

## **DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE EM EXCEL PARA ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE PEÇAS DE CONCRETO ARMADO**

SÓSTENES SILVA PEREIRA<sup>1\*</sup>; MARIA DE LOURDES TEIXEIRA MOREIRA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bacharel em Engenharia Civil, UFPI, Teresina-PI, sostenespereira@hotmail.com;

<sup>2</sup>Dra. em Engenharia Civil, Profa. Associada I CT, UFPI, Teresina-PI, mmoreira@ufpi.edu.br

Apresentado no

Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2018  
21 a 24 de agosto de 2018–Maceió-AL, Brasil

**RESUMO:** Na Engenharia, a segurança é geralmente tratada em termos probabilísticos. Porém, devido às dificuldades computacionais e à falta de conhecimento sobre o assunto, é comum que os engenheiros estruturais realizem o dimensionamento de estruturas seguindo métodos semi-probabilísticos prescrito por normas. O problema se agrava, porque as normas brasileiras não foram desenvolvidas a partir de um estudo probabilístico completo, ou seja, de uma análise de confiabilidade estrutural. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um *software* que calcula o índice de confiabilidade estrutural de vigas e lajes de concreto armado submetidos à flexão simples. Além de desenvolver uma ferramenta computacional, o trabalho visa mostrar que a análise de confiabilidade pode ser feita com recursos simples de computação sem perder a praticidade. O programa foi desenvolvido através do Microsoft Excel. O *software* permite que o usuário realize a análise de confiabilidade através de modelos probabilísticos prontos ou modelando cada variável do problema com os parâmetros que desejar e escolhendo entre quatro tipos de distribuição de probabilidades: normal, lognormal, de Gumbel e de Weibull. Os resultados do programa foram comparados com os de outro estudo similar e se mostraram bem próximos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Confiabilidade estrutural, concreto armado, método de Monte Carlo, Microsoft Excel.

### **SOFTWARE DEVELOPMENT IN EXCEL FOR REINFORCED CONCRETE ELEMENTS RELIABILITY ANALYSIS**

**ABSTRACT:** Safety is usually treated in probabilistic terms in engineering problems. However, due to computational difficulties and the lack of knowledge on the subject, it is common for structural engineers to carry out the structural design following the semi-probabilistic approaches prescribed by the codes. The problem worsens, because Brazilian codes were not developed from a complete probabilistic study, that is, a structural reliability analysis. The present work shows the development of software that calculates the structural reliability index of beams and slabs of reinforced concrete subjected to simple bending. In addition to developing a computational tool, the paper aims to demonstrate that reliability analysis can be done with simple computing resources without sacrificing viability. The program was developed through Microsoft Excel. The software allows the user to perform the reliability analysis through predefined probabilistic models or by modeling each problem variable with the desired parameters and choosing between four types of probability distributions: normal, lognormal, Gumbel, and Weibull. The program results were compared to those of a similar study and were found to be comparable.

**KEYWORDS:** Structural Reliability, Reinforced Concrete, Monte Carlo Method, Microsoft Excel.

### **INTRODUÇÃO**

Espera-se que os engenheiros garantam a segurança dos sistemas pelos quais eles se responsabilizam, porém o senso comum da ideia de segurança difere do que acontece na realidade. Popularmente, pensa-se em um sistema seguro, principalmente na área estrutural, como um sistema “à prova de algo”, 100% confiável. Porém, a própria natureza dos materiais da construção civil, a forma

de execução, as simplificações de cálculo e a natureza das cargas revelam que existem muitas incertezas em todo o processo que vai desde o projeto até à utilização da estrutura. Assim, a Engenharia não trata de garantir certezas, mas de, conforme os recursos disponíveis, diminuir as chances de falha dos sistemas.

Diante desse quadro, a segurança torna-se uma questão de probabilidade, por isso se usa a expressão “análise de confiabilidade”. Muito embora desde muito tempo já houvesse ferramentas de estatística e de teoria da probabilidade para lidar com o problema da segurança de forma puramente probabilística, a implementação dessa abordagem esbarrou sempre em duas dificuldades: conseguir dados suficientes para criar modelos probabilísticos para as variáveis envolvidas e o grande esforço computacional necessário para realizar os cálculos de probabilidade. Mas conforme a pesquisa sobre as características estatísticas das variáveis avança juntamente com a tecnologia de computação, essas dificuldades vão sendo superadas.

