

Helenton Carlos da Silva  
(Organizador)

Estudos (Inter)  
Multidisciplinares  
nas Engenharias 2

Helenton Carlos da Silva  
(Organizador)

Estudos (Inter) Multidisciplinares nas  
Engenharias  
2

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora  
Copyright © Atena Editora  
Copyright do Texto © 2019 Os Autores  
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora  
Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira  
Diagramação: Geraldo Alves  
Edição de Arte: Lorena Prestes  
Revisão: Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

### **Conselho Editorial**

#### **Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Faria – Universidade Estácio de Sá  
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima  
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia  
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### **Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

### Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás  
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

### Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto  
Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí  
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

| <b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)<br/>(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b> |  |
|---|--|
| E82   | <p>Estudos (inter) multidisciplinares nas engenharias 2 [recurso eletrônico] / Organizador Helenton Carlos da Silva. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019.</p> <p>Formato: PDF<br/>Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader<br/>Modo de acesso: World Wide Web<br/>Inclui bibliografia<br/>ISBN 978-85-7247-701-7<br/>DOI 10.22533/at.ed.017190910</p> <p>1. Engenharia – Pesquisa – Brasil. I. Silva, Helenton Carlos da.</p> <p style="text-align: right;">CDD 658.5</p> |
| <b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>   |  |

Atena Editora  
Ponta Grossa – Paraná - Brasil  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
contato@atenaeditora.com.br

## APRESENTAÇÃO

A obra “*Estudos (Inter) Multidisciplinares nas Engenharias*” aborda uma série de livros de publicação da Atena Editora, em seu I volume, apresenta, em seus 21 capítulos, discussões de diversas abordagens acerca da importância da (inter) multidisciplinaridade nas engenharias.

O processo de aprendizagem, hoje em dia, é baseado em um dinamismo de ações condizentes com a dinâmica do mundo em que vivemos, pois a rapidez com que o mundo vem evoluindo tem como chave mestra a velocidade de transmissão das informações.

A engenharia praticada nos dias de hoje é formada por conceitos amplos e as situações a que os profissionais são submetidos mostram que esta onda crescente de tecnologia não denota a necessidade apenas dos conceitos técnicos aprendidos nas escolas.

Desta forma, os engenheiros devem, além de possuir um bom domínio técnico da sua área de formação, possuir domínio também dos conhecimentos multidisciplinares, além de serem portadores de uma visão globalizada.

Este perfil é essencial para o engenheiro atual, e deve ser construído na etapa de sua formação com o desafio de melhorar tais características.

Dentro deste contexto podemos destacar que uma equipe multidisciplinar pode ser definida como um conjunto de profissionais de diferentes disciplinas que trabalham para um objetivo comum.

Neste sentido, este livro é dedicado aos trabalhos relacionados aos estudos da (inter) multidisciplinaridade nas engenharias, com destaque mais diversas engenharias e seus temas de estudos.

Os organizadores da Atena Editora agradecem especialmente os autores dos diversos capítulos apresentados, parabenizam a dedicação e esforço de cada um, os quais viabilizaram a construção dessa obra no viés da temática apresentada.

Por fim, desejamos que esta obra, fruto do esforço de muitos, seja seminal para todos que vierem a utilizá-la.

Helenton Carlos da Silva

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1 .....</b>   | <b>1</b>  |
| ANÁLISE DO DESEMPENHO DE CONCRETO DESENVOLVIDO A PARTIR DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NA CIDADE DE SÃO CARLOS/SP  |           |
| Tatiane Caroline Rocha Lemos<br>Eduvaldo Paulo Sichieri<br>Victor José dos Santos Baldan  |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.0171909101</b>  |           |
| <b>CAPÍTULO 2 .....</b>   | <b>13</b> |
| ESTUDO DE DOSAGEM DE ARGAMASSA A PARTIR DE RESÍDUO PROVENIENTE DA RECICLAGEM DE PNEUS   |           |
| Tatiane Caroline Rocha Lemos<br>Eduvaldo Paulo Sichieri<br>Victor José dos Santos Baldan  |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.0171909102</b>  |           |
| <b>CAPÍTULO 3 .....</b>   | <b>25</b> |
| ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICA DA MADEIRA: UMIDADE, DENSIDADE APARENTE E RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELAS ÀS FIBRAS DAS ESPÉCIES COMERCIALIZADAS NO MUNICÍPIO DE BOA VISTA-RR |           |
| Weiza Nunes Barbosa<br>Emerson Lopes de Amorim<br>Luiz Gustavo Ayres Barros<br>Kellen de Souza Singh<br>Lucas Matos de Souza<br>José Castro Lima  |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.0171909103</b>  |           |
| <b>CAPÍTULO 4 .....</b>   | <b>37</b> |
| ANÁLISE DOS EFEITOS DA VAZÃO MÁSSICA SOBRE A DEPOSIÇÃO DE INCRUSTAÇÕES EM AQUECEDORES DE LEITE DO TIPO PLACAS PLANAS GAXETADAS  |           |
| Alex Vazzoler   |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.0171909104</b>  |           |
| <b>CAPÍTULO 5 .....</b>   | <b>47</b> |
| AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE FARINHA DE MANDIOCA ( <i>Manihot esculenta Crantz</i> ) EM COMUNIDADE TRADICIONAL DO MUNICÍPIO DE MACAPÁ-AP E POSSÍVEIS SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS                      |           |
| Roberto Quaresma Santana<br>Lia Carla de Souza Rodrigues<br>Jorge Emílio Henriques Gomes<br>Marília de Almeida Cavalcante   |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.0171909105</b>  |           |
| <b>CAPÍTULO 6 .....</b>   | <b>55</b> |
| AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE MACROTEXTURA E DRENABILIDADE EM DUAS PISTAS DE POUSO NA REGIÃO DO VALE DO ARAGUAIA   |           |
| Thamires Ferreira da Silva  |           |

Lucas Jorge Freitas Marinho  
Augusto Romanini  
Raul Tadeu Lobato Ferreira

**DOI 10.22533/at.ed.0171909106**

**CAPÍTULO 7 ..... 69**

COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DE GELATINAS OBTIDAS A PARTIR DAS PELES DE MAPARÁ (*Hypophthalmidae*) E URITINGA (*Arius Proops*)

Élida Viana de Souza  
Jiullie Delany Bastos Monteiro  
Nara Helem Brazão da Costa  
Leliane da Silveira Barbosa Gomes  
Iara Eleni de Souza Pereira

**DOI 10.22533/at.ed.0171909107**

**CAPÍTULO 8 ..... 77**

CONTROLE ESTRUTURAL DO DEPÓSITO PLACER DE MINERAIS PESADOS NA REGIÃO PRAIAL AO NORTE DA DESEMBOCADURA DA LAGOA DOS PATOS (BUJURU, BRASIL)

Bruno Silva da Fontoura  
Adelir José Strieder  
Jéssica Stern Behling  
Rui Sérgio Saraiva Duarte Junior  
Talita Cabelera da Silva  
Paulo Mendes  
Aureliano Augusto Vieira da Nóbrega  
Lauro Julio Calliari

**DOI 10.22533/at.ed.0171909108**

**CAPÍTULO 9 ..... 87**

ESTRUTURA FÍSICA E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA MÁQUINA A RELUTÂNCIA VARIÁVEL PAUTADO EM PROTÓTIPO 8/6

