e Suas Coordenadas	81
4.3. O Programa PREPOS	83
5. Aplicação Numérica	94
5.1. Introdução	94
5.2. Resultados Experimentais e Análise Numérica	94
5.2.1. Estudo de Pinto (2000)	94
5.2.2. Estudo de Araújo (2002)	105
6. Conclusões e Sugestões	119
6.1. Conclusões	119
6.2. Sugestões para trabalhos futuros	122
Referências Bibliográficas	124

Lista de Figuras

Figura 2. 1 – Uso de chapas coladas para reforço ao cisalhamento e à flexão	26
Figura 2. 2 – Diagrama “tensão x deformação” específica de diversos tipos de fibras (Master Builders Technologies)	28
Figura 2. 3 – Diagrama “tensão x deformação” específica de compósitos de fibra de carbono comercializados pela Sika e por Master Builders Technologies, respectivamente	29
Figura 2. 4 – Esquema de reforço à flexão e ao cisalhamento utilizando lâminas de fibras de carbono	30
Figura 2. 5 – Viga reforçada ao cisalhamento com o uso de estribos externos pré-tracionados	31
Figura 2. 6 – Viga reforçada à flexão e cisalhamento com o uso de vergalhões colados	32
Figura 2. 7 – Sistema estrutural, Diagrama de Esforço cortante e Momento Fletor de V1 a V5	34
Figura 2. 8 – Diagrama de “tensão x deformação” da Lâmina Sika Carbodur tipo S utilizada	36
Figura 2. 9 – Detalhamento da armadura interna da viga V1	36
Figura 2. 10 – Reforço da viga V1	37
Figura 2. 11 – Posição em que foram medidas deformações nas armaduras internas das vigas	38
Figura 2. 12 – Posição em que foram medidas deformações nas lâminas do reforço das vigas	38
Figura 2. 13 – Sistema estrutural, Diagrama de Esforço cortante e Momento Fletor de VR e V1 a V6	40
Figura 2. 14 – Detalhamento da armadura interna das vigas VR e V1 a V6	42
Figura 2. 15 – Reforço da viga V1 a V3	43
Figura 2. 16 – Reforço das vigas V4 a V6	43
Figura 2. 17 – Posição para medição de deformações nas armaduras e deslocamentos das vigas VR, V1 e V4	43
Figura 2. 18 – Posição para medição de deformações nas armaduras e deslocamentos das vigas V2, V3, V5 e V6	43
Figura 3. 1 – Divisão do domínio de integração em pequenas áreas denominadas Elementos Finitos	46
Figura 3. 2 – Placa de espessura ‘e’, solicitada por forças externas atuando em seu plano médio	51

Figura 3. 3 – a) Elemento isoparamétrico Q4 no espaço $\xi\eta$ b) Elemento isoparamétrico Q4 no espaço xy	52
Figura 3. 4 – a) Elemento isoparamétrico Q8 no espaço $\xi\eta$ b) Elemento isoparamétrico Q8 no espaço xy	55
Figura 3. 5 – Relação “tensão x deformação” uniaxial para compressão do concreto	60
Figura 3. 6 – Relação “tensão x deformação” uniaxial para tração e para o cisalhamento respectivamente	60
Figura 3. 7 – Espaço tridimensional de tensões, eixo hidrostático e plano desviador	64
Figura 3. 8 – Superfície de William-Warnke: Seção desviadora	65
Figura 3. 9 – Superfície de William-Warnke: Seção meridional	66
Figura 3. 10 – Relação “tensão x deformação” que descreve o comportamento do material utilizado nos reforços	67
Figura 3. 11 – Relação “tensão x deformação” que descreve o material dos reforços inseridos durante o cálculo	68
Figura 3. 12 – Representação gráfica do Método de Newton-Raphson standard	70
Figura 3. 13 – Representação gráfica do Método de Newton-Raphson modificado	71
Figura 3. 14 – Representação gráfica do Método de Newton-Raphson rigidez inicial	71
Figura 3. 15 – Típica trajetória de equilíbrio com ponto-limite para o caso unidimensional	72
Figura 3. 16 – Representação gráfica do Método do Comprimento de Arco com processo iterativo do tipo Newton-Raphson modificado para um caso unidimensional	73
Figura 3. 17 – Decomposição do vetor $\{ w \}^i$ segundo Welssels (1977)	75
Figura 3. 18 – Representação gráfica dos sistemas de equações, caso unidimensional, da decomposição de Welssels (1977)	75
Figura 4. 1 – Relação entre os sistemas de coordenadas do modelo e da tela de plotagem	79
Figura 4. 2 – implementação no modelo dos comandos de translação direcionada e Pan	80
Figura 4. 3 – implementação no modelo de fatores de escala	80

