

COLEÇÃO
DESAFIOS
DAS
ENGENHARIAS:

ENGENHARIA CIVIL



CARLOS AUGUSTO ZILLI
(ORGANIZADOR)

Atena
Editora
Ano 2021

COLEÇÃO
DESAFIOS
DAS
ENGENHARIAS:

ENGENHARIA CIVIL



CARLOS AUGUSTO ZILLI
(ORGANIZADOR)

Atena
Editora
Ano 2021

Editora Chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes Editoriais

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto Gráfico e Diagramação

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremona

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da Capa

iStock

Edição de Arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 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-NãoDerivativos 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 Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná

Prof. Dr. Américo Junior Nunes da Silva – Universidade do Estado da Bahia

Profª Drª Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa

Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Arnaldo Oliveira Souza Júnior – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense
Prof^a Dr^a Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Daniel Richard Sant’Ana – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof^a Dr^a Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros
Prof. Dr. Humberto Costa – Universidade Federal do Paraná
Prof^a Dr^a Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. José Luis Montesillo-Cedillo – Universidad Autónoma del Estado de México
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof^a Dr^a Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Prof^a Dr^a Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Miguel Rodrigues Netto – Universidade do Estado de Mato Grosso
Prof. Dr. Pablo Ricardo de Lima Falcão – Universidade de Pernambuco
Prof^a Dr^a Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof^a Dr^a Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof^a Dr^a Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof^a Dr^a Vanessa Ribeiro Simon Cavalcanti – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Prof^a Dr^a Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof^a Dr^a Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Prof^a Dr^a Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal do Semi-Árido
Prof. Dr. Jayme Augusto Peres – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof^a Dr^a Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Prof^a Dr^a Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof^a Dr^a Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Douglas Siqueira de Almeida Chaves – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Fernanda Miguel de Andrade – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Helio Franklin Rodrigues de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Jesus Rodrigues Lemos – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Jônatas de França Barros – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Vanessa da Fontoura Custódio Monteiro – Universidade do Vale do Sapucaí
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Welma Emidio da Silva – Universidade Federal Rural de Pernambuco

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie
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
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª 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
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Linguística, Letras e Artes

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro
Profª Drª Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Edna Alencar da Silva Rivera – Instituto Federal de São Paulo
Profª Drª Fernanda Tonelli – Instituto Federal de São Paulo,
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 Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Conselho Técnico científico

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí
Profª Ma. Adriana Regina Vettorazzi Schmitt – Instituto Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais
Prof. Me. Alexsandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Profª Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Andrezza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Profª Drª Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia
Profª Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá
Profª Ma. Anne Karynne da Silva Barbosa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais
Prof. Me. Armando Dias Duarte – Universidade Federal de Pernambuco
Profª Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Profª Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Me. Carlos Augusto Zilli – Instituto Federal de Santa Catarina
Prof. Me. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná
Profª Drª Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª Drª Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas
Prof. Me. Clécio Danilo Dias da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará

Profª Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília
Profª Ma. Daniela Remião de Macedo – Universidade de Lisboa
Profª Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás
Prof. Me. Edevaldo de Castro Monteiro – Embrapa Agrobiologia
Prof. Me. Edson Ribeiro de Brito de Almeida Junior – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases
Prof. Me. Eduardo Henrique Ferreira – Faculdade Pitágoras de Londrina
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Me. Ernane Rosa Martins – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes – Instituto Edith Theresa Hedwing Stein
Prof. Me. Ezequiel Martins Ferreira – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora
Prof. Me. Fabiano Eloy Atílio Batista – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
Prof. Me. Francisco Odécio Sales – Instituto Federal do Ceará
Prof. Me. Francisco Sérgio Lopes Vasconcelos Filho – Universidade Federal do Cariri
Profª Drª Germana Ponce de Leon Ramirez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
Prof. Me. Givanildo de Oliveira Santos – Secretaria da Educação de Goiás
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro
Profª Ma. Isabelle Cerqueira Sousa – Universidade de Fortaleza
Profª Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará
Prof. Dr. José Carlos da Silva Mendes – Instituto de Psicologia Cognitiva, Desenvolvimento Humano e Social
Prof. Me. Jose Elyton Batista dos Santos – Universidade Federal de Sergipe
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco
Profª Drª Juliana Santana de Curcio – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFGA
Prof. Dr. Kárpio Márcio de Siqueira – Universidade do Estado da Bahia
Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis
Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFPR
Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Ma. Lillian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
Profª Ma. Lillian de Souza – Faculdade de Tecnologia de Itu
Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Profª Drª Livia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe
Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná
Profª Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz
Profª Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof. Me. Luiz Renato da Silva Rocha – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª Ma. Luma Sarai de Oliveira – Universidade Estadual de Campinas
Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos

Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva – Governo do Estado do Espírito Santo
Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior
Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
Prof. Me. Marcos Roberto Gregolin – Agência de Desenvolvimento Regional do Extremo Oeste do Paraná
Profª Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará
Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Prof. Dr. Pedro Henrique Abreu Moura – Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Profª Drª Poliana Arruda Fajardo – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Rafael Cunha Ferro – Universidade Anhembi Morumbi
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Renan Monteiro do Nascimento – Universidade de Brasília
Prof. Me. Renato Faria da Gama – Instituto Gama – Medicina Personalizada e Integrativa
Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof. Me. Robson Lucas Soares da Silva – Universidade Federal da Paraíba
Prof. Me. Sebastião André Barbosa Junior – Universidade Federal Rural de Pernambuco
Profª Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão
Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
Prof. Dr. Sullivan Pereira Dantas – Prefeitura Municipal de Fortaleza
Profª Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Universidade Estadual do Ceará
Profª Ma. Thatianny Jasmine Castro Martins de Carvalho – Universidade Federal do Piauí
Prof. Me. Tiago Silvio Dedoné – Colégio ECEL Positivo
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Coleção desafios das engenharias: engenharia civil

Bibliotecária: Janaina Ramos
Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Flávia Roberta Barão
Edição de Arte: Luiza Alves Batista
Revisão: Os autores
Organizador: Carlos Augusto Zilli

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C691 Coleção desafios das engenharias: engenharia civil /
Organizador Carlos Augusto Zilli. – Ponta Grossa - PR:
Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-302-3

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.023211407>

1. Engenharia civil. I. Zilli, Carlos Augusto (Organizador).
II. Título.

CDD 624

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

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

APRESENTAÇÃO

Esta obra, intitulada “Coleção Desafios das Engenharias: Engenharia Civil”, em seu primeiro volume, apresenta 18 capítulos que abordam pesquisas relevantes sobre os desafios enfrentados pela engenharia civil mundo afora, tais como: Otimização e Dimensionamento de Peças Estruturais, Concreto em Situações de Incêndio, Confiabilidade Estrutural, Prevenção de Danos em Estruturas, Estudos de Materiais Alternativos para Construção Civil, Concreto Ecológico e Descarte de Resíduos.

Desta forma, esta obra se mostra potencialmente disponível para contribuir com discussões e análises aprofundadas acerca de assuntos atuais e relevantes, servindo como base referencial para futuras investigações relacionadas à estruturas de concreto armado e materiais de construção civil.

Deixo, aos autores dos capítulos, um agradecimento especial, e aos futuros leitores, anseio que esta obra sirva como fonte inspiradora e reflexiva.

Esta obra é indicada para os mais diversos leitores, tendo em vista que foi produzida por meio de linguagem fluída e abordagem prática, o que favorece a compreensão dos conceitos apresentados pelos mais diversos públicos, sendo indicada, em especial, aos amantes da área de engenharia.

