

Amanda Fernandes Pereira da Silva
(Organizadora)

ENGENHARIA- RIAS: Pesquisa, desenvolvimento e inovação 3



Amanda Fernandes Pereira da Silva
(Organizadora)

ENGENHARIA- RIAS: Pesquisa, desenvolvimento e inovação 3



Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2023 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2023 Os autores

Copyright da edição © 2023 Atena

Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. 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.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof^o Dr^a Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof^o Dr^a Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá
Prof^o Dr^a Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco
Prof^a Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Prof^a Dr^a Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof^a Dr^a Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes
Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof^a Dr^a Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof^a Dr^a Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof^o Dr Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá
Prof^a Dr^a Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Engenharias: pesquisa, desenvolvimento e inovação 2

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Flávia Roberta Barão
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizadora: Amanda Fernandes Pereira da Silva

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
E57	Engenharias: pesquisa, desenvolvimento e inovação 2 / Organizadora Amanda Fernandes Pereira da Silva. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2023. Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-258-0935-9 DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.359231801 1. Engenharia. I. Silva, Amanda Fernandes Pereira da (Organizadora). II. Título. CDD 620
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

Sabendo que a Atena Editora faz parte do grupo de instituições que incentivam a difusão de inovação científica, a mais nova coleção “Engenharias: Pesquisa, desenvolvimento e inovação 3” engloba pesquisa científica, aplicada, desenvolvimento experimental e inovação tecnológica. Um dos grandes desafios enfrentados atualmente nos mais diversos ramos do conhecimento, é o do saber multidisciplinar, aliando conceitos de diversas áreas.

Atualmente, é necessário que os profissionais saibam discernir e transitar conceitos e práticas levando em consideração o viés humano e técnico. Diante desse contexto, este livro traz capítulos ligados a teoria e prática em um caráter multidisciplinar, apresentando de maneira clara e lógica conceitos pertinentes aos profissionais das mais diversas áreas do saber. Os mais diversos temas estão relacionados às áreas de engenharia, como civil, materiais, mecânica, química, dentre outras, dando um viés onde se faz necessária a melhoria contínua em processos, projetos e na gestão geral no setor fabril.

Esta obra se mostra como fundamental, de abordagem objetiva, para todos os âmbitos acadêmicos e pesquisadores que busquem alavancar em conhecimento. Aos autores, agradeço pela confiança e espírito de parceria.


Boa leitura.

Amanda Fernandes Pereira da Silva

CAPÍTULO 1 1**A IMPORTÂNCIA DO SISTEMA DE GESTÃO DE QUALIDADE DENTRO DOS PROCESSOS EMPRESARIAIS**

Milena dos Santos Silva

Luis Jorge Souza dos Anjos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3592318011>**CAPÍTULO 2 5****ANÁLISE COMPARATIVA DAS NORMAS NBR 6118/2014, NBR 7188/2013 E AASHTO LRFD 2012, BASEADA NA TEORIA DA CONFIABILIDADE – ESTUDO DE CASO DE UMA VIGA I DA PONTE SOBRE CÓRREGO SÃO DOMINGOS NA RODOVIA ESTADUAL ES-010, TRECHO ITAÚNAS - ES-421**

Rodrigo José Costa Nóbrega

Emmanoel Guasti Ferreira


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3592318012>**CAPÍTULO 330****ANÁLISE DA DEFLEXÃO DE VIGAS E EIXOS POR EDO E SIMULAÇÃO EXPERIMENTAL DE BAIXO CUSTO**

Cristian Comin

Adabiel Oleone da Silva

Jocelaine Cargnelutti

Vanderlei Galina


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3592318013>**CAPÍTULO 439****APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP PARA AUXÍLIO À TOMADA DE DECISÃO DO MELHOR TRATAMENTO PARA A BORRA OLEOSA GERADA NA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA**

Wanderbeg Correia de Araujo

Haron Calegari Fanticelli

Jose Oduque Nascimento de Jesus

Artur Saturnino Rodrigues

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3592318014>**CAPÍTULO 557****ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLIED IN DIFFERENT AREAS OF ROBOTICS**

Márcio Mendonça

Rodrigo Henrique Cunha Palácios

João P. S. Bertocini

Ivan R. Chrun

Wagner Fontes Godoy


José Augusto Fabri

Francisco de Assis Scannavino Junior

Lucas Botoni de Souza

Emanuel Ignacio Garcia

Marta Rúbia Pereira dos Santos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3592318015>

