



Nathaly Sarasty Narváez

**Projeto Baseado em Confiabilidade de Vigas em Concreto
Armado com e sem Reforço de Compósitos 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.

Orientador: Profa. Marta de Souza Lima Velasco
Co-orientador: Prof. Luiz Eloy Vaz

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2012



Nathaly Sarasty Narváez

**Projeto Baseado em Confiabilidade de Vigas em Concreto
Armado com e sem Reforço de 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. Luiz Eloy Vaz

Co-Orientador

Universidade Federal Fluminense

Prof. Emil de Souza Sánchez Filho

Universidade Federal Fluminense

Prof. Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Profa. Andréia Abreu Diniz de Almeida

Universidade Federal Fluminense

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 28 de fevereiro de 2012.

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

Nathaly Sarasty Narváez

Graduou-se em Engenharia Civil na Universidade de Nariño, Colômbia, em 2009. Na PUC-Rio desenvolveu seu trabalho de pesquisa com ênfase em concreto reforçado e análise de confiabilidade.

Ficha Catalográfica

Narváez, Sarasty Nathaly

Projeto baseado em confiabilidade de vigas em concreto armado com e sem reforço de compósitos de fibras de carbono / Nathaly Sarasty Narváez ; orientadores: Marta de Souza Lima Velasco, Luiz Eloy Vaz. – 2012.

146 f. il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Análise de confiabilidade. 3. Vigas de concreto armado. 4. Compósitos de fibra de carbono. I. Velasco, Marta de Souza Lima. II. Vaz, Luiz Eloy. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 624

Este trabalho é dedicado a minha família por seu constante
apoio e amor incondicional

Agradecimentos

A Deus, pela oportunidade de desenvolver este trabalho no Brasil com sua benção e proteção diária.

Aos meus pais e irmã, exemplos de coragem e responsabilidade, pela dedicação, amor e acompanhamento em todos os meus empreendimentos. Seus conselhos me ajudaram a superar os momentos difíceis.

A minha avó Carmelita, tia Cristina e Vanessa, por me oferecerem sempre carinho e compreensão.

A minha orientadora professora Marta de Souza Lima Velasco por me dar a oportunidade de trabalhar com ela e me oferecer seus conhecimentos e sua confiança.

Ao meu co-orientador professor Luiz Eloy Vaz por compartilhar seus conhecimentos de engenharia, por me receber na sua casa e me mostrar a belíssima cultura brasileira através da música e da história.

Aos professores do departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio e aos técnicos do Laboratório de Estruturas e Materiais.

A os amigos que conheci durante o mestrado com os quais formamos uma segunda família por tantas alegrias e boas experiências, especialmente a Vanessa e Eliot por estarem comigo em todo momento transmitindo valores como o respeito, a tolerância e a paciência.

Ao CNPq e a PUC-Rio pelo seu apoio financeiro.

Resumo

Narváez, Sarasty Nathaly; Velasco, Marta de Souza Lima. Eloy, Luiz Vaz. **Projeto Baseado em Confiabilidade de Vigas em Concreto Armado com e sem Reforço de Compósitos de Fibras de Carbono**. Rio de Janeiro, 2012. 146p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

No Brasil, o dimensionamento de estruturas de concreto armado segue as recomendações da norma brasileira NBR 6118-2003. A norma brasileira, usa a metodologia de dimensionamento semi-probabilístico que não quantifica a probabilidade de falha de um elemento estrutural. A análise de confiabilidade de estruturas é uma ferramenta que possibilita o cálculo da probabilidade de falha associada a um estado limite e também um dimensionamento para uma determinada probabilidade de falha denominada probabilidade de falha alvo. Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia que possibilite o dimensionamento baseado em confiabilidade de seções de vigas de concreto armado sem e com reforço com compósitos de fibras de carbono. Na análise de confiabilidade desenvolvida foram consideradas como variáveis aleatórias o carregamento, as resistências do aço e do concreto, e a resistência à tração dos compósitos de fibras de carbono com propriedades estatísticas determinadas com base nos resultados dos ensaios realizados no laboratório de Estruturas e Materiais do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio (LEM-DEC). Exemplos de dimensionamento de seções de vigas de concreto armado submetidas à força cortante e à flexão foram realizados inicialmente por métodos semi-probabilísticos e depois utilizando a metodologia proposta baseada em confiabilidade. A análise dos resultados mostra a viabilidade de um projeto baseado em confiabilidade usando um índice de probabilidade de falha determinado para cada tipo de projeto aliando economia e segurança.

