



DETERMINAÇÃO DA CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DE PERFIS METÁLICOS SUBMETIDOS À CARREGAMENTOS PERMANENTES E ACIDENTAIS

Tiago Luiz Roschel

roschel.ufabc@gmail.com

Universidade Federal do ABC

Rua nove de julho 307, 09606-010, São Bernardo do Campo, Brasil

Marcelo Araujo da Silva

marcelo.araujo@ufabc.edu.br

Universidade Federal do ABC

Rua Arcturus 03, 0606-070, São Bernardo do Campo, Brasil

Abstract. *O presente trabalho visa estudar e determinar computacionalmente a confiabilidade estrutural de perfis metálicos submetidos a carregamentos permanentes e acidentais através do método de Monte Carlo levando-se em conta a distribuição de probabilidade tanto das cargas, permanentes e acidentais quanto da resistência do material. Uma vez que estruturas como perfis Aeronáuticos tem sido cada vez mais estudadas e analisadas por meios probabilísticos com o intuito de garantir o funcionamento da estrutura ou elemento estrutural através da determinação de probabilidade de falha, pois estão sujeitas à inúmeras incertezas de projeto e fenomenológica. A análise estrutural probabilística é a arte de formular um modelo matemático dentro do qual se pode perguntar e obter resposta à pergunta: “Qual é a probabilidade de uma estrutura se comportar de uma forma especificada quando dada uma ou mais das suas propriedades, materiais, dimensões geométricas e propriedades de natureza aleatória?”. (Ditlevsen e Madsen, 2005). O método de Monte Carlo pode ser descrito como um método estatístico, no qual se utiliza uma sequência de números aleatórios para simular problemas que podem ser representados por processos estocásticos. As variáveis aleatórias do problema de confiabilidade serão as tensões de escoamento dos materiais que compõem os perfis, assim como as cargas aplicadas nos mesmos. Através de análises estatísticas será obtida a probabilidade de falha da estrutura, podendo, através deste determinar o índice de confiabilidade da estrutura.*

Keywords: *Confiabilidade, Estrutura, Monte Carlo, Probabilidade.*

INTRODUÇÃO

CILAMCE 2017

Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering
P.O. Faria, R.H. Lopez, L.F.F. Miguel, W.J.S. Gomes, M. Noronha (Editores), ABMEC, Florianópolis, SC, Brazil,
November 5-8, 2017.

Desde o início do processo de fabricação até o final de sua vida útil uma aeronave está sujeita a diversos fatores que podem levar a danos e falhas estruturais que podem comprometer a segurança dos passageiros. O presente propõe-se aprofundar no tema “CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DE PERFIS METÁLICOS AEROESPACIAIS SUBMETIDAS À CARREGAMENTOS PERMANENTES E ACIDENTAIS” de modo a determinar a confiabilidade levando-se em conta distribuições de probabilidade tanto das cargas quanto da resistência do material.

Os projetos de sistemas e componentes estruturais aeronáuticos possuem características peculiares, quanto ao tipo de solicitação atuante, tipicamente dinâmica e imprevisível (cargas acidentais), e quanto aos requisitos da segurança em operação. Em geral esta segurança é traduzida em parâmetros de projeto como o coeficiente de segurança. Devido à grande exigência e competitividade do mercado aéreo em termos de desempenho de produto e redução de custos, otimizar este coeficiente em relação a sua confiabilidade torna-se essencial.

Atualmente o fator de segurança utilizado internacionalmente para projetos de aeronaves comerciais, segundo requisito de certificação FAR Part 25.571 [1], é o de salvo especificações em contrário, deve ser aplicado um fator de segurança de 1,5 à carga limite prescrita que são consideradas cargas externas na estrutura. Quando uma condição de carregamento é prescrita em termos de cargas finais, não é necessário aplicar um fator de segurança, salvo indicação em contrário.

O processo clássico de projeto tem como base o uso do coeficiente de segurança que é simples e fácil de se empregar, mas deixa a desejar pela falta de maior rigor no tratamento quantitativo das variáveis de projeto, pois esta teoria clássica de projeto por vezes acaba ignorando o fato de que em engenharia nem sempre os valores são perfeitamente definidos, mas valores que variam dentro de um intervalo. Visando este conceito, o presente trabalho busca determinar este fator por meio de conceitos probabilísticos, de forma a obter uma ferramenta capaz de resolver situações onde a solicitação é aleatória, excitando dinamicamente a estrutura, permitindo uma criteriosa avaliação do nível de segurança existente ao longo da vida do produto. A principal diferença entre o método de projeto clássico e o enfoque probabilístico consiste no fato de se admitir neste último a probabilidade de falha. No método clássico a probabilidade de falha do projeto fica oculta por um coeficiente de segurança.

