

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Andrea Isabel Rojas Eraso**

**Análise de Confiabilidade de Longarinas de Pontes  
Ferrovíarias de Concreto Armado**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Marta de Souza Lima Velasco  
Co-orientadora: Prof.<sup>a</sup> Andréia A. Diniz de Almeida

Rio de Janeiro  
Setembro de 2011



**Andrea Isabel Rojas Eraso**

**Análise de Confiabilidade de Longarinas de Pontes  
Ferroviárias de Concreto Armado**

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

**Prof.<sup>a</sup> Marta de Souza Lima Velasco**

Orientador  
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof.<sup>a</sup> Andréia A. Diniz de Almeida**

Co-orientadora  
Universidade Federal Fluminense

**Prof.<sup>a</sup> Claudia Maria de Oliveira Campos**

Universidade Federal Fluminense

**Prof. Rodrigo Bird Burgos**

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 9 de setembro de 2011

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

### **Andrea Isabel Rojas Eraso**

Graduou-se em Engenharia Civil na Universidade de Nariño, Pasto - Colombia, em 2008. Atua na área de Confiabilidade estrutural com ênfase em concreto armado.

#### Ficha Catalográfica

Rojas Eraso, Andrea Isabel

Análise de confiabilidade de longarinas de pontes ferroviárias de concreto armado / Andrea Isabel Rojas Eraso; orientadora: Marta de Souza Lima Velasco; co-orientadora: Andréia A. Diniz de Almeida – 2011. .

128 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Concreto armado. 3. Confiabilidade de estruturas. 4. Estado limite último. 5. Confiabilidade de estruturas. I. Velasco, Marta de Souza Lima. II. Almeida, Andreia A Diniz. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

“Não há sabedoria alguma, nem discernimento algum, nem plano algum que possa opor-se ao Senhor. Prepara-se o cavalo para o dia da batalha, mas o Senhor é que dá a vitória”. Prov. 21:30-31

## Agradecimentos

A Deus pelo seu amor e sua fidelidade, nada teria sentido sem sua maravilhosa presença.

Aos meus pais e a minha família pelo seu amor, seu apoio, suas orações, por ter sempre as palavras oportunas no momento certo.

A minha orientadora Marta de Souza Lima Velasco, pelos conhecimentos transmitidos e por toda sua colaboração.

A Andréia A. Diniz minha co-orientadora, pelos conhecimentos transmitidos, disponibilidade, paciência, incentivo e principalmente pela amizade desenvolvida ao longo destes anos.

Aos professores do departamento, especialmente ao professor Rodrigo Bird Burgos pelos ensinamentos e colaboração neste trabalho.

A todos os amigos e colegas que me acompanharam nesta caminhada, pelos bons momentos compartilhados.

A Lorena Chamorro pela sua amizade e seu apoio, pelas longas noites de trabalhos e por cada momento compartilhado juntas.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, cada aporte foi fundamental.

A CAPES e a PUC-Rio pelo apoio financeiro.

## Resumo

Rojas Eraso, Andrea Isabel; Velasco, Marta de Souza Lima; Almeida, Andreia A. Diniz. **Análise de Confiabilidade de Longarinas de Pontes Ferroviárias de Concreto Armado**, Rio de Janeiro, 2011. 128 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Em todo projeto de estruturas de engenharia existem incertezas associadas às propriedades dos materiais, às propriedades geométricas e aos carregamentos. Essas incertezas geralmente são consideradas através de fatores de segurança. A análise de confiabilidade aplicada ao projeto de estruturas é uma ferramenta que permite avaliar a probabilidade de falha da estrutura para um determinado modo de comportamento e a sensibilidade deste projeto em relação às variáveis consideradas. Neste trabalho são aplicadas estratégias de avaliação da confiabilidade das vigas principais de uma ponte existente de concreto armado, as quais são verificadas no estado limite último na flexão simples e no estado último de serviço na formação de fissuras, segundo as recomendações da NBR6118:2003. Foram desenvolvidas rotinas com o auxílio do programa Matlab para avaliar a probabilidade de falha da ponte segundo o método de simulação de Monte Carlo e o método FORM (First Order Reliability Method). Também é realizada uma análise de sensibilidade para analisar a influência de cada variável na confiabilidade da ponte.

