

## 8

### Referências Bibliográficas

AASHTO-LRFD. **Bridge design specifications**. Washington DC: Association of State High and Transportation Officials 1994.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). COMMITTEE 440. **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures**. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Ações e Seguranças nas Estruturas – Procedimento: NBR 8681**. Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

\_\_\_\_\_. **Concreto – Preparo, Controle e Recebimento: NBR 12655**. Rio de Janeiro, Brasil, 1996.

\_\_\_\_\_. **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento: NBR 6118**. Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

AUWERAER, H.; PEETERS, B. **International research projects on structural Health Monitoring: an overview**. Structural Health Monitoring, Vol. 2, No. 4, 2003, pp. 341- 358.

AVEN, T.; HEIDE, B. **Reliability and validity of risk analysis**. Reliability Engineering & System Safety, Vol. 94, No. 11, 2009, pp. 1862-1868.

BAILEY, S.F.; BRUHWILER, E.; HIRT, M.A. **Bridge reliability experience in Switzerland**. Published in: Structural Reliability in Bridge Engineering: Design, inspection, Assessment, rehabilitations and Management, Proceedings of a Workshop, 1996, pp. 139-149.

BALAGEAS, D. **Structural Health Monitoring**. Chapter 1, John Wiley & Sons, 2006.

BARBOSA, A.; FREITAS, M.; NEVES, F. **Confiabilidade estrutural utilizando o método de Monte Carlo o redes neurais**. Revista Escola de Minas, Vol. 58, No. 3, 2005, pp. 247-255.

BEZZAZI, M.; GHOULBZOURI, A.; KHAMLICH, A.; PARRÓN, M.; RUBIO, M. **Evaluación de métodos aproximados del análisis de fiabilidad en el caso del diseño elástico de estructuras**. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, UCLM, 2010.

BROWNJHON, J.M.W. **Structural health monitoring of civil infrastructure**. Philosophical transactions of the Royal Society A, Vol. 365, No. 1851, 2007, pp. 589-622.

CALGARO, J-A. **Loads on bridges**. Progress in Structural Engineering and Materials, Vol.1 No. 4, 1998, pp.452-461.

CARRARINI, A. **Reliability analysis of the crosswind stability of railway vehicles**. Journal of Wind engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 95, No. 7, 2007, pp. 493-509.

CASAS, J.R. **Evaluation of existing concrete bridges in Spain**. ACI Concrete International, Vol. 21, No. 8, 1999, pp. 48-53.

CASAS, J.R.; MINGUILLÓN, C.C. **A comprehensive traffic load model for bridge safety checking**, Structural Safety, Vol. 19, No. 4, 1997, pp. 339-359.

CASAS, J.R.; WISNIEWSKI, D.F. **Safety Format and Required Safety Levels Background document D4.4.1**.

CASTRO, L.A. **Análise da segurança no projeto de estruturas: Método dos estados limites**. Dissertação de mestrado – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de estruturas, São Carlos, 1997.

CATBAS, F.N.; AKTAN, A.E.; GRIMMELSMAN, K.A.; TSIKOS, C.J. **Issues in infrastructure Health Monitoring for management**. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 126, No. 7, 2000, pp. 711-724.

CATBAS, F.N.; SUSOY, M.; FRANGOPOL, D. **Structural health monitoring and reliability estimation: long span truss bridge application with environmental monitoring data**. Journal of Engineering Structures, Elsevier, Vol. 30, 2008, pp. 2347-2359.

CHENG, J.; CAI, C.S.; XIAO, R.; CHEN, S.R. **Flutter reliability analysis of suspension bridges**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 93, No. 10, 2005, pp. 757-775.

CHENG, J.; LI, Q.S. **Reliability analysis of a long span steel arch bridge against wind-induced stability failure during construction**, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, No. 3, 2009, 552-558.

\_\_\_\_\_. **Reliability analysis of long span steel arch bridges against wind-induced stability failure**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 97, 2008, pp. 132-139.

CHOI, H.; LEE, S.; CHOI, I.; CHO, H.; MAHADEVAN, S.; **Reliability-based failure cause assessment of collapsed bridge during construction**. Reliability Engineering & System Safety, Vol. 91, No. 6, 2006, pp. 674-688.

CHOI, K.K.; YOUN, B.D. **Advances in Reliability-Based Design Optimization and Probability Analysis**. NASA/ICASE Series on Risk-Based Design, Center for Computer-Aided Design, University of Iowa, 2001.

CHO, H.; LIM, J.; CHOI, H. **Reliability-based fatigue failure analysis for causes assessment of a collapsed steel truss bridge**. Engineering Failure Analysis, Vol. 8, No. 4, 2001, pp. 311-324.

CICILIA, F.; LIMA, E.; SAGRILO, L. **Análisis de confiabilidad estructural de funciones de estado límite con múltiples puntos de diseño usando estrategias evolutivas.** Ingeniería Investigación y tecnología, Vol.10, No.2, 2009, pp. 87-97.

CRUZ, P; WISNIEWSKI, D; CASAS, J. **Métodos de avaliação da segurança de pontes existentes.** Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas. Série II. 2008, pp.19-30.

CULSHAW, B. **Structural health monitoring of civil engineering structures.** Progress in Structural Engineering and Materials, Vol.1, No. 3, 1998, pp.308-315.

DIAMANTIDIS, D. **Reliability assessment of existing structures.** Engineering Structures, Vol. 9, No. 3, 1987, pp. 177-182.

DIAMANTIDIS, D.; BAZZURRO, P. **Safety acceptance criteria for existing structures.** Workshop on Risk Acceptance and Risk Communication, Stanford University, 2007.

DIAZ, E.; NÚÑEZ, F.; CALDERÓN, W.; SÁNCHEZ, C.; RUIZ, D. **Evaluación por confiabilidad estructural de puentes en acero apoyada en monitoreo e instrumentación.** Ingeniería y Universidad, Vol. 10, No. 1, 2006, pp. 1-37.