Figura 4. 4 –Introdução de reforço de acordo com coordenadas do modelo original	81
Figura 4. 5 –Introdução de reforço de acordo com coordenadas do modelo original	82
Figura 4. 6 – Possíveis intercessões entre funções definidas pelo reforço e as que definem o elemento	82
Figura 4. 7 – Tela inicial do programa PREPOS	83
Figura 4. 8 – Tela para geração da malha de Elementos Finitos	84
Figura 4. 9 – Tela demonstrando as opções de manipulação gráfica do modelo	84
Figura 4. 10 – Tela demonstrando a introdução de restrições de deslocamento ao modelo	85
Figura 4. 11 – Tela para entrada de dados referente as propriedades do material que compõe os elementos	86
Figura 4. 12 – Tela para entrada de reforço linear em qualquer direção	87
Figura 4. 13 – Tela para entrada de reforço linear em qualquer direção com possibilidade de cópia do original	87
Figura 4. 14 – Tela para entrada de propriedades referente a novos materiais de reforço	88
Figura 4. 15 – Tela para entrada das cargas nodais que incidem sobre a estrutura	89
Figura 4. 16 – Escolha do procedimento de cálculo a ser utilizado	89
Figura 4. 17 – Tela para definição da estratégia de solução do modelo e definição dos “steps” necessários	90
Figura 4. 18 – Tela para análise de resultados e definição de novos parâmetros pra reinicio do cálculo	91
Figura 4. 19 – Gráficos para análise resultados nos nós e elementos lineares	91
Figura 4. 20 – Tela para introdução de novos reforços	92
Figura 4. 21 – Visualização dos novos reforços e definição de novos parâmetros pra reinicio do cálculo	93
Figura 5. 1 – Discretização adotada para analise numérica: (a) Elementos de concreto; (b) Elementos de armadura; e (c) Elementos de reforço	95
Figura 5. 2 – Diagrama “Carga x Flecha” – Deflectômetro 1	98
Figura 5. 3 – Diagrama “Carga x Flecha” – Deflectômetro 2	98