Palavras-chave

Análise de Confiabilidade; Vigas de Concreto Armado; Compósitos de Fibra de Carbono.

Abstract

Narváez, Sarasty Nathaly; Velasco, Marta de Souza Lima (Advisor); Eloy, Luiz Vaz (Co-advisor). **Reliability-based Design of RC Beams Strengthened with CFC**. Rio de Janeiro, 2012. 146p. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In Brazil, the design of reinforced concrete structures follows the recommendations of Brazilian standard NBR 6118-2003. The Brazilian standard uses the methodology of semi-probabilistic design that does not quantify the probability of failure of a structural element. The reliability analysis of structures is a tool that allows the calculation of probability of failure associated with a limit state and also the design for a given probability of failure. This work aims to develop a methodology that enables the Reliability-based-design of concrete beams sections with and without strengthening with carbon fiber composites. In the reliability analysis were considered as random variables the loads, the compression concrete strength, yield strength, and tensile strength of carbon fiber composites with certain statistical properties based on the results of tests performed in the Structures and Materials laboratory at PUC-Rio (LEM-DEC). Examples of reinforced concrete beams strengthened with CFC were performed initially by semi-probabilistic methods and then using the proposed methodology based on reliability. The analysis shows the feasibility of a Reliability-based-design using a reliability index of failure probability determined for each type of project combining economy and safety.

Keywords

Reliability Analysis; Reinforced Concrete; Carbon Fiber Composites.

Sumário

1 Introdução	22
1.1. Considerações Gerais	23
1.2. Revisão Bibliográfica	25
1.2.1. Estudos sobre Vigas de Concreto Armado Reforçadas com CFC Solicitadas à Força Cortante	25
1.2.2. Estudos sobre Vigas de Concreto Armado Reforçadas com CFC Solicitadas à Flexão	25
1.2.3. Estudos de Análise de Confiabilidade em Vigas de Concreto Armado Reforçadas com CFC	32
1.3. Objetivos	34
1.4. Organização do Trabalho	35
2 Projeto de Vigas de Concreto Armado Submetidas à Força Cortante e à Flexão	37
2.1. Projeto de Vigas de Concreto Armado Submetidas à Força Cortante	37
2.1.1. Critério do Projeto da NBR 6118-2003	40
2.2. Projeto de Vigas de Concreto Armado Submetidas à Flexão	43
2.2.1. Expressões de Dimensionamento de Vigas Submetidas à Flexão	46
2.3. Projeto de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com CFC Submetidas à Força Cortante	48
2.3.1. Modelo de Chen e Teng (2003 a, b)	50
2.3.2. Modos de Ruptura à Força Cortante	57
2.4. Projeto de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com CFC Submetidas à Flexão	59
2.4.1. Coeficiente de Segurança do CFC para Flexão	60
2.4.2. Modelo de Cálculo do Reforço à Flexão com CFC	61
2.4.3. Modos de Ruptura à Flexão de Vigas Reforçadas	63
3 Confiabilidade de Estruturas	66
3.1. Níveis dos Métodos de Projeto de Estruturas	66