DISSANAYAKE, P. B. R.; KARUNANANDA, P. A. K. **Reliability index for structural health monitoring of aging bridges.** Structural Health Monitoring, Vol.7, 2008, pp.175-183.

DITLEVSEN, O. **Structural reliability codes for probabilistic design – a debate paper based on elementary reliability and decision analysis concepts.** Structural Safety, Vol. 19, No. 3, 1997, pp. 253-270.

DU, J.S.; AU, F.T.K. **Deterministic and reliability analysis of prestressed concrete bridge girders: comparison of the Chinese, Hong Kong and AASHTO LRFD Codes.** Structural Safety, Vol. 27, No. 3, 2005, pp. 230-245.

ELMS, D.G. **Structural safety-issues and progress.** Progress in Structural Engineering and Materials, Vol.6, No. 2, 2004, pp.116-126.

ELLINGWOOD, B.R. **Reliability-based condition assessment and LRFD for existing structures.** Structural Safety, Vol. 18, No. 2, 1996, pp. 67-80.

ESTES, A.C.; FRANGOPOL, D.M. **Bridge lifetime system reliability under multiple limit states,** Journal of Bridge Engineering, Vol. 6, No. 6, 2001, pp. 523-528.

\_\_\_\_\_. **Load rating versus reliability analysis.** Journal of Structural Engineering, Vol. 131, No. 5, 2005, pp. 843-847.

FABER, M.H.; **Reliability based assessment of existing structures.** Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 2, No.2, 2000, pp.247-253.

FARRAR, C.R.; WORDEN, K. **An introduction to structural health monitoring.** Philosophical transactions of the Royal Society A, Vol. 365, No. 1851, 2007, pp. 303-315.

FERREIRA, L. **Aplicação da teoria de confiabilidade na obtenção de limites para o peso de veículos de carga em pontes de concreto.** Tese de Doutorado – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de estruturas, São Carlos, 2006.

FRANGOPOL, D.M.; AKGUL, F. **Bridge rating and reliability correlation: comprehensive study for different bridge types.** Journal Structural Engineering, Vol. 130, No. 7, 2004, pp. 1063-1074.

\_\_\_\_\_. **Rating and Reliability of existing bridges in a network,** Journal of Bridge Engineering, Vol. 8, No. 6, 2003, pp. 383-393.

FRANGOPOL, D.M.; ENRIGHT, M.P. **Reliability-based condition assessment of deteriorating concrete bridges considering load redistribution.** Structural Safety, Vol. 21, No. 2, 1999, pp. 159-195.

FRANGOPOL, D.M.; IMAI, K. **Reliability of long span bridges based on design experience with the Honshu-Shikoku bridges.** Journal Constructional Steel Research, Vol. 60, No. 3, 2004, pp. 373-392.

FRANGOPOL, D.M.; LIU, M.; KWON, K. **Fatigue reliability assessment of retrofitted steel bridges integrating monitored data.** Structural Safety, Vol. 32, No.1, 2010, pp. 77-89.

FRANGOPOL, D.M.; STRAUSS, A.; KIM, S. **Bridge reliability assessment based on monitoring.** Journal of Bridge Engineering, Vol.13, No. 3, 2008, pp. 258-270.

FUSCO, P.B. **Estruturas de concreto.** Editora Guanabara Dois S.A. 1986.

GE, Y.J.; XIANG, H.F.; TANAKA, H. **Application of a reliability analysis model to bridge flutter under extreme winds.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 86, No. 2000, pp. 155-167.

GHOSN, M. **Development of truck weight regulations using bridge reliability model.** Journal of Bridge Engineering, Vol. 5, No. 4, 2000, pp. 293-303.

GIL, R.E. **Fiabilidad estructural.** Revista de Obras Públicas, 1988, pp. 1111-1125.

GOMES, H.M. **Técnicas de avaliação da confiabilidade em estruturas de concreto armado.** Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2001.

GOMES, H.M.; AWRUCH, A.M. **Reliability of reinforced concrete structures using stochastic finite elements.** Engineering Computations, Vol. 19, No. 7, 2002, pp. 764-786.

GULVANESSIAN, H.; MENZIES, J.B. **The Eurocode for Structural loading: Eurocode I.** Progress in Structural Engineering and Materials, Vol.2, 2000, pp.472-482.

HAI, D.T. **Current status of existing railway bridges in Vietnam: An overview of steel deficiencies.** Journal of Constructional Steel Research, Vol. 62, No. 10, 2006, 987-994.

HAMUTÇUOĞLU, O.M.; SCOTT, M. **Finite element reliability analysis of bridge girders considering moment-shear interaction**. Structural Safety, Vol. 31, 2009, pp. 356-362.

HATASHITA, L.S. **Análise de confiabilidade de torres de transmissão de energia elétrica quando sujeitas a ventos fortes via método analítico FORM**. Dissertação de mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica, Curitiba, 2007.

HENRIQUES A.A. **Aplicação de novos conceitos de segurança no dimensionamento de betão estrutural**. Teses de Doutorado – Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Portugal, 1998.

\_\_\_\_\_. **Modelo de evaluación probabilística de la seguridad estructural de puentes de hormigón**, Inf. tecnol., La Serena, Vol. 17, No. 3, 2006, pp.129-1336.

IMAM, B.N.; RIGHINIOTIS, T.D.; CHRYSANTHOPOULOS, M.K. **Fatigue reliability of riveted connections in railway bridges**. 3<sup>rd</sup> International ASRANet Colloquium, July 2006, University of Surrey, Guildford, UK.

JAMES, G. **Analysis of traffic load effects on railway bridges**. Doctoral thesis, Structural Engineering Division, Royal Institute of Technology, Swedem, 2003.

JCSS. **Guideline for reliability based assessment of existing structures**. The Joint Committee in Structural Safety January, 2000.

KESLING, G.D.; WHITTAKER, I.C. **A simulation model of railroad reliability**. SIMULATION, Vol. 44, No. 4, 1985, pp. 168-180.