CAPÍTULO 677

AVALIAÇÃO DA PROBABILIDADE DE FALHA DE PÓRTICO PLANO DE AÇO SUJEITO A CARREGAMENTO GRAVITACIONAL E COM FLEXÃO EM TORNO DO EIXO DE MENOR INÉRCIA


Danilo Luiz Santana Mapa
 Marcilio Sousa da Rocha Freitas

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3592318016>

CAPÍTULO 786

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO ESPAÇO FÍSICO EM ACADEMIAS DE GINÁSTICA E MUSCULAÇÃO NA CIDADE DO RECIFE/PE


Emanoel Silva de Amorim
 Kássia Benevides Martins Gomes
 Girlândia de Moraes Sampaio
 Paula dos Santos Cunha Boumann
 Diogo Cavalcanti Oliveira
 José Allef Ferreira Dantas
 Ana Maria Batista Farias
 Hugo Leonardo França Silva
 Thiago Araújo de Menezes
 Arthur Henrique Neves Baptista

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3592318017>

CAPÍTULO 897

COMPARAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA UTILIZANDO ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA LINEAR E CURVA. CASO DE ESTUDO MEDELLÍN – COLÔMBIA

Eduardo Montoya Botero
 George Fernandes Azevedo
 Hernán Eduardo Martinez Carvajal
 Edwin Fabian Garcia Aristizabal
 Newton Moreira de Souza


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3592318018>

CAPÍTULO 9 107

EFEITO DA ADIÇÃO DE DIFERENTES PROPORÇÕES DE FIBRAS DE COCO A GESSO DE FUNDIÇÃO

Karina Paula Barbosa de Andrade Lima
 Deborah Grasielly Cipriano da Silva
 Ana Luíza Xavier Cunha
 Kyriale Vasconcelos Morant Cavalcanti
 Felipe Bezerra de Lima
 Jackson José dos Santos
 Eyshila Paloma Costa de Brito
 Lucas Ítalo Santos Gomes
 Francisco das Chagas da Costa Filho


Fernanda Wanderley Corrêa de Araújo
 José Dantas Neto
 Romildo Morant de Holanda
 Yêda Vieira Póvoas

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.3592318019>

CAPÍTULO 10.....121

EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA ESTRUTURA DO AÇO TENAX 300IM


Carlos Triveño Rios
 Giselle Primo Samogin
 Debora Christina Ramos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.35923180110>

CAPÍTULO 11 132

EFEITO DO ULTRASSOM NA EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS EM CHÁS: UMA REVISÃO


Camila Araújo Costa Lira
 Kamila de Lima Barbosa
 Tereza Raquel Pereira Tavares
 Anayza Teles Ferreira
 Antonia Ingrid da Silva Monteiro
 Maria Rayane Matos de Sousa Procópio
 Marcelo Henrique Raulino Soares Nunes
 Amanda Caúla Fontenele
 Izabel Cristina de Almeida Silva
 Francisca Andressa Rabelo da Silva França
 Andreson Charles de Freitas Silva
 José Diogo da Rocha Viana

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.35923180111>

CAPÍTULO 12.....141

OS DESAFIOS DO GESTOR DE PRODUÇÃO: UM ESTUDO EM UMA INDÚSTRIA DE PEQUENO PORTE

Alessandro Dias
 Maykon Aurélio Alves
 Natanael Oliveira
 Mayara dos Santos Amarante

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.35923180112>

CAPÍTULO 13.....161

POTENCIAL DE APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ


Marcela Trojahn Nunes
 Fabiele Schaefer Rodrigues
 Jocenir Boita

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.35923180113>

CAPÍTULO 14..... 169

REPLACEMENT OF CONVENTIONAL VEHICLES WITH ELECTRIC ONES ON THE MACROMETRÓPOLE PAULISTA: ENERGETIC AND ENVIRONMENTAL IMPACTS FOR THE HORIZON OF 2030


Guilherme Pedroso
João Marcos Pavanelli
Raiana Schimer Soares
Célio Bermann

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.35923180114>

CAPÍTULO 15.....203

UMA REFLEXÃO SOBRE A IMPORTÂNCIA DA GEOMECÂNICA PARA A ENGENHARIA DE PETRÓLEO


Elias Enes de Oliveira
Melissa Alves Fernandes
Geraldo de Souza Ferreira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.35923180115>

CAPÍTULO 16..... 215

FISSURAÇÃO NO CONCRETO ARMADO: POSSÍVEIS CAUSAS E TÉCNICAS DE RESOLUÇÃO

Amanda Fernandes Pereira da Silva
Diego Silva Ferreira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.35923180116>