3.2. Conceitos Fundamentais	69
3.2.1. Função Densidade e Cumulativa de Probabilidade	69
3.2.2. Correlação entre Variáveis Aleatórias	70
3.2.3. Função de Falha	72
3.2.4. Probabilidade de Falha	73
3.2.5. Confiabilidade de Estruturas	73
3.3. Definição do Índice de Confiabilidade Beta	74
3.3.1. Índice de Confiabilidade de Referência	75
3.4. Métodos de Análise de Confiabilidade	77
3.4.1. Método de Simulação de Monte Carlo	77
3.4.2. Métodos Analíticos de Análise de Probabilidade	81
3.4.2.1. Método FORM (First Order Reliability Method)	82
3.5. Confiabilidade de Sistemas Estruturais	85
3.5.1. Sistemas em Paralelo	86
3.5.2. Sistemas em Série	86
3.5.3. Índice de Confiabilidade do Sistema	87
3.5.4. Limites para a Probabilidade de Falha do Sistema	89
3.6. FERUM, (Finite Element Reliability Using Matlab)	90
3.7. Medidas de Sensibilidade	91
 4 Determinação Experimental das Propriedades Estatísticas das Fibras de Carbono	 93
4.1. Objetivos dos Ensaios	93
4.2. Sistema de Reforço Estrutural	94
4.3. Descrição do Ensaio de Resistência à Tração das Fibras de Carbono	96
4.4. Determinação do Tipo de Distribuição e Parâmetros Estatísticos das Variáveis	101
4.4.1. Teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S)	101
4.4.2. Teste do Chi-quadrado	104
4.5. Resultados	108
 5 Formulação do Problema	 109
5.1. Introdução	109
5.2. Funções de Falha para Análise de Confiabilidade de Vigas Submetidas à	

Força Cortante	109
5.2.1. Funções de Falha para Análise de Confiabilidade de Vigas Submetidas à Força Cortante sem Reforço	109
5.2.2. Funções de Falha para Análise de Confiabilidade de Vigas Submetidas à Força Cortante com Reforço	110
5.3. Funções de Falha para Análise de Confiabilidade de Vigas Submetidas à Flexão	111
5.3.1. Função de Falha para Análise de Confiabilidade de Vigas Submetidas à Flexão sem Reforço	111
5.3.2. Função de Falha para Análise de Confiabilidade de Vigas Submetidas à Flexão com Reforço	112
5.4. Exemplos de Aplicação	112
5.4.1. Exemplo de Viga Submetida à Força Cortante e à Flexão Analisada por Seções	112
5.4.2. Exemplo de Viga com e sem Reforço de CFC	120
5.4.2.1. Propriedades Estatísticas das Variáveis	122
5.4.2.2. Exemplo de Viga Submetida à Força Cortante	125
5.4.2.3. Exemplo de Viga Submetida à Flexão	135
6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	139

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Compósitos com fibras de carbono (CFC); retirada de Juvandes (2002).	24
Figura 2.1 – Trajetória das tensões principais em viga não fissurada.	37
Figura 2.2 – Distribuição de tensões e fissuras de força cortante.	38
Figura 2.3 – Modelo treliça; adaptada de Collins e Mitchell (1987).	39
Figura 2.4 – Modelo de uma viga de concreto segundo a treliça generalizada.	40
Figura 2.5 – Diagrama de deformações dos domínios 2, 3 e 4.	44
Figura 2.6 – Zonas de dimensionamento em função da deformação no aço.	44
Figura 2.7 – Distribuição de tensões e deformações em viga de seção retangular com armadura simples.	46
Figura 2.8 – Configurações de reforço à força cortante com CFC; retirada de Khalifa (1999).	48
Figura 2.9 – Viga reforçada; adaptada de Chen e Teng (2003a).	50
Figura 2.10 – Detalhe do reforço contínuo; adaptada de Chen e Teng (2003a)	51
Figura 2.11 – Força cortante x abertura da fissura; adaptada de Teng <i>et al.</i> (2001)	54
Figura 2.12 – Testes realizados por Chen e Teng; adaptada de Chen e Teng (2003 a).	55
Figura 2.13 – Posições eficazes ou ineficazes das faixas de PRF; adaptada de Chen e Teng (2003a).	57
Figura 2.14 – Modos de ruptura à força cortante; adaptada de Täljsten (2003)	58
Figura 2.15 – Modos de ruptura ao cortante da viga reforçada; adaptada de Täljsten (2003).	59
Figura 2.16 – Diagramas $\sigma \times \varepsilon$ parábola-retângulo e retangular simplificado para distribuição de tensões de compressão no concreto.	61
Figura 2.17 – Modos de Ruptura possíveis; adaptada de Beber (2003).	64
Figura 3.1 – Funções: (a) densidade; (b) cumulativa de probabilidades.	70
Figura 3.2 – Função densidade de probabilidades conjunta.	71