Como alternativa ao cálculo probabilístico da segurança, as normas modernas determinam a utilização de coeficientes sobre as ações e resistências. Comparativamente, esse método simplifica de forma considerável o dimensionamento das estruturas. Mas uma das desvantagens é que ele não garante ao projetista um controle preciso do nível de segurança dos elementos estruturais. Bastos (2012) mostrou que, por exemplo, comparando duas lajes de espessuras diferentes projetadas seguindo a norma brasileira, uma pode ter probabilidade de falha mais de 300 vezes maior que a outra. Por se tratarem de probabilidades pequenas, o problema é mais relacionado a economia do que a segurança.

No ano de 1990, Galambos já classificava como uma tragédia que a grande quantidade de pesquisa e dados já disponíveis naquela época sobre análise de confiabilidade fosse tão subutilizada pelos engenheiros estruturais por conta do método utilizado até os dias de hoje (2018) de elaborar o projeto de estruturas seguindo cegamente os coeficientes ditados por uma norma. Como solução, o autor defende um forte ensino dos métodos de análise de confiabilidade desde a graduação (Galambos, 1990).

Por isso, o presente trabalho visa contribuir com a disseminação do conhecimento sobre análise de confiabilidade nos meios acadêmico e profissional, mostrando o desenvolvimento de uma programa que analisa probabilisticamente a segurança das estruturas através de uma ferramenta computacional relativamente simples e acessível como o Microsoft Excel.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O programa foi desenvolvido no formato de um arquivo do software Microsoft Excel habilitado para macros. Ele usa as planilhas do Microsoft Excel como interface do usuário enquanto que tem a programação toda feita em *Visual Basic for Applications* (VBA), a linguagem de programação integrada ao Excel.

O programa foi feito para analisar a confiabilidade de vigas e lajes retangulares de concreto armado submetidas à flexão simples e com armadura de flexão simples. Utilizou-se a avaliação de confiabilidade em relação a uma seção, visto que a consideração do elemento estrutural como um todo é bastante complexa. A consideração apenas da seção resulta em um índice de confiabilidade menor que o real, especialmente para lajes, mas ainda assim é um tipo de análise comum na literatura (Santos et al., 2014).

Também foi feita a consideração de que o problema envolve apenas variáveis aleatórias sendo, portanto, uma análise estática, ou seja, que não considera a correlação das variáveis no espaço e no tempo. Uma análise de todo o ciclo de vida de uma estrutura é difícil de modelar, seu custo computacional é muito mais alto que o da análise de confiabilidade estática e está mais associada a estruturas submetidas a corrosão como pontes e estruturas marítimas (Hajjalizadeh et al., 2015; Wang & Wang, 2013; Wang et al., 2015).

O programa retorna ao usuário o índice de confiabilidade, que é uma medida de segurança frequentemente utilizada na literatura de confiabilidade estrutural. O programa usa o método de Monte Carlo para calcular a probabilidade de falha  $p_f$ , que por sua vez é transformada no índice de confiabilidade,  $\beta$ , através da seguinte equação (Haldar & Mahadevan, 2000):

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

onde  $\Phi^{-1}$  é o inverso da função de distribuição acumulada normal padrão. Quanto menor a probabilidade de falha, maior será o índice de confiabilidade.