O termo confiabilidade está intimamente ligado à confiança em algo. No caso do projeto em Engenharia, está relacionado com a confiança sobre um projeto executado, e pode ser traduzido pela segurança do projeto quando em uso. A segurança de um sistema estrutural é habitualmente obtida através de um coeficiente de segurança. Segundo (Leemis, 1995), “a confiabilidade de um item corresponde a sua probabilidade de desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado período de tempo sob condições ambientais predeterminadas”. Deixando clara a importância da confiabilidade como ferramenta de análise para projetos de Engenharia, pois esta fornece parâmetros que nos permitem tomar decisões mais coerentes, tais como taxa de falha, tempo médio entre falhas, cálculo da confiabilidade e tempo médio para reparo.

Além das justificativas citadas, a escolha deste tema está relacionada diretamente com um tema extremamente importante na Engenharia Aeroespacial que é a segurança, pois a probabilidade de perda da estrutura como um todo, e até mesmo de vidas é extremamente alta caso ocorra algum tipo de falha estrutural.

Do ponto de vista científico, trata-se de um assunto na fronteira atual na área de aplicação de Métodos Numéricos à Engenharia de Estruturas. Para resolver problemas de confiabilidade estrutural com restrições de cargas permanentes e acidentais via métodos estocásticos é necessário dispor de um grande número de dados que serão obtidos e analisados via métodos numéricos, tais como o Método de Monte Carlo. Vale-se ressaltar que a área de determinação da confiabilidade estrutural via métodos estocásticos é quase que inexplorada no setor Aeroespacial, não somente em âmbito nacional, mas também em nível internacional, pois o financiamento de programas de pesquisa nesta área ainda é muito escasso.

1 REFERÊNCIAL TEÓRICO

Este trabalho se baseará principalmente nos conceitos de confiabilidade, otimização e estatística. Conceitos estes que estão intrinsecamente conectados. Segundo (Ditlevsen e Madsen, 2005), o problema da escolha do nível de confiabilidade pode ser analisado por meio de métodos teóricos de decisão. No entanto, estes métodos não resolvem o problema, mas transformam-no em um problema de otimização mais claramente interpretável que equilibra os custos e ganhos associados uns em relação aos outros. Com isso, o problema é alterado de um problema de escolha de um valor alvo da medida de segurança para a escolha de valores de custo associados ao evento de falha.

Recentemente, linguagens matemáticas formais diferentes do formalismo de probabilidade foram desenvolvidas com o propósito de expressar avaliações de julgamento e seu processamento. Estas são línguas que trabalham com graus de verdade (“lógicas difusas”) ou graus de pertença de um conjunto (“teoria de conjuntos fuzzy”). Tentativas foram feitas para aplicar essas ferramentas também dentro do tipo de problemas que dizem respeito à confiabilidade estrutural. A opinião dominante é, no entanto, que o cálculo de probabilidade é a base matemática mais conveniente para a avaliação da confiabilidade das estruturas (Ditlevsen e Madsen, 2005). A forma geral da equação de verificação nos métodos probabilísticos é a seguinte;

$$\beta = -\varphi^{-1}(p_f) \quad (1)$$

Onde, na Eq. (1) φ^{-1} é a inversa da função distribuição normal reduzida (com média 0 e desvio padrão 1) e p_f é a probabilidade de falha definida como;

$$p_f = p(M = R - S < 0) \quad (2)$$

Onde, M é a função do estado limite e R e S são respectivamente, a resistência e a solicitação aplicada. O índice de segurança β é calculado usando um dos métodos de confiabilidade existentes, FORM, SORM, Monte Carlo, dentre tantos outros.