Figura 3.3 – Definição da função de falha.	72
Figura 3.4 – Índice de confiabilidade β	74
Figura 3.5 – Algoritmo para o cálculo da probabilidade de falha por Monte Carlo.	80
Figura 3.6 – Transformação do espaço original para o espaço reduzido (Normal Padrão); adaptada de Choi e Youn (2001).	82
Figura 3.7 – Aproximação do Método FORM para superfícies côncavas e convexas.	83
Figura 3.8 – Representação gráfica da busca do ponto de projeto para um problema com duas variáveis; adaptada de Choi e Youn (2001).	85
Figura 3.9 – Sistemas na análise de confiabilidade a) sistema em série b) sistema em paralelo.	87
Figura 3.10 – Função de falha com mais de um ponto de mínimo.	88
Figura 4.1 – Tecido de fibras de carbono no sentido longitudinal (Meneghel, 2005).	94
Figura 4.2 – Resina epóxi: (a) componentes A e B; (b) preparação da resina para a aplicação. (Meneghel, 2005).	95
Figura 4.3 – Dimensões dos corpos-de-prova segundo a norma ASTM D3039/3039M.	97
Figura 4.4 – Confecção dos corpos-de-prova.	97
Figura 4.5 – Máquina de ensaios EMIC.	98
Figura 4.6 – Extensômetro colado no corpo-de-prova.	98
Figura 4.7 – Corpos-de-prova ensaiados.	99
Figura 4.8 – Modos de falha dos corpos-de-prova.	99
Figura 4.9 – Teste Kolmogorov-Smirnov $F_x(x_i)$ vs S_n .	102
Figura 4.10 – Função densidade acumulada teórica e observada da resistência última à tração do CFC.	103
Figura 4.11 – Frequências teóricas e observadas teste Chi-quadrado.	105
Figura 4.12 – Histograma teste Chi-quadrado.	106
Figura 4.13 - Funções de distribuição Normal, Lognormal e Weibull.	106
Figura 5.1 – Dimensões da viga analisada.	112
Figura 5.2 – Variação da carga concentrada na viga.	113
Figura 5.3 – Índices de confiabilidade e variação da posição da carga concentrada na seção 1.	115

Figura 5.4 – Índices de confiabilidade e variação da posição da carga concentrada na seção 2.	116
Figura 5.5 – Índices de confiabilidade e variação da posição da carga concentrada na seção 4.	117
Figura 5.6 – Índices de confiabilidade e variação da posição da carga concentrada na seção 4.	118
Figura 5.7 – Índices de confiabilidade e variação da posição da carga concentrada na seção 5.	119
Figura 5.8 – Exemplo proposto.	120
Figura 5.9 – Diagrama de força cortante para as condições iniciais.	121
Figura 5.10 – Diagrama de momentos de flexão para as condições iniciais.	12
Figura 5.11 – Diagrama de força cortante após mudança de uso.	121
Figura 5.12 – Diagrama de momento de flexão após mudança de uso.	121
Figura 5.13 – Gráfico do processo iterativo do cálculo da armadura de cisalhamento e valores de β_1 , β_2 , β_{alvo} e $\beta_{sistema}$.	129
Figura 5.14 – Representação gráfica do processo iterativo do cálculo do CFC e β_1 , β_3 , β_4 , β_s .	132
Figura 5.15 – Fatores de importância da viga submetida à força cortante sem reforço.	133
Figura 5.16 – Fatores de importância viga submetida à força cortante com reforço	134
Figura 5.17 – Gráfico do processo iterativo do cálculo da armadura de flexão e valores de β_1 e β_{alvo} .	136
Figura 5.18 – Fatores de importância viga submetida à flexão sem e com reforço	138