Marcos José de Moraes Filho  
Luciano Coutinho Gomes  
Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira  
Darizon Alves de Andrade  
Josemar Alves dos Santos Junior  
Wanberton Gabriel de Souza

**DOI 10.22533/at.ed.0171909109**

**CAPÍTULO 10 ..... 99**

VARIAÇÃO DA PERDA DE CARGA NA MANGUEIRA EM FUNÇÃO DE SEU ENROLAMENTO

Diogo Henrique Morato de Moraes  
Ricardo Marques da Silva Viegas  
Dione Monteiro de Moraes  
Matheus Henrique Morato de Moraes  
Marcio Mesquita

**DOI 10.22533/at.ed.01719091010**

**CAPÍTULO 11 ..... 109**

**ÍNDICE DE DESEMPENHO DE MISTURAS TERNÁRIAS CONTENDO CIMENTO PORTLAND SÍLICA DE CASCA DE ARROZ E NANOSSÍLICA COLOIDAL**

Daniel da Silva Andrade  
Josué Régio Damaceno  
Laércio Breno Moreira  
Aline Alves de Almeida  
João Henrique da Silva Rêgo

**DOI 10.22533/at.ed.01719091011**

**CAPÍTULO 12 ..... 122**

**LEVANTAMENTO BIBLIOMÉTRICO E IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES DE PESQUISAS CIENTÍFICAS NA ÁREA DAS CIÊNCIAS SOCIAIS SOBRE A CANA-DE-AÇÚCAR PARA O SEGMENTO SUCROENERGÉTICO**

Manoel Gonçalves Filho  
Clóvis Delboni  
Reinaldo Gomes da Silva

**DOI 10.22533/at.ed.01719091012**

**CAPÍTULO 13 ..... 135**

**MELHORIA NO PROCESSO DE MONTAGEM ATRAVÉS DA FERRAMENTA POKA YOKE: UM ESTUDO DE CASO NO MCDONALD'S**

Jéssika Alvares Coppi Arruda Gayer  
Dayse Mendes  
Douglas Soares Agostinho  
Felipe Martins Machado  
Jennifer Evangelista Cavalcante  
Kellen Coelho dos Santos  
Marcos Augusto Mendes Marques  
Marcos Henrique Morais  
Renatha Querubina de Anevam  
Rodrigo Ramiro Prior

**DOI 10.22533/at.ed.01719091013**

**CAPÍTULO 14 ..... 144**

**MODELAGEM DA DISPERSÃO DE POLUENTES NA ATMOSFERA UTILIZANDO UMA ABORDAGEM ANALÍTICA**

Régis Sperotto de Quadros  
Glênio Aguiar Gonçalves  
Daniela Buske

**DOI 10.22533/at.ed.01719091014**

**CAPÍTULO 15 ..... 153**

**O ÍNDICE DE CONFIABILIDADE PARABÓLICO**

Emmanoel Guasti Ferreira  
Marcílio Sousa da Rocha Freitas  
José Antônio da Rocha Pinto  
Geraldo Rossoni Sisquini

**DOI 10.22533/at.ed.01719091015**



|   |            |
|---|------------|
| <b>CAPÍTULO 16</b> .....  | <b>168</b> |
| RE-EVALUATION OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE AND TOTAL ACID NUMBER ON NAPHTHENIC CORROSION BY ELECTROCHEMICAL NOISE TECHNIQUE  |            |
| Ana Carolina Tedeschi Gomes Abrantes<br>Alysson Nunes Diógenes<br>Haroldo de Araújo Ponte   |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.01719091016</b>   |            |
| <b>CAPÍTULO 17</b> .....  | <b>179</b> |
| SLOW-RELEASE FERTILIZER FROM A ROCK CONTAINING GLAUCONITE BY THERMAL PROCESSING WITH ADDITIVES  |            |
| Antonio Clareti Pereira<br>Emily Mayer de Andrade Becheleni<br>Marta Ribeiro dos Santos Gomes<br>Sônia Denise Ferreira Rocha  |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.01719091017</b>   |            |
| <b>CAPÍTULO 18</b> .....  | <b>190</b> |
| UMA INTRODUÇÃO AO USO DA INTEGRAL DE DUHAMEL EM SISTEMAS DINÂMICOS ESTRUTURAIS  |            |
| Natan Sian das Neves  |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.01719091018</b>   |            |
| <b>CAPÍTULO 19</b> .....  | <b>202</b> |
| USO DE PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL NA OTIMIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE ADSORÇÃO COM TURFA PARA REMOÇÃO DA TURBIDEZ DE EFLUENTE OLEOSO  |            |
| Regina Celia de Oliveira Brasil Delgado<br>Francisco Igor da Costa Freire<br>Andréa Francisca Fernandes Barbosa<br>André Luís Novais Mota<br>Kalyanne Keyly Pereira Gomes                                       |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.01719091019</b>   |            |
| <b>CAPÍTULO 20</b> .....  | <b>211</b> |
| UTILIZAÇÃO DE COBERTURA COMESTÍVEL NA CONSERVAÇÃO DE HORTIFRUITI  |            |
| Martiliana Mayani Freire<br>Leoclécio Luis de Paiva<br>Laís Barreto Franco<br>Anna Paula Marques Cardoso<br>Gleison Martins Medeiros Raposo<br>Caliane Lília Leite do Nascimento<br>Pedro Fagner Araújo Pereira |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.01719091020</b>   |            |
| <b>CAPÍTULO 21</b> .....  | <b>218</b> |
| MAPEAMENTO E AVALIAÇÃO DA DENSIDADE DE CAIXAS COLETORAS DE DRENAGENS URBANAS NA REGIÃO DO PORTO DE PELOTAS/RS   |            |
| Marciano Carneiro<br>Milton Cruz Fernandes  |            |

Angélica Cirolini  
Alexandre Felipe Bruch  
Lenon Silva de Oliveira  
Gabriel da Silva Pontes

**DOI 10.22533/at.ed.01719091021**

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| <b>SOBRE O ORGANIZADOR.....</b> | <b>232</b> |
| <b>ÍNDICE REMISSIVO .....</b>   | <b>233</b> |

## O ÍNDICE DE CONFIABILIDADE PARABÓLICO

### **Emmanuel Guasti Ferreira**

Instituto Federal do Espírito Santo  
Vitória - Espírito Santo

### **Marcílio Sousa da Rocha Freitas**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
(PROPEC) - UFOP  
Ouro Preto - Minas Gerais

### **José Antônio da Rocha Pinto**

Departamento de Matemática (DMAT) - UFES  
Vitória - Espírito Santo

### **Geraldo Rossoni Sisquini**

Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) -  
UFES  
Vitória - Espírito Santo

confiabilidade parabólico. Esse índice de confiabilidade foi calculado com a finalidade de melhorar os resultados estabelecidos pelo método SORM. A análise de confiabilidade estrutural de segunda ordem de várias funções de falha (superfícies de falha ou superfícies de estado limite) foi realizada e os resultados fornecidos pelo índice de confiabilidade parabólico, para efeito de comparação com as Simulações Monte Carlo (SMC), foram iguais ou melhores do que os resultados calculados pelo método SORM.

**PALAVRAS-CHAVE:** Índice de Confiabilidade, FORM, Curvaturas Principais, SORM e Simulação de Monte Carlo.

### **THE PARABOLIC RELIABILITY INDEX**

**ABSTRACT:** A reliability index called parabolic reliability index is displayed, which is the independent variable of a parabolic function of the second degree, whose value set is dependent on the first order reliability index (obtained by FORM method), of the second order reliability index (obtained by SORM method), of the sum of the principal curvatures, which are calculated via analytical geometry and provided to the SORM method, and a characteristic value ( $\psi$ ), established by the authors based on the sum of the main curvatures, which has a hyperbolic relationship with the parabolic reliability index.