SOBRE A ORGANIZADORA225**ÍNDICE REMISSIVO.....226**

AValiação DA PROBABILIDADE DE FALHA DE PÓRTICO PLANO DE AÇO SUJEITO A CARREGAMENTO GRAVITACIONAL E COM FLEXÃO EM TORNO DO EIXO DE MENOR INÉRCIA

Data de aceite: 02/01/2023

Danilo Luiz Santana Mapa

Marcilio Sousa da Rocha Freitas

RESUMO: A confiabilidade estrutural de pórticos de aço pode ser quantificada através da avaliação da probabilidade de violação de seus estados limites. No presente trabalho, através de análise estrutural avançada (análise inelástica de segunda ordem) no programa computacional CS-ASA, o carregamento gravitacional de um pórtico plano de aço foi incrementado até ocorrer a violação do estado limite último de resistência conforme prescrições da norma ANSI/AISC 360-16. Foram obtidos para o pórtico plano de aço os carregamentos gravitacionais limites para duas situações de projeto: pilares fletidos em torno do eixo de maior inércia e pilares fletidos em torno do eixo de menor inércia. O método FORM (*First Order Reliability Method*) foi utilizado para avaliar as probabilidades de falha da estrutura para ambas as situações. A norma ANSI/AISC 360-16 permite o emprego nas análises estruturais avançadas do coeficiente de 0,90 para ponderação das propriedades do aço, não fazendo distinção

se a flexão ocorre no eixo de menor ou de maior inércia nas estruturas de aço. A probabilidade de falha obtida na análise do pórtico com flexão em torno do eixo de menor inércia é ligeiramente maior do que a probabilidade de falha obtida para flexão em torno do eixo de maior inércia. Conclui-se que a análise avançada com o emprego do coeficiente de ponderação de 0,90 prescrito pela norma ANSI/AISC 360-16 resulta em níveis de segurança praticamente iguais, indiferente do eixo onde ocorre a flexão nos pilares, para o pórtico plano de aço analisado.

PALAVRAS-CHAVE: Pórtico de aço; análise avançada; eixo de menor inércia; probabilidade de falha.

ASSESSMENT OF THE FAILURE PROBABILITY OF PLANAR STEEL FRAME UNDER GRAVITY LOADS AND MINOR-AXIS BENDING

ABSTRACT: The structural reliability of steel frames can be measured by the probability of limit state violations. In this research, through advanced structural analysis (second-order inelastic analysis), using the CS-ASA software, the gravitational loading of a planar steel frame was increased until

the violation of the ultimate strength limit state, according to the ANSI/AISC 360-16 code. For the planar steel frame, the ultimate gravitational loads were obtained from two design situations: columns under minor-axis bending and columns under major-axis bending. The First Order Reliability Method (FORM) was used to evaluate the failure probabilities of the structure for both situations. The ANSI/AISC 360-16 code uses a factor of 0.90 applied to steel properties, regardless of whether the columns are under minor-axis or major-axis bending. The probability of failure obtained with the analysis of the steel frame with columns under minor-axis bending is slightly higher than the probability of failure obtained with the steel frame with columns under major-axis bending. Therefore, the advanced analysis using the factor of 0.90 prescribed by the ANSI/AISC 360-16 results in approximately equal safety levels, regardless of the axis where the bending occurs in the columns.

KEYWORDS: Steel frame; advanced analysis; minor axis bending; failure probability.

1 | INTRODUÇÃO

A confiabilidade estrutural de pórticos de aço pode ser quantificada através da avaliação da probabilidade de violação de seus estados limites. São definidos como estados limites de uma estrutura situações a partir das quais ela apresenta desempenho inadequado às finalidades da construção (ABNT 2003). Segundo a norma ANSI/AISC 360 (2016), os estados limites podem: i) ser ditados por requisitos funcionais, como deflexões máximas; ii) estar relacionados ao comportamento estrutural, como a formação de uma rótula plástica ou mecanismo; e iii) representar o colapso total ou parcial da estrutura. As normas de projeto estrutural garantem que a probabilidade de violação de um estado limite é aceitavelmente pequena, através do emprego de combinações de ações e fatores de segurança consistentes.

