

# Estudos Transdisciplinares nas Engenharias

João Dallamuta  
(Organizador)

**Atena**  
Editora  
Ano 2019

**João Dallamuta**

(Organizador)

# Estudos Transdisciplinares nas Engenharias

Atena Editora  
2019

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

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**

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
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. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
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  
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. 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. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> 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. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof.<sup>a</sup> Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista  
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Prof.<sup>a</sup> Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal  
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará

| <b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)<br/>(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b> |  |
|---|--|
| E82   | Estudos transdisciplinares nas engenharias [recurso eletrônico] / Organizador João Dallamuta. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019. – (Estudos Transdisciplinares nas Engenharias; v. 1)<br><br>Formato: PDF<br>Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader<br>Modo de acesso: World Wide Web<br>Inclui bibliografia<br>ISBN 978-85-7247-355-2<br>DOI 10.22533/at.ed.552193005<br><br>1. Engenharia – Pesquisa – Brasil. 2. Transdisciplinaridade.<br>I. Dallamuta, João. II. Série.<br><br>CDD 620 |
| <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

Caro(a) leitor(a)

Nesta obra temos um compendio de pesquisas realizadas por alunos e professores atuantes em ciências exatas, engenharia e tecnologia. São apresentados trabalhos teóricos e vários resultados práticos de diferentes formas de aplicação e abordagens de simulação, projetos e caracterização no âmbito da engenharia e aplicação de tecnologia.

Tecnologia e pesquisa de base são os pilares do desenvolvimento tecnológico e da inovação. Uma visão ampla destes temas é portanda fundamental. É esta amplitude de áreas e temas que procuramos reunir neste livro.

De abordagem objetiva, a obra se mostra de grande relevância para graduandos, alunos de pós-graduação, docentes e profissionais, apresentando temáticas e metodologias diversificadas, em situações reais.

Optamos pela divisão da obra em dois volumes, como forma de organização e praticidade a você leitor. Aos autores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura

João Dallamuta

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1</b> .....   | <b>1</b>  |
| ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO E QUALIDADE DO BIOGÁS   |           |
| Carla Caroline Carvalho Poças   |           |
| Arlison Darlison Lima Leal  |           |
| Aroldo José Teixeira de Souza Filho   |           |
| João Areis Ferreira Barbosa Junior  |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.5521930051</b>  |           |
| <b>CAPÍTULO 2</b> .....   | <b>6</b>  |
| ANÁLISE DO COMPORTAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DE ROCHAS CARBONÁTICAS QUANDO SUBMETIDAS A INJEÇÃO DE CO <sub>2</sub> SUPERCRÍTICO  |           |
| Deodório Barbosa de Souza   |           |
| Katia Botelho Torres Galindo  |           |
| Analice França Lima Amorim  |           |
| Cecília Maria Mota Silva Lins   |           |
| Leonardo José do Nascimento Guimarães   |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.5521930052</b>  |           |
| <b>CAPÍTULO 3</b> .....   | <b>17</b> |
| ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DO POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE PROVENIENTE DO PROCESSO DE RECICLAGEM MECÂNICA E DO POLIESTIRENO PROVENIENTE DA DEGASAGEM DO POLIESTIRENO EXPANDIDO |           |
| Fabiula Danielli Bastos de Sousa  |           |
| Thiago Czermainski Gonçalves Alves  |           |
| Matheus Alves Rodrigues   |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.5521930053</b>  |           |
| <b>CAPÍTULO 4</b> .....   | <b>31</b> |
| ASSOCIAÇÃO DA FILTRAÇÃO DIRETA E USO DE COAGULANTES NATURAIS E QUÍMICOS NO TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO  |           |
| Edilaine Regina Pereira   |           |
| Dandley Vizibelli   |           |
| Thaís Ribeiro   |           |
| Fellipe Jhordã Ladeia Janz  |           |
| José Euclides Stipp Paterniani  |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.5521930054</b>  |           |
| <b>CAPÍTULO 5</b> .....   | <b>38</b> |
| AUTOMATIZAÇÃO DE BRAÇO ROBÓTICO PARA COLETA EM CORPOS HÍDRICOS COM CONTAMINANTES NOCIVOS A SAÚDE HUMANA   |           |
| Louise Aimeé Reis Guimarães   |           |
| Jussiléa Gurjão de Figueiredo   |           |
| Ylan Dahan Benoliel Silva   |           |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.5521930055</b>  |           |

**CAPÍTULO 6 ..... 47**

AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DE PÓRTICOS PLANOS DE AÇO PROJETADOS COM ANÁLISE AVANÇADA

Danilo Luiz Santana Mapa  
Marcílio Sousa da Rocha Freitas  
Ricardo Azoubel da Mota Silveira

**DOI 10.22533/at.ed.5521930056**

**CAPÍTULO 7 ..... 62**

AVALIAÇÃO DA VAZÃO DE ASPERSORES SUBMETIDOS A DIFERENTES PRESSÕES

Anderson Crestani Pereira  
Adroaldo Dias Robaina  
Marcia Xavier Peiter  
Bruna Dalcin Pimenta  
Jardel Henrique Kirchner  
Wellington Mezzomo  
Marcos Vinicius Loregian  
Jhosefe Bruning  
Luis Humberto Bahú Ben

**DOI 10.22533/at.ed.5521930057**

**CAPÍTULO 8 ..... 70**

AVALIAÇÃO DO BINÔMIO TEMPO-TEMPERATURA DE REFEIÇÕES SERVIDAS EM RESTAURANTES *SELF-SERVICE* DE PICOS-PI

Nara Vanessa dos Anjos Barros  
Mateus da Conceição Araújo  
Adolfo Pinheiro de Oliveira  
Iraildo Francisco Soares  
Ennya Cristina Pereira dos Santos Duarte  
Rodrigo Barbosa Monteiro Cavalcante

**DOI 10.22533/at.ed.5521930058**

**CAPÍTULO 9 ..... 77**

AVALIAÇÃO DO EFEITO DE ANTIOXIDANTES NATURAIS NA ESTABILIDADE OXIDATIVA DO BIODIESEL

Ingrid Rocha Teixeira  
Jander Teixeira Peneluc  
Matheus Andrade Almeida  
Selmo Queiroz Almeida

**DOI 10.22533/at.ed.5521930059**

**CAPÍTULO 10 ..... 86**

AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE SEVERIDADE DE SECA DE PALMER (PDSI) PARA O MUNICÍPIO DE CRUZ ALTA/RS