Estruturas como perfis Aeronáuticos tem sido cada vez mais estudadas e analisadas por meios probabilísticos com o intuito de garantir o funcionamento da estrutura ou elemento estrutural através da determinação de probabilidade de falha, pois estão sujeitas às incertezas inerentes às variáveis envolvidas, como, dimensões do elemento, propriedades dos materiais, carregamentos permanentes provenientes do peso da aeronave, combustível, passageiros e carregamentos acidentais como rajadas de ventos, estes carregamentos podem ser representados probabilisticamente respectivamente por uma distribuição Normal e uma distribuição Extremos tipo 1, dependendo de sua incerteza fenomenológica.

Em suma, estas incertezas podem ser classificadas, de acordo com Machado (2000), como: incertezas fenomenológicas, associadas à ocorrência de eventos imprevisíveis; incertezas de avaliação, associadas à definição e à quantificação do desempenho do sistema estrutural;

incertezas do modelo, associadas às simplificações e hipóteses adotadas no modelo estrutural; incertezas estatísticas, associadas à extrapolação dos parâmetros estatísticos extraídos de populações finitas; incertezas de fatores humanos, associadas aos erros humanos ou à intervenção humana no comportamento do sistema estrutural; incertezas físicas, associadas à aleatoriedade inerente às variáveis de projeto.

No meio Aeronáutico torna-se evidente a importância do estudo da confiabilidade. Kececioglu (2002) apresenta uma definição tradicional de confiabilidade como: a probabilidade condicional, a um dado nível de confiança, de que um sistema executará suas funções de maneira satisfatória ou sem falhas, i.e., dentro dos limites de desempenho especificados, em uma certa idade, por um período de tempo especificado, ou pelo tempo de missão, quando utilizado da maneira e com o objetivo para o qual foi projetado, e operando sob as condições ambientais de aplicação e contexto operacionais com um certo nível de stress associado.

2 METODOLOGIA E RESULTADOS

Incidentalmente nos concentramos em entender familiarizar-se com a formulação de problemas de confiabilidade estrutural que são estudados mediante a técnicas de análises estáticas. A partir daí foi possível partir para formulação e programação do problema a ser analisado no presente trabalho. Onde utilizamos o software Matlab, um software interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico. O mesmo foi utilizado para gerar distribuições estocásticas de cargas permanentes e acidentais que podem ser modeladas matematicamente por uma distribuição Normal e Extremos Tipo 1(Gumbel) respectivamente, estas distribuições foram geradas utilizando funções pré existentes do software Matlab e podem ser observadas abaixo na Fig. 1.