**RESUMO:** Um índice de confiabilidade é apresentado, denominado índice de confiabilidade parabólico, que é a variável independente de uma função parábola do segundo grau, cujo valor estabelecido é dependente do índice de confiabilidade de primeira ordem (obtido pelo método FORM), do índice de confiabilidade de segunda ordem (obtido pelo método SORM), da soma das curvaturas principais, que são calculadas via geometria analítica e fornecidas ao método SORM, e de um valor característico ( $\psi$ ), estabelecido pelos autores com base na soma das curvaturas principais, que possui uma relação hiperbólica com o índice de

This reliability index was calculated in order to improve outcomes established by SORM method. The second order structural reliability analysis of several failure functions (failure surfaces or limit state surfaces) was performed, the results provided by the parabolic reliability index, for the purpose of comparison with Monte Carlo Simulations were equal to or better than the results calculated by SORM method.

**KEYWORDS:** Reliability index, FORM, Main curvatures, SORM and Monte Carlo Simulation.

## 1 | INTRODUÇÃO

O método SORM foi concebido com a finalidade de melhorar a precisão dos cálculos do método FORM, ou seja, melhorar a determinação do índice de confiabilidade de primeira ordem ( $\beta_F$ ) e/ou a probabilidade de falha de primeira ordem,  $P_f = \Phi(-\beta_F)$ . A ideia do método SORM é basicamente a mesma do FORM, ou seja, é aproximar a superfície de falha por um hiperparabolóide e não por um hiperplano, no ponto de projeto. Portanto, a diferença entre ambos consiste na aproximação feita para a superfície de falha no espaço reduzido. O SORM ao invés de utilizar uma superfície linear no ponto de projeto, ponto de maior densidade de probabilidade de falha, faz uma aproximação por uma superfície quadrática, como mostra a Figura 1. As curvaturas principais ( $k_j$ ) do hiperparabolóide, no ponto do projeto, são calculadas, por exemplo, conforme Ferreira (2015) e são iguais às da superfície de falha.

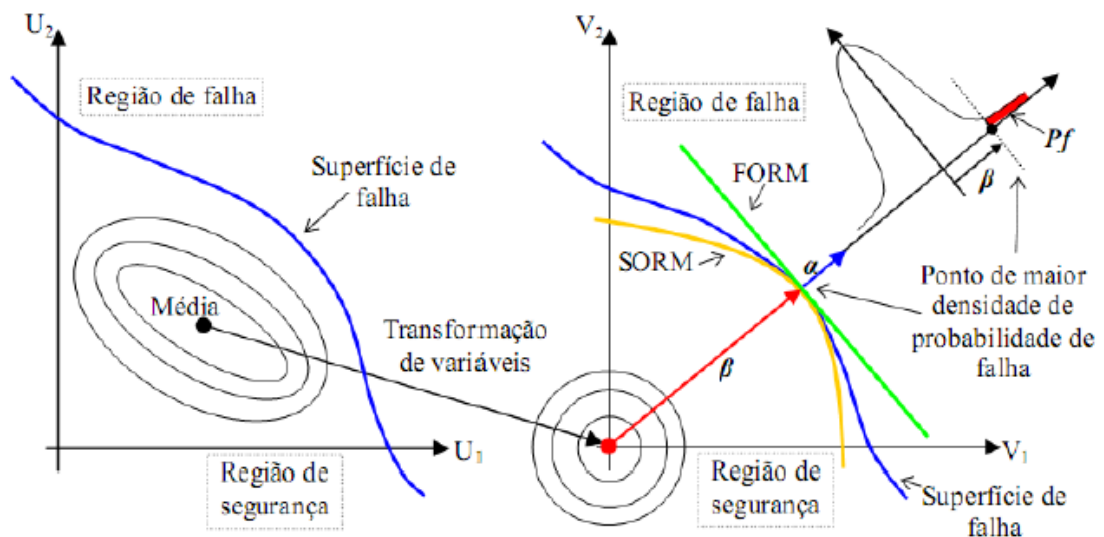


Figura 1: Demonstração gráfica da transformação de variáveis e dos métodos FORM e SORM.

Fonte: Adaptado de Rojas (2008).

Uma solução simples para o cálculo da probabilidade de falha de segunda ordem, usando uma aproximação de segunda ordem, foi desenvolvida por Breitung (1984), utilizando a teoria de aproximações assintóticas, que é suficientemente precisa para um grande valor do índice de confiabilidade  $\beta_F$  ( $1 \leq \beta_F \rightarrow \infty$ ), baseado num ajustamento a um hiperparabolóide, dada por:

$$P_{fs} \approx \Phi(-\beta_F) \prod_{j=1}^{n-1} (1 + \beta_F k_j)^{-1/2}, \quad (1)$$

onde  $\Phi(-\beta_F)$  é a distribuição cumulativa normal padrão de probabilidades,  $n$  é o número de variáveis aleatórias envolvidas na análise e  $k_j$  ( $j = 1, \dots, n-1$ ) são as curvaturas principais do hiperparabolóide no ponto de distância mínima à origem (ponto de projeto).

Tvedt (1990) formulou uma aproximação de três termos para o conteúdo de probabilidade, que é um procedimento exato para a aproximação por um hiperparabolóide, no interior da superfície de aproximação quadrática da seguinte forma (Cizelj et al., 1994; Lee et al., 2005; Madsen et al., 2006):

$$P_{fs} \approx A_1 + A_2 + A_3 \quad (2)$$

onde  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$  podem ser calculados por meio da Equação (3), conforme ilustrado abaixo:

$$\begin{aligned} A_1 &= \Phi(-\beta_F) \prod_{j=1}^{n-1} (1 + \beta_F k_j)^{-1/2} \\ A_2 &= [\beta_F \Phi(-\beta_F) - \phi(\beta_F)] \left\{ \prod_{j=1}^{n-1} (1 + \beta_F k_j)^{-1/2} - \prod_{j=1}^{n-1} (1 + (\beta_F + 1)k_j)^{-1/2} \right\} \\ A_3 &= (\beta_F + 1) [\beta_F \Phi(-\beta_F) - \phi(-\beta_F)] \left\{ \prod_{j=1}^{n-1} (1 + \beta_F k_j)^{-1/2} - \operatorname{Re} \left[ \prod_{j=1}^{n-1} (1 + (\beta_F + i)k_j)^{-1/2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

onde  $\operatorname{Re}[\ ]$  representa a parte real do argumento complexo e  $i$ , no terceiro termo, é uma unidade imaginária,  $A_1$  é uma aproximação assintótica da  $P_{fs}$ , que é exata para  $1 \leq \beta_F \rightarrow \infty$ ,  $A_2$  e  $A_3$  são termos de correção,  $\Phi$  e  $\phi$  são a função cumulativa de probabilidades e a função densidade de probabilidades para a distribuição normal padronizada. O primeiro termo da aproximação de Tvedt é o mesmo que o da aproximação de Breitung e os outros termos são as equações de modificação de ordem superior aplicadas nesse método, que compõem a Equação (3).