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Propriedades das fibras de carbono (Bulletin 14 da FIB, 2001).	24
Tabela 2.1 – Modos de ruptura possíveis (Beber, 2003).	63
Tabela 3.1 – Índices de confiabilidade β alvos relativos a um ano de período de referência.	75
Tabela 4.1 – Recomendações para a geometria dos corpos-de-prova segundo ASTM D3039/3039M.	96
Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios.	100
Tabela 4.3 – Resultados teste Kolmogorov-Smirnov.	104
Tabela 4.4 – Resultados teste Chi-Quadrado para a resistência à tração do CFC	107
Tabela 5.1 – Variáveis aleatórias com propriedades estatísticas	113
Tabela 5.2 – Índices de confiabilidade para a seção 1.	114
Tabela 5.3 – Índices de confiabilidade por FERUM e Monte Carlo.	115
Tabela 5.4 – Índices de confiabilidade para a seção 2.	116
Tabela 5.5 – Índices de confiabilidade para a seção 3.	117
Tabela 5.6 – Índices de confiabilidade para a seção 4.	118
Tabela 5.7 – Índices de confiabilidade para a seção 5.	119
Tabela 5.8 – Desvio padrão segundo condição de preparo NBR-6118.	122
Tabela 5.9 – Cargas acidentais em lajes.	124
Tabela 5.10 – Variáveis do exemplo.	126
Tabela 5.11 – Variáveis aleatórias do exemplo com os parâmetros estatísticos.	127
Tabela 5.12 – Comparação métodos Monte Carlo e FORM.	128
Tabela 5.13 – Iteração de cálculo da armadura a cisalhamento β_1 e β_2 .	129
Tabela 5.14 – Variáveis aleatórias do exemplo com os parâmetros estatísticos.	131
Tabela 5.15 – Valores dos índices de confiabilidade $\beta_1, \beta_3, \beta_4$ para a taxa de CFC ρ_f .	131
Tabela 5.16 – Iteração de cálculo da taxa de fibra de carbono e β_{sistema} .	132
Tabela 5.17 – Fatores de importância viga submetida à força cortante sem reforço.	133

Tabela 5.18 – Fatores de importância viga submetida à força cortante com reforço	134
Tabela 5.19 – Variáveis aleatórias do exemplo com os parâmetros estatísticos	135
Tabela 5.20 – Iteração de cálculo da armadura a flexão β_1 .	136
Tabela 5.21 – Fatores de importância viga submetida à flexão sem e com reforço	138

Lista de Símbolos

Romanos

A_f	Área de CFC
A_s	Área de armadura longitudinal de aço
A_{sw}	Área de armadura transversal de aço
b_w	Largura da seção transversal da viga
CoV	Coefficiente de variação
d	Altura útil da viga
D_f	Fator de distribuição da tensão
D_n	Diferença máxima entre as funções de densidade acumulada teórica e observada
D_n^α	Diferença máxima entre as funções de densidade acumulada teórica e observada aceitável
d_f	Altura efetiva do CFC
d_{fb}	Distância entre a face comprimida da viga e a extremidade inferior do CFC
d_{ft}	Distância entre a face comprimida da viga e a extremidade superior do CFC
E_f	Módulo de elasticidade do CFC
E_s	Módulo de elasticidade do aço
f_{cd}	Resistência de cálculo do concreto a compressão
f_{cj}	Resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de j dias
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
f_{cm}	Resistência média do concreto à compressão (cilindro padrão)
f_{ctd}	Resistência de cálculo do concreto à tração direta
$f_{ctk,inf}$	Resistência característica inferior do concreto à tração
f_{ctm}	Resistência média do concreto à tração
f_f	Tensão última do CFC
f_{fe}	Tensão efetiva do CFC
f_f	Valor médio da resistência à tração última do CFC
f'_c	Resistência característica do concreto à compressão