Na avaliação dos estados limites, é possível empregar análise inelástica para determinação das respostas estruturais. De acordo com a norma ANSI/AISC 360-16, essa análise estrutural deve levar em consideração: i) as deformações de flexão, cisalhamento, axiais e de torção dos elementos estruturais, e todas as demais deformações de componentes e ligações que contribuam para os deslocamentos da estrutura; ii) efeitos de segunda ordem (incluindo $P-\Delta$, $P-\delta$ e efeitos de torção); iii) imperfeições geométricas; iv) reduções de rigidez devido à inelasticidade, incluindo escoamento parcial da seção transversal, que pode ser acentuado pela presença de tensões residuais; e v) incertezas nas resistências e rigidezes dos elementos e ligações (AISC 2016). O comportamento inelástico da maioria dos elementos estruturais é resultado principalmente das tensões normais longitudinais do elemento se igualando ao limite de escoamento do aço. Portanto, as tensões normais, produzidas pela força axial e momentos fletores nos eixos de maior e menor inércia, devem ser incluídas no cálculo da resistência plástica da seção transversal dos elementos (Chen e Atsuta 1976).

Os efeitos das tensões residuais podem ser incluídos diretamente em análises

inelásticas de plasticidade distribuída (zona plástica) ou modificando os métodos de análise inelástica baseados em rótulas plásticas (plasticidade concentrada). Vale ressaltar que, em perfis submetidos à flexão em torno do eixo de menor inércia, o efeito das tensões residuais é mais pronunciado, visto que afeta mais as fibras extremas (Gonçalves *et al.* 2019). O escoamento parcial, que ocorre antes da formação de uma rótula plástica, pode reduzir a rigidez à flexão do elemento estrutural, resultando em redistribuição de esforços e aumento dos efeitos de segunda ordem. Este é o caso de perfis I fletidos em torno do eixo de menor inércia e, por isso, tal redução na rigidez precisa ser considerada na análise inelástica.

No presente trabalho, com a utilização de análise estrutural avançada (análise inelástica de segunda ordem) no programa computacional CS-ASA (Gonçalves 2013), o carregamento gravitacional de um pórtico plano de aço com seções transversais compactas do tipo I será incrementado até ocorrer a violação do estado limite último de resistência, conforme prescrições da norma ANSI/AISC 360-16. Serão obtidos para o pórtico plano de aço os carregamentos gravitacionais limites últimos para duas situações de projeto: i) pilares fletidos em torno do eixo de maior inércia; e ii) pilares fletidos em torno do eixo de menor inércia. O método *First Order Reliability Method* (FORM) de confiabilidade será utilizado para avaliar as probabilidades de falha do pórtico plano de aço para as duas situações. O objetivo da pesquisa é, portanto, comparar as probabilidades de falha obtidas para o pórtico plano de aço, pois se acredita que o fator de ponderação de 0,90 prescrito pela norma ANSI/AISC 360-16 é capaz de garantir confiabilidade estrutural aceitável para as duas situações examinadas.

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. A falha ocorre se R for menor do que S , o que é representado em termos de probabilidade como $P(R < S)$. 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:

$$P_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 f_z(z) dz = \Phi\left(\frac{0 - \mu_z}{\sigma_z}\right) = \Phi(-\beta_c) \quad 1$$

Sendo β_c o índice de confiabilidade de Cornell (1969) definido a seguir:

$$\beta_c = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad 2$$

Em sua implementação inicial, o índice de confiabilidade foi avaliado em função das médias e dos desvios-padrão da resistência e da solicitação máxima, como indicado na Eq.

2. Posteriormente, o índice de confiabilidade passou a ser obtido por métodos analíticos baseados em aproximações em séries de Taylor de primeira ordem (Método FORM).

2.1 Método analítico FORM

No Método FORM, 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:

$$V = (L)^{-1} \cdot (\sigma)^{-1} \cdot (U - m) \quad 3$$

Sendo:

m - vetor com as médias das variáveis U ;

σ - matriz diagonal contendo os desvios padrão das variáveis U ;

L - matriz triangular inferior obtida da decomposição de Choleski da matriz dos coeficientes de correlação de U .