Para utilizar o método de Monte Carlo, é necessário desenvolver uma função  $Z$ , chamada função de falha, que relaciona as variáveis envolvidas no problema de forma que o valor da função é menor que zero quando ocorre a falha do elemento estrutural. A função de falha utilizada no programa é a seguinte:

$$Z = \theta_R \cdot f_y \cdot A_s \cdot \left( h - d' - \frac{0,5 \cdot f_y \cdot A_s}{0,85 \cdot f_c \cdot b_w} \right) - \theta_S \cdot (M_g + M_q) \quad (2)$$

onde  $\theta_R$  e  $\theta_S$  são variáveis que levam em conta o erro do modelo das resistências e solicitações, respectivamente;  $f_y$  e  $f_c$  são, respectivamente, a resistência do aço e do concreto;  $A_s$  é a área de aço da armadura simples;  $h$  é a altura da viga ou laje;  $d'$  é a distância entre o centro de gravidade da armadura e a fibra mais tracionada; e  $M_g$  e  $M_q$  são, respectivamente, o momento causado pelas cargas permanentes e acidentais. Essa é a mesma função de falha usada por Santos et al. (2014).

A partir daí, é feito um grande número de simulações da função de falha. Em cada uma delas, são gerados números aleatórios para as variáveis de acordo com as suas características estatísticas. O quociente entre o número de simulações em que a função de falha é menor que zero e o número total de simulações é a aproximação da probabilidade de falha pelo método de Monte Carlo.

Desenvolveu-se o programa em três módulos: um módulo de vigas e outro de lajes com modelos probabilísticos predefinidos e outro com a opção do usuário entrar com o seu próprio modelo. Assim, mesmo que o usuário não possua dados sobre as características estatísticas das variáveis, ele pode inserir apenas os valores das variáveis que o programa aplicará o seu próprio modelo probabilístico para a análise de confiabilidade. No outro módulo, o usuário entra com o tipo de distribuição, a média e o desvio padrão de cada variável. O usuário pode escolher entre as distribuições normal, lognormal, de Gumbel e de Weibull. A Figura 1 traz a tabela onde são inseridos os dados e os botões de comando de cada um dos módulos do programa. Da esquerda para a direita: módulo de vigas, de lajes e o módulo de modelo probabilístico customizável.

Figura 1. Partes principais da interface dos três módulos do programa.

The figure shows three screenshots of the software interface. The first two show input data for beams and slabs, and the third shows a custom probabilistic model.

DADOS DE ENTRADA		
Variável	Valor	
$M_{gk}$	5,0 kN-m	Salvar
$M_{qk}$	25,56 kN-m	Salvar
$f_{ck}$	25,0 MPa	Salvar
$h$	60,0 cm	Salvar
$d'$	46,7 cm	Salvar
$b$	20,0 cm	Salvar
Tipo de aço	CA-50	Salvar
$A_s$	4,02 cm <sup>2</sup>	Salvar

Calcular

DADOS DE ENTRADA		
Variável	Valor	
$M_{gk}$	23,0 kN-m	Salvar
$M_{qk}$	34,0 kN-m	Salvar
$f_{ck}$	23,0 MPa	Salvar
$h$	23,0 cm	Salvar
$d'$	5,0 cm	Salvar
Tipo de aço	CA-50	Salvar
$A_s$	1,5 cm <sup>2</sup> /m	Salvar

Calcular

DADOS DE ENTRADA				
Variável	Distribuição	Média	Desvio padrão	
$M_g$	Normal	97,74 kN-m	9,774 kN-m	Salvar
$M_q$	Gumbel	21,74 kN-m	4,348 kN-m	Salvar
$f_c$	Weibull	29,9 MPa	4,485 MPa	Salvar
$h$	Normal	50,0 cm	2,25 cm	Salvar
$d'$	Lognormal	46,5 cm	3 cm	Salvar
$b$	Normal	20,0 cm	1 cm	Salvar
$f_y$	Normal	544,5 MPa	27,225 MPa	Salvar
$A_s$	Normal	9,425 cm <sup>2</sup>	0,141375 cm <sup>2</sup>	Salvar
$\theta_R$	Lognormal	1,02	0,0612	Salvar
$\theta_S$	Lognormal	1,0	0,05	Salvar

Calcular

A geração de números aleatórios de Gumbel e de Weibull é feita através da técnica de transformação inversa. Para a geração de números aleatórios normais foram testadas a transformação de Box-Muller – um método bastante simples de se programar – e o método de Ziggurat – muito mais complexo, porém em 2007 era o mais rápido método de alta precisão que existia (Thomas et al., 2007). Os números lognormais são gerados através da transformação de números normais explorando uma função biunívoca entre as duas distribuições de probabilidades.