Suélen Cristiane Riemer da Silveira  
Claudia Fernanda Almeida Teixeira-Gandra  
Rita de Cássia Fraga Damé  
Marcia Aparecida Simonete  
Emanuele Baifus Manke  
Maria Clotilde Carré Chagas Neta  
Henrique Michaelis Bergmann

**DOI 10.22533/at.ed.55219300510**

**CAPÍTULO 11 ..... 93**

**AVALIAÇÃO DO SUCO MISTO DE ACEROLA COM MANJERICÃO**

Michele Alves de Lima  
Elynne Kryslen do Carmo Barros  
Clélia de Moura Fé Campos  
Marilene Magalhães de Brito  
Maria Márcia Dantas de Sousa  
Karine Aleixes Barbosa de Oliveira  
Thamires Mendonça de Carvalho  
Robson Alves da Silva

**DOI 10.22533/at.ed.55219300511**

**CAPÍTULO 12 ..... 102**

**COLORIMETRIA APLICADA A ESPÉCIES FLORESTAIS EM MATO GROSSO**

Edilene Silva Ribeiro  
Joaquim Carlos Gonzalez  
William Cardoso Lima  
Luzia Elaine Domingues Pimenta Vargas  
Roberta Santos Souza

**DOI 10.22533/at.ed.55219300512**

**CAPÍTULO 13 ..... 114**

**COMPORTAMENTO DA ALFACE COM DISTINTAS DOSAGENS DE ESTERCO CAPRINO EM DIFERENTES REGIÕES**

Thaís Rayane Gomes da Silva  
Marcelo Rodrigues Barbosa Júnior  
Cinara Bernardo da Silva  
Luan Wamberg dos Santos  
Márcio Aurélio Lins dos Santos

**DOI 10.22533/at.ed.55219300513**

**CAPÍTULO 14 ..... 122**

**COMPORTAMENTO DA ALTURA DO CACAUEIRO SOB DIFERENTES QUANTIDADES DE ÁGUA E NITROGÊNIO**

Roger Luiz Da Silva Almeida  
Roger Luiz Da Silva Almeida Filho  
Gustavo Victor De Melo Araújo Almeida

**DOI 10.22533/at.ed.55219300514**

**CAPÍTULO 15 ..... 127**

**CORRELAÇÕES ENTRE AS TEORIAS DE EULER-BERNOULLI E DE SHI-VOYIADJIS PARA VIGAS: UMA ABORDAGEM TEÓRICA E NUMÉRICA**

Hilton Marques Souza Santana  
Fabio Carlos da Rocha

**DOI 10.22533/at.ed.55219300515**



|  |            |
|--|------------|
| <b>CAPÍTULO 16</b> .....   | <b>144</b> |
| EFICIÊNCIA DOS PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS NA REDUÇÃO DA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO (DQO)  |            |
| Júlia Buffon<br>Laura Cerezolli De Carli<br>Gabriela Madella Kranz<br>Maria Luiza Danielli Zanandréa<br>Murilo Cesar Costelli            |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.55219300516</b>  |            |
| <b>CAPÍTULO 17</b> .....   | <b>151</b> |
| ESTUDO DA REAÇÃO DE ELETRO-OXIDAÇÃO DE GLICEROL EM MEIO ALCALINO   |            |
| Micaeli Caldas Gloria<br>Elson Almeida de Souza<br>Paulo José de Sousa Maia  |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.55219300517</b>  |            |
| <b>CAPÍTULO 18</b> .....   | <b>167</b> |
| ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICO ECONÔMICA DO BIOGÁS DA SUINOCULTURA PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA                                    |            |
| Arilson Darlison Lima Leal<br>Carla Caroline Carvalho Poças<br>Aroldo José Teixeira de Souza Filho<br>João Areis Ferreira Barbosa Junior |            |
| <b>DOI 10.22533/at.ed.55219300518</b>  |            |
| <b>SOBRE O ORGANIZADOR</b> .....   | <b>172</b> |

## AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DE PÓRTICOS PLANOS DE AÇO PROJETADOS COM ANÁLISE AVANÇADA

### **Danilo Luiz Santana Mapa**

Universidade Federal de Ouro Preto  
Ouro Preto – Minas Gerais

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

Universidade Federal de Ouro Preto  
Ouro Preto – Minas Gerais

### **Ricardo Azoubel da Mota Silveira**

Universidade Federal de Ouro Preto  
Ouro Preto – Minas Gerais

**RESUMO:** A análise avançada de pórticos de aço resulta em estruturas mais seguras e econômicas, pois considera o comportamento não linear das estruturas e a capacidade de carga última do sistema estrutural. A aplicação de métodos de análise de confiabilidade possibilita avaliar o nível de segurança de estruturas projetadas com análise avançada em termos probabilísticos, através da avaliação direta da confiabilidade do sistema estrutural. No presente trabalho foi empregado o método analítico FORM (First Order Reliability Method) na avaliação da segurança de pórticos planos de aço considerando a aleatoriedade das variáveis de projeto mais significativas, que são as propriedades do material, os carregamentos externos aplicados e as propriedades geométricas das seções transversais dos perfis de aço. As análises avançadas foram realizadas

via método dos elementos finitos e consideraram a não linearidade geométrica, a não linearidade física do aço e imperfeições geométricas iniciais dos pórticos. Os resultados obtidos para os pórticos planos de aço analisados indicaram que a segurança estrutural é significativamente afetada quando se incorpora na análise de confiabilidade os efeitos não lineares através da análise avançada do sistema estrutural.

**PALAVRAS-CHAVE:** pórticos de aço; análise avançada; confiabilidade do sistema; segurança estrutural; efeitos não lineares.

**ABSTRACT:** Advanced analysis of steel frames results in safer and more economical structures due to the non-linear behavior of the structures and the ultimate load capacity of the structural system are taken into account. Reliability methods allow the evaluation of the safety level of structures designed by advanced analysis in probabilistic terms, by the direct evaluation of the reliability of the structural system. In the present work, the First Order Reliability Method (FORM) was used to evaluate the safety of steel frames taking into account the uncertainties of the most significant design variables, which are the properties of the material, the applied external loads and the geometric properties of the cross sections of the steel profiles. The advanced analyses were performed using the finite element method and considered the geometric

nonlinearities, the inelasticity of the steel and also the initial geometric imperfections of the portal frames. The results obtained for the analyzed steel frames indicated that structural safety is significantly affected when the nonlinear effects are incorporated in the reliability analysis by the advanced analysis of the structural system.