Carlos Augusto Zilli

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO DE LAJES NERVURADAS, UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO

Jessyca Priscylla de Almeida Nunes

Giuliana Furtado Franca Bono

Gustavo Bono


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0232114071>

CAPÍTULO 2..... 16

DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO CONFORME MÉTODO TABULAR E PRINCÍPIO DE CÁLCULO DAS ZONAS

Diogo Raniere Ramos e Silva

Maria de Lourdes Teixeira Moreira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0232114072>

CAPÍTULO 3..... 28

CONSIDERAÇÕES SOBRE PUNÇÃO EM LAJES PLANAS DE CONCRETO ARMADO

Ailton Queiroz Junior

Aurélio de Almeida Abdoral Neto

Eduardo Emilio Martins Pinheiro Câmara

Elsimar Souza Santos

Felipe Vieira Ladislau

Janiele Moreira Roland


Kevin de Matos Costa

Luiz Alfredo Franco Pinheiro

Paola de Kácia de Souza Pinto Silva

Pedro Ignácio Lima Gadêlha Jardim

Raíssa Coelho Almeida

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0232114073>


CAPÍTULO 4..... 43

CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DE PÓRTICOS PLANOS DE AÇO

Danilo Luiz Santana Mapa

Marcílio Sousa da Rocha Freitas

Ricardo Azoubel da Mota Silveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0232114074>


CAPÍTULO 5..... 64

PROJETO ÓTIMO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO COM SEÇÃO T UTILIZANDO OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

Rubens Silva Correia

Giuliana Furtado Franca Bono

Gustavo Bono


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0232114075>

CAPÍTULO 6..... 79

A SIMULAÇÃO NUMÉRICA NA RESOLUÇÃO DE DESAFIOS DA ENGENHARIA ESTRUTURAL

Tainá Mascarenhas Borghi

Ana Lucia Homce de Cresce El Debs

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0232114076>

CAPÍTULO 7..... 93

EXPERIÊNCIAS PARA A PREVENÇÃO DE DANOS NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO PÓS-TENSIONADO

Sergio Gavilán

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0232114077>

CAPÍTULO 8..... 108

EMPREGO DE ENSAIOS DE DURABILIDADE EM CONCRETOS COM SINTOMAS DE EXPANSÃO EM FUNDAÇÕES DE SUBESTAÇÕES E LINHAS DE TRANSMISSÃO EM MINAS GERAIS


Marina Munaretto Copetti

Cristiane Carine dos Santos

Ana Paula Maran

Silvane Santos da Silva

Régis Luís Wagner Mallmann

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0232114078>

CAPÍTULO 9..... 125

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS, FÍSICAS E DE DURABILIDADE DO CONCRETO POLÍMERO DESENVOLVIDO A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE RESINA POLIURETANA VEGETAL


Alexandre Rodriguez Murari

Giovanna Jacomelli

Victor José dos Santos Baldan

Eduvaldo Paulo Sichieri

Javier Mazariegos Pablos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0232114079>

CAPÍTULO 10..... 138


AVALIAÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CINZAS DE OLARIAS NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO ESTRUTURAL

Larissa Barbosa de Lima

Jozilene de Souza

Júlio César Damasceno

José Edivandro de Sousa Júnior


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140710>

CAPÍTULO 11..... 151

ESTUDO DO USO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO

CIVIL BRASILEIRA


Marcos David dos Santos
Marco Antônio Assis de Oliveira
Danylo de Andrade Lima
Marcelo Laédson Morato Ferreira
Hosana dos Santos Lima
Jacira Isabelle Medeiros de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140711>

CAPÍTULO 12..... 162

ARTEFATOS DE CONCRETO LEVE E PERMEÁVEL COM A UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E POLIESTIRENO EXPANSÍVEL


Mariana Venturini
Gabriel Salvador
Carlos Henrique Costa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140712>

CAPÍTULO 13..... 169

ANÁLISE COMPARATIVA DE MITIGAÇÃO UTILIZANDO OS CIMENTOS CPII – F 32, CPII E-40, CPIV E CPV COM METACAULIM EM AGREGADOS POTENCIALMENTE REATIVOS


Marina Munaretto Copetti
Cristiane Carine dos Santos
Ana Paula Maran
Silvane Santos da Silva
Régis Luís Wagner Mallmann

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140713>

CAPÍTULO 14..... 189

ANÁLISE PRELIMINAR DO COMPORTAMENTO DE PASTAS E ARGAMASSAS DE CIMENTO PORTLAND INCORPORADAS COM PÓ À BASE DE CACTO

Gabriella Cavalcante Souza
João Victor de Paiva Rodrigues
Yasmim Medeiros Rocha
Heber Sivini Ferreira




 <https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140714>

CAPÍTULO 15..... 201

UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS (POLÍMEROS REFORÇADOS POR FIBRAS) NAS PESQUISAS EXPERIMENTAIS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS AO CISALHAMENTO

Maicon de Freitas Arcine
Nara Villanova Menon

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140715>

CAPÍTULO 16	223
CONCRETO ECOLÓGICO: SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DA AREIA PELO PÓ DE VIDRO Rafael Dantas Ribeiro  https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140716	
CAPÍTULO 17	237
RESÍDUO DESCARTADO PELA SIDERÚRGICA DE CORUMBÁ-MS COMO POTENCIAL PARA REAPROVEITAMENTO NA CONSTRUÇÃO CIVIL Manoela da Silva Carvalho Fábio Kroll de Lima Felipe Fernandes de Oliveira Robson Fleming Ribeiro  https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140717	
CAPÍTULO 18	253
REDES NEURAIS ARTIFICIAIS APLICADAS NA MODELAGEM DA DIFUSÃO DE CO ₂ NO CONCRETO Emerson Felipe Felix Renan do Vale Leonel de Assis  https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140718	
SOBRE O ORGANIZADOR	272
ÍNDICE REMISSIVO	273

CONFIABILIDADE ESTRUTURAL DE PÓRTICOS PLANOS DE AÇO

Data de aceite: 01/07/2021

Danilo Luiz Santana Mapa

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Campus Universitário
Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil

Marcílio Sousa da Rocha Freitas

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Campus Universitário
Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil

Ricardo Azoubel da Mota Silveira

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Campus Universitário
Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil

RESUMO: Existem várias fontes de incerteza na análise estrutural que devem ser levadas em consideração ao se fazer uma avaliação adequada da segurança estrutural. Os métodos de confiabilidade permitem quantificar, de forma probabilística, a segurança de uma estrutura, uma vez que permite avaliar a probabilidade de violação dos estados limites. O presente trabalho visa realizar a análise de confiabilidade de pórticos planos de aço, por meio de análise estrutural avançada, considerando os efeitos da não linearidade geométrica e das ligações semirrígidas através de uma ferramenta

computacional desenvolvida em MATLAB. A ferramenta desenvolvida utiliza o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM), permitindo avaliar a probabilidade de falha de estruturas com comportamento não linear. Os critérios de falha de estruturas são expressos em termos das funções de desempenho do estado limite último e de serviço. Utilizando a ferramenta computacional desenvolvida, foi realizada a análise da confiabilidade estrutural de diversos exemplos numéricos de pórticos planos encontrados na literatura. Analisando os resultados obtidos e comparando com os encontrados por outros autores, foi possível validar a implementação computacional, atestando sua precisão e eficiência na análise de confiabilidade estrutural de pórticos de aço.

PALAVRAS-CHAVE: Confiabilidade estrutural, pórticos planos, análise estrutural avançada, ligações semirrígidas.

ABSTRACT: There are various sources of uncertainty in structural analysis and they should be taken into account in order to make proper assessment of structural safety. The reliability methods make it possible to quantify, in a probabilistic way, the safety of a structure, since it allows the evaluation of the limit states violation probability. In the present work, a computational tool was developed in MATLAB aims to perform the reliability analysis of two-dimensional steel frames, by advanced finite element structural analysis, considering the effects of geometric nonlinearity and semi-rigid connections. The tool developed employs the First Order Reliability Method (FORM), making it possible to evaluate

the safety level (probability of failure) of structures with nonlinear behavior. The failure criteria of structures are expressed in terms of the ultimate and serviceability limit state performance functions. Using the computational tool developed, the structural reliability analysis of several numerical examples of two-dimensional steel frames found in the literature was carried out. By analyzing the obtained results and comparing with the ones found by other authors, it was possible to validate the computational implementation, attesting its accuracy and efficiency in the structural reliability analysis of steel frames.

KEYWORDS: Structural reliability, 2D steel frames, advanced structural analysis, partially restrained connections.

1 | INTRODUÇÃO

A avaliação da segurança de pórticos metálicos considerando o comportamento em serviço do sistema estrutural é um desafio para os engenheiros. As normas de projeto estrutural que empregam o método dos estados limites são calibradas visando uma confiabilidade alvo para os elementos estruturais solicitados de forma isolada. Os coeficientes parciais de segurança obtidos por calibração no método dos estados limites são aplicados sobre as ações atuantes na estrutura e sobre as resistências nominais dos elementos estruturais, objetivando suprir todas as incertezas inerentes às variáveis de projeto. Entretanto, esse método semi-probabilístico não permite o conhecimento real dos níveis de segurança da estrutura em serviço.