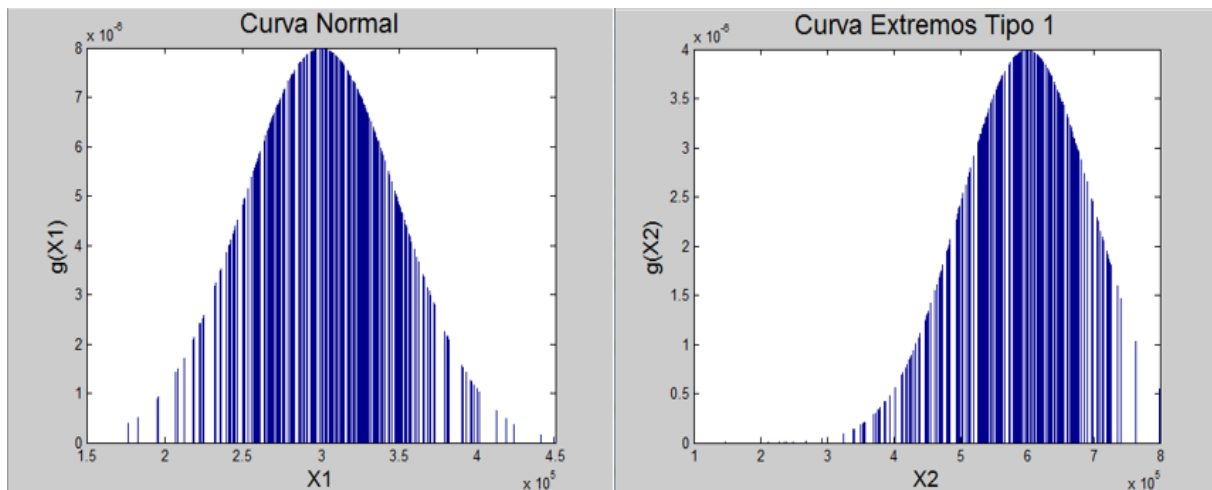


Figura 1. Distribuições Probabilísticas

A curva dada pela função $g(x_1)$ representa as cargas permanentes da estrutura e a função $g(x_2)$ representa as cargas aleatórias, é possível obter a matriz de solicitação da estrutura combinando cada uma das probabilidades geradas pela função $g(x_1)$ com a função $g(x_2)$ e vice versa, podendo assim percorrer cada probabilidade de combinação de carga permanente e acidental do espaço amostral para gerar a matriz de solicitação da estrutura. Logo, restou apenas gerar a matriz de resistência da estrutura para poder calcular a margem de segurança. A matriz estocástica de resistência também pode ser modelada por uma distribuição normal assim como a matriz das cargas permanentes.

De posse dessas curvas de densidade de probabilidade da resistência do material e da solicitação da estrutura geradas aleatoriamente, foi possível obter a margem de segurança do modelo de cálculo estrutural dada pela Eq.3;

$$M = R - S \quad (3)$$

Onde quando $S > R$ tem-se a falha e quando $S < R$ tem-se segurança do modelo, como pode ser observado na Fig. 2.

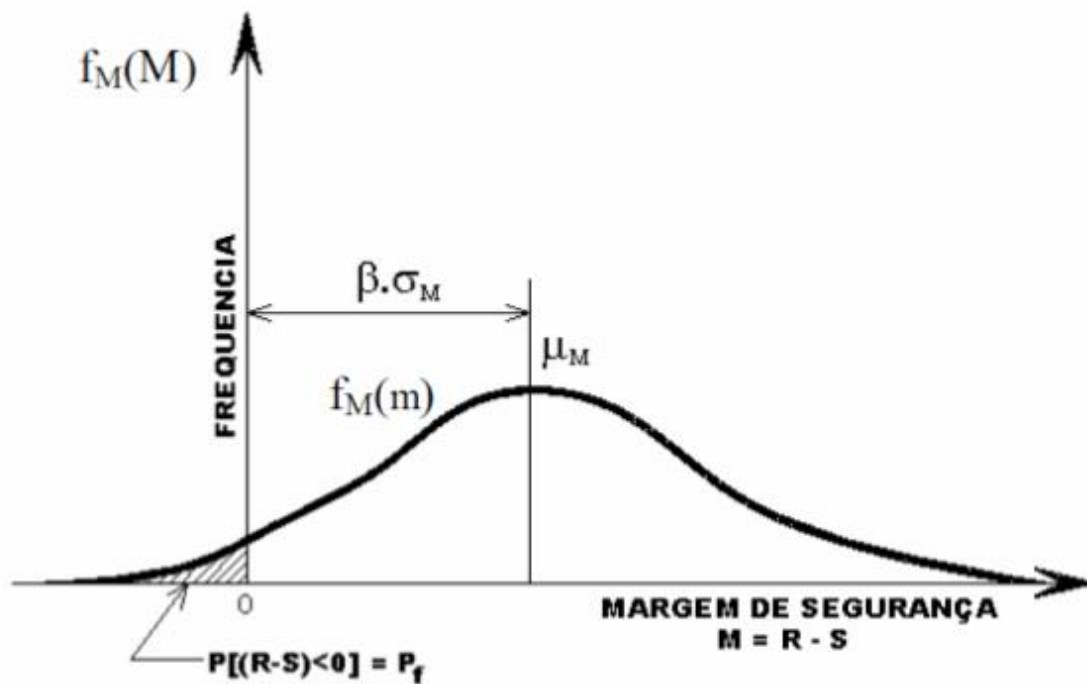


Figura 2. Probabilidade de falha do modelo de cálculo estrutural – (Nogueira, 2006)

Entendendo-se o conceito ao calcular função de densidade de probabilidade M , pode-se então definir o conceito de probabilidade de falha, que como pode ser visto na Fig.2 ocorre quando a margem de segurança (M) é menor que zero. Via software Matlab calculamos a margem de segurança e plotamos o histograma da margem de segurança do modelo estrutural como pode ser visto na Fig. 3 para facilitar a visualização da probabilidade de falha da estrutura.