**KEYWORDS:** steel frames; advanced analysis; system reliability; structural safety; nonlinear effects.

## 1 | INTRODUÇÃO

As estruturas de aço são amplamente utilizadas na construção civil por apresentarem alta resistência, boa ductilidade e rápida fabricação e montagem. Atualmente as normas estruturais recomendam procedimentos comuns para o projeto de pórticos de aço que são: realizar a análise estrutural para obtenção dos esforços solicitantes nos elementos da estrutura para todas as combinações de ações; e verificar a segurança estrutural de cada elemento do pórtico para os estados limites especificados nas normas, através do Método dos Estados Limites. No entanto essa abordagem possui inconvenientes, pois as normas permitem a realização de análise elástica dos pórticos de aço sem a consideração direta dos efeitos devidos as não linearidades física e geométrica.

O conceito de análise avançada surgiu com o propósito de superar o inconveniente acima mencionado, através do emprego da análise inelástica (não linearidade física) de segunda ordem (não linearidade geométrica) dos pórticos de aço de forma a considerar todos os efeitos significativos do comportamento estrutural não linear. O projeto por análise avançada utiliza análises estruturais não lineares para prever o desempenho do sistema estrutural.

Recentes avanços na análise estrutural não linear tornaram possível projetar uma estrutura de aço como um sistema, em vez de um conjunto de elementos estruturais independentes. Uma análise inelástica rigorosa pode determinar com precisão as interações complexas entre elementos de um sistema estrutural, e pode capturar o efeito benéfico da redistribuição de esforços que ocorre após a formação de rótulas plásticas, o que leva ao projeto de estruturas mais leves e econômicas.

No entanto, o progresso relatado na área de análise estrutural não foi acompanhado por um progresso na verificação da segurança estrutural, pois o Método dos Estados Limites continua sendo amplamente empregado, embora suas limitações sejam conhecidas (Ellingwood *et al.*, 1982). A formação da primeira rotula plástica em um elemento individual da estrutura, verificada nos estados limites últimos, não conduz necessariamente à falha de todo o sistema estrutural, devido à redundância da estrutura ou à redistribuição de esforços. Há uma diferença evidente entre o nível de confiabilidade do sistema estrutural e os níveis de confiabilidade dos elementos estruturais, porque a capacidade estrutural relaciona-se não apenas com as

capacidades dos elementos individuais, mas também com a ductilidade e redundância estrutural (Hendawi & Frangopol, 1994).

O Método dos Estados Limites utiliza coeficientes parciais de segurança aplicados sobre as ações atuantes e sobre as resistências nominais, entretanto, o uso desses coeficientes não permite o conhecimento do nível de segurança do sistema estrutural em serviço. Embora este método esteja consolidado e seja bem aceito por projetistas na verificação da segurança estrutural, é apropriado avaliar a segurança de estruturas usando métodos de confiabilidade mais avançados.

Segundo Madsen *et al.* (2006), os métodos de confiabilidade estrutural são divididos em níveis. O método dos estados limites que emprega coeficientes parciais de segurança para cada variável incerta de projeto é classificado como método de nível I. Se for utilizada a função densidade de probabilidade das variáveis incertas para a determinação da probabilidade de falha da estrutura são chamados de métodos de nível III. No presente trabalho foi utilizado método de confiabilidade de nível III na avaliação dos níveis de segurança das estruturas, utilizando-se análise estrutural avançada. O método de nível III empregado no presente trabalho permite conhecer o real nível de segurança de estruturas, usualmente projetadas por métodos de nível I.

Embora a norma brasileira NBR 8800 (ABNT, 2008) disponibilize diretrizes para o projeto de estruturas por meio de análise avançada, em nenhuma pesquisa anterior incorporou-se nessa análise a aleatoriedade das variáveis de projeto e avaliou-se o nível de segurança de pórticos de aço projetados por análise avançada.

O objetivo geral é apresentar e discutir os resultados das análises de confiabilidade estrutural de exemplos de estruturas planas de aço via análise estrutural avançada, considerando o comportamento não linear geométrico e a não linearidade física do aço. Foi utilizada nas análises de confiabilidade a ferramenta computacional desenvolvida por Mapa (2016), que emprega o método analítico FORM (*First Order Reliability Method*) para avaliar a probabilidade de falha da função de desempenho formulada para estado limite último relacionado ao colapso plástico.

## 2 | CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

Na análise de confiabilidade estrutural, a máxima solicitação,  $S$ , e a resistência disponível,  $R$ , são modeladas por variáveis aleatórias. O objetivo da análise de confiabilidade é assegurar o evento ( $R > S$ ) durante toda vida útil da estrutura em termos de probabilidade.

A falha ocorre se  $R$  for menor do que  $S$  e esse evento pode ser representado em termos de probabilidade como  $P(R < S)$ . Para as variáveis aleatórias  $R$  e  $S$  com distribuições de probabilidade conhecidas, contínuas e estatisticamente independentes, a probabilidade de falha  $P_f$  pode ser calculada através da seguinte expressão (Ang & Tang, 1984):

$$P_f = P(R < S) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{S>R} f_R(r) \cdot f_S(s) \cdot dr \cdot ds = \int_0^{\infty} F_R(s) f_S(s) ds \quad (1)$$

O cálculo da probabilidade de falha utilizando a Eq. (1) requer que as funções densidade de probabilidade  $f_R(r)$  e  $f_S(s)$  sejam conhecidas. Na prática, essa informação nem sempre está disponível ou é difícil de ser obtida. Mesmo quando as funções de probabilidade são conhecidas, a avaliação numérica da Eq. (1) pode ser impraticável.

Se ambas as variáveis aleatórias  $R$  e  $S$  possuem distribuição normal e são estatisticamente independentes, então a variável aleatória  $Z$  pode ser introduzida como  $Z = R - S$ . Então a Eq. (1) pode ser utilizada para definir a probabilidade de falha como:

$$P_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 f_Z(z) \cdot dz = \Phi\left(\frac{0 - \mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi(-\beta_c) \quad (2)$$

Sendo  $\mu_Z = \mu_R - \mu_S$ ,  $\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$ ,  $\Phi$  é a função distribuição cumulativa da distribuição normal padrão e  $\beta_c$  é o índice de confiabilidade de Cornell (1969), definido a seguir:

$$\beta_c = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (3)$$

O índice de confiabilidade  $\beta_c$  foi introduzido na tentativa de se evitar as dificuldades conceituais e práticas decorrentes do uso da Eq. (1). Em sua implementação inicial, o índice de confiabilidade foi avaliado simplesmente em função das médias e dos desvios-padrão da resistência e da solicitação máxima, como indicado na Eq. (3). Posteriormente, o índice de confiabilidade passou a ser obtido por métodos analíticos baseados em aproximações em séries de Taylor de primeira ordem (método analítico FORM).