O método dos estados limites presente nas normas de construção metálica é caracterizado por um tratamento racional da natureza estocástica das variáveis de projeto através da aplicação de coeficientes parciais de segurança calibrados com base em níveis aceitáveis de confiabilidade para vários estados limites. 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 e considerando o elemento estrutural como componente de um sistema estrutural.

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. Quando são utilizados dois valores (usualmente média e variância) para cada variável incerta, eles são chamados de métodos de nível II, e quando utilizam a função densidade de probabilidade das variáveis incertas para a determinação da probabilidade de falha dos estados limites 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 relacionados aos estados limites relevantes ao projeto 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. Também é possível determinar os estados limites mais críticos para uma determinada estrutura através da análise de confiabilidade, obtendo-se estruturas confiáveis em função do conhecimento do real nível de segurança com relação aos estados limites e determinação do estado limite governante da estrutura.

O objetivo geral deste artigo é apresentar os resultados das análises de confiabilidade estrutural de três pórticos metálicos planos via análise estrutural avançada, considerando o comportamento não linear geométrico e a flexibilidade das ligações. Foi utilizada nas análises de confiabilidade a ferramenta computacional desenvolvida por Mapa (2016). A ferramenta emprega os métodos FORM (*First Order Reliability Method*) e simulação de Monte Carlo para avaliar a probabilidade de falha de funções de desempenho formuladas para estados limites últimos de resistência e estados limites de serviço baseados em deslocamentos nodais. Os exemplos numéricos de análise de confiabilidade de pórticos metálicos planos apresentados atestaram a eficiência e precisão da ferramenta computacional desenvolvida por Mapa (2016) na avaliação do nível de segurança de estruturas com comportamento não linear.

2 I 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 pode ser calculada através da seguinte expressão (Ang e 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 devido à insuficiência de dados. 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 . 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 $\mu_Z = \mu_R - \mu_S$, $\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$, Φ é a função distribuição cumulativa

da distribuição normal padrão e β_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 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).

O índice de confiabilidade é então definido como a distância do ponto V^* até a origem:

$$\beta = |V^*| \quad (4)$$

Uma das etapas desse método é a transformação das variáveis U em variáveis V . Embora existam diferentes possibilidades para essa transformação utiliza-se normalmente a transformação de Nataf (Melchers, 1999) definida por:

$$V = \Gamma \sigma^{-1} (U - m) \quad (5)$$

Sendo m o vetor com as médias das variáveis U , σ a matriz diagonal contendo os desvios padrões 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 (ou de programação não linear) com uma restrição, tal que:

$$\begin{aligned} P: & \text{minimizar } |V| \\ & \text{Sujeito a } g(V) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

O problema de otimização apresentado na Eq. (6) pode ser resolvido por vários

algoritmos. Utiliza-se comumente o algoritmo denominado HLRF, desenvolvido por Hasofer e Lind (1974) e aprimorado por Rackwitz e Fiessler (1978). O processo iterativo gerado pelo algoritmo HLRF caminha em busca do ponto V^* resolvendo-se a seguinte equação:

$$V^{i+1} = \frac{1}{\|\nabla g(V^i)\|^2} \cdot [\nabla g(V^i)^T V^i - g(V^i)] \cdot \nabla g(V^i) \quad (7)$$

Para utilização do algoritmo HLRF, são úteis as seguintes relações:

$$g(V^i) = G(U^i) \quad (8)$$

$$V^i = \Gamma \sigma^{-1}(U^i - m) \quad (9)$$

$$\nabla g(V^i) = [(\Gamma \sigma^{-1})^{-1}]^T \nabla G(U^i) \quad (10)$$

Na Eq. (10) temos que $\nabla G(U)$ é o gradiente da função de falha no espaço original avaliado no ponto U e $\nabla g(V^i)$ é o gradiente da função de falha no espaço reduzido avaliado no ponto V^i . Ao ser obtido o ponto de projeto V^* determina-se o índice de confiabilidade calculando-se a norma do vetor que interliga a origem do sistema reduzido ao ponto V^* . Durante o processo iterativo checa-se a variação relativa do valor de β e interrompe-se o processo quando essa variação é inferior a uma tolerância estabelecida. De posse do índice de confiabilidade β , a probabilidade de falha pode ser obtida utilizando-se a Eq. (2).

A Figura 1 fornece uma representação gráfica do método analítico FORM com indicação da função de falha não linear $g(V)$ no espaço reduzido, do ponto de projeto V^* , da aproximação linear da função de falha no ponto de projeto e indicado o índice de confiabilidade β .

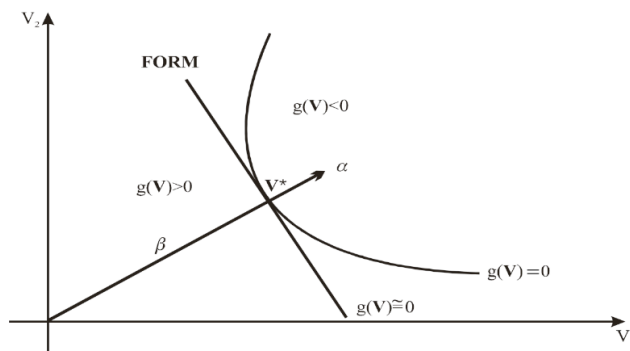


Figura 1. Representação gráfica do método analítico FORM (Adaptado de Sagrilo, 2004).

3 | ANÁLISE ESTRUTURAL AVANÇADA DE PÓRTICOS PLANOS

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 metálicas. A análise avançada de estruturas é caracterizada quando efeitos não lineares são considerados na formulação do elemento estrutural.

O comportamento não linear pode ser produzido por mudanças na geometria do pórtico durante o carregamento como mostra a Fig. 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.

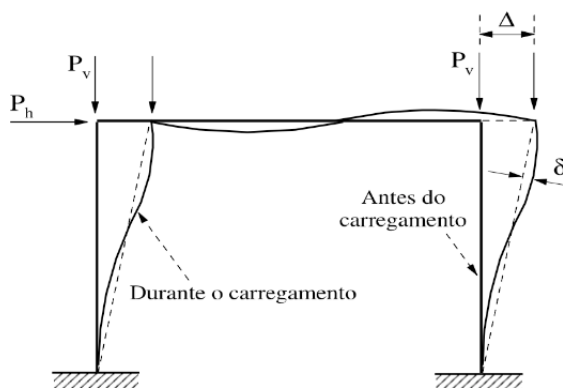


Figura 2. Representação gráfica dos efeitos $P-\Delta$ e $P-\delta$ (Adaptado de Silva, 2009).

Outra fonte de não linearidade que deve ser considerada em uma análise estrutural avançada diz respeito a flexibilidade das ligações. Ao se considerar as ligações entre os elementos do pórtico como semirrígidas obtém-se um comportamento mais próximo do real, existindo a transferência parcial de momento fletor entre os elementos do pórtico, o que também significa dizer que a ligação possui alguma rigidez.

A incorporação das ligações semirrígidas na análise estrutural se dá através de expressões analíticas, representando curvas momento-rotação, formuladas de forma a relacionar o momento fletor M atuante na ligação em função da rotação relativa θ . O modelo de representação do comportamento de ligações semirrígidas proposto por Richard e Abbott (1975), modelo matemático de potências com quatro parâmetros, descreve a relação momento-rotação como:

$$M(\theta) = \frac{(k - k_p)\theta}{\left[1 + \left|\frac{(k - k_p)\theta}{M_0}\right|^N\right]^{1/N}} + k_p\theta \quad (11)$$

Seus parâmetros podem ser definidos como: rigidez inicial (k) também denominada rigidez elástica; rigidez devido ao encruamento (k_p) da ligação; parâmetro definindo a curvatura do diagrama (N) e o momento de referência (M_0). Como na definição da função são necessários apenas quatro parâmetros e o resultado sempre fornece uma rigidez positiva, este modelo é considerado simples. Por possuir, além disso, boa eficiência computacional, ele vem sendo bastante utilizado para representação do comportamento de ligações semirrígidas (Silva, 2009).