JEPPSSON, J. **Reliability-based assessment procedures for existing concrete structures**. Doctoral thesis, Lund University, Division of Structural Engineering, Swedem, 2003.

JUNIOR, A.C. **Aplicação de confiabilidade na calibração de coeficientes parciais de segurança de normas brasileiras de projeto estrutural**. Dissertação de mestrado – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de estruturas, São Carlos, 2008.

KIM, S.; LEE, S.; MHA, H. **Fatigue reliability assessment of an existing steel railroad bridge**. Engineering Structures, Vol. 23, 2001, pp. 1203-1211.

KIUREGHIAN, A. D. **Analysis of structural reliability under parameter uncertainties**. Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 23, No. 4, 2008, pp. 351-358.

KIUREGHIAN, A. D.; HAUKAAS, T.; FUJIMURA, K. **Structural reliability software at the University of California, Berkeley**. Structural Safety, Vol. 28, No. 1, 2006, pp. 44-67.

KIUREGHIAN, A. D.; LIU, P. **Structural reliability under incomplete probability information**. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 112, No. 1, 1986, pp. 85-104.

KIYOHIRO, I.; FRANGOPOL, D.M. **System reliability of suspension bridges**. Structural Safety, Vol. 24, No. 2, 2002, pp. 219-259.

KODURU, S.D.; HAUKAAS, T. **Feasibility of FORM in finite element reliability analysis**. Structural Safety, Vol. 32, No. 2, 2010, pp. 145-153.

KÜHN, B.; LUKIC, M.; NUSSBAUMER, A.; GÜNTHER, H.; HELMERICH, R.; HERION, S.; KOLSTEIN, M.; WALBRIDGE, S.; ANDROIC, B.; DIJKSTRA, O.; BUKAK, O. **Assessment of existing steel structures: recommendations for estimation of remaining fatigue life**, JRC Scientific and Technical Reports, Office for Official Publications of the European Communities, 2008.

KWON, K.; FRANGOPOL, D. **Bridge fatigue reliability assessment using probability density functions of equivalent stress range based on field monitoring data**. International Journal of Fatigue, Vol. 32, 2010, pp. 1221-1232.

LAW, S.S.; LI, J. **Updating the reliability of a concrete bridge structure based on condition assessment with uncertainties**. Engineering Structures, Vol. 32, No. 1, 2010, pp. 286-296.

LEE, I.; CHOI, K.; GORSICH, D. **Sensitivity analyses of FORM-based and DRM-based performance measure approach (PMA) for reliability-based design optimization (RBDO)**. International Journal for numerical methods in engineering, Vol. 82, No. 1, 2010, pp. 26-46.

LEÓN, D.; MANJARREZ, L.; ANG, A. **Structural reliability of the Tampico bridge under wind loading**, CIENCIA ergo sum, Vol.15, No. 2, 2008, pp. 161-166.

LIANG, M.; KAO, C.; HUNG, H.; OUNG, J. **A case study of reliability analysis on the damage state of existing concrete viaduct structure**. Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 122, No. 4, 2009, pp. 371-379.

LIANG, M.; LAN, J. **Reliability analysis for the existing reinforced concrete pile corrosion of bridge substructure**. Cement and Concrete Research, Vol. 32, No. 3, 2005, pp. 540-550.

LINDQUIST, M. **Confiabilidade estrutural de pontes laminadas protendidas de madeira**. Teses de Doutorado – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de estruturas, São Carlos, 2006.

LIU, C. **Reliability validation of multigirder steel bridges designed by LRFD**. Computers & Structures, Vol. 80, No. 32, 2002, pp. 2515-2527.

LIU, D.; HUAWEN, Y.; XIAOZHEN, L. **Safety assessment and reinforcement technique for deck steel truss bridge under increasing speed**. The Eighth International Conference of Chinese Logistics and Transportation Professionals, 2008, pp. 2300-2306.

LIU, M.; FRANGOPOL, D.M.; KIM, S. **Bridge safety evaluation based on monitored live load effects**. Journal of Bridge Engineering, Vol. 14, No. 4, 2009, pp.257-269.

\_\_\_\_\_. **Bridge system performance assessment from Structural Health Monitoring: a case study.** Journal of Bridge Engineering, Vol. 135, No. 6, 2009, pp.733-742.

LOPES, P.; REAL, M.; **Aplicação de métodos FORM e Monte Carlo na avaliação da confiabilidade de vigas de concreto armado resuperadas com PRFC,** 4º Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, FURG, Rio Grande/RS, 2010.

LOPEZ, M. **Análise de confiabilidade de estruturas aplicada ao projeto de reforço à força cortante de vigas em concreto armado com compósitos de fibras de carbono.** Tese de Doutorado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2007.

MADSEN, H.O., S. KRENK & N.C. LIND. **Methods of Structural Safety.** Prentice-Hall, 1986.

MAINÇON, P. **A first order reliability method for series systems.** Structural Safety, Vol. 22, No. 1, 2000, 5-26.

MELCHERS, R.E. **Safety and risk in structural engineering.** Progress in Structural Engineering and Materials, Vol.4, No. 2, 2002, pp.193-202.

\_\_\_\_\_. **Structural Reliability Analysis and Prediction.** John Wiley & Sons, 2002.

MURAT, H.O. **Parametric uncertainties in reliability analysis of bridge structures.** Doctoral theses – Oregon State University, Oregon, 2010.

NAKIB, R. **Deterministic and reliability-based optimization of truss bridges.** Computers & Structures, Vol. 65, No. 5. 1997, pp. 767-775.

NOWAK, A.S. **System reliability models for bridge structures.** Bulletin of the polish academy of sciences, Technical sciences, Vol. 52, No. 4, 2004, pp. 321-328.

\_\_\_\_\_. **Live load model for highway bridges.** Structural Safety, Vol. 13, No. 1, 1993, pp. 53-66.

NOWAK, A.S.; COLLINS, K.R. **Reliability of Structures.** McGraw-Hill: New York, 2000.

NOWAK, A.S.; HONG, Y. **Bridge live-loads models.** Journal of Structural Engineering, Vol. 117, No. 9, 1991, pp. 2757-2767.