Outra etapa importante do Método FORM é a busca ao ponto sobre a superfície de falha mais próximo à origem do sistema reduzido, denominado ponto de projeto V^* . Para encontrar o ponto de projeto, formula-se um problema de otimização P com uma restrição, tal que:

$$\begin{aligned} P: & \text{minimizar } |V| \\ & \text{Sujeito a } g(V) = 0 \end{aligned} \quad 4$$

Utiliza-se comumente o algoritmo denominado HLRF, desenvolvido por Hasofer e Lind (1974) e aprimorado por Rackwitz e Fiessler (1978), para resolução do problema de otimização apresentado pela Eq. 4. O processo iterativo gerado pelo algoritmo HLRF caminha em busca do ponto de projeto, resolvendo-se a seguinte equação:

$$V^{i+1} = \frac{1}{|\nabla g(V^i)|^2} \cdot \left[\nabla g(V^i)^T V^i - g(V^i) \right] \cdot \nabla g(V^i) \quad 5$$

Durante o processo iterativo determina-se o índice de confiabilidade β calculando-se a norma do vetor V^{i+1} e interrompe-se o processo quando a variação relativa do valor de β é inferior a uma tolerância estabelecida. De posse do índice de confiabilidade β , a probabilidade de falha pode ser obtida utilizando-se a Eq. 1.

3 I ANÁLISE ESTRUTURAL AVANÇADA

No presente trabalho, para realização da análise estrutural avançada do pórtico plano de aço, foi adotado o CS-ASA desenvolvido por Silva (2009) em linguagem Fortran 95. O CS-ASA realiza análises numéricas avançadas estáticas e dinâmicas de estruturas baseado no método dos elementos finitos e foi utilizado para obtenção da carga limite que leva a estrutura ao colapso, considerando os efeitos da inelasticidade do aço e não linearidade geométrica do pórtico.

No CS-ASA encontra-se implementado o método da rótula plástica refinado para acompanhar o processo de plastificação do aço na análise estrutural avançada. No método da rótula plástica refinado, a consideração da plastificação do material é concentrada nos pontos nodais de cada elemento finito. Emprega-se, nesse método, o módulo tangente para considerar a degradação da rigidez em função da variação das forças internas. No CS-ASA foi implementada a equação para o módulo de elasticidade tangente do AISC (2005), no qual a degradação da rigidez da seção varia em função do esforço normal, sendo expressa por:

$$\frac{E_t}{E} = -2,7243 \frac{P}{P_y} \ln \left(\frac{P}{P_y} \right), \text{ se } P > 0,39P_y \quad 6$$

Como critério para definir o estado limite último de resistência da seção transversal, adotam-se superfícies de plastificação, que descrevem a interação entre esforço normal e momento fletor. No contexto do método da rótula plástica refinado, essas superfícies são responsáveis por definir o instante em que ocorre a formação da rótula plástica (plastificação total da seção). Neste trabalho foi empregada a superfície de resistência proposta por McGuire, Gallagher e Ziemian (2000), que avalia a interação entre esforço normal e momento fletor no eixo de menor inércia:

$$M_{pny} = M_{py} \sqrt{\left(-3p^6 + \sqrt{9p^{12} - 4(p^2 - 1)} \right) / 2} \quad 7$$

Sendo:

M_{pny} - momento plástico reduzido em torno do eixo de menor inércia;

M_{py} - momento de plastificação total da seção transversal em torno do eixo y;

p - relação entre esforço normal solicitante e esforço normal resistente da seção transversal.

Para valores relativamente grandes de deslocamentos, a deflexão lateral de um membro pode levar ao aparecimento de momentos fletores adicionais devido à presença de um esforço normal. Esse comportamento é comumente chamado de efeitos de segunda ordem e são oriundos das deformações da estrutura à medida que é carregada. Para simular esses efeitos foram utilizadas as equações desacopladas de rigidez da formulação de elementos finitos linearizada proposta por Yang e Kuo (1994). Nas análises estruturais

não lineares do pórtico foram utilizadas: formulação plástica refinada proposta por Liew, White e Chen (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 0,1% do carregamento total; e o método de Newton-Raphson padrão como estratégia de solução não linear. Cada elemento estrutural do pórtico foi discretizado em quatro elementos finitos.

4 | EXEMPLO NUMÉRICO

Neste exemplo foi investigada a segurança estrutural com relação ao estado limite último de colapso do pórtico plano de um andar apresentado na Figura 1, na qual são mostradas a geometria, o carregamento atuante e as condições de apoio. O pórtico é composto por perfis laminados americanos: perfis W12x58 (W310x86) para os pilares; e perfil W24x76 (W610x113) para a viga. Todos são feitos do mesmo material: aço com tensão de escoamento de 345 MPa; e módulo de elasticidade longitudinal igual a 200 GPa. Foi introduzida uma imperfeição geométrica inicial (desaprumo) angular igual a $\Delta_0 = 1/500$ nos pilares (Figura 1), conforme recomendação das normas AISC 303-16 (2016) e AS4100 (1998), resultando em um deslocamento de 7,32mm no topo dos pilares. É assumido que o momento fletor resistente dos elementos estruturais 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. As ligações entre os elementos viga-pilar foram consideradas como rígidas.