$f_R(r)$	Função densidade de probabilidade marginal da resistência
$f_{RS}(r,s)$	Função densidade de probabilidades conjunta
$f_S(s)$	Função densidade de probabilidade marginal da solicitação
f_y	Tensão de escoamento à tração do aço
f_{yd}	Tensão máxima permitida no aço
f_{yk}	Resistência característica de escoamento do aço
f_{yw}	Resistência de escoamento da armadura transversal de aço
f_{ywd}	Resistência de cálculo de escoamento da armadura transversal de aço
$f_x(x)$	função densidade de probabilidades de X
$F_x(x)$	função cumulativa de probabilidades de X
g_1	Função de falha relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto
g_2	Função de falha relativa à ruína por tração diagonal
g_3	Função de falha relativa à ruína por tração diagonal, devido à ruptura do reforço.
g_4	Função de falha relativa à ruína por tração diagonal, devido ao descolamento do reforço.
h	Altura da viga
h_{fe}	Altura efetiva do CFC
L_e	Comprimento de ancoragem efetivo
$L_{máx}$	Comprimento de aderência máximo
M_d	Momento fletor de cálculo
M_{dmax}	Momento fletor de cálculo máximo no trecho em análise
M_{pp}	Momento na viga submetida à flexão devida ao peso próprio
P_i	Termo de primeira ordem da probabilidade de falha de um sistema em série
P_{ik}	Termo de segunda ordem da probabilidade de falha de um sistema em série
P_{ikl}	Termo de terceira ordem da probabilidade de falha de um sistema em série
p_f	Probabilidade de falha
$p_{f adm}$	Probabilidade de falha admissível
R_{cc}	Resultante de tensão do concreto na flexão

R_{st}	Resultante de tensão do aço na flexão
s	Espaçamento entre as armaduras transversais de aço
S_d	Desvio padrão da dosagem do concreto, tabelado na NBR 1265 (1996) de acordo com a condição de preparo do concreto
s_f	Espaçamento de eixo a eixo entre estribos de CFC
s_{fmax}	Espaçamento de eixo a eixo entre estribos de CFC
s_{nom}	Valor característico da resistência de escoamento do aço
t_f	Espessura da faixa de CFC
$Var(X)$	Variância de uma variável aleatória
V_c	Parcela da força cortante resistida pelo concreto
V_{cd}	Valor de projeto da parcela da força cortante resistida pelo concreto
V_f	Parcela da força cortante resistida pelo CFC
V_{fd}	Valor de projeto da parcela da força cortante resistida pelo CFC
$V_{f,d}$	Parcela de força cortante resistida pelo CFC, limitada pelo descolamento do compósito
$V_{f,r}$	Parcela de força cortante resistida pelo CFC, limitada pela ruptura do compósito
V_g	Força cortante proveniente do carregamento permanente
V_{Rd1}	Valor de projeto da parcela da força cortante resistida pelo concreto
V_{Rd2}	Valor de projeto da força cortante resistida pelas bielas comprimidas
V_{Rd3}	Força cortante resistente de cálculo
V_S	Força cortante solicitante
V_{Sd}	Força cortante solicitante de cálculo
V_{sw}	Parcela da força cortante resistida pela armadura transversal de aço
V_{swd}	Valor de projeto da força cortante resistida pela armadura transversal de aço
w_f	Largura do estribo de CFC
z_{cc}	Braço de alavanca
z_b	Coordenada da extremidade inferior
z_t	Coordenada da extremidade superior
X_{2lim}	Limite do domínio de deformação na flexão