O programa funciona da seguinte forma: cada variável tem um comando para que todos os seus valores aleatórios necessários sejam gerados. Isso possibilita que, enquanto o programa gera os valores de uma variável, o usuário insira os dados de outra, agilizando o funcionamento do programa. Após todos os números aleatórios necessários gerados, o usuário deve dar o comando para que o índice de confiabilidade seja calculado. Foi medido o tempo médio gasto para gerar cada distribuição de probabilidades e também para o cálculo do índice de confiabilidade a partir dos números aleatórios.

Os testes foram realizados em computador equipado com processador Intel® Core™ i5-4310U (cache de 3MB, até 3,00 GHz) e utilizando o Microsoft Excel 2007.

O erro do método de Monte Carlo com 95% de confiança é dado pela seguinte equação (Shoorman, 1968 apud Haldar & Mahadevan, 2000):

$$\varepsilon \% = 200 \sqrt{\frac{1 - p_f}{N \cdot p_f}} \quad (3)$$

onde  $p_f$  é a probabilidade de falha real e  $N$ , o número de simulações. O programa faz sempre 10 milhões de simulações, o que gera um erro variável. Por exemplo, para um índice de confiabilidade real de 3,4, o erro do programa é  $\pm 0,01$ , já para um índice de 4,5, o erro é  $\pm 0,1$ . Essa precisão é satisfatória para os objetivos deste trabalho já que o maior valor alvo do índice de confiabilidade para a flexão na norma americana é 3,5, enquanto no Eurocode o valor alvo é de 3,8 para as estruturas mais usuais (Szczeszen & Nowak, 2003; El-Reedy, 2012).

O programa foi verificado através da comparação dos seus resultados com os resultados do estudo de confiabilidade de Bastos (2012). No referido trabalho, foi feita a análise de confiabilidade através do método de Monte Carlo, com o auxílio do programa VaP 1.6, de 3 vigas e 15 lajes submetidas à flexão simples. Cada elemento foi submetido a 11 situações diferentes de carga mudando a proporção entre carga permanente e sobrecarga, mas mantendo-se a mesma carga total. Alterou-se levemente a função de falha original do programa deste trabalho para ser igual à usada por Bastos (2012). A comparação foi feita entre os índices de confiabilidade dados pelos programas que, por sua vez, foram calculados de acordo com a Equação 1.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra o tempo médio para gerar os 10 milhões de números aleatórios para cada distribuição de probabilidade e para o cálculo do índice de confiabilidade incluindo a execução das simulações.

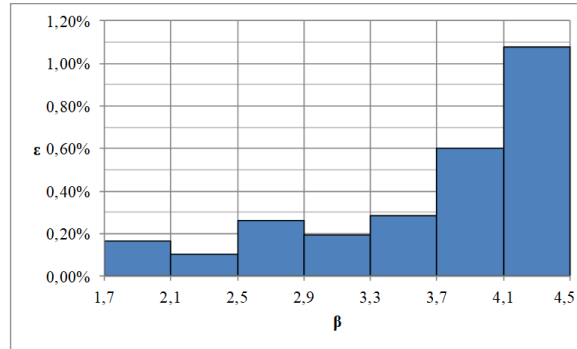
Tabela 1. Tempo de processamento individual das tarefas realizadas pelo programa

Tarefa	Tempo médio de processamento (s)
Normal Ziggurat	3,7
Normal Box-Muller	6,3
Lognormal Ziggurat	5,8
Lognormal Box-Muller	8,2
Gumbel	4,1
Weibull	7,4
Simulações	3,6

Esses resultados mostram que o tempo efetivo de espera do usuário pelo resultado da simulação é de cerca de 10 segundos no caso de inserção manual dos dados, já que o tempo de inserção dos dados é usualmente maior que o tempo de processamento de uma variável e, assim, o usuário vai esperar pelo processamento apenas da última variável e das simulações. No caso de a última variável inserida ser determinística (o que não é raro), o tempo de espera do usuário seria de apenas 3,6 segundos. Percebe-se também que o ganho de velocidade com o método de Ziggurat na linguagem VBA não é tão grande quanto em outras linguagens como C++ em que chega a ser 8 vezes mais rápido que a transformação de Box-Muller (Thomas et al., 2007).