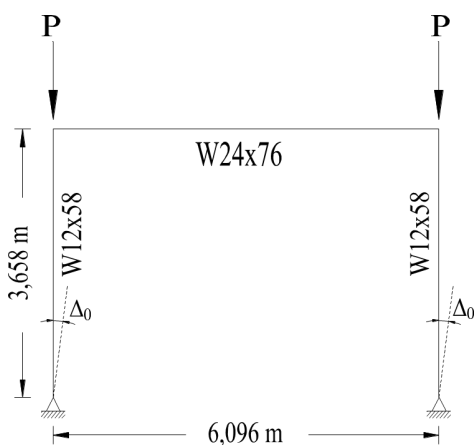


Figura 1 - Pórtico plano de um andar

Realizando a análise estrutural avançada do pórtico da Figura 1, conforme prescrições da norma AISC 360-16 (reduzindo a tensão de escoamento e módulo de

elasticidade do aço através da multiplicação pelo fator de ponderação de 0,90), chegou-se aos seguintes valores para a carga máxima aplicada no topo dos pilares do pórtico: $P = 2607 \text{ kN}$ quando ocorre flexão dos pilares em torno do eixo de maior inércia; $P = 1169 \text{ kN}$ quando ocorre flexão dos pilares em torno do eixo de menor inércia. Verifica-se que a carga suportada pelo pórtico é 2,23 vezes maior quando os pilares sofrem flexão em torno do eixo de maior inércia.

De modo a investigar os níveis de segurança do pórtico com relação ao estado limite último de colapso da estrutura, foram realizadas análises de confiabilidade considerando quatro variáveis aleatórias, cuja descrição estatística se encontra na Tabela 1. Foi considerado que a carga P aplicada no topo dos pilares (Figura 1) era resultado da seguinte combinação de ações entre carga permanente (D) e carga variável (L), sugerida pela norma ASCE 7-10 (ASCE 2010): $P = 1,2D_n + 1,6L_n$. Foi assumida a relação entre carga variável e carga permanente igual a 1,5, ou seja, $L_n = 1,5D_n$, valor típico segundo Ellingwood (2000).

Variável	Valor nominal	Valor médio	Coefficiente de variação (COV)	Distribuição	Referência
$D \text{ (kN)}$	D_n	$1,05.D_n$	0,10	Normal	Ellingwood <i>et al.</i> (1982)
$L \text{ (kN)}$	L_n	L_n	0,25	Ext. Tipo I	Ellingwood <i>et al.</i> (1982)
$E \text{ (GPa)}$	200,00	200,0	0,04	Lognormal	Bartlett <i>et al.</i> (2003)
$F_y \text{ (MPa)}$	345,00	379,5	0,06	Lognormal	Bartlett <i>et al.</i> (2003)

Tabela 1 - Descrição estatística das variáveis aleatórias

A Tabela 2 resume os resultados dos índices de confiabilidade obtidos no presente trabalho e obtidos por Liu (2019) relacionados ao estado limite último de colapso do pórtico plano. Os índices de confiabilidade obtidos resultam em probabilidades de falha iguais a 0,187% e 0,347%, para os pilares fletidos em torno do eixo de maior inércia e menor inércia, respectivamente. Já os índices de confiabilidade obtidos por Liu (2019) resultam em probabilidades de falha iguais a 0,212% e 0,226%, respectivamente.

Eixo onde ocorre flexão nos pilares	Índice β (Presente trabalho)	Índice β (Liu 2019)
Maior inércia	2,90	2,86
Menor inércia	2,70	2,84

Tabela 2 - Índices de confiabilidade obtidos para o pórtico

A probabilidade de falha obtida na análise do pórtico com flexão em torno do eixo de menor inércia é ligeiramente maior do que a probabilidade de falha obtida para flexão em torno do eixo de maior inércia. Nesse trabalho, tal probabilidade de falha foi 1,9 vezes maior. Em contrapartida, Liu (2019) encontrou uma probabilidade de falha 1,1 vezes maior.

Comparando os índices de confiabilidade do presente estudo com aqueles obtidos pelo outro autor, observa-se, na Tabela 2, que os índices de confiabilidade obtidos por Liu (2019) são próximos daqueles alcançados, resultando em probabilidades de falha da mesma ordem de grandeza.