## 2 | O ÍNDICE DE CONFIABILIDADE PARABÓLICO ( $B_p$ )

Esse índice visa melhorar a qualidade dos resultados fornecidos pelo método SORM quanto à aproximação do valor do índice de confiabilidade de segunda ordem ( $\beta_S$ ) e/ou da probabilidade de falha de segunda ordem ( $P_{fs}$ ).

### 2.1. Obtenção

Através da resolução de diversos exemplos foi observada a aproximação

$$\beta_S - \beta_F \approx \Sigma k_j, \quad (4)$$

onde o termo  $\Sigma k_j$  é a soma das curvaturas principais, no ponto de projeto, da

superfície de estado limite. Introduzindo, agora, o índice de confiabilidade parabólico ( $\beta_p$ ) na Equação (4) sem alterá-la, do ponto de vista da matemática, tem-se

$$(\beta_S - \beta_p) + (\beta_p - \beta_F) \approx \Sigma k_j, \quad (5)$$

e com a finalidade, na Equação (5), de ser colocado o sinal de igual, será introduzido, de maneira conveniente, um valor  $\psi$ , então

$$(\beta_S - \beta_p) (-\psi) + (\beta_p - \beta_F) (\psi) = \Sigma k_j. \quad (6)$$

Com o objetivo de eliminar a dúvida relativa ao sinal de  $\psi$ , na Equação (6), tanto o termo à direita quanto o à esquerda são elevados ao quadrado, logo

$$[(\beta_S - \beta_p) (-\psi) + (\beta_p - \beta_F) (\psi)]^2 = [\Sigma k_j]^2. \quad (7)$$

Resolvendo a Equação (7) é obtida a Equação (8), ou seja,

$$4 \psi^2 \beta_p^2 - 4 \psi^2 (\beta_S + \beta_F) \beta_p + [(\psi) (\beta_S + \beta_F)]^2 - (\Sigma k_j)^2 = 0, \quad (8)$$

e na Equação (8), que é uma função parábola do segundo grau (ver Figura 2), fazendo  $a = 4 \psi^2$ ,  $b = -4 \psi^2 (\beta_S + \beta_F)$  e  $c = [(\psi) (\beta_S + \beta_F)]^2 - (\Sigma k_j)^2$ , ela passa a ser reescrita na forma

$$F(\beta_p) = a \beta_p^2 + b \beta_p + c = 0. \quad (9)$$

A solução da Equação (9) é fornecida por

$$\beta_p = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a}, \quad (10)$$

onde  $\Delta = b^2 - 4ac$ .

As derivadas de primeira e segunda ordem da função  $F(\beta_p)$  são fornecidas por

$$\frac{d[F(\beta_p)]}{d(\beta_p)} = 2a \beta_p + b, \quad (11)$$

$$\frac{d^2[F(\beta_p)]}{d(\beta_p)^2} = 2a, \quad (12)$$

onde as coordenadas do vértice, representadas a seguir, foram obtidas através das Equações (9) e (11), respectivamente:

$$\beta_{pv} = \frac{-b}{2a}, \quad (13)$$

$$F_v(\beta_{pv}) = \frac{-\Delta}{4a}, \quad (14)$$

sendo sempre um ponto de mínimo  $[\beta_{pv}, F_v(\beta_{pv})]$ , pois a derivada de segunda ordem, também, sempre será positiva ( $a > 0$ ), conforme ilustrado na Figura 2. Como consequência o domínio da função é  $\psi \neq 0$ , fornecido por

$$\Delta > 0. \quad (15)$$

A Equação (10) pode ser representada, também, na forma

$$\beta_p = \beta_{pv} \pm \frac{\sqrt{\Delta}}{2a}. \quad (16)$$

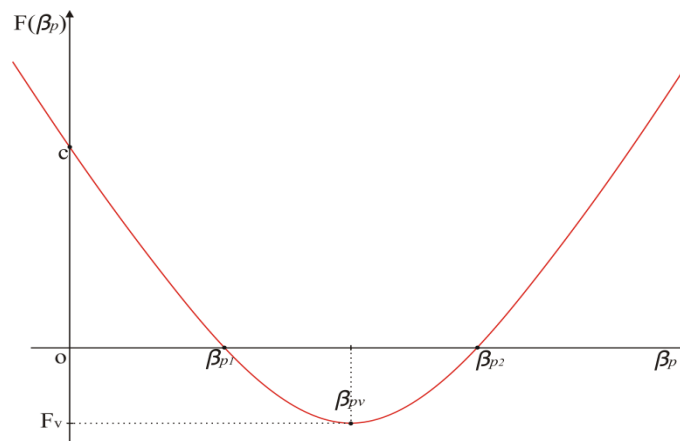


Figura 2: Gráfico da função parábola do 2º grau  $F(\beta_p)$ .

Substituindo, na Equação (16),  $\beta_{pv}$ ,  $a$  e  $\Delta$ , a fim de que  $\beta_p$  fique em função de  $\beta_F$ ,  $\beta_S$ ,  $\Sigma k_j$  e  $\psi$ , que são os dados de entrada na referida equação para o cálculo de  $\beta_p$ , obtém-se uma função hiperbólica  $\beta_p(\psi)$  (ver as Figura 3 e Figura 4), pois

$$\beta_p(\psi) = \frac{\beta_F + \beta_S}{2} + \frac{\Sigma k_j}{2|\psi|}. \quad (17)$$

O sinal do termo  $\frac{\Sigma k_j}{2|\psi|}$  da Equação (17), é governado pela soma das curvaturas principais ( $\Sigma k_j$ ), que pode ter sinal negativo ou positivo. O sinal da  $\Sigma k_j$  será negativo quando  $\beta_s < \beta_F$  e positivo quando  $\beta_s > \beta_F$ . No entanto, quando  $\Sigma k_j \rightarrow 0$ ,  $\beta_p(\psi) \rightarrow \beta_{pv} \rightarrow \beta_{smc}$ , como preconiza a Equação (17), pois

$$\beta_{pv} = \frac{\beta_F + \beta_S}{2}, \quad (18)$$

e o valor de  $\beta_p$   $\beta_F$   $\beta_{smc}$  visto que  $\beta_F = \beta_S$ , e passa a não depender mais do valor de  $\psi$ .

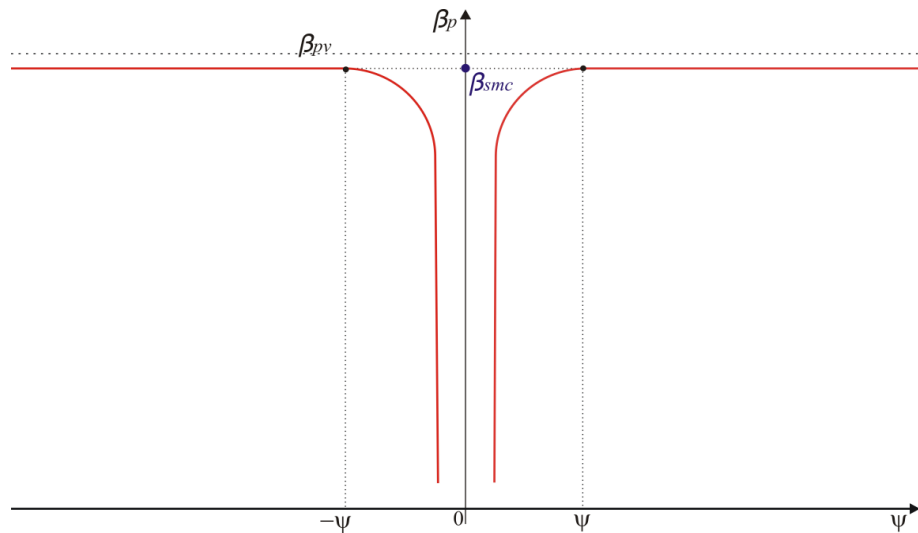


Figura 3: Gráfico da função hiperbólica  $\beta_p(\psi)$ , quando  $\Sigma k_j < 0$ .