## 2.1 Método analítico FORM

No método FORM (*First-Order Reliability Method*), as variáveis aleatórias  $U$ , cujas distribuições são quaisquer e podem ser dependentes entre si ou não, são transformadas em variáveis  $V$  normais padrão estatisticamente independentes, sendo a função de falha  $G(U)$  escrita no espaço das variáveis reduzidas (espaço  $V$ ) como  $g(V)$ . Depois disto, a superfície de falha definida por  $g(V) = 0$  é aproximada por uma superfície linear (ou hiperplano) no ponto com a menor distância até a origem, identificado como  $V^*$  (ponto de projeto no espaço das variáveis reduzidas).

Uma das etapas desse método é a transformação das variáveis  $U$  com distribuições quaisquer em variáveis  $V$  normais padrão estatisticamente independentes. Utiliza-se comumente a transformação de Nataf (Melchers, 1999) definida por:

$$V = \Gamma \sigma^{-1} (U - m) \quad (4)$$

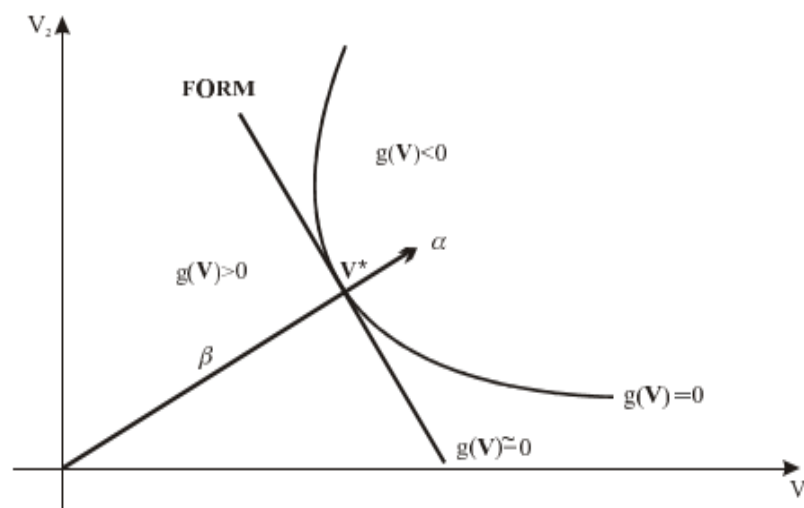
Sendo  $m$  o vetor com as médias das variáveis  $U$ ,  $\sigma$  a matriz diagonal contendo os desvios padrão das variáveis  $U$  e  $\Gamma = L^{-1}$ , sendo  $L$  a matriz triangular inferior obtida da decomposição de Choleski da matriz dos coeficientes de correlação de  $U$ . Outra etapa importante desse método é a busca ao ponto sobre a superfície de falha mais próximo à origem do sistema reduzido, também denominado ponto de projeto  $V^*$ . Para encontrar o ponto de projeto, formula-se um problema de otimização  $P$  com uma restrição, tal que:

$$\begin{aligned} P: & \text{minimizar } |V| \\ & \text{Sujeito a } g(V) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Utiliza-se comumente o algoritmo denominado HLRF, desenvolvido por Hasofer & Lind (1974) e aprimorado por Rackwitz & Fiessler (1978), para resolução do problema de otimização apresentado pela Eq. (5). O processo iterativo gerado pelo algoritmo HLRF caminha em busca do ponto resolvendo-se a seguinte equação:

$$V^{i+1} = \frac{1}{|\nabla g(V^i)|^2} \cdot [\nabla g(V^i)^T V^i - g(V^i)] \cdot \nabla g(V^i) \quad (6)$$

Durante o processo iterativo determina-se o índice de confiabilidade  $\beta$  calculando-se a norma do vetor  $V^{i+1}$  e interrompe-se o processo quando a variação relativa do valor de  $\beta$  é inferior a uma tolerância estabelecida. De posse do índice de confiabilidade  $\beta$ , a probabilidade de falha pode ser obtida utilizando-se a Eq. (2). A Figura 1 fornece uma representação gráfica do método analítico FORM, indicando a aproximação linear da função de falha em  $V^*$  e o índice de confiabilidade  $\beta$ .



### 3 | ANÁLISE ESTRUTURAL AVANÇADA

O emprego crescente de elementos estruturais leves e esbeltos e solicitações próximas à resistência limite do material tornam necessária a utilização de ferramentas avançadas de análise de estruturas. A análise avançada de estruturas é caracterizada quando efeitos não lineares são considerados na formulação do elemento estrutural. Dentre as fontes de não linearidade cita-se a não linearidade geométrica e a não linearidade física do material.

O comportamento não linear pode ser produzido por mudanças na geometria do pórtico durante o carregamento (Figura 2), o que é comumente referido na literatura como não linearidade geométrica ou efeitos de segunda ordem. Os principais efeitos geométricos relacionados à não linearidade geométrica são o efeito global  $P-\Delta$  como resultado dos deslocamentos laterais na estrutura, e o efeito local  $P-\delta$  nos elementos, associado com deformações locais relativas à corda entre os extremos do elemento.

Uma análise de segunda ordem rigorosa deve combinar os efeitos da teoria de grandes deslocamentos (equilíbrio analisado no estado deformado da estrutura) e o efeito da carga axial na rigidez dos elementos (cargas axiais incrementam as deformações laterais locais dos elementos). De forma a viabilizar essa análise de segunda ordem é necessário empregar formulações numéricas adequadas para sua consideração na aplicação do método dos elementos finitos (Silva, 2009).

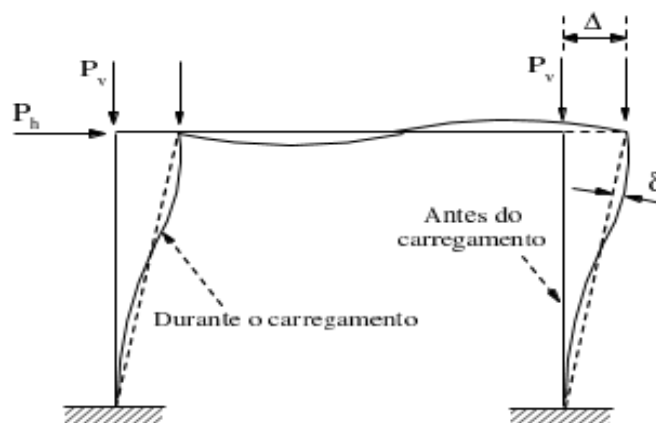


Figura 2. Representação gráfica dos efeitos  $P-\Delta$  e  $P-\delta$

Fonte: (Silva, 2009)

Outra fonte de não linearidade que deve ser considerada em uma análise estrutural avançada diz respeito a inelasticidade (não linearidade física) do material. Sabe-se que além do comportamento elástico, o aço também se comporta de forma inelástica. A inelasticidade do aço é o processo de escoamento das fibras causando alterações na distribuição de tensões na seção transversal do elemento à medida

que os esforços internos atuantes nele aumentam. Essa característica favorece a redistribuição de esforços após a formação de rótulas plásticas. Por simplificação, o aço é idealizado como um material elástico-perfeitamente plástico e a Figura 3 apresenta o comportamento tensão deformação para esse caso.