Gregos

α	Ângulo de inclinação entre a armadura transversal de aço e o eixo longitudinal da viga
α_i	Cosseno diretor entre o vetor normal à superfície de falha no ponto de projeto y^* e o eixo da variável reduzida Y_i
α_i, α_k	Vetores dos cossenos diretores nos pontos de projeto y^* associados aos modos de ruptura
λ	Comprimento máximo de ancoragem
β	Ângulo de inclinação entre a orientação das fibras do CFC e o eixo longitudinal da viga
β	Índice de confiabilidade
β_{alvo}	Índice de confiabilidade admissível
β_1	Índice de confiabilidade referente ao esmagamento das bielas de compressão
β_2	Índice de confiabilidade referente à ruína por tração diagonal
β_3	Índice de confiabilidade referente à tração diagonal devido à ruptura do reforço
β_4	Índice de confiabilidade referente à tração diagonal devido ao descolamento do reforço
β_{serie}	Índice de confiabilidade equivalente obtido considerando a formulação se sistemas em série
β_L	Coefficiente que traduz o comprimento de ancoragem efetivo
β_w	Coefficiente que reflete o efeito da razão entre a largura do CFC e do concreto
ξ	Relação entre as coordenadas das extremidades inferior e superior do reforço.
ε_{cd}	Deformação de encurtamento na fibra mais comprimida de concreto
ε_{cu}	Deformação de encurtamento última na fibra mais comprimida de concreto
ε_f	Deformação específica do CFC
ε_{fe}	Deformação específica efetiva do CFC
ε_{fu}	Deformação específica última do CFC
$\varepsilon_{m\acute{a}x}$	Deformação específica máxima, ou limite, do CFC

ε_s	Deformação do aço do gráfico esforço – deformação
ε_{sd}	Deformação de alongamento na armadura tracionada
ε_{yd}	Deformação de alongamento na armadura tracionada
ϕ	Fator de minoração da resistência
$\Phi ()$	Função de distribuição cumulativa da variável normal padrão
$\Phi (, \rho)$	Função de distribuição cumulativa bidimensional normal padrão
γ_c	Fator de segurança do concreto
γ_f	Coefficiente de segurança para resistência de ancoragem
γ_m	Coefficiente de minoração do momento
γ_s	Fator de segurança do aço
θ	Inclinação das bielas de compressão
ρ	Matriz de correlação
ρ_f	Taxa geométrica de CFC
ρ_{ik}	Coefficiente de correlação entre dois modos de ruptura (duas funções de estado)
ρ_{sw}	Taxa geométrica de armadura transversal
$\rho_{x,y}$	Coefficiente de correlação
$\sigma_f^{máx}$	Tensão máxima no CFC
$\sigma_{f\ Max_D}$	Tensão máxima no FRP, limitada pelo descolamento do compósito
$\sigma_{f\ Max_R}$	Tensão máxima no FRP, limitada pela ruptura do compósito
$\sigma_{f\ yw}$	Desvio padrão da resistência de escoamento do aço
σ_s	Esforço a tração do aço do gráfico esforço - deformação
σ_{sd}	Tensão de cálculo na armadura tracionada

Lista de Abreviaturas

PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
CFC	Carbon fibers composites (Compósitos com Fibras de carbono)
ACI	American Concrete Institute
FIB	Federation Internationale du Beton
NBR	Norma Brasileira
AFORM	Advanced First-Order Reliability Method
FORM	First Order Reliability Method (Método de Confiabilidade de primeira ordem)
PRF	Polímero reforçado com fibras
CFRP	Carbon Fibre Reinforced Polymer (Polímero Armado com Fibras de Carbono)
JCSS	Joint Committee on Structural Safety
LRFD	Load and Resistance Factor Design
PDF	Probability Density Function (Função Densidade de Probabilidades)
CDF	Cumulative Distribution Function (Função de Distribuição Cumulativa)
FOSM	First Order Second Moment (Método de Confiabilidade de segundo momento)
FERUM	Finite Element Reliability Using Matlab
UCB	Universidade da Califórnia em Berkeley
RBDO	Reliability-Based Design Optimization
LEM-DEC	Laboratorio de Estruturas e Materias do Departamento de Engenharia Civil