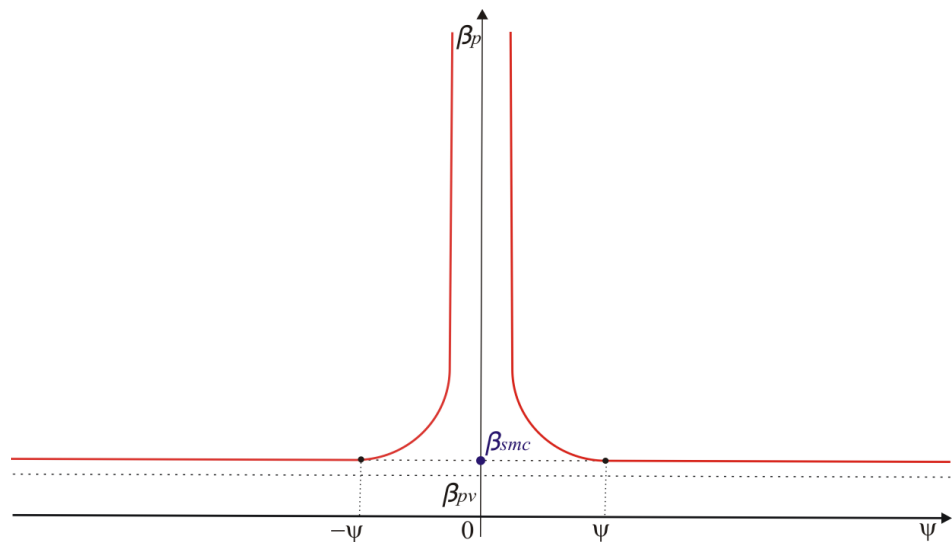


Figura 4: Gráfico da função hiperbólica  $\beta_p(\psi)$ , quando  $\Sigma k_j > 0$ .

Quando a  $\Sigma k_j$  não for muito pequena, que é o que ocorre com maior frequência, o valor de  $\beta_p$  é função do valor de  $\psi$  conforme mostrado na Equação (17) e ilustrado nas Figuras 3 e 4.

Analisando as Figuras 3 e 4, fica constatado que o domínio da função é  $\psi \neq 0$  e quando  $\psi \rightarrow \infty$  ou  $\psi \rightarrow -\infty$ ,  $\beta_p \rightarrow \beta_{pv} \rightarrow \beta_{smc}$ . Caso isso não ocorra  $\beta_{pv} > \beta_{smc}$  como mostrado na Figura 3 ou  $\beta_{pv} < \beta_{smc}$  conforme ilustrado na Figura 4.

## 2.2 Validade do procedimento de cálculo

O procedimento de cálculo para a obtenção do índice de confiabilidade parabólico, através da Equação (17), funcionará quando forem utilizados os valores de  $\psi$  em conformidade com os critérios estabelecidos no item 2.3, sendo  $\psi \neq 0$ , e os métodos FORM e SORM (no caso em tela SORM Breitung e SORM Tvedt) apresentarem convergência para os valores dos seus respectivos índices de confiabilidade,  $\beta_F$  e  $\beta_S$ .



## 2.3 Determinação do valor de $\psi$

A determinação dos valores de  $\psi$ , que está baseada no sinal da soma das curvaturas principais ( $\Sigma k_j$ ), deve obedecer ao seguinte critério:

a) Quando  $\Sigma k_j > 0$ : utilizar o valor inicial de  $\psi = 1$  ou  $-1$ , com incrementos iguais à  $1$  ou  $-1$ , respectivamente, até que seja obtido o valor de  $\beta_p$  maior ou igual ao maior valor entre o índice de confiabilidade ( $\beta_s$ ) calculado pelo método SORM Breitung e o índice de confiabilidade calculado pelo método SORM Tvedt, obtendo assim o intervalo de convergência, ilustrado na Figura 5, onde  $\beta_p \rightarrow \beta_{smc}$ ;

b) Quando  $\Sigma k_j < 0$ : utilizar o valor inicial de  $\psi = 1$  ou  $-1$ , com incrementos iguais à  $1$  ou  $-1$ , respectivamente, até que seja obtido o valor de  $\beta_p$  maior ou igual ao menor valor entre o índice de confiabilidade ( $\beta_s$ ) calculado pelo método SORM Breitung e o índice de confiabilidade calculado pelo método SORM Tvedt, obtendo assim o intervalo de convergência, ilustrado na Figura 5, onde  $\beta_p \rightarrow \beta_{smc}$ .

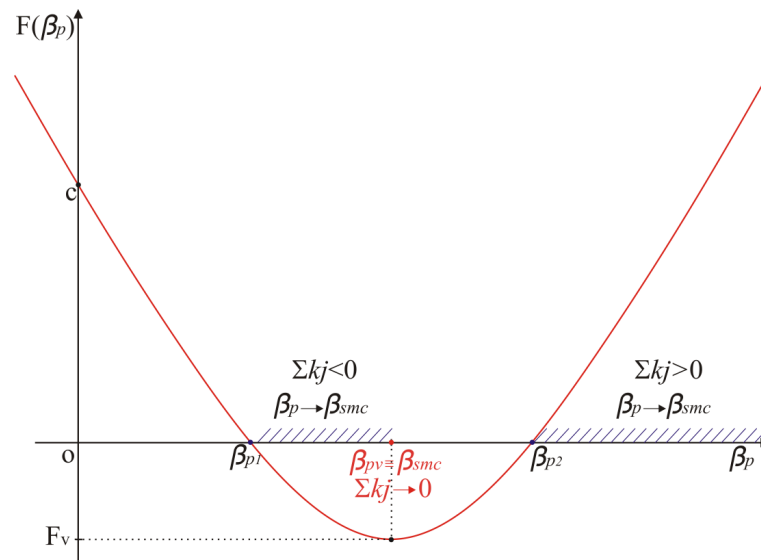


Figura 5: Gráfico ilustrando os intervalos de convergência de  $\beta_p$ , quando  $\Sigma k_j > 0$  e  $\Sigma k_j < 0$ .

## 3 | RESULTADOS

Todos os exemplos foram calculados no ambiente MATLAB (Lee, 2018).

### 3.1 Exemplo 1

Esse exemplo foi analisado por Wu e Wirsching (1987) e utilizado na análise da fadiga de componentes em alta temperatura e baixo número de ciclos de carregamento.

A função de falha é expressa por

$$G(\mathbf{U}) = \Delta \cdot 10^4 \left[ \frac{fpp}{R(Y\Delta\varepsilon)^{-1.71}} + \frac{1-fpp}{H(Y\Delta\varepsilon)^{-1.188}} \right], \quad (19)$$

onde,

$$\mathbf{U} = (\Delta, fpp, R, Y, H, \Delta\varepsilon). \quad (20)$$

As características das variáveis aleatórias (independentes) estão sumarizadas na Tabela 1 e os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 2, 3, 4 e 5.

| Variável            | Distribuição | Média (u.v.)* | Coefficiente de Variação (u.v.)* |
|---------------------|--------------|---------------|----------------------------------|
| $\Delta$            | Lognormal    | 1.0440        | 0.30                             |
| fpp                 | Normal       | 0.7000        | 0.10                             |
| R                   | Lognormal    | 0.2390        | 0.40                             |
| Y                   | Lognormal    | 1.0110        | 0.15                             |
| H                   | Lognormal    | 1.8020        | 0.40                             |
| $\Delta\varepsilon$ | Gumbel       | 0.0005        | 0.16                             |

Tabela 1: Características das variáveis aleatórias.