No presente artigo, para realização da análise estrutural avançada dos pórticos metálicos planos foi adotado o sistema computacional CS-ASA desenvolvido por Silva (2009) em linguagem Fortran 95. O CS-ASA realiza análises numéricas avançadas estáticas e dinâmicas de estruturas metálicas baseado no método dos elementos finitos e foi utilizado no presente estudo para obtenção dos esforços internos e deslocamentos nodais em análise estática de pórticos metálicos planos considerando os efeitos da não linearidade geométrica e da flexibilidade das ligações, especificamente para ligações com comportamento momento-rotação não linear representado pelo modelo de Richard e Abbott (1975).

Na análise da confiabilidade de estruturas complexas, as funções de desempenho (equações de estados limites) geralmente são funções implícitas (não-analíticas) das variáveis aleatórias. Portanto a análise de confiabilidade realizada foi uma combinação do método de análise de confiabilidade FORM e o método dos elementos finitos determinístico presente no CS-ASA. A análise de confiabilidade dos pórticos planos no presente estudo foi realizada pela ferramenta computacional desenvolvida por Mapa (2016) em linguagem MATLAB (MathWorks, 2017) que possui funcionamento acoplado ao CS-ASA para avaliações dos estados limites a cada iteração do método analítico FORM.

Nas análises estruturais não lineares dos pórticos foi utilizada a formulação de elemento finito SOF-2 (Silva, 2009) presente no CS-ASA, estratégia de incremento constante do parâmetro de carga, estratégia de iteração a carga constante, fator de carga incremental fixado em 1% do carregamento total, 100 incrementos de carga, adotado o método de Newton-Raphson padrão como estratégia de solução não linear e critério de convergência por carga e deslocamento.

4 | FUNÇÕES 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. As funções de estado limite último de resistência definem a segurança contra carregamentos extremos durante a vida útil da estrutura e as funções de estado limite de serviço definem requisitos funcionais da estrutura. A seguir são apresentados os estados limites investigados no presente estudo.

4.1 Funções de estado limite último

Os elementos de viga-coluna que compõem a estrutura reticulada de um pórtico plano estão sujeitos a combinação de esforços solicitantes. O *Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design* (AISC, 2005) apresenta em seu capítulo H a condição a ser atendida pelas barras submetidas aos efeitos combinados de força axial e momento fletor na forma de equações de interação, que são equivalentes as equações encontradas no item 5.5.1.2 da norma NBR 8800 (ABNT, 2008). O presente estudo utiliza essa limitação fornecida pelas equações de interação, que podem ser expressas na forma de funções de desempenho para estados limites últimos de resistência pelas Equações (12) e (13) a seguir:

$$G(U) = 1 - \left(\frac{P_u}{P_n} + \frac{8}{9} \cdot \frac{M_{ux}}{M_{nx}} \right) \quad \text{se} \quad \frac{P_u}{P_n} \geq 0,2 \quad (12)$$

$$G(U) = 1 - \left(\frac{P_u}{2 \cdot P_n} + \frac{M_{ux}}{M_{nx}} \right) \quad \text{se} \quad \frac{P_u}{P_n} < 0,2 \quad (13)$$

Nas Equações (12) e (13): P_u é a força axial solicitante de tração ou de compressão, P_n é a força axial resistente nominal de tração ou de compressão, M_{ux} é o momento fletor solicitante em relação ao eixo de maior inércia e M_{nx} é o momento fletor resistente nominal em relação ao eixo de maior inércia. Os esforços resistentes nominais P_n e M_{nx} foram calculados para os elementos de viga-coluna dos pórticos conforme os procedimentos prescritos pelo LRFD (AISC, 2005).

4.2 Funções de estado limite de serviço

Para o critério de deslocamentos em serviço, a seguinte função de desempenho foi utilizada:

$$G(U) = 1 - \frac{\delta}{\delta_{\text{limite}}} \quad (14)$$

Sendo δ a componente do deslocamento nodal calculada e δ_{limite} o deslocamento máximo admissível do nó. Segundo Haldar e Mahadevan (2000), em geral são analisadas deflexões laterais nos nós de topo dos elementos de coluna do pórtico plano, limitadas pela altura do pórtico de modo que $\delta_{\text{limite}} = \text{altura}/400$, e são também analisadas deflexões

verticais no meio do vão dos elementos de viga do pórtico plano, limitadas pelo vão da viga de modo que $\delta_{limite} = \text{vão}/360$.

5 | EXEMPLOS NUMÉRICOS

Com o propósito de ilustrar a aplicação da ferramenta computacional de análise de confiabilidade desenvolvida por Mapa (2016), serão apresentados nas seções seguintes os resultados da análise de confiabilidade estrutural de três pórticos metálicos planos. No primeiro exemplo será apresentado um portico plano de um andar com ligações semirrígidas onde foram investigados os níveis de segurança com relação aos estados limites últimos e de serviço. No segundo exemplo é apresentado um pórtico de dois andares assimétrico com ligações semirrígidas onde foi investigado o nível de segurança com relação ao estado limite de serviço do deslocamento horizontal de um nó de topo de uma coluna do pórtico. No terceiro exemplo é apresentado um pórtico plano abatido biengastado fortemente não linear onde foi investigado o nível de segurança com relação ao estado limite de serviço de deslocamento vertical de um nó no meio do vão do pórtico. Em cada um desses exemplos é feita uma comparação entre os índices de confiabilidade obtidos por análise linear e não linear geométrica dos pórticos e também é feita uma comparação entre os índices de confiabilidade obtidos para os pórticos com ligações viga-coluna rígidas e semirrígidas com comportamento momento-rotação não linear e diferentes rigidezes das ligações.

5.1 Pórtico plano de um andar com ligações semirrígidas

Neste exemplo foi investigada a segurança estrutural para estados limites últimos (Equações 12 e 13) e de serviço (Equação 14) do pórtico plano apresentado na Fig. 3. A geometria, os carregamentos atuantes, as condições de apoio, a localização das ligações semirrígidas e as seções do pórtico são mostrados na Fig. 3. O pórtico é composto por duas colunas e uma viga, sendo que todos os elementos do pórtico são feitos do mesmo material e possuem a mesma seção transversal (perfil metálico W16x67). É assumido que todos os elementos do pórtico possuem contenções laterais adequadas, de modo que a capacidade do momento fletor resistente do elemento seja igual ao seu momento plástico.

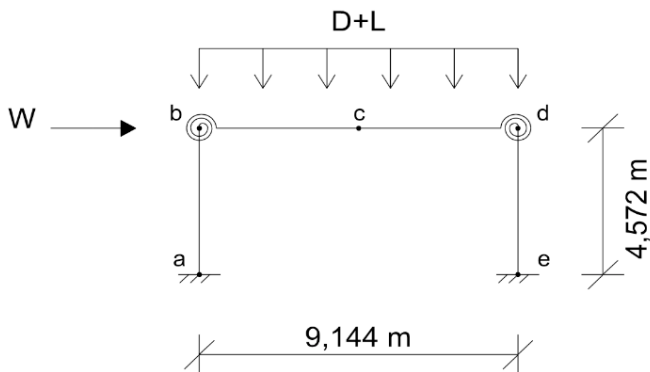


Figura 3. Pórtico plano de um andar com ligações semirrígidas.

Foram consideradas como aleatórias na análise de confiabilidade as variáveis: o carregamento permanente distribuído (D); o carregamento acidental distribuído (L); o carregamento concentrado devido ao vento (W); a área (A), o momento de inércia (I) e o módulo plástico (Z_x) da seção transversal dos elementos do pórtico; o módulo de elasticidade (E) e a tensão de escoamento (F_y) do material dos perfis metálicos que constituem os elementos do pórtico da Fig. 3. A Tabela 1 fornece a descrição estatística das variáveis aleatórias envolvidas na análise de confiabilidade estrutural: valores nominais, valores médios, coeficientes de variação e tipos de distribuição de probabilidade.