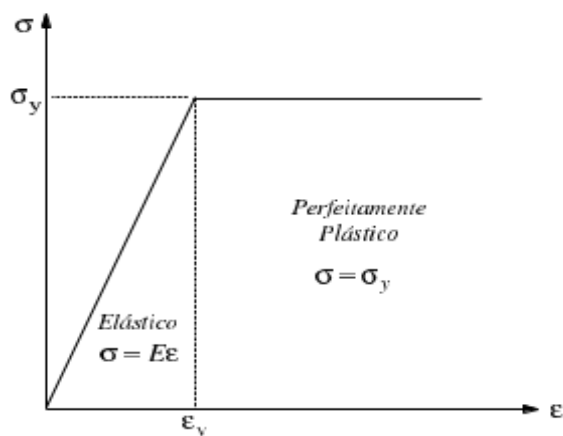


Figura 3. Diagrama tensão-deformação idealizado do aço

Fonte: (Silva, 2009)

A Figura 4a representa um pórtico plano no regime elástico. Com o acréscimo de carga, inicia-se a sequência de formação de rótulas plásticas, indicada na Figura 4b pela numeração de 1 a 4. Ao se atingir a carga limite última ocorre o desenvolvimento da quarta rótula plástica e acontece o mecanismo de colapso plástico do pórtico, no qual a estrutura passa a se deformar indefinidamente sem nenhum incremento de carga.

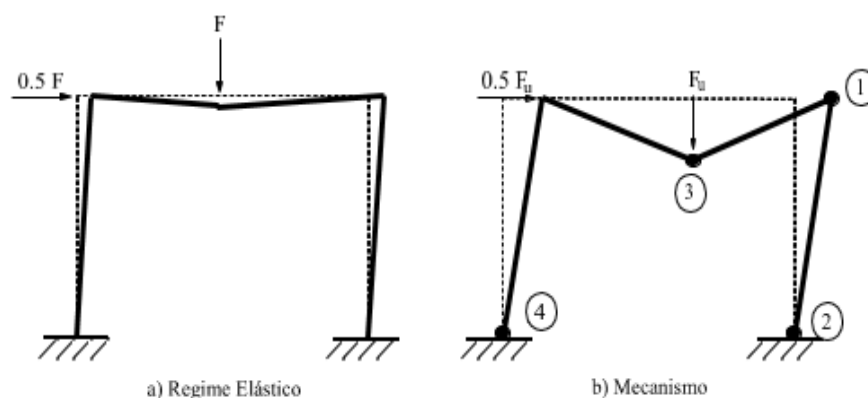


Figura 4. Mecanismo em um pórtico plano

Fonte: (Gonçalves, 2013)

A Figura 5 apresenta as respostas obtidas por diferentes métodos de análise estrutural de um pórtico metálico plano com ligações rígidas e sob a ação de carregamentos crescentes. A análise inelástica de segunda ordem, que considera as não linearidades física e geométrica simultaneamente, é o tipo de análise mais representativa do comportamento e da resistência de um sistema estrutural, sobretudo



devido as complexas interações entre os membros estruturais e as redistribuições de esforços subsequentes a formação de rótulas plásticas.

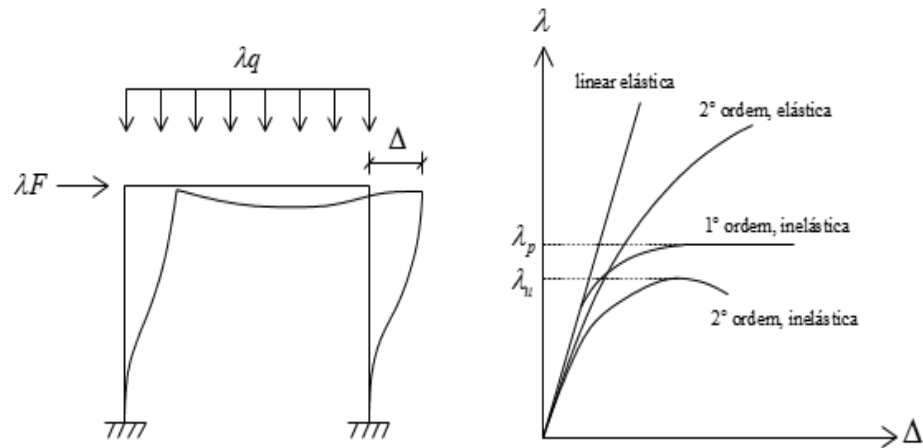


Figura 5. Respostas obtidas para por diferentes métodos de análise estrutural

Fonte: (Autor, 2018)

### 3.1 Sistema computacional CS-ASA

Para realização da análise estrutural avançada dos pórticos planos de aço foi adotado o sistema computacional CS-ASA desenvolvido por Silva (2009) em linguagem Fortran 95. O CS-ASA (*Computational System for Advanced Structural Analysis*) realiza análises numéricas avançadas estáticas e dinâmicas de estruturas baseado no método dos elementos finitos e foi utilizado no presente estudo para obtenção da carga limite que leva as estruturas ao colapso plástico, considerando os efeitos da não linearidade geométrica e da não linearidade física do aço.

Nas análises estruturais não lineares dos pórticos foi utilizada a formulação plástica refinada proposta por Liew *et al.* (1993) presente no CS-ASA (Silva, 2009), estratégia de incremento constante do parâmetro de carga, estratégia de iteração a carga constante, fator de carga incremental fixado em 1% do carregamento total, 1000 incrementos de carga, adotado o método de Newton-Raphson padrão como estratégia de solução não linear.

## 4 | FUNÇÃO DE DESEMPENHO

A segurança de uma estrutura precisa ser avaliada com relação a critérios de desempenho pré-determinados. Os critérios de desempenho são geralmente expressos na forma de funções de estado limite, que são relações funcionais entre todos os efeitos de carga e parâmetros relacionados a resistência. A função de estado limite último define a segurança contra carregamentos extremos durante a vida útil da estrutura.