NOWAK, A.S., KASZYNSKA, M. **Tarjet safety levels for design and evaluation of bridges,** Trans. JWRI (Join Weld Res Inst Osaka Univ), Vol. 32, No. 1, 2003, 189-196.

NOWAK, A. S.; PARK, C.; CASAS, J. R. **Reliability analysis of prestressed concrete bridge girders: Comparison of Eurocode, Spanish Norma IAP and AASHTO LRFD.** Structural Safety, Vol. 23, 2001, pp. 331-344.

NOWAK, A.S.; SZERSZEN, M.M. **Bridge load and resistance models.** Engineering Structures, Vol. 20, No. 11, 1998, pp. 985-990.

PELLISSETTI, M.F.; SCHUELLER, G.I. **On general purpose software in structural reliability – An overview**. Structural Safety, Vol. 28, No. 1, 2006, pp. 3-16.

PHAM, B.H.; AL-MAHAIDI, R. **Reliability analysis of bridge beams retrofitted with fiber reinforced polymers**. Composite Structures. Vol. 82, 2008, pp. 177-184.

PIONER VALLEY PLANNING COMMISSION (PVPC), **Railroad overpass safety study**, Final Report, 2006.

PIPINATO, A.; MODENA, C. **Structural analysis and fatigue reliability assessment of the Paderno bridge**. Practice Periodical on Structural Design and Construction. ASCE, Vol. 15, No. 2, 2010, pp. 109-124.

POURZEYNALI, S.; DATTA, T.K. **Reliability analysis of suspension bridges against fatigue failure from the gusting of Wind**. Journal of Bridge Engineering, Vol. 10, No.3, 2005, pp. 262-271.

PRAT, M. **Traffic load models for bridge design: recent developments and research**. Progress in Structural Engineering and Materials, Vol.3, 2001, pp.326-334.

RACKWITZ, R. **Reliability analysis – a review and some perspectives**. Structural Safety, Vol. 23, No. 4, 2001, pp. 365-395.

RIBEIRO, S.E. **Análise da confiabilidade de vigas de concreto armado com plástico reforçado por fibras**. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Engenharia de estruturas, Belo Horizonte, 2009.

RÜCKER, W.; HILLE, F.; ROHRMANN, R. **Guideline for the assessment of existing structures**. Federal Institute of Materials Research and Testing (BAM), SAMCO Final Report, Germany, 2006.

SAGRILO, L.V.S. **Confiabilidade Estrutural – COPPE/UFRJ, Notas de Aula**, Rio de Janeiro, 2004.

SB4.4.2. **Safety and Probabilistic Modeling Background document D4.4 to SB-LRA “Guideline for load and resistance assessment of railway bridges”**. Prepared by Sustainable Bridges – a project within EU FP6, Available from: [www.sustainablebridges.net](http://www.sustainablebridges.net), 2007.

SCHIJVE, J. **Fatigue of Structural and Materials**. Springer, Delft, Holanda, 2009.

SCHNEIDER, J. **Introduction to safety and reliability of structure**. Structural Engineering Document, 5, IABSE, 1997.

SEXSMITH, R.G.; REID, S.G. **Safety factors for bridge falsework by risk management**. Structural Safety, Vol. 25, No. 2, 2003, pp. 227-243.

SPEIRAN, K.; FRANCIS, J.; ELLIS, R.M; THOMPSON, P.D. **Implementation of a Bridge Management System in the province of Nova Scotia**. Annual conference of the transportation association of Canada, Quebec, 2004.



STRAUSS, A.; FRANGOPOL, D.M.; BERGMEISTER, K. **Assessment of existing structures based on identification.** Journal Structural Engineering, Vol. 136, No. 1, 2010, pp. 86-97.

STEWART, M.G. **Reliability-based bridge design and assessment.** Progress in Structural Engineering and Materials, Vol.1, No. 2, 1998, pp.214-222.

STEWART, M.G.; ROSOWSKY, D.V.; VAL, D.V. **Reliability-based bridge assessment using risk-ranking decision analysis.** Structural Safety, Vol. 23, No. 4, 2001, pp. 397-405.

STEENBERGEN, R.D.J.M.; VROUNWENVELDER, A.C.W.M. **Safety philosophy for existing structures and partial factors for traffic loads on bridges.** HERON, Vol. 55, No. 2, 2010, pp. 123-139.

SUDRET, B.; KIUREGHIAN, A.D. **Comparison of finite element reliability methods.** Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 17, No. 4, 2002, pp. 337-348.

SZERSZEN, M.; NOWAK, A.; LAMAN, J. **Fatigue reliability steel research.** Journal Constructional Steel Research, Vol. 52, No. 1, 1999, pp.83-92.

TABSH, S.W. **Reliability of composite steel bridge beams designed following AASHTO's LFD and LRFD specifications.** Structural Safety, Vol. 17, No. 4, 1996, pp. 225-237.

TANNER, P.; ORTEGA, L. **Rehabilitación de puentes del pasado. Una tarea del futuro.** Hormigón y Acero, No. 216, 2000, pp. 127-137.

TIRADO, J.J. **Introducción a la evaluación de estructuras existentes aplicando técnicas de fiabilidad.** ETSICCP Universidad Politécnica de Valencia, Notas de Aula.

TOBIAS, D.H.; FOUTCH, D.A. **Reliability-based method for fatigue evaluation of railway bridges.** Journal of Bridge Engineering, Vol. 2, No. 2, 1997, pp. 53-60.

VAL, D.V.; STEWART, M.G.; **Safety factors for assessment of existing structures.** Journal of Structural Engineering, Vol. 128, No. 2, 2002, pp. 258-265.

VAL, D.V.; STEWART, M.G.; MELCHERS, R. **Effect of reinforcement corrosion on reliability of highway bridges.** Engineering Structures, Vol. 23, No. 11, 1998, pp. 1010-1019.