Nota: \*u.v. = Unidade da Variável.

| Variável | $\Delta$ | fpp     | R       | Y      | H      | $\Delta\varepsilon$ |
|----------|----------|---------|---------|--------|--------|---------------------|
| $V^*_i$  | -1.2680  | -0.6504 | -0.2796 | 0.8220 | 0.9957 | -1.3844             |

Tabela 2: Ponto de projeto ( $V^*_i$ ) obtido via método FORM (HL-RF).

Nota:  $V^*_i$  = Coordenadas do ponto de projeto no espaço reduzido.

| $j$   | 1       | 2      | 3       | 4      | 5      | $\sum k_j$ |
|-------|---------|--------|---------|--------|--------|------------|
| $k_j$ | -0.1593 | 0.1093 | -0.0478 | 0.0000 | 0.0474 | -0.0504    |

Tabela 3: Curvaturas principais da função de falha.

|           | FORM (HL-RF)          | SORM Breitung         | SORM Tvedt             | $\beta_p$              | SMC                    |
|-----------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| $i$       | 5                     | -                     | -                      | -                      | -                      |
| $\beta_F$ | 2.385                 | -                     | -                      | -                      | -                      |
| $P_f$     | $8.54 \times 10^{-3}$ | -                     | -                      | -                      | -                      |
| $P_{fs}$  | -                     | $9.70 \times 10^{-3}$ | $10.44 \times 10^{-3}$ | $10.12 \times 10^{-3}$ | $10.17 \times 10^{-3}$ |
| $\beta_S$ | -                     | 2.338                 | 2.310                  | 2.322                  | 2.320                  |
| $\psi$    | -                     | -                     | -                      | 1                      | -                      |
| NAF       | 35                    | 21                    | 21                     | -                      | $10^5$                 |

Tabela 4: Resultados obtidos na análise da confiabilidade.

Nota:  $i$ =número de iterações;  $P_f$ =probabilidade de falha de primeira ordem;  $P_{fs}$ =probabilidade de falha de segunda ordem;  $\beta_F$ =índice de confiabilidade de primeira ordem;  $\beta_S$ =índice de confiabilidade equivalente ou de segunda ordem obtido via métodos SORM Breitung e método

SORM Tvedt; NAF=número de avaliações da função de falha;

Nota<sub>2</sub>: Os valores de  $\beta_p$  e  $\beta_s$ (SORM) estão de acordo com Sagrilo (1994) e  $\beta_s$ (SMC) de acordo com Wu e Wirsching (1987).

| Módulo dos erros relativos (%) | FORM (HL-RF) | SORM Breitung | SORM Tvedt | $\beta_p$ |
|--------------------------------|--------------|---------------|------------|-----------|
| e                              | 2.80         | 0.78          | 0.43       | 0.09      |

Tabela 5: Módulo dos erros relativos referentes ao índice de confiabilidade da SMC.

### 3.2. Exemplo 2

O exemplo abaixo consiste em uma função de falha utilizada por Zhao e Ono (1999), num artigo sobre um procedimento geral para utilização dos métodos de confiabilidade (FORM/SORM), sendo

$$G(\mathbf{U}) = X_1 + 2X_2 + 2X_3 + X_4 - 5X_5 - 5X_6 \quad (21)$$

onde

$$\mathbf{U} = (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6). \quad (22)$$

As características das variáveis aleatórias (independentes) estão sumarizadas na Tabela 6 e os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 7, 8, 9 e 10.

| Variável | Distribuição | Média(u.v.)* | Desvio Padrão (u.v.) * |
|----------|--------------|--------------|------------------------|
| $X_1$    | Lognormal    | 120          | 12                     |
| $X_2$    | Lognormal    | 120          | 12                     |
| $X_3$    | Lognormal    | 120          | 12                     |
| $X_4$    | Lognormal    | 120          | 12                     |
| $X_5$    | Lognormal    | 50           | 15                     |
| $X_6$    | Lognormal    | 40           | 12                     |

Tabela 6: Características das variáveis aleatórias.

Nota: \*u.v. = Unidade da Variável.

| Variável | $X_1$   | $X_2$   | $X_3$   | $X_4$   | $X_5$  | $X_6$  |
|----------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
| $V^*_i$  | -0.1810 | -0.3557 | -0.3557 | -0.1810 | 1.8998 | 1.2594 |

Tabela 7: Ponto de projeto ( $V^*_i$ ) obtido via método FORM (HL-RF).

Nota:  $V^*_i$  = Coordenadas do ponto de projeto no espaço reduzido.

| $j$   | 1       | 2      | 3      | 4      | 5      | $\Sigma k_j$ |
|-------|---------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| $k_j$ | -0.2073 | 0.0018 | 0.0077 | 0.0104 | 0.0151 | -0.1723      |

Tabela 8: Curvaturas principais da função de falha.

|           | FORM<br>(HL-RF)       | SORM<br>Breitung      | SORM<br>Tvedt         | $\beta_p$             | SMC                   |
|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $i$       | 14                    | -                     | -                     | -                     | -                     |
| $\beta_F$ | 2.348                 |                       |                       |                       |                       |
| $P_f$     | $0.94 \times 10^{-2}$ | -                     | -                     | -                     | -                     |
| $P_{fs}$  | -                     | $1.25 \times 10^{-2}$ | $1.33 \times 10^{-2}$ | $1.25 \times 10^{-2}$ | $1.22 \times 10^{-2}$ |
| $\beta_S$ | -                     | 2.240                 | 2.216                 | 2.240                 | 2.250                 |
| $\psi$    | -                     | -                     | -                     | 2                     | -                     |
| NAF       | 98                    | 21                    | 21                    | -                     | $10^4$                |

Tabela 9: Resultados obtidos na análise da confiabilidade.

Nota<sub>1</sub>:  $i$ =número de iterações;  $P_f$ =probabilidade de falha de primeira ordem;  $P_{fs}$ =probabilidade de falha de segunda ordem;  $\beta_F$ =índice de confiabilidade de primeira ordem;  $\beta_S$ =índice de confiabilidade equivalente ou de segunda ordem obtido via métodos SORM Breitung e método

SORM Tvedt; NAF=número de avaliações da função de falha;

Nota<sub>2</sub>: Os valores de  $\beta_F=2.348$  e  $\beta_S(\text{SORM})=2.273$  de acordo com Zhao e Ono (1999), sendo o valor exato de  $\beta_S=2.254$ , segundo Der Kiureghian et al.(1987).

| Módulo dos erros<br>relativos (%) | FORM<br>(HL-RF) | SORM<br>Breitung | SORM<br>Tvedt | $\beta_p$ |
|-----------------------------------|-----------------|------------------|---------------|-----------|
| <b>e</b>                          | 4.36            | 0.44             | 1.51          | 0.44      |

Tabela 10: Módulo dos erros relativos referentes ao índice de confiabilidade da SMC.