Figura 5. 4 – Diagrama “Carga x Deformação” da armadura longitudinal interna no meio do vão - Extensômetro D-1	99
Figura 5. 5 – Diagrama “Carga x Deformação” da armadura longitudinal interna - Extensômetro D-2	99
Figura 5. 6 – Diagrama “Carga x Deformação” da lâmina de fibra de carbono no meio do vão - Extensômetro F-1	100
Figura 5. 7 – Diagrama “Carga x Deformação” da lâmina de fibra de carbono Extensômetro F-2	100
Figura 5. 8 – Configuração da viga no início do processo de fissuração – Passo de solução 9	101
Figura 5. 9 – Configuração da viga durante o procedimento de reforço – Passo de solução 11	102
Figura 5. 10 – Configuração da viga imediatamente antes ao descolamento do compósito – Passo de solução 16	102
Figura 5. 11 – Configuração da viga imediatamente após descolamento do compósito – Passo de solução 17	103
Figura 5. 12 – Distribuição de tensões nas armaduras iniciais e de reforço – Passo de solução 17	103
Figura 5. 13 – Configuração da viga na iminência da ruptura – Passo de solução 18	104
Figura 5. 14 – Discretização adotada para análise numérica: (a) Elementos de concreto; (b) Elementos de armadura; e (c) Elementos de reforço	106
Figura 5. 15 – Diagrama “Carga x Flecha” na posição do Deflectômetro 1 - Comparação entre o valor teórico da viga reforçada e o experimental	109
Figura 5. 16 – Diagrama “Carga x Flecha” na posição do Deflectômetro 2 - Comparação entre o valor teórico da viga reforçada e o experimental	109
Figura 5. 17 – Diagrama “Carga x Deformação” na posição do Extensômetro 2 - Comparação entre o valor teórico da viga reforçada e o experimental	110
Figura 5. 18 – Diagrama “Carga x Deformação” na posição do Extensômetro 7 - Comparação entre o valor teórico da viga reforçada e o experimental	111
Figura 5. 19 – Diagrama “Carga x Flecha” na posição do Deflectômetro 1 - Comparação entre o valor teórico da viga reforçada e o experimental	112
Figura 5. 20 – Diagrama “Carga x Flecha” na posição do Deflectômetro 2	113
Figura 5. 21 – Diagrama ‘Carga x Deform.’ na posição do Extensômetro 2	113

Figura 5. 22 – Diagrama “Carga x Deform.” na posição do Extensômetro 7	113
Figura 5. 23 – Configuração de tensões atuantes durante o processo de fissuração – Passo de solução 8 – Tensões de compressão e tração ao longo das seções transversais	115
Figura 5. 24 – Configuração de tensões atuantes no início do processo de escoamento do aço – Passo de solução 16 – Tensões de compressão e tração ao longo das seções transversais	115
Figura 5. 25 – Configuração de tensões atuantes ao início do processo de escoamento do aço – Passo de solução 16 – Tensões principais de Compressão	116
Figura 5. 26 – Configuração de tensões atuantes na eminência de ruptura do compósito de fibra de carbono – Passo de solução 19 – Tensões de compressão e tração ao longo das seções transversais	116
Figura 5. 27 – Configuração de tensões atuantes na eminência de ruptura do compósito de fibra de carbono – Passo de solução 19 – Tensões principais de Compressão	117
Figura 5. 28 – Configuração de tensões atuantes na eminência de ruptura do compósito de fibra de carbono – Passo de solução 19 – Armação e reforço de flexão	117

Lista de Tabelas

Tabela 2. 1 – Propriedades físicas de compósitos utilizados em reforço de estruturas	33
Tabela 2. 2 – Resistência média à compressão e à tração do concreto de acordo com NBR5739 e NBR7222	35
Tabela 2. 3 – Características das barras de aço utilizadas	35
Tabela 2. 4 – Características do adesivo epóxico utilizado	35
Tabela 2. 5 – Características do compósito de fibra de carbono utilizado	36
Tabela 2. 6 – Resistência à flexão teórica das vigas sem reforço	36
Tabela 2. 7 – Resistência ao cortante teórica V_R	37
Tabela 2. 8 – Reforço utilizado nas vigas	37
Tabela 2. 9 – Resistência à flexão teórica das vigas reforçadas	38
Tabela 2. 10 – Tensão cisalhante longitudinal	38
Tabela 2. 11 – Valores de carga e modo de ruptura das vigas	39
Tabela 2. 12 – Resistência média à compressão e à tração do concreto de acordo com NBR5739 e NBR7222	41
Tabela 2. 13 – Características das barras de aço utilizadas	41
Tabela 2. 14 – Características do compósito de fibra de carbono utilizado	41
Tabela 2. 15 – Resistência teórica à flexão e ao cortante das vigas sem reforço	42
Tabela 2. 16 – Reforço utilizado nas vigas	42
Tabela 2. 17 – Seqüência para carregamento utilizado nos ensaios.	44
Tabela 2. 18 – Resistência à flexão teórica das vigas reforçadas	44
Tabela 2. 19 – Carga de ruptura das vigas e maiores aberturas observadas	45
Tabela 2. 20 – Valores de carga e modo de ruptura das vigas ensaiadas	45
Tabela 5. 1 – Propriedades do concreto utilizado em V1	95
Tabela 5. 2 – Parâmetros utilizados no modelo constitutivo	95