5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por fim, foi possível conhecer o nível de confiabilidade ao se utilizar as prescrições da norma americana AISC 360-16 (2016) no projeto de um pórtico plano de aço. Os resultados mostraram que a probabilidade de falha obtida para o pórtico com flexão em torno do eixo de menor inércia é ligeiramente maior do que a probabilidade de falha obtida para flexão em torno do eixo de maior inércia.

O índice de confiabilidade alvo para elementos de aço sujeitos à flexão deve ser de no mínimo 2,6 para as combinações entre ações gravitacionais do ASCE-7 (Ellingwood, 2000). Os índices de confiabilidade obtidos para o pórtico nessa pesquisa e por Liu (2019) foram superiores à confiabilidade alvo ($\beta > 2,6$).

Conclui-se que a análise avançada com o emprego do coeficiente de 0,90 para ponderação das propriedades do aço, conforme prescreve a norma AISC 360-16, resulta em níveis de segurança praticamente iguais e suficientes, indiferente do eixo no qual ocorre a flexão nos pilares, para o pórtico plano de aço analisado.

REFERÊNCIAS

ABNT (2003). *Ações e segurança nas estruturas - Procedimento*. NBR 8681. Rio de Janeiro, RJ.

AISC 303-16 (2016). *Code of standard practice for steel buildings and bridges*. American Institute of Steel Construction (AISC), Chicago, Illinois, EUA.

AISC 360-16 (2016). *Specification for Structural Steel Buildings*. American Institute of Steel Construction (AISC), Chicago, Illinois, EUA.

AISC (2005). *Specification for Structural Steel Buildings*. American Institute of Steel Construction. Chicago, Illinois, EUA.

AS4100 (1998). *Australian Standard AS4100 – Steel Structures*. Standards Australia, Sydney, NSW 2001, Australia.

ASCE 7-10 (2010). *Minimum design loads for buildings and other structures*. American Society of Civil Engineers. Reston, VA.

Bartlett, F. M., Dexter, R. J., Graeser, M. D., Jelinek, J. J., Schmidt, B. J. e Galambos, T. V. (2003). Updating standard shape material properties database for design and reliability. *Eng. J. AISC*, 40(1), 2–14.

Chen, W. F. e Atsuta, T. (1976). *Theory of Beam-Columns, Volume I: In Plane Behavior and Design, and Volume II: Space Behavior and Design*. McGraw-Hill, New York, NY.

- Cornell, C. A. (1969). A Probability-Based Structural Code. *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 66, n. 12, p. 974-985.
- Ellingwood, B. R. (2000). LRFD: Implementing structural reliability in professional practice. *Eng. Struct.*, 22(2), 106–115.
- Ellingwood, B., Macgregor, J., Galambos, T. V. e Cornell, C. A. (1982). Probability Based Load Criteria: Load Factors and Load Combinations. *Journal of the Structural Division*, 108, 978–997.
- Gonçalves, G. A. (2013). *Modelagem do Comportamento Inelástico de Estruturas de Aço: Membros sob Flexão em Torno do Eixo de Menor Inércia*. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.
- Gonçalves, G. A., Silveira, R. A. M., Silva, A. R. D. e Silva, J. L. (2019). Inelastic second-order analysis of steel columns under minor-axis bending. *REM - International Engineering Journal*, Ouro Preto, vol. 72, issue 3, p. 405-414.
- Hasofer, A. M. e Lind, N. C. (1974). An exact and invariant first-order reliability format. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 100, p. 111-121.
- Liew, J. Y., White, D. W. e Chen, W. F. (1993). Second-Order Refined Plastic-Hinge Analysis for Frame Design, Parts I and II. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 11, pp. 3196-3237.
- Liu, H. (2019). *System reliability calibrations for the Direct Design Method of planar steel frames with partially restrained connections*. Ph.D. Thesis, The University of Sidney, School of Civil Engineering.
- McGuire, W., Gallagher, R. H. e Ziemian, R. D. (2000). *Matrix Structural Analysis*. John Wiley & Sons, 480 p.
- Melchers, R. E. (1999). *Structural reliability analysis and prediction*. John Wiley & Sons, 2. ed., 431 p.
- Rackwitz, R. e Fiessler, B. (1978). Structural reliability under combined random load sequences. *Computer and Structures*, v. 9, p. 489-494.
- Silva, A. R. D. (2009). *Sistema computacional para análise avançada estática e dinâmica de estruturas metálicas*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.
- Yang, Y. B. e Kuo, S. R. (1994). *Theory & Analysis of Nonlinear Framed Structures*. Prentice Hall, 1. Ed., 450 p.