### 3.3 Exemplo 3

Esse exemplo, obtido de Maes et al. (1993) consiste numa função de falha, cujo estado limite é representado por

$$G(\mathbf{U}) = 3.5 - X_1 + 0.5[\cosh(X_2) - 1], \quad (23)$$

onde

$$\mathbf{U} = (X_1, X_2). \quad (24)$$

As características das variáveis aleatórias (independentes) estão sumarizadas na Tabela 11 e os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 12, 13, 14 e 15.

| Variável | Distribuição  | Média(u.v.)* | Desvio Padrão(u.v.)* |
|----------|---------------|--------------|----------------------|
| $X_1$    | Normal Padrão | 0            | 1                    |
| $X_2$    | Normal Padrão | 0            | 1                    |

Tabela 11: Características das variáveis aleatórias.

Nota: \*u.v. = Unidade da Variável.

|                 |        |        |
|-----------------|--------|--------|
| <b>Variável</b> | $X_1$  | $X_2$  |
| $V_i^*$         | 3.5000 | 0.0000 |

Tabela 12: Ponto de projeto ( $V_i^*$ ) obtido via método FORM (HL-RF).

Nota:  $V_i^*$  = Coordenadas do ponto de projeto no espaço reduzido.

|       |        |              |
|-------|--------|--------------|
| $j$   | 1      | $\Sigma k_j$ |
| $k_j$ | 0.5000 | 0.5000       |

Tabela 13: Curvaturas principais da função de falha.

|           | FORM<br>(HL-RF)       | SORM Breitung         | SORM<br>Tvedt         | $\beta_p$             | SMC                   |
|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $i$       | 1                     | -                     | -                     | -                     | -                     |
| $\beta_F$ | 3.500                 | -                     | -                     | -                     | -                     |
| $P_f$     | $2.33 \times 10^{-4}$ | -                     | -                     | -                     | -                     |
| $P_{fs}$  | -                     | $1.40 \times 10^{-4}$ | $1.36 \times 10^{-4}$ | $1.29 \times 10^{-4}$ | $1.32 \times 10^{-4}$ |
| $\beta_S$ | -                     | 3.633                 | 3.641                 | 3.654                 | 3.649                 |
| $\psi$    | -                     | -                     | -                     | 3                     | -                     |
| NAF       | 3                     | 3                     | 3                     | -                     | $10^6$                |

Tabela 14: Resultados obtidos na análise de confiabilidade.

Nota<sub>1</sub>:  $i$ =número de iterações;  $P_f$ =probabilidade de falha de primeira ordem;  $P_{fs}$ =probabilidade de falha de segunda ordem;  $\beta_F$ =índice de confiabilidade de primeira ordem;  $\beta_S$ =índice de confiabilidade equivalente ou de segunda ordem obtido via métodos SORM Breitung e método

SORM Tvedt; NAF=número de avaliações da função de falha;

Nota<sub>2</sub>: Os valores de  $\beta_F$ ,  $\beta_S$ (SORM) e  $k_j$  estão de acordo com Maes et al. (1993).

| Módulo dos erros<br>relativos (%) | FORM<br>(HL-RF) | SORM<br>Breitung | SORM<br>Tvedt | $\beta_p$ |
|-----------------------------------|-----------------|------------------|---------------|-----------|
| <b>e</b>                          | 4.08            | 0.43             | 0.22          | 0.14      |

Tabela 15: Módulo dos erros relativos referentes ao índice de confiabilidade da SMC.

### 3.4 Exemplo 4

Nesse exemplo, obtido de Der Kiureghian e De Stefano (1990), é apresentada a superfície de falha de um hiperparabolóide, composta pelo seu índice de confiabilidade  $\beta$  e as suas curvaturas principais  $k_j$ , sendo o estado limite representado por

$$G(\mathbf{U}) = \beta + 0.5 \sum_{i=1}^9 k_i X_i^2 - X_{10}, \quad (25)$$

onde  $\beta=3$ ,  $k_1=0.30$ ,  $k_2=0.29$ ,  $k_3=0.28$ ,  $k_4=0.27$ ,  $k_5=0.26$ ,  $k_6=0.25$ ,  $k_7=0.24$ ,  $k_8=0.23$

e  $k_g=0.22$ , de acordo com Der Kiureghian e De Stefano (1990).

$$\mathbf{U} = (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}). \quad (26)$$

As características das variáveis aleatórias (independentes) estão sumarizadas na Tabela 16 e os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 17, 18, 19 e 20.

| Variável | Distribuição  | Média (u.v.) <sup>*</sup> | Desvio Padrão(u.v.) <sup>*</sup> |
|----------|---------------|---------------------------|----------------------------------|
| $X_1$    | Normal Padrão | 0                         | 1                                |
| $X_2$    | Normal Padrão | 0                         | 1                                |
| $X_3$    | Normal Padrão | 0                         | 1                                |
| $X_4$    | Normal Padrão | 0                         | 1                                |
| $X_5$    | Normal Padrão | 0                         | 1                                |
| $X_6$    | Normal Padrão | 0                         | 1                                |
| $X_7$    | Normal Padrão | 0                         | 1                                |
| $X_8$    | Normal Padrão | 0                         | 1                                |
| $X_9$    | Normal Padrão | 0                         | 1                                |
| $X_{10}$ | Normal Padrão | 0                         | 1                                |

Tabela 16: Características das variáveis aleatórias.

Nota: <sup>\*</sup>u.v. = Unidade da Variável.

| Variável | $V_i^*$ | $\alpha^*$ |
|----------|---------|------------|
| $X_1$    | 0.0000  | 0.0000     |
| $X_2$    | 0.0000  | 0.0000     |
| $X_3$    | 0.0000  | 0.0000     |
| $X_4$    | 0.0000  | 0.0000     |
| $X_5$    | 0.0000  | 0.0000     |
| $X_6$    | 0.0000  | 0.0000     |
| $X_7$    | 0.0000  | 0.0000     |
| $X_8$    | 0.0000  | 0.0000     |
| $X_9$    | 0.0000  | 0.0000     |
| $X_{10}$ | 3.0000  | -1.0000    |

Tabela 17: Resultados obtidos via método FORM (HL-RF).

| $j$                 | $K_j$ |
|---------------------|-------|
| 1                   | 0.30  |
| 2                   | 0.29  |
| 3                   | 0.28  |
| 4                   | 0.27  |
| 5                   | 0.26  |
| 6                   | 0.25  |
| 7                   | 0.24  |
| 8                   | 0.23  |
| 9                   | 0.22  |
| $\Sigma k_j = 2.34$ |       |

Tabela 18: Curvaturas principais da função de falha.

|           | FORM<br>(HL-RF)       | SORM Breitung         | SORM Tvedt            | $\beta_p$             | SMC                   |
|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $i$       | 1                     | -                     | -                     | -                     | -                     |
| $\beta_F$ | 3.000                 | -                     | -                     | -                     | -                     |
| $P_f$     | $1.35 \times 10^{-3}$ | -                     | -                     | -                     | -                     |
| $P_{fs}$  | -                     | $0.10 \times 10^{-3}$ | $0.09 \times 10^{-3}$ | $0.08 \times 10^{-3}$ | $0.08 \times 10^{-3}$ |
| $\beta_S$ | -                     | 3.716                 | 3.756                 | 3.768                 | 3.764                 |
| $\psi$    | -                     | -                     | -                     | 3                     | -                     |
| NAF       | 11                    | 55                    | 55                    | -                     | $10^5$                |

Tabela 19: Resultados obtidos na análise de confiabilidade.