## Palavras-chave

Pontes Ferroviárias; confiabilidade; concreto armado; estruturas existentes.

## Abstract

Rojas Eraso, Andrea Isabel; Velasco, Marta de Souza Lima (Advisor); Almeida, Andreia A. Diniz (Co-Advisor). **Reliability Analysis for Stringers of Concrete Railway Bridges**. Rio de Janeiro, 2011. 128p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the project of engineering structures, some design variables are usually taken as deterministic, although there are uncertainties associated with loads, material and geometrical properties. The use of safety factors is the most common strategy to deal with these uncertainties. The reliability analysis of structures is a tool to assess the probability of structural failure in a certain behavior and the sensitivity of this failure in relation to each variable considered. This work is concerned with the reliability analysis of the main beams of an existing bridge made of reinforced concrete, which is checked at the ultimate limit state in simple bending and the ultimate state of service in the formation of cracks as recommended by NBR6118: 2003. Matlab routines are developed in order to assess the probability of failure of the bridge using two methods: Monte Carlo simulation and FORM (First Order Reliability Method). Additionally, a sensitivity analysis is performed in order to analyze the influence of each variable in the reliability of the bridge.

## Keywords

Railway bridges; reliability; reinforced concrete; existing structures.

## Sumário

1	Introdução	21
1.1.	Considerações Iniciais	21
1.2.	Objetivo	22
1.3.	Organização do Trabalho	23
2	Revisão Bibliográfica	25
2.1.	Estruturas Existentes	25
2.2.	Monitoração e Gerenciamento de Pontes	29
2.3.	Fadiga	33
2.4.	Pontes de Concreto Armado	35
2.5.	Códigos de Calibração	36
2.6.	Modelos de Carga	38
2.7.	O FORM Como Método de Avaliação da Probabilidade de Falha	39
2.8.	Programas Computacionais	40
3	Sistemática de Avaliação de Pontes e Viadutos	41
3.1.	Panorama Geral do que é Feito	41
3.2.	Normas Técnicas	44
4	Confiabilidade Estrutural	45
4.1.	Introdução	45
4.2.	Estados Limites	48
4.3.	Função de Estado Limite	49
4.4.	Probabilidade de Falha	49
4.5.	Métodos de Cálculo da Probabilidade de Falha	51
4.5.1.	Método de Primeira Ordem FORM (First Order Reliability Method)	52
4.5.2.	Análise de Sensibilidade	56
4.5.3.	Método de Simulação de Monte Carlo	56
4.6.	Índice de Confiabilidade de Referência	58
5	Formulação do Problema	61



5.1. Introdução	61
5.2. Verificação de Segurança no Estado Limite Último	61
5.3. Variáveis Aleatórias	62
5.4. Função de Estado Limite	64
5.5. Momento Resistente	64
5.6. Momento Solicitante	68
5.7. Verificação de Segurança no Estado Limite de Serviço	71
5.7.1. Estado Limite de Formação de Fissuras	71
5.7.2. Estado Limite de Abertura de Fissuras	74
5.8. Rotinas Implementadas para Análise de Confiabilidade Associadas ao Estado Limite de Ruptura	79
6 Estudo de Caso	83
6.1. Descrição Geral da Ponte	83
6.2. Análise de Confiabilidade da Ponte	84
6.2.1. Análise com Seis Variáveis Aleatórias	86
6.2.2. Análise com Quatro Variáveis Aleatórias	88
6.2.3. Análise com Três Variáveis Aleatórias	93
6.2.4. Influência do Coeficiente de Variação (COV) da Carga Móvel (Q) na Probabilidade de Falha	94
6.2.5. Influência da Variação da Carga Móvel na Probabilidade de Falha	97
6.2.6. Análise com Quatro Variáveis Aleatórias sem Considerar Coeficientes de Segurança	99
6.2.7. Influência da Variação COV da Carga Móvel (Q) na Probabilidade de Falha	101
6.2.8. Influência da Variação da Carga Móvel na Probabilidade de Falha	103
6.3. Análise no Estado Limite de Serviço na Formação de Fissuras	105
7 Conclusões e Sugestões	107
7.1. Sugestões	108
8 Referências Bibliográficas	109
Anexo A Teoria de Probabilidade	119
A.1. Introdução	119
A.2. Variável Aleatória	119
A.3. Função Cumulativa de Distribuição (CDF) e Função Densidade de	