Variável	Unidade	Valor nominal	Valor médio	Coefficiente de variação	Tipo de Distribuição
E	MPa	199948,04	199948,04	0,06	Lognormal
A	cm ²	127,10	127,10	0,05	Lognormal
I	cm ⁴	39708,48	39708,48	0,05	Lognormal
Z_x	cm ³	2130,32	2130,32	0,05	Lognormal
F_y	MPa	248,21	260,62	0,10	Lognormal
D	kN/m	43,78	45,97	0,10	Lognormal
L	kN/m	16,05	16,05	0,25	Ext. Tipo I
W	kN	28,91	22,55	0,37	Ext. Tipo I

Tabela 1. Propriedades estatísticas das variáveis aleatórias segundo Gao (1994).

Inicialmente, o pórtico foi analisado assumindo como rígidas todas as ligações entre os elementos de viga e colunas. Foram feitas análises de confiabilidade estrutural, através de análise linear e não linear geométrica do pórtico para: estado limite de resistência última da viga bd sujeita a flexão composta; estado limite de resistência última em d da coluna de

sujeita a flexão composta; estado limite de serviço referente ao deslocamento horizontal em b ; e estado limite de serviço referente ao deslocamento vertical em c .

De modo a avaliar a influência da existência de ligações semirrígidas entre os elementos do pórtico na probabilidade de falha dos estados limites citados acima, foram feitas análises de confiabilidade estrutural considerando a presença de ligações semirrígidas em b e d (Figura 3). O comportamento momento-rotação não linear das ligações será considerado através do modelo matemático de potências com quatro parâmetros proposto por Richard e Abbott (1975). Foram adotadas três curvas momento-rotação, mostradas na Fig. 4, para representar o comportamento das ligações com rigidezes distintas. A Curva 1 representa ligações com rigidez elevada, a Curva 3 representa ligações com comportamento muito flexível e a Curva 2 representa ligações com rigidez intermediária. A descrição estatística das variáveis aleatórias que representam os quatro parâmetros do modelo de Richard e Abbott (1975) para as ligações flexíveis do pórtico é fornecida na Tabela 2, para cada uma das três curvas momento-rotação consideradas nas análises de confiabilidade.

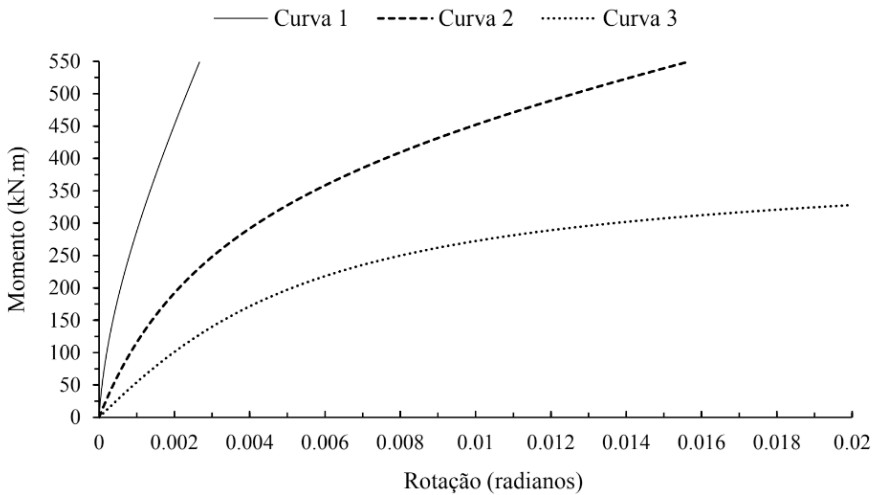


Figura 4. Curvas momento-rotação das ligações semirrígidas.

Variável aleatória	Médias			Coeficiente de variação	Tipo de Distribuição
	Curva 1	Curva 2	Curva 3		
k (kN.m/rad)	1,1298E+06	1,4688E+05	5,6492E+04	0,15	Normal
k_p (kN.m/rad)	1,1298E+05	1,1298E+04	1,1298E+03	0,15	Normal
M_0 (kN.m)	508,43	451,94	338,95	0,15	Normal
N	0,50	1,00	1,50	0,05	Normal

Tabela 2. Propriedades estatísticas dos parâmetros das ligações segundo Gao (1994).

Para propósito de comparação, os índices de confiabilidade obtidos no presente trabalho para os estados limites últimos e para estados limites de serviço em várias seções do pórtico plano de um andar foram resumidos em duas tabelas. Na Tabela 3 são resumidos os índices de confiabilidade obtidos mediante análise linear e não linear geométrica do pórtico com ligações rígidas entre a viga e as colunas. Na Tabela 4 são resumidos os índices de confiabilidade obtidos mediante análise não linear geométrica do pórtico com ligações semirrígidas cujo comportamento momento-rotação foi representado para cada uma das três curvas apresentadas na Fig. 4.

Estado limite	Localização	Carregamento	Análise Linear (β)	Análise não linear geométrica (β)
Resistência	Viga em d	$D+L$	3,04	3,02
	Coluna em d	$D+L$	2,78	2,76
Serviço	Deslocamento lateral em b	$D+L+W$	5,08	5,01
	Deflexão vertical em c	L	4,72	4,69

Tabela 3. Índices de confiabilidade obtidos para o pórtico com ligações rígidas.

Estado limite	Localização	Carregamento	Curva 1 (β_1)	Curva 2 (β_2)	Curva 3 (β_3)
Resistência	Viga em d ou c^*	$D+L$	3,23	3,91	2,10*
	Coluna em d	$D+L$	2,98	3,62	4,62
Serviço	Deslocamento lateral em b	$D+L+W$	4,92	4,65	4,32
	Deflexão vertical em c	L	4,53	4,11	3,61

Tabela 4. Índices de confiabilidade obtidos para o pórtico com ligações semirrígidas.

Analisando os índices de confiabilidade da Tabela 3 observa-se que o comportamento linear e não linear geométrico do pórtico plano de um andar analisado neste exemplo pouco se diferem. Os índices de confiabilidade obtidos com as análises linear e não linear geométrica são muito similares, embora os índices de confiabilidade da análise não linear indiquem uma probabilidade de falha ligeiramente maior para todos os estados limites analisados, pois a análise não linear resultou em maiores esforços internos e maiores

deslocamentos nodais calculados para o pórtico.

É interessante notar na Tabela 3 que os índices de confiabilidade correspondentes aos estados limites de serviço são muito maiores do que aqueles relacionados aos estados limites últimos de resistência, o que indica que os estados limites últimos são os estados limites governantes, ou seja, é esperado que a estrutura falhe primeiramente por critério relacionado à resistência do que por critério relacionado a deslocamentos excessivos no pórtico plano. O pórtico plano de um andar analisado é suficientemente rígido para não desenvolver um problema de deslocamentos excessivos em serviço.

Analisando a Tabela 4 observa-se que com a consideração das ligações semirrígidas, os índices de confiabilidade obtidos para os estados limites últimos e de serviço se alteram de forma significativa. Para os estados limites últimos de resistência, com a ocorrência da redistribuição de momentos devido a presença das ligações semirrígidas, era esperado que o momento na seção *d* diminuísse e o momento na seção *c* aumentasse, à medida que a rigidez das ligações fosse reduzida. O momento fletor máximo solicitante (momento de projeto) para a viga acaba sendo deslocado da seção *d* para a seção *c* quando a rigidez das ligações for baixa, como no caso do comportamento momento-rotação da Curva 3.

É interessante notar que na análise de confiabilidade do pórtico com ligações rígidas (Tabela 3), o estado limite com maior probabilidade de falha era aquele relacionado à falha da coluna por critério de resistência, mas à medida que a rigidez das ligações diminui, por exemplo quando se passou de um comportamento momento-rotação bastante rígido (Curva 1) para um comportamento bastante flexível (Curva 3), os índices de confiabilidade aumentaram para a coluna e diminuíram para a viga, tornando a viga mais propensa a falha do que as colunas no caso da Curva 3, sendo agora o estado limite de resistência da viga o estado limite governante (estado limite crítico) do pórtico, ou seja, o estado limite com maior probabilidade de falha.