Tabela 5. 3 – Pontos para traçado da curva “tensão x deformação” do aço CA50A	96
Tabela 5. 4 – Pontos para traçado da curva “tensão x deformação” do compósito de fibra de carbono	96
Tabela 5. 5 – Desempenho do programa na obtenção de convergência para NRs	97
Tabela 5. 6 – Comparação entre valores de carga e deformação na ruptura	101
Tabela 5. 7 – Propriedades do concreto utilizado	107
Tabela 5. 8 – Parâmetros utilizados no modelo constitutivo das vigas V1a V6	107
Tabela 5. 9 – Pontos para traçado da curva “tensão x deformação” do aço CA50A	107
Tabela 5. 10 – Pontos para traçado da curva “tensão x deformação” do compósito de fibra de carbono	107
Tabela 5. 11 – Desempenho do programa na obtenção de convergência para NRs	108
Tabela 5. 12 – Comparação entre valores de carga e deformação na ruptura	109
Tabela 5. 13 – Desempenho do programa na obtenção de convergência para NRs	109
Tabela 5. 14 – Comparação entre valores de carga e deformação na ruptura.	111
Tabela 5. 15 – Desempenho do programa na obtenção de convergência para NRs	112
Tabela 5. 16 – Comparação entre valores de carga e deformação na ruptura	114

Lista de Símbolos

Gregos

Π_p – Energia potencial total

Ω_{ext} – Potencial das forças externas

$\{\varepsilon\}$ – Vetor de deformações

$\{\varepsilon_0\}$ – Vetor de deformações iniciais

$\{\sigma\}$ – Vetor de tensões

$\{\sigma_0\}$ – Vetor de tensões iniciais

$[\partial]$ – Operador diferencial

$\{\Delta Q\}$ - Vetor das forças desbalanceadas

φ^b – Fator de carga associado

$d\sigma$ – Tensores de incremento de tensão

$d\varepsilon$ – Tensores de incremento de deformação

γ – Deformações cisalhantes

ν – Coeficiente de Poisson

τ – Tensões cisalhantes

α_t – Razão entre resistências uniaxiais de tração e de compressão

ε_c – Deformação associada a f'_c

κ_t – Deformação associada a f'_t

κ_{bc} – Deformação associada a f'_{bc} em umas das direções de carregamento

Romanos

- U – Energia de deformação
- dV – Volume infinitesimal de material da estrutura
- U_o – Densidade de Energia em cada ponto do material
- $\{u\}$ – Campo de deslocamentos no elemento
- $\{F_{int}\}$ – Vetor de forças internas ou equilibrantes
- $[C]$ – Matriz constitutiva do material
- $[N]$ – Funções de interpolação dos elementos
- $\{R_o\}$ – Vetor de cargas de referência
- $\{T^a\}$ – Vetor comprimento de arco
- Q_{TOL} – Tolerância arbitrada para forças
- $\{u_L\}$ – Deslocamentos nodais do elemento
- $[B]$ – Matriz que relaciona deformações e deslocamentos
- $\{R_{ext}\}$ – Vetor de forças externas nodais
- n_e - Número de elementos
- $[K]$ - Matriz de rigidez global da estrutura
- E – Módulo de elasticidade ortotrópico
- G – Módulo de cisalhamento
- W – Abertura de fissuras
- Y_i – Tensão normalizada
- X_{iu} – Deformação uniaxial equivalente normalizada
- f_t – Resistência à tração normalizada do concreto
- $X_{t,máx}$ – Máxima deformação normalizada
- $f_{c,m}$ – resistência à compressão da matriz de concreto
- f_c – Resistência uniaxial à compressão do concreto