VELOSO, L, *et al.* **Desenvolvimento de Metodologia para Avaliação da Integridade Estrutural de Pontes e Viadutos Ferroviários ao Longo da Estrada de Ferro Carajás.** RELATÓRIO TÉCNICO, primeira etapa, Vol. 4. Obra de arte especial No. 55, NiCAE, Universidade Federal do Pará, 2007.

VERZENHASSI, C. **Otimização de risco estrutural baseada em confiabilidade.** Dissertação de mestrado – Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de estruturas, São Carlos, 2008.

VU, K.A.; STEWART, M.G. **Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models**. Structural Safety, Vol. 22, No. 4, 2000, pp. 313-333.

WANG, N.; ELLINGWOOD, B.; ZUREICK, A.; O'MALLEY, C. **Condition assessment of existing bridge structures**. Georgia Institute of technology school of civil and environmental engineering, Report of Task 1 – Appraisal of state-of-the-art of bridge condition assessment. 2009.

WIRSCHING, P.H. **Fatigue reliability**, Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 1, No. 2, 1998, pp. 200-206.

WISNIEWSKI, D.F. **Safety formats for the assessment of concrete bridges**. Doctoral Thesis – University of Minho, Department of Civil Engineering, School of Engineering, Guimarães, Portugal, 2007.

WISNIEWSKI, D. F.; CASAS, J.R.; HENRIQUES, A.A; CRUZ, P. **Probability-based assessment of existing concrete bridge – Stochastic resistance models and applications**. Structural Engineering International. Vol. 19, No. 2, 2009, pp. 203-210.

XUN, X.; QIANG, S. **Damage safety assessment and service life prediction of bridges**, International Conference on Transportation Engineering, 2007, pp. 2229-2234.

YANG, D.; LI, G.; CHENG, G. **Convergence analysis of first order reliability method using chaos theory**. Computers & Structures, Vol. 84, No. 8, 2006, pp. 563-571.

YOUN, B.D. **Advances in reliability-based design optimization and probability analysis**. Doctoral thesis – Graduate College, The University of Iowa, Iowa, 2001.

ZHAO, Y.; ONO, T. **A general procedure for first/second-order reliability method (FORM/SORM)**. Structural Safety, Vol. 21, No. 2, 1999, pp. 95-112.

ZHAO, Y.; ONO, T. **Moment methods for structural reliability**. Structural Safety, Vol.23, No. 1, 2001, pp. 47-75.

## **Anexo A**

### **Teoria de Probabilidade**

#### **A.1. Introdução**

É apresentado um resumo de os conceitos fundamentais da teoria de probabilidade.

#### **A.2. Variável Aleatória**

Muitos fenômenos aleatórios de interesse estão associados a resultados numéricos de alguma quantidade física. A variável que associa um número ao resultado de um experimento aleatório é chamada variável aleatória, por definição uma variável aleatória é uma função que confere um número real a cada resultado no espaço amostral de um experimento aleatório. Geralmente uma variável aleatória é denotada com uma letra maiúscula. Sendo  $X$  uma variável aleatória,  $(X=a)$  ou  $(X<b)$  pode ser a representação de eventos desta variável aleatória.

Uma variável aleatória discreta é uma variável com uma faixa finita (ou infinita contável) de possíveis valores, enquanto uma variável aleatória contínua é uma variável aleatória com um intervalo de números reais para sua faixa.

#### **A.3. Função Cumulativa de Distribuição (CDF) e Função Densidade de Probabilidade (PDF)**

Uma variável aleatória pode ser caracterizada pela sua função cumulativa de distribuição  $F_X$  (CDF) e sua função densidade de probabilidade  $f_X$ , identificada por PDF, definida como a primeira derivada de  $F_X$ .

Com frequência é de interesse saber a probabilidade de que uma variável aleatória assuma um valor particular. A distribuição de probabilidades de uma variável aleatória  $X$  é uma descrição das probabilidades associadas com os valores possíveis de  $X$ . Uma função densidade de probabilidade pode ser usada para descrever a distribuição de probabilidades de uma variável aleatória

continua  $X$ . Fornece uma descrição simples das probabilidades associadas a uma variável aleatória.

A função de densidade de probabilidade é uma função matemática contínua que tem como objetivo descrever os resultados obtidos em experimentos aleatórios representa estatisticamente este experimento, Sendo  $X$  uma variável aleatória, a sua função densidade de probabilidades  $f_x(x)$  é definida de tal forma que:

$$P\left(x - \frac{dx}{2} \leq X \leq x + \frac{dx}{2}\right) = f_x(x)dx \quad (\text{A.1})$$

Usualmente uma função de probabilidade é identificada por PDF (Probability Density Function). A probabilidade da variável  $X$  assumir valores entre  $a$  e  $b$  é:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f_x(x)dx \quad (\text{A.2})$$

A função PDF tem que satisfazer as seguintes condições (Figura 32):

- $f_x(x) \geq 0.0$  para qualquer  $x$
- $\int_{-\infty}^{\infty} f_x(x)dx = 1.0$  (área unitária)
- $\int_a^b f_x(x)dx = P(a \leq X \leq b)$

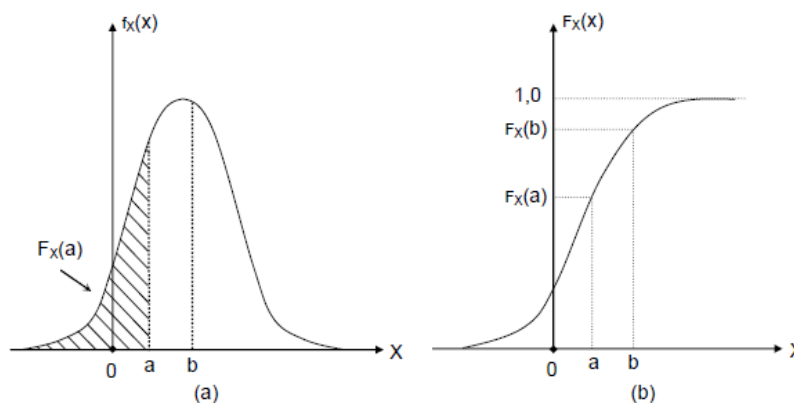


Figura A.1 (a) Função Densidade de Probabilidade (PDF) e (b) Função Cumulativa de Distribuição (CDF).