Assim, para o pórtico considerado, a menor rigidez das ligações entre a viga e as colunas como no caso da Curva 3 teve um efeito benéfico para as colunas e um efeito prejudicial para a viga, o que pode levar à necessidade de redimensionamento do pórtico devido às mudanças significativas que ocorreram nos esforços de projeto (esforços máximos solicitantes) atuantes nos elementos do pórtico.

Os índices de confiabilidade relacionados aos estados limites de serviço diminuíram a medida que a rigidez das ligações foi sendo reduzida, o que era esperado, uma vez que a presença das ligações semirrígidas reduziu a rigidez global do pórtico analisado, e para o caso da Curva 3, o estado limite relacionado à deflexão vertical no meio do vão da viga passou a ter maior probabilidade de falha do que o estado limite de resistência da coluna. Portanto, se a flexibilidade nas ligações for significativa como no caso da Curva 3, critérios de segurança relacionados a estados limites de serviço tornam-se tão importantes quanto critérios relacionados a estados limites de resistência última.

5.2 Pórtico plano de dois andares assimétrico com ligações semirrígidas

Neste exemplo foi investigada a segurança estrutural relacionada ao estado limite de serviço de deslocamento horizontal do nó 1 do pórtico plano assimétrico apresentado na Figura 5. A geometria, as cargas atuantes, as condições de apoio, a discretização do pórtico em elementos finitos e a localização das seis ligações semirrígidas entre as vigas e as colunas são mostrados na Figura 5. O pórtico é composto por 11 pontos nodais, sendo que os nós 9, 10 e 11 estão engastados. Todos os elementos do pórtico são feitos do mesmo material e foram adotadas duas seções transversais diferentes, uma sessão associada a todas as vigas e outra seção associada a todas as colunas do pórtico.

O deslocamento lateral máximo permitido para o nó 1 do pórtico foi limitado em 25,4 milímetros, configurando o estado limite de serviço considerado na análise de confiabilidade. A função de desempenho que define o problema de confiabilidade foi expressa pela Eq. (14). Para o cálculo dos deslocamentos horizontais do nó 1 utilizou-se análise não linear geométrica, considerando inicialmente como rígidas as ligações entre as vigas e colunas do pórtico e posteriormente considerando como semirrígidas, com comportamento momento-rotação representado pelas três curvas mostradas na Figura 4, que representam o comportamento não linear de ligações com diferentes rigidezes.

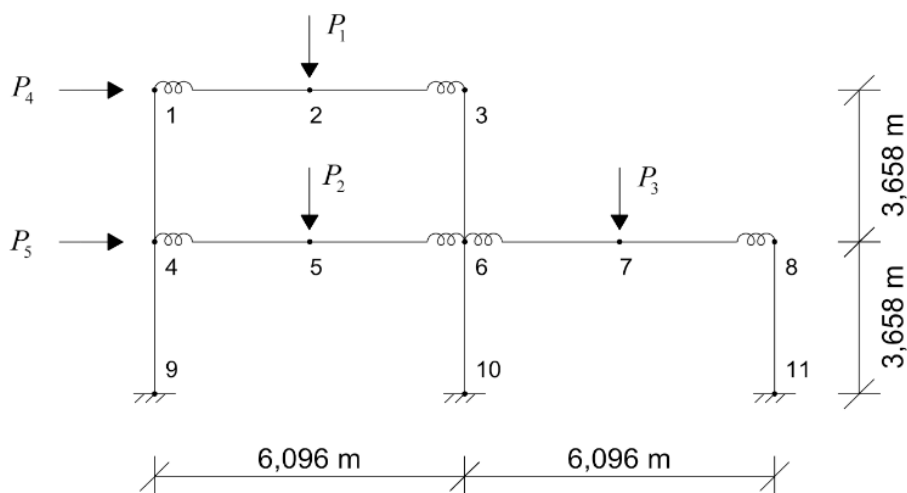


Figura 5. Geometria, cargas nodais e ligações semirrígidas do pórtico plano de dois andares assimétrico.

Na análise de confiabilidade estrutural do pórtico com ligações rígidas foram consideradas na análise de confiabilidade dez variáveis aleatórias: o módulo de elasticidade do material; a área e o momento de inércia da seção transversal das vigas; a área e o momento de inércia da seção transversal das colunas; três cargas verticais representando

carregamentos permanentes; e duas cargas horizontais representando carregamentos provenientes da ação do vento. A Tabela 5 fornece a descrição estatística das variáveis aleatórias envolvidas na análise de confiabilidade estrutural: médias, coeficientes de variação e tipos de distribuição de probabilidade.

A Tabela 6 resume os índices de confiabilidade obtidos pelo algoritmo FORM para o estado limite de serviço de deslocamento horizontal do nó 1 do pórtico plano da Fig. 5, considerando as ligações entre as vigas e as colunas como rígidas ou parcialmente restringidas e com base em análise não linear geométrica. Observa-se na Tabela 6 que a consideração das ligações semirrígidas altera de forma significativa o índice de confiabilidade do estado limite de serviço considerado na análise de confiabilidade. Analisando os índices β_0 , β_1 , β_2 e β_3 nota-se que com o decréscimo da rigidez das ligações houve um aumento na probabilidade de falha devido à redução da rigidez global do pórtico, resultando em maiores deslocamentos horizontais para o nó 1 do pórtico.

Comparando os índices de confiabilidade obtidos no presente trabalho com os índices obtidos por Haldar e Mahadevan (2000), nota-se na Tabela 6 boa concordância entre os valores, embora no presente trabalho os índices de confiabilidade obtidos resultam em maior probabilidade de falha em relação aos índices obtidos pelos outros autores para o mesmo estado limite de serviço de deslocamento horizontal do nó 1 do pórtico, fixado o limite de 25,4 milímetros para esse deslocamento horizontal.

Descrição	Variável	Unidade	Média	Coefficiente de variação	Tipo de Distribuição
propriedades do material e das seções transversais	E	MPa	199948,04	0,06	Lognormal
	A_{viga}	cm ²	76,13	0,05	Lognormal
	I_{viga}	cm ⁴	21519,16	0,05	Lognormal
	A_{coluna}	cm ²	114,19	0,05	Lognormal
cargas permanentes	I_{coluna}	cm ⁴	14318,36	0,05	Lognormal
	P_1	kN	44,48	0,10	Lognormal
	P_2	kN	88,96	0,10	Lognormal
cargas devido ao vento	P_3	kN	88,96	0,10	Lognormal
	P_4	kN	44,48	0,37	Ext. Tipo I
	P_5	kN	22,24	0,37	Ext. Tipo I

Tabela 5. Propriedades estatísticas das variáveis aleatórias segundo Haldar e Mahadevan (2000).

Estado limite de deslocamento horizontal do nó 1 com base em análise não linear geométrica	Tipo de ligação entre as vigas e as colunas do pórtico							
	Rígida (β_0)		Curva 1 (β_1)		Curva 2 (β_2)		Curva 3 (β_3)	
	Haldar e Mahadevan (2000)	Presente trabalho	Haldar e Mahadevan (2000)	Presente trabalho	Haldar e Mahadevan (2000)	Presente trabalho	Haldar e Mahadevan (2000)	Presente trabalho
Índice de Confiabilidade (β)	2,274	2,240	2,233	2,142	1,927	1,851	1,483	1,417

Tabela 6. Índices de confiabilidade obtidos para o estado limite de deslocamento horizontal do nó 1.

5.3 Pórtico plano abatido biengastado de Williams

Neste exemplo foi investigada a segurança estrutural relacionada ao estado limite de serviço de deslocamento vertical do nó 5 do pórtico abatido biengastado de Williams (1964) apresentado na Figura 6. A geometria, a carga atuante, as condições de apoio e a discretização do pórtico em elementos finitos são mostrados na Figura 6. O pórtico é composto por 9 pontos nodais e 8 elementos finitos, sendo que os nós 1 e 9 estão engastados. Todos os elementos do pórtico são feitos do mesmo material e possuem a mesma seção transversal.

O deslocamento vertical máximo permitido para o nó 5 do pórtico foi limitado em 2,54 milímetros, configurando o estado limite de serviço considerado na análise de confiabilidade. A função de desempenho que define o problema de confiabilidade foi expressa pela Eq. (14). Para o cálculo dos deslocamentos verticais do nó 5 utilizou-se análise estática linear e não linear geométrica, considerando como rígidas as ligações entre os elementos do pórtico.