Probabilidade (PDF)	119
A.4. Principais Parâmetros de uma Variável Aleatória Contínua	121
A.5. Distribuições de Probabilidade	122
A.5.1. Distribuição Normal ou Gaussiana	122
A.5.2. Outras Distribuições	122
A.5.3. Distribuições Normais Equivalentes	124
A.5.4. Coeficientes de Correlação Equivalentes	124
A.6. Coeficientes Parciais de Segurança	125
A.7. Valores Característicos das Variáveis	126

## Lista de figuras

Figura 2.1. Pesquisas necessárias e áreas de estudo envolvidas (adaptado de Catbas <i>et al</i> 2008)	32
Figura 2.2. Esquema básico para análise de confiabilidade usando SHM (adaptado de Catbas <i>et al</i> 2008 ).	32
Figura 4.1 Representação da integral de convolução (fonte: Melchers 2002)	50
Figura 4.2. Definição do domínio de falha (fonte: Melchers 2002).	51
Figura 4.3. Transformação do espaço original para o espaço reduzido normal padrão (fonte: Choi e Youn 2001).	53
Figura 4.4. Aproximação do Método FORM para superfícies côncavas e convexas (fonte: Lopez 2007).	53
Figura 4.5. Representação gráfica da busca do ponto de projeto para um problema com duas variáveis (fonte: Choi e Youn 2001).	55
Figura 5.1. Domínios de estado limite último de uma seção transversal (fonte: NBR 6118:2003)	65
Figura 5.2. Seção Tipo da ponte	66
Figura 5.3. Esquema geral para uma viga T	67
Figura 5.4. Locomotiva tipo DASH9 (fonte: Relatório Técnico, Veloso <i>et al</i> 2007).	69
Figura 5.5. Vagão tipo GDT (fonte: Relatório Técnico, Veloso <i>et al</i> 2007).	69
Figura 5.6. Esquema geral dos estádios de deformação.	72
Figura 5.7. Concreto de envolvimento da armadura (fonte NBR6118:2003)	78
Figura 5.8. Fluxograma esquemático das opções de análise implementadas no programa de confiabilidade de estruturas.	82
Figura 6.1. Vista geral da ponte sobre o Rio Vermelho (fonte: Relatório Técnico, Veloso <i>et al</i> 2007).	83
Figura 6.2. Sistema estrutural da ponte (fonte: Relatório Técnico, Veloso <i>et al</i> 2007).	84
Figura 6.3. Seção $\pi$ da ponte sobre o Rio Vermelho (a) largura da longarina 35 cm. (b) Largura da longarina 70 cm. (fonte: Relatório Técnico, Veloso <i>et al</i> 2007).	84
Figura 6.4. Comparação do índice de confiabilidade obtido pelo FORM	