A função cumulativa de probabilidade  $F_x(x)$  de  $X$  é definida assim:

$$F_x(a) = \int_{-\infty}^a f_x(x)dx \quad (\text{A.3})$$

$F_x(a)$  é a probabilidade da variável  $X$  assumir valores menores ou iguais a  $a$ . É identificada como CDF (Cumulative Distribution Function) e deve satisfazer as seguintes propriedades (Figura A.1):

- $F_x(-\infty) = 0.0$

- b)  $0 \leq F_x(x) \leq 1.0$   
 c)  $F_x(\infty) = 1.0$

#### A.4. Principais Parâmetros de uma Variável Aleatória Contínua

As características probabilísticas de uma variável aleatória seriam completamente descritas se a forma da PDF e os parâmetros associados fossem plenamente conhecidos. Nem sempre é conhecida a forma que representa a função de distribuição de probabilidade de uma variável aleatória, pelo tanto certas aproximações são necessárias. Neste caso, esta variável aleatória pode ser descrita por sua média e por uma medida de dispersão da variável aleatória.

O valor médio, ou a média, de uma variável aleatória  $X$  é definido como:

$$E(X) = \mu_x = \int_{-\infty}^{\infty} xf_x(x)dx \quad (A.4)$$

Onde  $f_x(x)$  é a PDF de  $X$  definida anteriormente.

A *variância* mede a dispersão dos valores da variável em torno da média e é definida como:

$$\begin{aligned} \text{Var}(X) &= \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_x)^2 f_x(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f_x(x) dx - 2\mu_x \int_{-\infty}^{+\infty} x f_x(x) dx + \mu_x^2 \int_{-\infty}^{+\infty} f_x(x) dx \\ \text{Var}(X) &= E(X^2) - \mu_x^2 \end{aligned} \quad (A.5)$$

A medida de dispersão mais indicada é a raiz quadrada da variância que é chamada desvio padrão de  $X$  é definido como:

$$\sigma_x = \sqrt{\text{Var}(X)} \quad (A.6)$$

Somente com a variância e o desvio padrão é difícil mensurar se a dispersão é grande ou pequena, pelo tanto o indicativo desta amplitude é dado pelo coeficiente de variação de  $X$ , definido como a razão entre o desvio padrão e a média, ou seja:

$$\text{COV} = \delta_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (A.7)$$

O coeficiente de variação mede, de forma adimensional (ao contrário da variância) a dispersão dos dados da variável aleatória em torno da média. Coeficientes de variação baixos indicam que os valores da variável aleatória estão distribuídos próximos a média, enquanto que valores altos indicam uma forte dispersão em torno da mesma.

## A.5. Distribuições de Probabilidade

### A.5.1. Distribuição Normal ou Gaussiana

É uma das distribuições mais utilizadas, sua a função densidade de probabilidade é dada por:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x}\right)^2\right] \quad (\text{A.8})$$

Tem somente como parâmetros a média  $\mu_x$  e do desvio padrão  $\sigma_x$  da variável aleatória e é geralmente denotada por  $N(\mu_x, \sigma_x)$ . A sua função cumulativa

Introduzindo uma variável auxiliar, também conhecida como variáveis reduzidas pode-se reescrever a anterior equação assim:

$$f_Y(y) = \phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}y^2\right] \quad (\text{A.9})$$

Para a variável reduzida a média e desvio padrão são iguais a 0 e 1, respectivamente, e é determinada por:

$$Y = \frac{X - \mu_x}{\sigma_x} \quad (\text{A.10})$$

Esta transformação resulta em uma nova variável aleatória  $Y$  com PDF normal padrão  $\phi(y)$ . A CDF chamada, neste caso, de função de distribuição cumulativa normal padrão  $\Phi(y)$  que só pode ser avaliada por integração numérica, ou usando tabelas disponíveis em livros de estatística. Pode ser obtida por:

$$\Phi(y) = \int_{-\infty}^y f_Y(y) dy \quad (\text{A.11})$$

A função de distribuição cumulativa de uma variável aleatória normal é obtida a partir de:

$$F_x(X) = \Phi\left(\frac{X - \mu_x}{\sigma_x}\right) \quad (\text{A.12})$$

### A.5.2. Outras Distribuições

Na seguinte tabela é apresentado valores de PDF, CDF,  $\mu_x$ , e  $\sigma_x$  de distribuições de probabilidade mais utilizadas.

Tabela A.1. Distribuições de probabilidade mais utilizadas

Distribuição	PDF - $f_X(x)$	CDF - $F_X(x)$	Média - $\mu_X$	Desvio Padrão - $\sigma_X$
Normal	$\frac{1}{x\xi\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_X}{\sigma_X}\right)^2\right]$	$\Phi\left(\frac{x-\mu_X}{\sigma_X}\right)$	$\mu_X$	$\sigma_X$
Lognormal	$\frac{1}{x\xi\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\lambda}{\xi}\right)^2\right]$	$\Phi\left(\frac{\ln(x)-\lambda}{\xi}\right)$	$\exp\left(\lambda + \frac{1}{2}\xi^2\right)$	$\mu_X \sqrt{\exp(\xi^2)-1}$
Rayleigh	$\frac{x-\tau}{\sigma_R^2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\tau}{\sigma_R}\right)^2\right]$	$1 - \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\tau}{\sigma_R}\right)^2\right]$	$\tau + \sigma_R \sqrt{\frac{\pi}{2}}$	$\sigma_R \sqrt{2 - \frac{\pi}{2}}$
Uniforme	$\frac{1}{b-a}$	$\frac{x-a}{b-a}$	$\frac{a+b}{2}$	$\frac{b-a}{\sqrt{12}}$
Tipo I Máx (Gumbel)	$\alpha \exp\{-\alpha(x-u) - \exp[-\alpha(x-u)]\}$	$\exp\{-\exp[\alpha(x-u)]\}$	$u + \frac{0,5772}{\alpha}$	$\frac{\pi}{\alpha\sqrt{6}}$
Tipo I Mínimo	$\alpha \exp\{\alpha(x-u) - \exp[\alpha(x-u)]\}$	$1 - \exp\{-\exp[\alpha(x-u)]\}$	$u - \frac{0,5772}{\alpha}$	$\frac{\pi}{\alpha\sqrt{6}}$
Tipo II Máximo	$\frac{k}{v}\left(\frac{v}{k}\right)^{k+1} \exp\left[-\left(\frac{v}{x}\right)^k\right]$	$\exp\left[-\left(\frac{v}{x}\right)^k\right]$	$v\Gamma\left(1 - \frac{1}{k}\right)$	$v\left[\Gamma\left(1 - \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 - \frac{1}{k}\right)\right]^{0,5}$
Tipo III Mín (Weibull)	$\frac{k}{v}\left(\frac{x}{k}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{v}\right)^k\right]$	$1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{v}\right)^k\right]$	$v\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$	$v\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]^{0,5}$