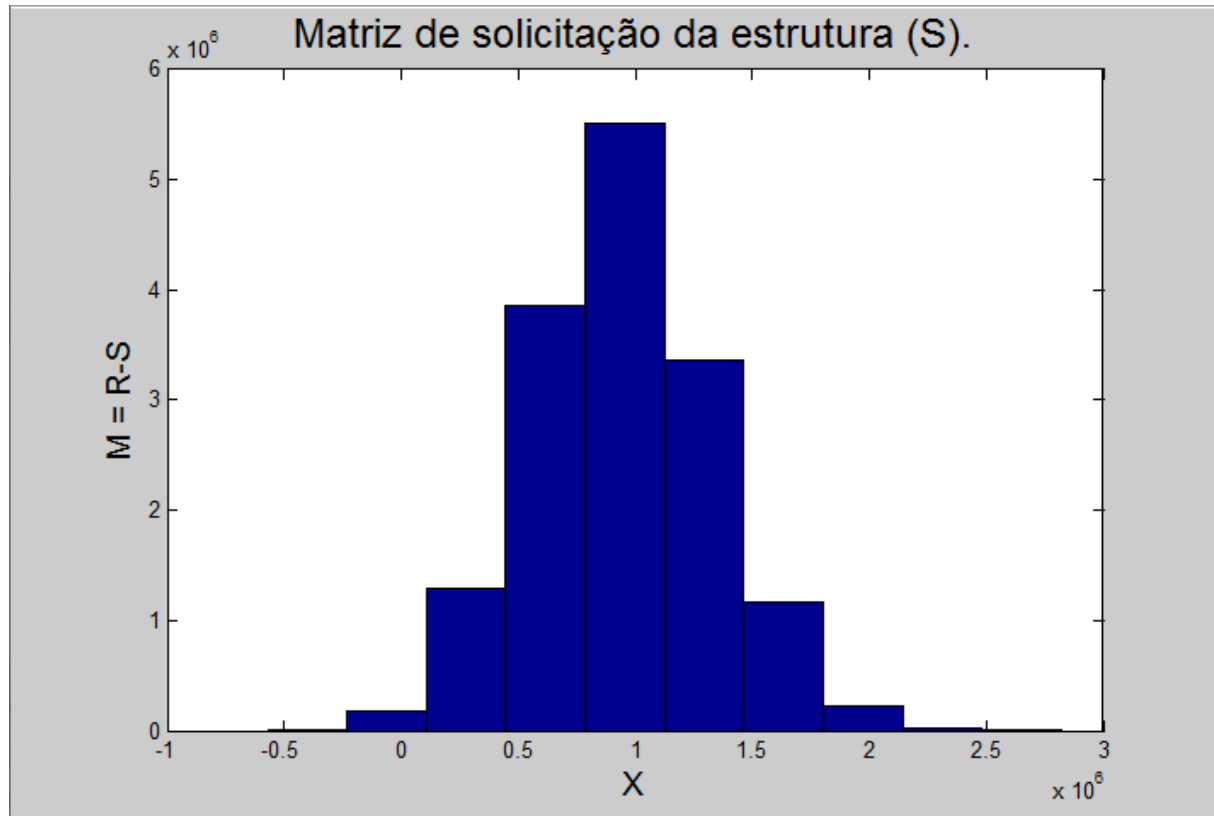


Figura 3. Margem de segurança / Probabilidade de falha.

Então, podemos calcular o índice de confiabilidade β através da Eq. 4:

$$\beta = \frac{\bar{x}_t}{\sigma_t} \quad (4)$$

Uma vez que o índice de confiabilidade β está intrinsecamente a probabilidade de falha da estrutura vide Fig. 4, é possível então finalmente obter a probabilidade de falha do modelo estrutural.