Na análise da confiabilidade de estruturas complexas, as funções de desempenho (equações de estados limites) geralmente são funções implícitas das

variáveis aleatórias. No presente trabalho, as análises de confiabilidade realizadas foram uma combinação do método de análise de confiabilidade FORM e o método dos elementos finitos determinístico implementado no CS-ASA (Silva, 2009). A análise de confiabilidade dos pórticos planos foi realizada pela ferramenta computacional desenvolvida por Mapa (2016), que possui funcionamento acoplado ao CS-ASA para avaliações do estado limite último a cada iteração do método analítico FORM.

A função de desempenho foi formulada em função da resistência (  $R$  ) limite última do sistema estrutural e em função da solicitação (  $S$  ) atuante no sistema estrutural. No presente trabalho propõe-se que a função de desempenho seja formulada conforme a Eq. (7) a seguir:

$$G(U) = 1 - \frac{S}{R} = 1 - \frac{1}{\lambda} \quad (7)$$

Na Equação (7) a resistência global da estrutura foi expressa em função de um fator adimensional de carga  $\lambda = R / S$ , que fornece quantas vezes a resistência ao colapso plástico da estrutura é maior do que a solicitação atuante, com base em análise inelástica de segunda ordem da estrutura. Esse fator também pode expressar a solicitação necessária para formação da primeira rótula plástica no sistema estrutural.

## 5 | EXEMPLOS NUMÉRICOS

Serão apresentados nesta seção os resultados da análise de confiabilidade estrutural de duas estruturas planas de aço. As análises de confiabilidade foram realizadas mediante o emprego da ferramenta computacional desenvolvida por Mapa (2016), que possibilitou avaliar os níveis de segurança dos estados limites últimos das estruturas.

No primeiro exemplo serão apresentados os resultados da análise de confiabilidade do pórtico plano de Vogel (1985), visando conhecer o nível de segurança da estrutura quando projetada pela norma NBR 8800 (ABNT, 2008). No segundo exemplo será apresentada uma viga contínua de três vãos com capacidade significativa para redistribuição de carga inelástica, onde foram investigados os níveis de segurança com relação ao colapso plástico da viga e com relação à formação da primeira rótula plástica na estrutura, visando conhecer o nível de segurança da estrutura quando projetada pela norma ANSI 360 (AISC, 2010).

### 5.1 Pórtico de Vogel

Neste exemplo foi investigada a segurança estrutural com relação ao estado limite último (Equação 7) do pórtico plano de Vogel (1985) apresentado na Figura 6, onde são mostradas a geometria, o carregamento atuante e as condições de apoio.

O pórtico é composto por perfis laminados europeus HEB 300 para os pilares e perfil HEA 340 para a viga. Todos os perfis são feitos do mesmo material: aço com tensão de escoamento de 235 MPa e módulo de elasticidade longitudinal igual a 200 GPa.

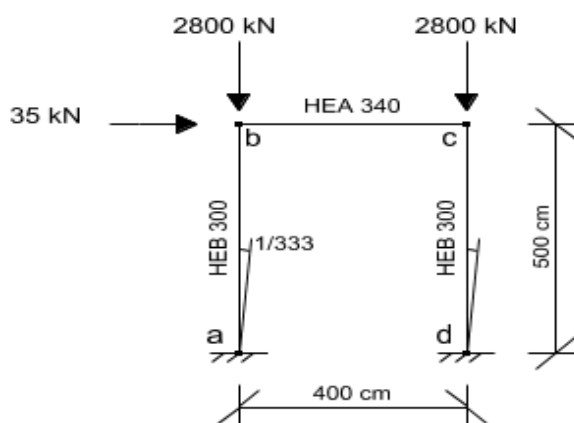


Figura 6. Pórtico de Vogel (1985)

Fonte: (Autor, 2018)

Seguindo as prescrições da norma brasileira NBR 8800 (ABNT, 2008), foram consideradas imperfeições geométricas globais iguais a  $h/333$  no topo do pórtico, sendo  $h$  a altura total do pórtico. É assumido que o momento fletor resistente dos elementos seja igual ao momento de plastificação total da seção transversal, pois considera-se que a viga e os pilares são adequadamente contidos lateralmente e as seções transversais dos perfis são compactas.

O fator de carga última relacionado ao colapso do pórtico encontrado por análise estrutural inelástica de segunda ordem foi de  $\lambda=0,862$ . Lavall *et al.* (2013) também realizaram a análise avançada desse pórtico conforme prescrições da NBR 8800 (ABNT, 2008) e chegaram à mesma conclusão de que o pórtico suporta aproximadamente 86,2% do carregamento total aplicado na Figura 6.

De modo a investigar os níveis de segurança do pórtico com relação ao colapso da estrutura, foram realizadas análises de confiabilidade considerando oito variáveis aleatórias, cuja descrição estatística se encontra na Tabela 1. Na Tabela 2 são resumidos os índices de confiabilidade obtidos por análise inelástica de segunda ordem do pórtico, para 100%, 86,2% e 72,3% do carregamento total mostrado na Figura 6.

| Variável      | Unidade | Valor nominal | Valor médio | Coefficiente de variação | Tipo de distribuição |
|---------------|---------|---------------|-------------|--------------------------|----------------------|
| $E$           | $MPa$   | 200000,00     | 200000,00   | 0,06                     | Lognormal            |
| $F_y$         | $MPa$   | 235,00        | 246,75      | 0,10                     | Lognormal            |
| $A_{viga}$    | $cm^2$  | 133,50        | 133,50      | 0,05                     | Lognormal            |
| $I_{viga}$    | $cm^4$  | 27690,00      | 27690,00    | 0,05                     | Lognormal            |
| $Z_{viga}$    | $cm^3$  | 1850,00       | 1850,00     | 0,05                     | Lognormal            |
| $A_{colunas}$ | $cm^2$  | 149,10        | 149,10      | 0,05                     | Lognormal            |
| $I_{colunas}$ | $cm^4$  | 25170,00      | 25170,00    | 0,05                     | Lognormal            |
| $Z_{colunas}$ | $cm^3$  | 1869,00       | 1869,00     | 0,05                     | Lognormal            |

Tabela 1. Descrição estatística das variáveis aleatórias

| Nível de carregamento | Índice de confiabilidade ( $\beta$ ) |
|-----------------------|--------------------------------------|
| 100%                  | -0,179                               |
| 86,2%                 | 1,343                                |
| 72,3%                 | 3,113                                |

Tabela 2. Índices de confiabilidade obtidos para o pórtico de Vogel

Os índices de confiabilidade obtidos via análise avançada do pórtico mostrados na Tabela 2 indicam probabilidades de falha de 57,100% para 100% do carregamento, 8,964% para 86,2% do carregamento e 0,093% para 72,3% do carregamento. Resultados idênticos foram obtidos por Mapa *et al.* (2019), onde foram verificados os estados limites últimos dos pilares do pórtico. O pórtico apresenta capacidade de redistribuição de carga limitada (falhou com pouca ação inelástica) e os resultados obtidos pela avaliação da confiabilidade do sistema estrutural são idênticos aos resultados obtidos pela avaliação da confiabilidade dos elementos estruturais.