### A.5.3. Distribuições Normais Equivalentes

Para uma variável aleatória  $X$ , cuja distribuição de probabilidades não é normal, uma distribuição normal equivalente num ponto  $x^*$  pode ser obtida, igualando-se as funções densidade de probabilidade (PDF) e distribuição cumulativa (CDF) de uma variável normal e da distribuição real de  $X$  no referido ponto, conforme as seguintes expressões:

$$\Phi\left(\frac{x^* - \mu_X^N}{\sigma_X^N}\right) = F_X(x^*) \quad (\text{A.13})$$

$$\frac{1}{\sigma_X^N} \phi\left(\frac{x^* - \mu_X^N}{\sigma_X^N}\right) = f_X(x^*) \quad (\text{A.14})$$

Onde  $\phi(\ )$  e  $\Phi(\ )$  são, respectivamente, às PDF e CDF normais padrão,  $f_X(X)$  e  $F_X(X)$  são, respectivamente, às PDF e CDF da variável  $X$  e  $\sigma_X^N$  e  $\mu_X^N$  são, respectivamente, a média e desvio padrão da normal equivalente no ponto  $x^*$ . Esses valores podem ser calculados mediante:

$$\sigma_X^N = \frac{\phi\{\Phi^{-1}[F_X(x^*)]\}}{f_X(x^*)} \quad (\text{A.15})$$

$$\mu_X^N = x^* - \sigma_X^N \Phi^{-1}[F_X(x^*)]$$

$\Phi^{-1}(\ )$  corresponde a inversa da distribuição cumulativa normal padrão.

Em outras palavras,  $\Phi^{-1}(p)$  corresponde ao valor da variável reduzida cuja probabilidade de ocorrerem valores menores ou iguais a ela seja igual a  $p$ .

### A.5.4. Coeficientes de Correlação Equivalentes

Quando as variáveis aleatórias não normais são correlacionadas é necessário obter os coeficientes de correlação equivalentes, para isto os coeficientes entre as variáveis aleatórias originais devem ser corrigidos para coeficientes de correlação entre as variáveis normais equivalentes, sendo:

$$\rho_{ij}^E = F \rho_{ij} \quad (\text{A.16})$$

Onde  $F$  é um valor que depende somente de  $\rho_{ij}$  e dos coeficientes de variação das variáveis aleatórias não normais. Este valor não depende do ponto onde transformação está sendo realizada. Kiureghian and Liu [1986] desenvolveram expressões analíticas para o fator  $F$  para um grande número de distribuições de probabilidades.



### Decomposição de Cholesky da matriz dos coeficientes de correlação equivalentes

Se uma matriz simétrica  $P$  pode ser descomposta em duas matrizes triangulares, em que uma é a transposta da outra, como no caso dos coeficientes de correlação equivalentes, pode-se obter os elementos da matriz triangular inferior  $L$  a partir das seguintes expressões:

$$\begin{aligned} L_{11} &= 1.0 \\ L_{i1} &= \rho_{i1} \quad i = 1, n \\ L_{ik} &= \frac{1}{L_{kk}} \left( r_{ik} - \sum_{j=1}^{k-1} L_{ij} L_{kj} \right) \quad 1 < k < i \\ L_{ii} &= \sqrt{1 - \sum_{j=1}^{i-1} L_{ij}^2} \quad i > 1 \end{aligned} \quad (A.17)$$

Onde  $\rho_{ij}$  é o coeficiente de correlação entre as variáveis  $X_i$  e  $X_j$ .

Então a matriz triangular inferior  $L$  é:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 & 0 & 0 \\ L_{12} & L_{22} & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ L_{1n} & L_{2n} & \cdot & L_{nn} \end{bmatrix} \quad (A.18)$$

### A.6. Coeficientes Parciais de Segurança

O método dos estados limites já descrito anteriormente é um método probabilístico, onde são usados modelos de cálculo determinísticos, considerando as incertezas das variáveis envolvidas, através da aplicação dos coeficientes parciais de segurança. Os valores de cálculo utilizados são obtidos a partir da aplicação destes coeficientes a valores característicos da resistência e da solicitação.

A definição dos coeficientes parciais de segurança foi feita segundo a experiência dos projetistas estruturais, nos últimos anos estes coeficientes são determinados com base científica, com ajuda da confiabilidade estrutural.

*Coeficiente de segurança central* ( $\lambda_0$ ) relaciona as médias das variáveis de resistência  $R$  e solicitação  $S$ .

$$\lambda_0 = \frac{\mu_R}{\mu_S} \quad (A.19)$$

Este coeficiente não reflete a segurança da estrutura, na estrutura real os valores médios utilizados podem ser tanto maiores quanto menores do que os

valores reais. Pelo tanto não há garantia de que esse coeficiente seja suficiente para garantir a segurança da estrutura.