A

Acessibilidade arquitetônica 87

Aço ferramenta 121, 124, 128, 129

Análise avançada 77, 84, 85

Artificial intelligence 57, 58, 59, 60, 65, 66, 68, 73, 74, 76

Autonomous vehicle 58, 59

Avaliação pós ocupação 87

B

Borra oleosa 39, 40, 41, 42, 46, 47, 53

C

Chuvas 98

Cinza de casca de arroz 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168

CO₂ emissions 169, 172, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 183, 185, 188, 189, 190, 191, 194, 195, 196, 197

Competitividade 2, 141, 142, 150, 198

Cristobalita 161, 165, 167

D

Desafios 38, 141, 142, 143, 146, 147, 148, 151, 156, 158, 159, 204, 205

Desenvolvimento 2, 6, 7, 20, 30, 31, 37, 39, 43, 54, 87, 88, 95, 105, 120, 141, 142, 145, 147, 148, 159, 167, 198, 205, 206, 213

E

Eixo de menor inércia 77, 79, 81, 83, 84, 85

Electric vehicle 169, 171, 179, 200, 201

Empresa 1, 2, 39, 41, 46, 47, 48, 52, 53, 109, 123, 141, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 201

Energy consumption 169, 170, 174, 181, 182, 185, 188, 189, 190, 191, 192, 195

Engenharia 6, 8, 9, 12, 13, 20, 21, 22, 24, 29, 30, 31, 38, 54, 57, 85, 86, 87, 96, 106, 118, 119, 120, 121, 130, 132, 141, 142, 143, 144, 146, 157, 164, 168, 203, 204, 205, 208, 209, 210, 212, 213, 214, 215, 219, 224, 225

Engenharia de Petróleo 203, 204, 205, 209, 210, 212, 213, 214

Ensino em engenharia 30

Envoltória curva 97, 98, 104

Equações diferenciais ordinárias 30

Ergonomia 87, 88, 90, 91, 93, 95, 96

Escorregamentos 97, 98, 99, 100

Extração de fitoquímicos 133

F

Fator de segurança 12, 97, 98, 99, 102, 105

Fibra natural 108, 110

Fissuras 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224

G

Geomecânica 101, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214

Gesso de fundição 107, 108, 110, 113, 115, 117

Gestão 1, 2, 3, 4, 38, 86, 119, 120, 141, 144, 146, 147, 148, 151, 152, 155, 156, 157, 158, 159

I

Impacto 14, 15, 17, 49, 121, 122, 123, 127, 128, 129, 141, 142, 150

Índice de confiabilidade 5, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 26, 27, 79, 80, 84

Interdisciplinaridade 30, 37, 38

M

Macrometrópole Paulista 169, 172, 176, 197, 199

Matriz curricular 203, 209, 210

Mecânica das rochas 203, 204, 206, 208, 209, 210, 211

Método AHP 39, 41, 43, 44, 45, 46, 47, 53, 54

Método Monte Carlo 5, 10

Modos de falha 5, 8, 18

P

Patologias 215, 216, 217, 218, 219, 223, 224

Polifenóis 133, 134, 136, 138, 139

Pórtico de aço 77

Precision agriculture 58, 65

Probabilidade de falha 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 77, 79, 80, 83, 84

Processos empresariais 1

Q

Qualidade 1, 2, 3, 4, 86, 87, 88, 89, 93, 95, 96, 122, 133, 134, 139, 144, 146, 148, 152, 154, 161, 162, 167, 218

R

Resíduos sólidos 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 53, 54, 55, 120

Resistência dos materiais 8, 9, 30, 31, 38

Resistência mecânica 108, 116, 117

S

SiO₂ 161, 165, 166, 167

Superfície de estado limite 5, 7

T

Tecnologias para o tratamento de borra oleosa 39

Tenacidade 121, 122, 128, 130

TENAX 300IM 121, 122, 123, 124, 125, 126, 128, 129

U

Unmanned aerial vehicle 58

Urban transport 169, 170, 198

ENGENHARIA- RIAS:

Pesquisa, desenvolvimento
e inovação 3

- 
-  www.atenaeditora.com.br
 -  contato@atenaeditora.com.br
 -  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 -  www.facebook.com/atenaeditora.com.br

ENGENHARIA- RIAS:

Pesquisa, desenvolvimento
e inovação 3



www.atenaeditora.com.br



contato@atenaeditora.com.br



[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)



www.facebook.com/atenaeditora.com.br