Nota<sub>1</sub>:  $i$ =número de iterações;  $P_f$  =probabilidade de falha de primeira ordem;  $P_{fs}$  =probabilidade de falha de segunda ordem;  $\beta_F$  =índice de confiabilidade de primeira ordem;  $\beta_S$ =índice de confiabilidade equivalente ou de segunda ordem obtido via métodos SORM Breitung e método

SORM Tvedt; NAF=número de avaliações da função de falha;

Nota<sub>2</sub>: Os valores de  $\beta_F$ ,  $\beta_S$ (SORM) e  $k_j$  estão de acordo com Der Kiureghian e De Stefano (1990).

| Módulo dos erros relativos (%) | FORM<br>(HL-RF) | SORM<br>Breitung | SORM<br>Tvedt | $\beta_p$ |
|--------------------------------|-----------------|------------------|---------------|-----------|
| e                              | 20.30           | 1.28             | 0.21          | 0.11      |

Tabela 20: Módulo dos erros relativos referentes ao índice de confiabilidade da SMC.

## 4 | CONCLUSÕES

A Tabela 21 representa a síntese dos melhores resultados obtidos, para o índice de confiabilidade de segunda ordem ( $\beta_S$ ) calculado através do método SORM Breitung

ou SORM Tvedt e, também, os resultados fornecidos pelo índice de confiabilidade parabólico ( $\beta_p$ ).

| EXEMPLO | SORM*     |       | $\beta_p$ ** |       | SMC   | Maior Eficácia |
|---------|-----------|-------|--------------|-------|-------|----------------|
|         | $\beta_s$ | e (%) | $\beta_p$    | e (%) |       |                |
| 1       | 2.310     | 0.43  | 2.322        | 0.09  | 2.320 | **             |
| 2       | 2.240     | 0.44  | 2.240        | 0.44  | 2.250 | Ambos          |
| 3       | 3.641     | 0.22  | 3.654        | 0.14  | 3.649 | **             |
| 4       | 3.756     | 0.21  | 3.768        | 0.11  | 3.764 | **             |

Tabela 21: Comparação dos melhores resultados (< e) obtidos na análise de confiabilidade estrutural via método SORM Breitung ou SORM Tvedt com os resultados fornecidos pelo  $\beta_p$ , quanto à eficácia.

Nota: e = Módulo dos erros relativos referentes ao índice de confiabilidade fornecido via SMC.

Analisando os dados apresentados na Tabela 21, verifica-se que foi realizada a análise de confiabilidade estrutural de quatro funções de falha e, quanto ao quesito maior eficácia, em relação à Simulação Monte Carlo, ocorreu um resultado igual (Exemplo 2) entre os dois processos de cálculo e três resultados (Exemplos 1, 3 e 4), cujos índices de confiabilidade parabólicos melhoraram os resultados fornecidos pelo método SORM.

## 5 | AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PROPEC) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), à FAPES, à FAPEMIG e ao CNPq pela colaboração no desenvolvimento desse trabalho.

## REFERÊNCIAS

BREITUNG, K. Asymptotic approximations for multinormal integrals. **Journal of Engineering Mechanics (ASME)**, v. 110, n. 3, p. 357, 1984.

CIZELJ, L.; MAVKO B.; RIESCH-OPPERMANN, H. Application of first and second order reliability methods in the safety assessment of cracked steam generator tubing. **Nuclear Engineering and Design**, v.147, p. 1-10, 1994.

DER KIUREGHIAN, A.; De Stefano, M. **An efficient algorithm for second-order reliability analysis**. Berkeley: Department of Civil Engineering/ University of California. Report n° UCB/SEMM - 90/20, 1990.

DER KIUREGHIAN, A.; LIN, H. Z.; HWANG, S. J. Second-order reliability approximations. **Journal of Engineering Mechanics, ASCE**, 1987; 113 (8): 1208 – 25.



FERREIRA, E. G., **Análise de confiabilidade estrutural via método SORM DG**, 2015. 212 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – UFOP, Ouro Preto – MG, 2015.

LEE, H. H. Programming and engineering computing with MATLAB 2018. USA: SDC Publications, 2018.

LEE, S.Y.; CASTANIER, M. P.; PIERRE, C. Assessment of Probabilistic Methods for Mistuned Bladed Disk Vibration. **46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference**, 18-21 April, Austin, Texas, 2005.

MADSEN, H.O.; KRENK, S.; LIND, N.C. **Methods of Structural Safety**, New Jersey: Prentice Hall, Englewoods Cliffs, 2006.

MAES, M.A.; BREITUNG, K.; DUPPUIS, D.J. Asymptotic importance sampling. **Structural Safety**, Amsterdam, v. 12, p.167-186, 1993.

ROJAS, K.E. **Méthodologie d'Analyse de Fiabilité Basée sur des Techniques Heuristiques d'Optimisation et Madèles sans Maillage: Applications aux Systèmes Mécaniques**. Tese de Doutorado, INSA de Rouen, 2008.

SAGRILO, L.V.S. **Análise da confiabilidade estrutural utilizando os métodos analíticos FORM e SORM**, 1994. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1994.

TVEDT, L. Distribution of quadratic forms in normal space - application to structural reliability. **Journal of Engineering Mechanics (ASME)**, Amsterdam, v. 116, n. 6, p. 1183-1197, 1990.

WU, Y.T.; WIRSCHING, P.H. New algorithm for structural for reliability estimation. **Journal of Engineering Mechanics (ASME)**, Amsterdam, v. 113, n. 9, p. 1319-1336, 1987.

ZHAO, Y.; ONO, T. A general procedure for first/second-order reliability method (FORM/SORM). **Structural Safety**, Amsterdam, v. 21, p.95-112, 1999.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Adsorção 38, 39, 202, 203, 204, 205, 206, 208, 209, 210

Agregado artificial 1, 11, 13

### B

Biomassa 47, 49, 52, 54

Bloco estrutural 13, 20

### C

Cimento Portland 3, 113, 120

Concreto reciclado 1, 13, 15

Controle estrutural 77, 80, 84, 85

Corrosão 202, 203

### D

Desperdícios 127, 135, 140, 142

Dinâmica estrutural 190, 191, 200

Drenabilidade 55, 56, 57, 58, 60, 61, 64, 65, 66, 67, 68

Drenagem urbana 218, 219, 231

### E

Energia 14, 27, 38, 43, 47, 52, 53, 54, 96, 97, 98, 103, 115, 126, 127, 133, 232

Ensino 139, 190, 232

### F

Farinha de mandioca 47, 49, 50, 52, 54

### I

Índice de confiabilidade 153, 154, 155, 156, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 165, 166

Inovação 76, 122, 124, 125, 126, 127, 232

Irrigação 99, 100, 108

### M

Madeira 25, 26, 27, 28, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 51, 52

### N

Nanossílica 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121

### P

Pozolana 109, 110

Propriedade mecânica 25, 27

Propriedades físicas 25, 26, 27, 28, 71, 111

## **R**

Resíduos 1, 2, 4, 10, 12, 13, 14, 15, 19, 22, 23, 47, 49, 52, 53, 54, 69, 70, 71, 72, 74, 76, 110, 208, 229

Resíduos de pneu 13, 15

## **S**

Sílica de casca de arroz 109, 110, 111, 112, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120

Solução analítica 144, 151

Sustentabilidade 1, 14, 24, 35, 74, 127, 138, 142, 232

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-701-7



9 788572 477017