para 6 e 4 variáveis aleatórias.	91
Figura 6.5. Comparação da probabilidade de falha obtida pelo FORM para 6 e 4 variáveis aleatórias.	91
Figura 6.6. Comparação da probabilidade de falha para as análises feitas com seis, quatro e três variáveis aleatórias.	94
Figura 6.7. Variação do índice de confiabilidade em função do COV da carga móvel Q.	96
Figura 6.8. Variação do fator de importância em função do COV de Q.	96
Figura 6.9. Comparação do índice de confiabilidade em função da variação de Q	98
Figura 6.10. Comparação da probabilidade de falha em função da variação de Q	98
Figura 6.11. Fator de importância em função da variação da carga móvel Q.	99
Figura 6.12. Comparação da probabilidade de falha obtida com e sem coeficientes de segurança	100
Figura 6.13. Variação do índice de confiabilidade em função do COV da carga móvel Q, sem coeficientes de segurança.	102
Figura 6.14. Variação do fator de importância em função do COV de Q, sem coeficientes de segurança.	103
Figura 6.15. Comparação do índice de confiabilidade em função da variação de Q sem coeficientes de segurança	104
Figura 6.16 Probabilidade de falha em função da variação de Q sem coeficientes de segurança	104
Figura A.1 (a) Função Densidade de Probabilidade (PDF) e (b) Função Cumulativa de Distribuição (CDF).	120
Figura A.2. Valor característico típico para a variável Resistência S (fonte: James 2003)	127
Figura A.3. Valor característico típico para a variável solicitação S (fonte: James 2003)	128

## Lista de tabelas

Tabela 2.1. Níveis de avaliação da segurança, (Wisniewski, 2007)	28
Tabela 4.1. Valores do índice de confiabilidade de referência $\beta_T$ e Probabilidade de falha $P_f$ associadas, relacionadas ao estado limite último.	59
Tabela 4.2. Valores do índice de confiabilidade de referência $\beta_T$ e probabilidade de falha $P_f$ associados ao estado limite de serviço	60
Tabela 5.1. Modelos probabilísticos das variáveis aleatórias	63
Tabela 5.2. Abertura máxima das fissuras ( $w_k$ ), para combinação freqüente, em função das classes de agressividade ambiental (NBR6118:2003).	74
Tabela 5.3. Classes de agressividade ambiental	74
Tabela 6.1. Seções consideradas na análise	85
Tabela 6.2. Dados probabilísticos das variáveis aleatórias	85
Tabela 6.3. Dados de área e momento de inércia para as seções estudadas	85
Tabela 6.4. Armaduras de tração e compressão para cada seção	85
Tabela 6.5. Probabilidade de falha segundo os métodos: simulação de Monte Carlo e FORM para seis variáveis aleatórias sem considerar armadura de pele.	86
Tabela 6.6. Comparação das probabilidades de falha calculadas segundo a simulação de Monte Carlo e o FORM sem armadura de pele para 6 variáveis aleatórias.	87
Tabela 6.7. Probabilidade de falha segundo os métodos: simulação de Monte Carlo e FORM para seis variáveis aleatórias com armadura de pele	88
Tabela 6.8. Comparação das probabilidades de falha calculadas segundo a simulação de Monte Carlo e o FORM com armadura de pele para 6 variáveis aleatórias.	88
Tabela 6.9. Probabilidade de falha para os métodos: simulação de Monte Carlo e FORM para quatro variáveis aleatórias sem armadura de pele.	89
Tabela 6.10. Comparação das probabilidades de falha calculadas segundo a simulação de Monte Carlo e o FORM sem armadura de pele para 4 variáveis aleatórias.	89
Tabela 6.11. Resultado da probabilidade de falha para os métodos: simulação de Monte Carlo e FORM para quatro variáveis aleatórias com armadura de pele	90