Seguindo as prescrições da NBR 8800 (ABNT, 2008) verificou-se que o pórtico se encontra seguro para 86,2% do carregamento total aplicado, mas através da análise de confiabilidade do estado limite último foi possível conhecer o real nível de segurança da estrutura para esse nível de carregamento determinístico. Se a confiabilidade desejada para o pórtico fosse uma probabilidade de falha menor que 0,1% ( $\beta > 3,1$ ), observa-se na Tabela 2 que o carregamento aplicado na estrutura não poderia exceder 72,3% do carregamento total mostrado na Figura 6.

## 5.2 Viga contínua de três vãos

Neste exemplo foi investigada a segurança estrutural com relação ao estado limite último (Equação 7) da viga contínua apresentada na Figura 7, onde são mostradas a geometria, o carregamento atuante e as condições de apoio. A viga é composta por

perfis laminados  $W27 \times 84$  ( $W690 \times 125$ ) no primeiro vão,  $W16 \times 31$  ( $W410 \times 46,1$ ) no segundo vão e  $W18 \times 35$  ( $W460 \times 52$ ) no terceiro vão. Todos os perfis são feitos do mesmo material: aço com tensão de escoamento nominal de  $345 \text{ MPa}$  e módulo de elasticidade longitudinal igual a  $200 \text{ GPa}$ .

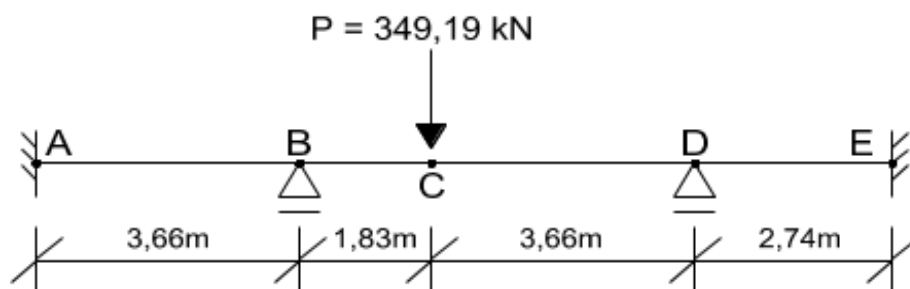


Figura 7. Viga contínua de três vãos

Fonte: (Autor, 2018)

Realizando a análise inelástica determinística da viga contínua da Figura 7 conforme prescrições da norma americana ANSI 360 (AISC, 2010), verificou-se que a primeira rótula plástica se forma na seção B, com um fator de carga  $\lambda_1=0,981$ , a segunda rótula plástica se forma na seção C com um fator de carga  $\lambda_2=1,20$  e a terceira rótula plástica se forma na seção D com um fator de carga  $\lambda_3=1,29$ . Zhang *et al.* (2018) também realizaram a análise avançada dessa viga e chegaram à mesma conclusão de que a viga contínua suporta aproximadamente 129% do carregamento total aplicado na Figura 7.

De modo a investigar os níveis de segurança da viga contínua com relação ao estado limite último de formação da primeira rótula plástica da estrutura, foram realizadas análises de confiabilidade considerando três variáveis aleatórias, cuja descrição estatística se encontra na Tabela 3. Foi considerado que a carga  $P$  aplicada na seção C da Figura 7 era a soma da carga permanente ( $D$ ) com o carregamento variável ( $L$ ). Os valores nominais dos carregamentos foram assumidos como:  $D_n = 97 \text{ kN}$  e  $L_n = 1,5 \cdot D_n$ . Portanto, o carregamento nominal que solicita a viga será  $P = 1,2 \cdot D_n + 1,6 \cdot L_n = 349,19 \text{ kN}$ .

De modo a investigar também os níveis de segurança da viga contínua com relação ao estado limite último de colapso plástico da estrutura, foram realizadas análises de confiabilidade considerando as mesmas variáveis aleatórias da Tabela 3, porém os valores nominais dos carregamentos foram assumidos como:  $D_n = 125,13 \text{ kN}$  e  $L_n = 1,5 \cdot D_n$ . Portanto, o carregamento nominal que solicita a viga será  $P = 1,2 \cdot D_n + 1,6 \cdot L_n = 450,46 \text{ kN}$ .

| Variável    | Valor nominal | Valor médio | Coefficiente de variação (COV) | Distribuição | Referência                      |
|-------------|---------------|-------------|--------------------------------|--------------|---------------------------------|
| $D$ (kN)    | $D_n$         | $1,05.D_n$  | 0,10                           | Normal       | Ellingwood <i>et al.</i> (1982) |
| $L$ (kN)    | $L_n$         | $L_n$       | 0,25                           | Ext. Tipo I  | Ellingwood <i>et al.</i> (1982) |
| $F_y$ (MPa) | 345,00        | 379,50      | 0,06                           | Lognormal    | Bartlett <i>et al.</i> (2003)   |

Tabela 3. Descrição estatística das variáveis aleatórias

Na Tabela 4 são resumidos os índices de confiabilidade obtidos para os estados limites últimos de formação da primeira rótula plástica e relacionados ao colapso plástico da viga.

| Estado limite último | Índice $\beta$ (Presente trabalho) | Índice $\beta$ (Zhang <i>et al.</i> , 2018) |
|----------------------|------------------------------------|---|
| Primeira rótula      | 4,05                               | 3,90  |
| Colapso plástico     | 2,95                               | 2,76  |

Tabela 4. Índices de confiabilidade obtidos para a viga contínua

A confiabilidade alvo para elementos sujeitos à flexão deve estar entre 2,6 à 2,8 para combinações do ASCE-7 (Ellingwood, 2000). Com base nos resultados da análise de confiabilidade da Tabela 4, algumas observações podem ser feitas.

O índice de confiabilidade  $\beta = 4,05$  obtido no presente trabalho indica que se a viga for dimensionada para que não ocorra a formação de nenhuma rótula plástica, a probabilidade de falha do sistema estrutural será de 0,00256%. Já o índice de confiabilidade  $\beta = 2,95$  obtido no presente trabalho indica que se a viga for dimensionada para que não ocorra o colapso plástico, a probabilidade de falha do sistema estrutural será de 0,15889%.