Para melhorar o problema anterior são utilizados os valores característicos a traves de fatores de segurança que minoram a resistência e majoram a solicitação, considerando a incerteza inerente a essas variáveis.

Dividindo os valores característicos de R e de S pelos seus valores médios. Obtém-se um coeficiente de minoração da resistência  $\phi_k$  e um coeficiente de majoração da solicitação  $\gamma_k$ .

$$\phi_k = \frac{r_k}{\mu_R} < 1 \quad \gamma_k = \frac{s_k}{\mu_S} > 1 \quad (\text{A.20})$$

Existe alem um coeficiente de segurança global ou característico  $\lambda_k$

$$\lambda_k = \frac{r_k}{s_k} = \frac{\phi_k \mu_R}{\lambda_k \mu_S} = \frac{\phi_k}{\lambda_k} \lambda_0 \quad (\text{A.21})$$

A escolha do nível de segurança e do coeficiente  $\lambda_k$  é subjetiva pelo tanto os fatores de segurança parciais não fornecem uma medida de violação de estados limites. Somente a probabilidade de falha pode ser considerada como tal medida.

Nas normas técnicas modernas o coeficiente parcial característico pode ser encontrado mediante:

$$\lambda_k = \frac{\lambda_S}{\phi_R} \quad (\text{A.22})$$

## A.7. Valores Característicos das Variáveis

As normas e códigos atuais para projetos de engenharia civil incorporam o uso de fatores de segurança e valores característicos. Os valores característicos são tipicamente percentiis altos ou baixos para os efeitos da solicitação e da resistência respectivamente. O valor característico de uma variável aleatória é determinado como um valor que, de acordo com a sua distribuição de probabilidade, representa um nível percentual de ser ultrapassado, sendo dependente do tipo de material e da classe da estrutura.

Considerando que a resistência característica é admitida como sendo um valor que tem apenas 5% de probabilidade de não ser atingido. Uma ilustração típica para a resistência do material é apresentada na seguinte Figura.

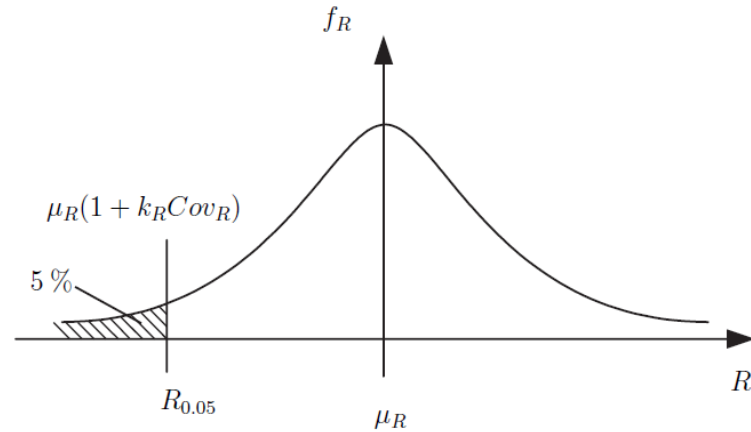


Figura A.2. Valor característico típico para a variável Resistência S (fonte: James 2003)

Da figura pode-se observar que o valor característico é dado por:

$$R_k = \mu_R (1 + k_R \text{COV}_R) \quad (\text{A.23})$$

Onde  $\mu_R$  é o valor médio da resistência R,  $\text{COV}_R$  é o coeficiente de variação da resistência e  $k_R$  é um fator dependente do tipo de distribuição considerada para a resistência e do percentil especificado para o valor característico.

Para uma distribuição normal o valor de  $k_R$  representando o percentil de 0.05 é dado por:

$$\begin{aligned} 0,05 &= \Phi\left(\frac{R_k - \mu_R}{\sigma_R}\right) \\ 0,05 &= \Phi(k_R) \\ k_R &= \Phi^{-1}(0,05) \rightarrow k_R \approx -1,645 \end{aligned} \quad (\text{A.24})$$

Onde  $\Phi$  e  $\Phi^{-1}$  são a função cumulativa de distribuição e a inversa para a distribuição de probabilidade normal padrão. Estes valores podem se encontrar em tabelas na literatura existente.

Analogamente para a solicitação o valor característico é dado por:

$$S_k = \mu_S (1 + k_S \text{COV}_S) \quad (\text{A.25})$$

Pode-se observar graficamente na seguinte figura:

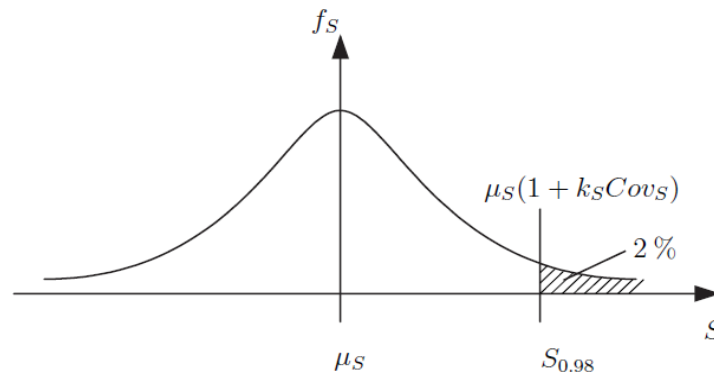


Figura A.3. Valor característico típico para a variável solicitação  $S$  (fonte: James 2003)

Tipicamente os valores característicos têm um percentil de 50% para as cargas permanentes como o peso próprio o qual é o valor médio. Para as cargas variáveis o valor característico equivale na maioria dos casos ao percentil de 98% do valor máximo anual. As cargas variáveis tais como as cargas de tráfego e as de vento são dependentes do tempo pelo tanto uma descrição apropriada de estas cargas deve ser obtida através de processos estocásticos. Já este modelo é complicado pode-se considerar que o processo estocástico é estacionário ou seja que o tempo é invariante. A distribuição da carga esta relacionada a um período de referência especificado. Este período geralmente é de um ano, para este período existe um coeficiente de confiabilidade ou uma probabilidade de falha associada