Tabela 6.12. Comparação das probabilidades de falha calculadas segundo a simulação de Monte Carlo e o FORM sem armadura de pele para 4 variáveis aleatórias	90
Tabela 6.13. Comparação entre as análises feitas com o FORM para seis e quatro variáveis aleatórias	90
Tabela 6.14. Valores característicos e valores médios das variáveis aleatórias	92
Tabela 6.15. Resultados do método FORM para quatro variáveis aleatórias	92
Tabela 6.16. Comparação entre as análises feitas com o FORM para quatro variáveis aleatórias.	93
Tabela 6.17. Resultado do método FORM para três variáveis aleatórias	93
Tabela 6.18. Comparação entre as análises com três e seis variáveis aleatórias.	94
Tabela 6.19. Análise de sensibilidade da probabilidade de falha em função do COV da carga móvel Q.	95
Tabela 6.20. Valores característicos e valores médios da carga móvel Q	97
Tabela 6.21. Resultado do FORM para quatro variáveis aleatórias com carga móvel Q aumentada 25% 50% e 100%	97
Tabela 6.22. Análises para quatro variáveis aleatórias pelo método FORM, considerando a armadura de pele.	100
Tabela 6.23. Resultados obtidos com e sem coeficientes de segurança	100
Tabela 6.24. Análises para quatro variáveis aleatórias pelo método FORM, desconsiderando a armadura de pele.	101
Tabela 6.25. Comparação entre os dados obtidos com e sem coeficientes de segurança, sem armadura de pele.	101
Tabela 6.26. Resultados da análise de sensibilidade da probabilidade de falha em função do COV da carga Q, sem considerar coeficientes de segurança	102
Tabela 6.27. Resultado do método FORM variando a carga móvel, sem considerar coeficientes de segurança	103
Tabela 6.28. Resultados (via FORM), para o estado limite de formação de fissuras	105
Tabela A.1. Distribuições de probabilidade mais utilizadas	123

## Lista de Símbolos

### Romanos

$a$	Parâmetro da distribuição Uniforme
$A_{cri}$	Área da região de envolvimento
$A_s$	Área da seção transversal da armadura longitudinal de tração
$A'_s$	Área da seção da armadura longitudinal de compressão
$b$	Parâmetro da distribuição Uniforme
$b_f$	Largura da mesa da viga
$b_w$	Largura da alma da viga
$C$	Valor da confiabilidade da estrutura
$d$	Altura útil
$d'$	Altura útil
$E_{cs}$	Módulo de elasticidade secante do concreto
$E_s$	Módulo de elasticidade do aço
$E(X)$	Valor médio ou a média de uma variável aleatória $X$
$F$	Domínio de falha
$F$	Valor que depende somente de $\rho_{ij}$ e dos coeficientes de variação das variáveis aleatórias não normais
$f_{cd}$	Resistência de cálculo à compressão do concreto
$f_{ck}$	Resistência à compressão do concreto
$f_{ct}$	Resistência à tração direta do concreto
$f_{ct,m}$	Resistência media do concreto a tração
$F_{d,ser}$	Valor de cálculo das ações para combinações de serviço
$F_{gik}$	Valor característico das ações permanentes
$F_{q1k}$	Valor característico da ação variável principal direta
$F_R(s)$	Representa a probabilidade de $R \leq s$
$f_R$	Função densidade de probabilidade marginal da resistência
$f_R(r)$	Função densidade de probabilidade da resistência
$f_{RS}$	Função densidade de probabilidade conjunta
$f_{RS}(r,s)$	Função conjunta de densidade de probabilidade de $R$ e $S$
$f_s$	Função densidade de probabilidade marginal da solicitação
$f_s(s)$	Função densidade de probabilidade da solicitação
$f_s(s)ds$	Representa a probabilidade de $S$ assumir um valor entre $s$ e $s+ds$