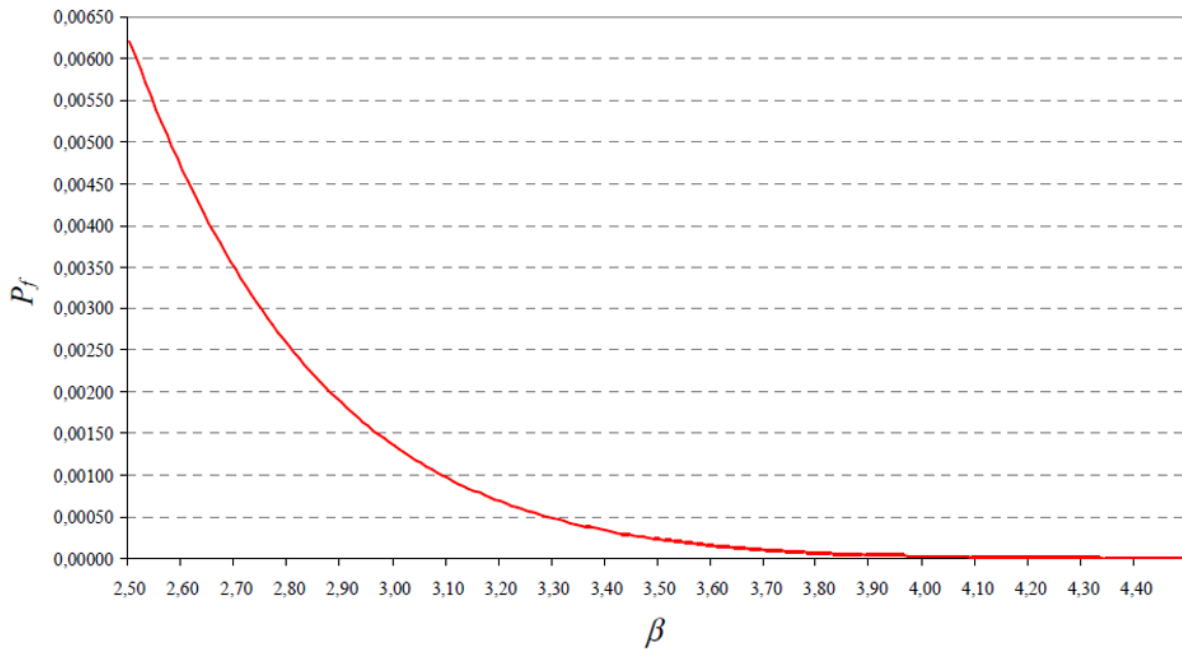


Figura 4. Gráfico da probabilidade de falha (p_f) em função do índice de confiabilidade β (Nogueira, 2006)

3 CONCLUSÃO

Analizando os dados obtidos de uma ampla gama de testes baseado no método de Monte Carlo foi possível obter um índice de confiabilidade de 2.7 para um espaço amostral de apenas 300 variáveis aleatórias devido aos restritivos; tempo e limitação computacional. Este índice β segundo Fig 4. representa uma confiabilidade de 96.50% mantendo assim coerência com o alto grau de confiabilidade que o setor aeroespacial exige. Levando em conta o baixo valor de nosso espaço amostral, tendo a ideia de que ao aumentá-lo, a margem de segurança também o acompanharia, é possível identificar o grande potencial e confiabilidade que o método da determinação da confiabilidade estrutural via método de Monte Carlo apresenta.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do ABC, seu corpo docente e discente, direção e administração que tanto auxiliaram ao longo dos anos de estudo e pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Arora, J. S., (2012), Introduction to Optimum Design, Third Edition, Academic Press.
- Brasil, R. M. L. R. F., Silva, M. A., Arora, J. S. E Swan, C. C., (2001a), On Optimization And Sensitivity For Civil Structures Subjected To Dynamic Loading, European Conference On Computational Mechanics, Cracow, Polônia.
- Chahande, A. I. e Arora, J. S., (1994), Optimization of large structures subjected to dynamic loads with the multiplier method, International Journal For Numerical Methods in Engineering, 37, pp. 413-430.
- Ditlevsen, O. e Madsen, H.O., Structural reliability methods. Denmark: Copyright, 2005.
- Federal Aviation Administration. FAR: Part. 25.571: damage tolerance and fatigue evaluation of structure. Washington, DC, 1978.
- Kececioğlu, D., Reliability engineering handbook, Vol. 1-2, DEStech publications, 2002.
- Laranja, R. e Brito, J., Verificação Probabilística da Segurança das Estruturas, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.
- Lemis, L., Reability: probabilistic models and estatistical methods. New York: Prentice Hall, 1995.
- Machado, E. R., Avaliação da confiabilidade de estruturas em concreto armado, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte – MG., 2000.
- Pfeil, W., Pfeil, M., (2000), Estruturas de aço – Dimensionamento prático (7ª. Edição), LTC Editora.
- Silva, M.A. e Brasil, R.M.L.R.F., Otimização em Projetos de estruturas. Notas de Aula, 2016.