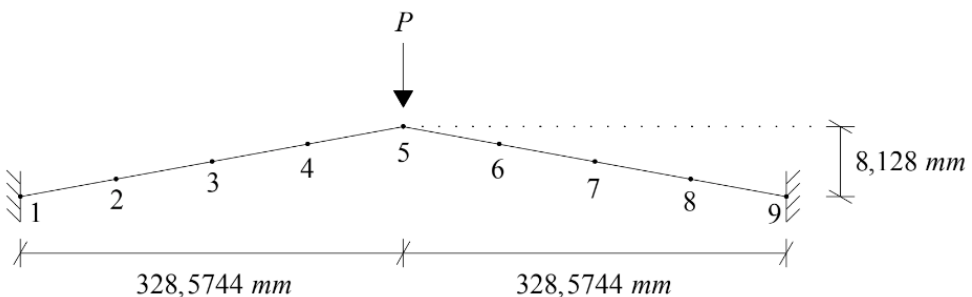


Figura 6. Geometria, carga atuante e discretização do pórtico plano abatido biengastado.

Foram consideradas na análise de confiabilidade quatro variáveis aleatórias: o módulo de elasticidade do material (E); a área (A) e o momento de inércia (I) da seção transversal de todos os elementos; e a carga vertical (P) atuante no nó 5. A Tabela 7 fornece

a descrição estatística das variáveis aleatórias envolvidas na análise de confiabilidade estrutural: médias, coeficientes de variação e tipos de distribuição de probabilidade.

Variável	Unidade	Média	Coeficiente de variação	Tipo de Distribuição
<i>E</i>	<i>MPa</i>	4826,33	0,10	Normal
<i>A</i>	<i>mm²</i>	1737,42	0,10	Normal
<i>I</i>	<i>mm⁴</i>	5512,09	0,10	Normal
<i>P</i>	<i>N</i>	-	0,15	Normal

Tabela 7. Propriedades estatísticas das variáveis aleatórias segundo Zhou (1992).

Utilizando os valores médios das variáveis aleatórias da Tabela 7, Haldar e Nee (1989) realizaram a análise não linear geométrica do pórtico de forma determinística e obtiveram o gráfico de carga vertical versus o deslocamento vertical do nó onde a carga está aplicada. A Figura 7 compara os resultados obtidos para o deslocamento vertical através de análise linear e não linear geométrica do pórtico no presente trabalho com os resultados obtidos por Haldar e Nee (1989) para análise não linear, variando a carga *P* de 0 a 100 *N*. Os resultados apresentados por Haldar e Nee (1989) mostraram certa concordância com os resultados obtidos no presente trabalho.

É possível observar no gráfico da Figura 7 que mesmo quando a carga externa aplicada não é elevada, o deslocamento obtido pela análise linear já se difere do deslocamento obtido pela análise não linear geométrica do pórtico, resultando a análise linear em menores deslocamentos para um mesmo nível de carregamento. Portanto, a Figura 7 demonstra o comportamento fortemente não linear do pórtico.

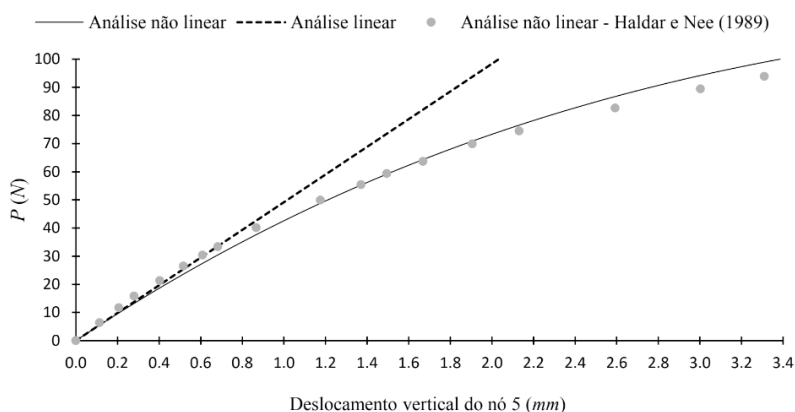


Figura 7. Trajetória de equilíbrio do pórtico plano abatido biengastado.

A Figura 8 mostra a variação do índice de confiabilidade do estado limite de serviço em relação à variação da média da carga vertical P aplicada. As curvas obtidas com base em análise linear e análise não linear geométrica obtidas por Zhou (1992) e no presente trabalho são mostradas na Figura 8. Os resultados das análises linear e não linear são consideravelmente diferentes.

As curvas obtidas no presente trabalho mostradas na Figura 8 ficaram abaixo das curvas obtidas por Zhou (1992) para as análises linear e não linear geométrica, indicando que no presente trabalho obteve-se sempre maior probabilidade de falha com relação aos resultados obtidos por Zhou (1992) para um mesmo valor médio da carga vertical, embora a distância entre as curvas seja pequena, mostrando boa concordância entre os resultados obtidos entre esse autor e o presente trabalho.

A Figura 8 mostra que a distância entre as curvas relativas as análises de confiabilidade com base em análise linear e não linear do pórtico aumenta à medida que o valor médio da carga vertical P aumenta, obtendo-se uma diferença cada vez maior entre os índices de confiabilidade obtidos por análise linear e não linear geométrica.

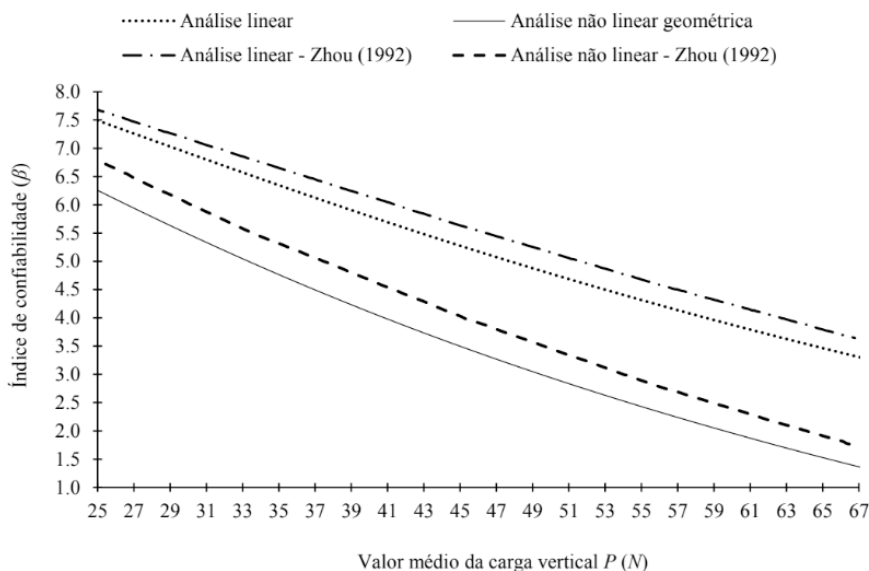


Figura 8. Índice de confiabilidade vs média da carga vertical P .

6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi realizada a análise de confiabilidade de três pórticos metálicos planos via análise estrutural avançada em elementos finitos, considerando os efeitos da não linearidade geométrica e da flexibilidade das ligações. As propriedades do material, as propriedades das seções transversais, os quatro parâmetros das ligações

semirrígidas do modelo de Richard e Abbott (1975) e os carregamentos externos atuantes foram considerados como variáveis aleatórias nas análises de confiabilidade estrutural dos pórticos planos realizadas pela ferramenta computacional em linguagem MATLAB (MathWorks, 2017) desenvolvida por Mapa (2016).

O método analítico FORM foi empregado na avaliação da probabilidade de falha de funções de desempenho formuladas para estados limites últimos de resistência e estados limites de deslocamentos em serviço, possibilitando avaliar o nível de segurança de estruturas com comportamento não linear. As respostas estruturais (esforços internos e deslocamentos nodais) dos pórticos planos analisados foram obtidas por análises estruturais avançadas realizadas pelo sistema computacional CS-ASA (Silva, 2009).