$F_x(\mathbf{X})$	Função cumulativa de distribuição
$f_x(\mathbf{X})$	Função densidade de probabilidade
$f_{yd}$	Resistência de cálculo à tração do aço
$f_{yk}$	Resistência à tração do aço
$g(\mathbf{Y})$	Função de falha escrita em função das variáveis no espaço normal padrão
$g(\mathbf{Y}^K)$	Valor da função de falha no espaço reduzido
$G(\mathbf{X})$	Função de estado limite no espaço original
$h$	Altura da viga
$h_f$	Altura das asas da viga
$I_c$	Momento de inércia da seção bruta do concreto
$I_e$	Momento equivalente segundo a formula de Brandson
$I_i$	Fator de importância
$I_{II}$	Momento de inércia no Estádio II puro
$\mathbf{J}$	Jacobiano da transformação de Nataf
$k$	Nível de confiança desejado
$k$	Parâmetro das distribuições Tipo II Máximo e Tipo III Mínimo (Weibull)
$k_R$	Fator que depende do tipo de distribuição considerada para a resistência e do percentil especificada para o valor característico
$k_S$	Fator que depende do tipo de distribuição considerada para a solicitação e do percentil especificada para o valor característico
$L$	Matriz triangular inferior obtida a partir da decomposição de Choleski da matriz dos coeficientes de correlações equivalentes das variáveis $X$
$n_s$	Número de simulações para o método de simulação de Monte Carlo
$\mathbf{m}$	Vetor com as médias normais equivalentes das variáveis aleatórias $X$
$M_f$	Momento de fissuração
$M_{rd}$	Momento resistente de cálculo
$M_{sd}$	Momento solicitante de cálculo
$M_{sp}$	Momento solicitante por carga permanente
$M_{spadic}$	Momento solicitante por carga adicional para cálculo do momento por carga permanente
$M_{sp1}$	Momento auxiliar para o cálculo do momento solicitante por carga permanente
$M_{sq}$	Momento solicitante por carga móvel



$M_{sq1}$	Momento auxiliar para o cálculo do momento por carga móvel
$P_f$	Probabilidade de falha associada ao problema
$P_{fadm}$	Probabilidade de falha admissível
$Q$	Carga móvel
$Q_{in}$	Valor nominal da i-ésima carga (ou seu efeito)
$R$	Resistência do elemento
$R_{cd}$	Força que age no concreto
$R_n$	Resistência nominal
$R_K$	Valor característico da resistência
$R_{sd}$	Força que age no aço de tração
$R'_{sd}$	Força que age no aço de compressão
$S$	Solicitação imposta ao elemento
$S_K$	Valor característico da solicitação
$u$	Parâmetro da distribuição Tipo I Máximo (Gumbel) e Tipo I Mínimo
$v$	Parâmetro das distribuições Tipo II Máximo e Tipo III Mínimo (Weibull)
$Var(\mathbf{X})$	Variância de uma variável aleatória $X$
$w$	Abertura de fissura
$w_1$	Abertura de fissura 1
$w_2$	Abertura de fissura 2
$w_k$	Abertura máxima das fissuras
$x$	Profundidade da linha neutra
$\mathbf{X}$	Indicador de variável aleatória
$X_{II}$	Posição da linha neutra no estágio II
$X_{2lim}$	Altura limite para o domínio 2
$X_{3lim}$	Altura limite para o domínio 3
$\mathbf{Y}$	Variáveis normais padrão estatisticamente independentes
$\mathbf{Y}^*$	Ponto de projeto no espaço reduzido
$y_t$	Distância do centro de gravidade da seção transversal a sua fibra mais tracionada

## Gregos

$\alpha$	Parâmetro da distribuição Rayleigh
$\alpha$	Valor que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta
$\alpha_e$	Relação entre o módulo de elasticidade do aço e o módulo de

	elasticidade secante do concreto
$\alpha_i^2$	Co-seno diretor entre o vetor normal à superfície de falha no ponto de projeto e o eixo da variável reduzida
$\beta$	Índice de confiabilidade
$\beta_{adm}$	Índice de confiabilidade admissível
$\beta_T$	Índice de confiabilidade de referência
$\Gamma$	Matriz inversa da matriz L
$\gamma$	Peso específico do concreto
$\gamma_i$	Coefficiente de majoração da i-ésima carga (ou seu efeito)
$\gamma_k$	Coefficiente de segurança global ou característico
$\epsilon_s$	Deformação da armadura
$\epsilon_c$	Deformação da fibra de concreto
$\epsilon_{yd}$	Deformação do cálculo do aço correspondente a tensão de escoamento
$\eta$	Coefficiente de conformação superficial
$\lambda$	Parâmetro da distribuição Lognormal
$\lambda_o$	Coefficiente de segurança central
$\lambda_k$	Coefficiente de majoração da solicitação
$\mu_R$	Valor médio da resistência
$\mu_S$	Valor médio da solicitação
$\mu_X$	Valor médio de uma variável aleatória X
$\mu_X^N$	Média normal equivalente no ponto $x^*$
$\xi$	Parâmetro da distribuição Lognormal
$\rho_{ij}$	Coefficiente de correlação entre as variáveis $X_i$ e $X_j$
$\rho_{ij}^E$	Coefficiente de correlação equivalente
$\rho_r$	Taxa de armadura passiva ou ativa aderente em relação à área da região de envolvimento.
$\sigma$	Matriz diagonal contendo os desvios padrões normais equivalentes das variáveis aleatórias X
$\sigma$	Tensão obtida pela teoria linear para as cargas máximas esperadas durante a vida útil da estrutura
$\sigma_{adm}$	Tensão admissível
$\sigma_{lim}$	Tensão limite
$\sigma_X^N$	Desvio padrão normal equivalente no ponto $x^*$
$\sigma_s$	Tensão de tração no centro de gravidade da armadura considerada