A probabilidade de falha do sistema estrutural para o dimensionamento baseado no colapso plástico é cerca de 62 vezes maior que a probabilidade de falha do sistema estrutural para o dimensionamento baseado na formação da primeira rótula plástica. Zhang *et al.* (2018) também chegaram numa probabilidade de falha cerca de 60 vezes maior para o estado limite último relacionado ao colapso plástico. A diferença entre os índices de confiabilidade encontrados para os estados limites últimos analisados é resultado da capacidade significativa de redistribuição de carga da viga após a formação da primeira rótula plástica.

Porém, observa-se na Tabela 4 que os índices de confiabilidade obtidos no presente trabalho e por Zhang *et al.* (2018) para o estado limite último de colapso plástico é superior a confiabilidade alvo. O dimensionamento com base no colapso plástico deixa pouca reserva de resistência, e portanto, têm-se um melhor aproveitamento do aço no sistema estrutural. Através da análise inelástica de segunda ordem, verificou-se que a viga é capaz de suportar um carregamento 29% maior com um nível de

segurança maior que a confiabilidade alvo.

Comparando os índices de confiabilidade obtidos no presente trabalho com os índices obtidos por outros autores, observa-se na Tabela 4 que os índices de confiabilidade obtidos por Zhang *et al.* (2018) são próximos daqueles obtidos no presente trabalho, levando à probabilidades de falha da mesma ordem de grandeza.

Observa-se ainda na Tabela 4 que os índices de confiabilidade obtidos pelos outros autores são um pouco menores do que os índices obtidos no presente trabalho, levando a probabilidades de falha ligeiramente maiores. Essa pequena diferença entre os resultados pode ser justificada pois Zhang *et al.* (2018) empregaram o método de simulação direta de Monte Carlo na avaliação da probabilidade de falha, empregaram na análise inelástica o método da zona plástica (discretização da seção transversal em fibras) com tensões residuais e consideraram o encruamento do aço no diagrama tensão-deformação.

## 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foram realizadas análises de confiabilidade de duas estruturas planas de aço via análise estrutural avançada em elementos finitos, considerando os efeitos da não linearidade geométrica e da inelasticidade do aço. O método analítico FORM foi empregado na avaliação da probabilidade de falha do sistema com relação ao estado limite último do colapso plástico.

No primeiro exemplo foi analisado o pórtico de Vogel (1985), onde foi possível conhecer o nível de confiabilidade obtido ao se utilizar as prescrições da norma NBR 8800 (ABNT, 2008) na verificação do colapso plástico do pórtico, ou seja, foi possível conhecer o real nível de segurança do sistema estrutural quando projetado pela norma brasileira.

No segundo exemplo foi analisada uma viga contínua de três vãos, onde foi possível conhecer o nível de confiabilidade obtido ao se utilizar as prescrições da norma americana ANSI 360 (AISC, 2010). A viga analisada tem capacidade significativa para redistribuição de carga inelástica, e através da análise de confiabilidade foi possível conhecer o nível de segurança para os carregamentos que levam à formação da primeira rótula plástica e ao colapso plástico. Observou-se que através da análise avançada é possível aproveitar melhor a resistência do aço, mantendo-se uma confiabilidade maior que a confiabilidade alvo .

## REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 8800: **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

AISC. **ANSI 360 - Specification for structural steel buildings**. American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, USA, 2010.

Ang, A. H. S. & Tang, W. H. **Probability concepts in engineering planning and design – decision, risk and reliability**. John Wiley & Sons, v. II, 562 p., 1984.

Bartlett, F. M. *et al.* Updating standard shape material properties database for design and reliability. **Eng. J. AISC**, 40(1), 2–14, 2003.

Cornell, C. A. A Probability-Based Structural Code. **Journal of the American Concrete Institute**, Vol. 66, n. 12, p. 974-985, 1969.

Ellingwood, B. *et al.* Probability based load criteria: load factor and load combinations. **Journal of the Structural Division**. ASCE, vol. 108, n. 5, p. 978-997, 1982.

Ellingwood, B. R. LRFD: Implementing structural reliability in professional practice. **Eng. Struct.**, 22(2), 106–115, 2000.

Gonçalves, G. A. **Modelagem do comportamento inelástico de estruturas de aço: membros sob flexão em torno do eixo de menor inércia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

Hasofer, A. M. & Lind, N. C. An exact and invariant first-order reliability format. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 100, p. 111-121, 1974.

Hendawi, S. & Frangopol, D. M. System reliability and redundancy in structural design and evaluation. **Structural Safety**, 16(1–2), 47–71, 1994.

Lavall, A. C. C. *et al.* Análise avançada de pórticos de aço conforme as prescrições da ABNT NBR 8800: 2008. **Revista da Estrutura de Aço**, vol. 2, n. 3 (dezembro/2013), 2013.

Liew, J.Y.R. *et al.* Second-order refined plastic hinge analysis for frame design. **Journal of Structural Division**, vol. 119(11), 1993.

Madsen, H. O. *et al.* **Methods of structural safety**. Dover Publications, 2. ed., 416 p, 2006.

Mapa, D. L. S. *et al.* **Confiabilidade Estrutural de Pórticos de Aço**. **Revista da Estrutura de Aço**, vol. 8, n. 1 (abril/2019), 2019.

Mapa, D. L. S. **Confiabilidade estrutural de pórticos metálicos planos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

Melchers, R. E. **Structural reliability analysis and prediction**. John Wiley & Sons, 2. ed., 431 p, 1999.

Rackwitz, R. & Fiessler, B. Structural reliability under combined random load sequences. **Computer and Structures**, v. 9, p. 489-494, 1978.

Sagrilo, L. V. S. **Confiabilidade estrutural – métodos analíticos para análise de confiabilidade**. Notas de aula – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

Silva, A. R. D. **Sistema computacional para análise avançada estática e dinâmica de estruturas metálicas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

Vogel, U. Calibrating Frames. **Stahlbau**, vol. 54 (outubro/1985), p. 295-301, 1985.

Zhang, H. *et al.* System Reliabilities of Planar Gravity Steel Frames Designed by the Inelastic Method in AISC 360-10. **J. Struct. Eng.**, 144(3): 04018011, 2018.



## **SOBRE O ORGANIZADOR**

**João Dallamuta:** Professor assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia de Telecomunicações pela UFPR. MBA em Gestão pela FAE Business School, Mestre pela UEL. Trabalha com Gestão da Inovação, Empreendedorismo e Inteligência de Mercado.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-355-2