A Figura 2 traz a comparação entre os resultados dos dois programas em termos do erro percentual médio nos intervalos do índice de confiabilidade indicados. O maior erro absoluto e percentual foi registrado na mesma simulação que tinha, segundo Bastos (2012),  $\beta = 4,265$ . O erro percentual foi de 2,08% e o absoluto, 0,089.

Figura 2. Erro do programa em comparação a Bastos (2012) para diferentes intervalos de  $\beta$ .



Como esperado, o erro cresce com o aumento do índice de confiabilidade. O erro do programa é considerado aceitável já que o índice de confiabilidade alvo é comumente estabelecido com precisão de uma casa decimal. Além disso, como já foi mostrado, os valores alvo do índice de confiabilidade para estruturas costumam estar na faixa analisada.

## CONCLUSÃO

Conclui-se que atualmente a análise de confiabilidade estrutural está acessível aos engenheiros. Com o auxílio de um programa relativamente simples e popular como o Microsoft Excel, um computador com poder de processamento mediano e conhecimento razoável de programação, é possível analisar a confiabilidade de estruturas. O aumento contínuo no poder de processamento dos computadores garante que programas como esse possam substituir o modo convencional de como é feito o dimensionamento estrutural.

As maiores barreiras a uma abordagem puramente probabilística do problema da segurança estrutural (a falta de dados estatísticos e a complexidade dos cálculos) já podem ser consideradas superadas. No entanto, há ainda a necessidade de que essa abordagem seja normatizada desde os dados de entrada à interpretação dos resultados. Isso, juntamente com a ausência da análise de confiabilidade no currículo de grande parte dos cursos de graduação, são as principais últimas barreiras para que o dimensionamento estrutural por confiabilidade faça parte do dia-a-dia dos engenheiros estruturais.

## REFERÊNCIAS

- Bastos, F. P. de S. Análise de confiabilidade de seções submetidas à flexão simples e composta pelo método de Monte Carlo. 108f. TCC (Graduação em Engenharia Civil). Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.
- El-Reedy, M. A. Reinforced Concrete Structural Reliability. CRC Press, Boca Raton-FL. 2012. 347p.
- Galambos, T. V. Developments in modern steel design standards. Journal of Construction Steel Research, v.17, n.1 e 2, p.141-162, 1990.
- Haldar, A.; Mahadevan, S. Probability, reliability, and statistical methods in engineering design. John Wiley & Sons, Inc., New York-NY. 2000. 304p.
- Hajjalizadeh, D; Stewart, M.; Enright, B.; OBrien, E. J. Spatial time-dependent reliability analysis of reinforced concrete slab bridges subject to realistic traffic loading. Structure And Infrastructure Engineering, v.12, n.9, p.1137-1152. 2015.
- Santos, D. M.; Stucchi, F. R.; Beck, A. T. Confiabilidade de vigas projetadas de acordo com as normas brasileiras. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v.7, n.5, p.723-746, 2014.
- Szerszen, M. M.; Nowak, A. S. Calibration of Design Code for Buildings (ACI 318): Part 2- Reliability Analysis and Resistance Factors. ACI Structural Journal, v.100, n.3, p.383-391, 2003.
- Thomas, D. B.; Luk, W.; Leong, P. H. W.; Villasenor, J. D. Gaussian random number generators. ACM Computing Surveys, v.39, n.4, artigo 11, 2007.
- Wang, L.; Wang, X.; Wang, R.; Chen, X. Time-Dependent Reliability Modeling and Analysis Method for Mechanics Based on Convex Process. Mathematical Problems In Engineering, v.2015, p.1-16, 2015.
- Wang, Z.; Wang, P. A new approach for reliability analysis with time-variant performance characteristics. Reliability Engineering & System Safety, v.115, p.70-81, 2013.