calculada no Estádio II

$\sigma_{sd}$	Tensão de cálculo à compressão no concreto
$\sigma'_{sd}$	Tensão de cálculo à tração no concreto
$\sigma_R$	Parâmetro da distribuição Rayleigh
$\sigma_X$	Desvio padrão de uma variável aleatória X
$\tau$	Parâmetro das distribuições Tipo I Máximo (Gumbel) e Tipo I Mínimo
$\Phi$	Fator de minoração da resistência
$\Phi()$	Função de distribuição cumulativa da variável normal padrão
$\Phi()$	Função densidade de probabilidade normal padrão
$\Phi^{-1}()$	Inversa da distribuição cumulativa normal padrão
$\phi()$	Representa a função de densidade de probabilidade
$\phi$	Diâmetro da barra utilizada na armadura de tração
$\varphi$	Coefficiente de impacto
$\varphi_k$	Coefficiente de minoração da resistência
$\psi_1$	Fator de redução de combinação freqüente para estado limite de serviço
$\psi_2$	Fator de redução de combinação quase freqüente para estado limite de serviço
$\nabla g(\mathbf{Y}^k)$	Gradiente da função de falha no espaço reduzido, avaliada no ponto de projeto para iteração K, $\mathbf{Y}^k$ .
$\nabla G(\mathbf{X})$	Gradiente da função de falha no espaço original avaliado no ponto X
$\nabla g(\mathbf{Y}^*)_i$	Componente do gradiente da função de estado no espaço reduzido

## Lista de Abreviaturas

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASCE	American Society of Civil Engineers
BMS	Bridge Management System ( <i>Sistema de gerenciamento de pontes</i> )
CEB	Comite Euro-International Du Beton
CDF	Cumulative Distribution Function ( <i>Função Cumulativa de Distribuição</i> )
COV	Coeficiente de variação
C.S.	Coeficiente de segurança
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce
EFC	Estrada de Ferro Carajás
ELF	Estado limite de fadiga
ELS	Estado limite de serviço
ELU	Estado limite último
FORM	First Order Reliability Method ( <i>Método de Confiabilidade de Primeira Ordem</i> )
FOSM	First Order Second Moment ( <i>Método de Confiabilidade de primeira ordem e segundo momento</i> )
HLRF	Algoritmo de Hasofer, Lind, Rackwitz e Fiessler
ISO	International Organization for Standardization
JCSS	Joint Committee on Structural Safety ( <i>Comité de Segurança Estrutural</i> )
LRFD	Load Factor Design
LRFD	Load and Resistance Factor Design
NBR	Norma Brasileira Registrada
NiCAE	Núcleo de Instrumentação e Computação Aplicada à Engenharia
PDF	Probability Density Function ( <i>Função Densidade de Probabilidade</i> )
RSM	Response Surface Methodology ( <i>Métodos de superfície de resposta</i> )
SHM	Structural Health Monitoring ( <i>Monitoramento da Saúde Estrutural</i> )
SORM	Second Order Reliability Method ( <i>Método de Confiabilidade de Segunda Ordem</i> )
VA	Variável Aleatória