Através da análise dos resultados dos exemplos numéricos investigados e comparações com os resultados obtidos por outros autores (Tabela 6 e Figura 8), foi possível atestar a precisão e a eficiência da ferramenta computacional desenvolvida por Mapa (2016) na análise de confiabilidade estrutural de pórticos metálicos planos, especialmente quando são consideradas não linearidades geométricas bem como a não linearidade física das ligações semirrígidas.

A obtenção de índices de confiabilidade para diferentes estados limites e em diferentes seções do pórtico (Tabelas 3 e 4) permitiu avaliar os diferentes níveis de segurança de cada estado limite e também qual era o estado limite governante (aquele com maior probabilidade de falha). Os índices de confiabilidade obtidos através da análise não linear geométrica indicam uma probabilidade de falha ligeiramente maior para os estados limites últimos e de serviço analisados (Tabela 3), pois esse tipo de análise resultou em esforços internos e deslocamentos nodais em geral ligeiramente maiores que aqueles obtidos pela análise linear do pórtico plano.

Em estruturas fortemente não lineares, como o exemplo numérico do pórtico abatido biengastado apresentado, a influência da não linearidade geométrica nos índices de confiabilidade é significativa (Figura 8), mesmo quando os carregamentos externos não são elevados. Para essas estruturas, os resultados da análise linear são inaceitáveis, e a confiabilidade deve ser estimada com base em análise não linear geométrica.

A influência da flexibilidade das ligações entre as vigas e as colunas na confiabilidade estrutural dos pórticos metálicos planos é considerável e, portanto, a presença das ligações semirrígidas deve ser adequadamente considerada na análise e no projeto dos pórticos. Quando as ligações semirrígidas foram consideradas (Tabelas 4 e 6), os índices de confiabilidade obtidos para os estados limites de resistência e de serviço mudaram significativamente.

A influência das ligações semirrígidas na confiabilidade estrutural depende da função de estado limite analisada. No exemplo numérico do pórtico plano de um andar analisado observou-se que para estados limites de resistência a menor rigidez das ligações tem um efeito benéfico para as colunas e um efeito prejudicial para as vigas (Tabela 4), pois

devido a presença das ligações semirrígidas ocorreu redistribuição de momentos fletores no pórtico plano. Já para os estados limites de serviço, observou-se que a menor rigidez das ligações resulta em menores índices de confiabilidade (Tabelas 4 e 6), uma vez que a presença das ligações semirrígidas reduz a rigidez global da estrutura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, CNPq, FAPEMIG, Fundação Gorceix, PROPEC/UFOP e PROPP/UFOP o apoio fornecido para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABNT, 2008. *NBR 8800: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 237 p., Rio de Janeiro.

AISC, 2005. *Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design*. American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, USA.

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

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

Gao, L., 1994. *Stochastic finite element method for the reliability analysis of nonlinear frames with PR connections*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – The University of Arizona, USA.

Haldar, A., & Mahadevan S., 2000. *Reliability assessment using stochastic finite element analysis*. John Wiley & Sons, 344 p.

Haldar, A., & Nee, Ker-Ming, 1989. Elasto-plastic large deformation analysis of PR steel frames for LRFD. *Computers and Structures*, v. 31, n. 5, p. 811-823.

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

Madsen, H.O., Krenk, S., & Lind, N. C., 2006. *Methods of structural safety*. Dover Publications, 2. ed., 407 p.

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

MathWorks, 2017. *MATLAB Programming Fundamentals*. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/matlab_prog.pdf>. Acesso em: 30 de agosto de 2017.

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

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

Richard, R. M.; & Abbott, B. J., 1975. Versatile elastic-plastic stress-strain formula. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, vol. 101(4), p. 511-515.

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

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.

Williams, F. W., 1964. An approach to the nonlinear behavior of the members of a rigid jointed plane framework with finite deflections. *British Quarterly Journal of Mechanics & Applied Mathematics*, v. 17, n. 4, p. 451-469.

Zhou, Y, 1992. *Efficient stochastic finite element method for the reliability analysis of nonlinear frame structures*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – The University of Arizona, USA.

SOBRE O ORGANIZADOR

CARLOS AUGUSTO ZILLI - Possui graduação em Engenharia Civil e Matemática pela Universidade do Sul de Santa Catarina - UNISUL (2015 e 2005). É doutorando em Engenharia e Gestão do Conhecimento pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC (2021) e mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC (2020). Possui especialização em Avaliação de Imóveis e Perícias de Engenharia pelo Instituto de Pós-Graduação - FAPAN (2018), em Gestão de Obras e Projetos pela Universidade do Sul de Santa Catarina - UNISUL (2017), e em Engenharia de Segurança do Trabalho pelo Centro Universitário de Capivari - FUCAP (2016). É docente no Instituto Federal de Educação de Santa Catarina (IFSC) - Campus São Carlos. Possui experiência na área de Matemática, com ênfase em Educação Matemática e em Engenharia de Avaliações e Perícias, com ênfase em Inferência Estatística. Tem interesse em temas relacionados à Ciência de Dados, Engenharia de Avaliações e Planta de Valores Genéricos.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Adições minerais 123, 124, 169, 171, 173, 174, 175, 184, 185, 187

Aditivo natural 189, 191

Agregado miúdo 109, 117, 118, 119, 137, 138, 142, 149, 170, 223, 224, 225, 226, 227, 233, 234, 235, 236, 237, 239, 240, 251

Agregado reativo 169, 173, 185

Algoritmo genético 1, 5

Análise estrutural avançada 43, 44, 45, 48, 49, 60

Argamassa ecológica 237

C

Cinzas de olaria 138

Cisalhamento 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 40, 41, 42, 92, 150, 201, 202, 203, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 221, 233

Concreto 1, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 41, 42, 62, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 74, 75, 76, 77, 78, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 115, 116, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 130, 131, 132, 133, 136, 138, 139, 140, 143, 146, 147, 148, 149, 153, 162, 163, 164, 167, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 180, 184, 185, 186, 187, 190, 194, 199, 200, 201, 202, 203, 206, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 215, 216, 217, 218, 220, 221, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 251, 253, 254, 255, 256, 257, 260, 262, 266, 267, 268, 269, 270, 271

Concreto armado 1, 3, 6, 7, 8, 14, 15, 16, 17, 18, 26, 27, 28, 29, 31, 34, 41, 42, 64, 65, 66, 67, 68, 70, 71, 74, 75, 77, 78, 88, 170, 201, 202, 203, 206, 209, 210, 212, 213, 216, 217, 218, 220, 221, 253, 254, 268, 270, 271

Concreto leve 162, 163

Concreto permeável 162

Confiabilidade estrutural 43, 44, 45, 51, 52, 53, 56, 57, 59, 61, 62, 63, 270

Construção civil 1, 3, 67, 107, 109, 125, 126, 127, 136, 137, 138, 139, 140, 149, 151, 152, 153, 155, 156, 157, 158, 160, 161, 162, 163, 167, 170, 189, 191, 202, 205, 223, 224, 225, 226, 234, 235, 237, 239, 244, 251, 252, 254

D

Dimensionamento 1, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 15, 16, 18, 19, 20, 22, 23, 26, 27, 28, 29, 33, 34, 36, 41, 64, 65, 69, 74, 77, 78, 210, 211

E

Edificações sustentáveis 152

Engenharia de materiais 137, 152, 189, 235

Engenharia estrutural 2, 79, 80, 82, 83, 91, 92

F

Filler 138, 139, 142

I

Incêndio 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 25, 26, 27, 130, 133, 136

Inteligência artificial 253, 268

L

Lajes 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 18, 25, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 39, 40, 41, 42, 65, 67, 84, 87, 93, 206, 244, 245

Lajes lisas 28, 29, 30, 31, 40, 41, 42

Lajes nervuradas 1, 3, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 65

Ligações semirrígidas 43, 48, 49, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 60, 61, 62

M

Materiais de construção civil 137, 237

Material compósito 201, 203, 204, 215

Matéria-prima 152, 153, 154, 155, 162, 190, 224, 225, 238, 239

Método de Hertz 16, 18, 19

O

Opuntia ficus-indica 189, 190, 191

Otimização 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 46, 64, 65, 66, 67, 68, 70, 71, 75, 76, 77, 189

Otimização estrutural 1, 5

Otimização por enxame de partículas 64, 65, 66, 70, 77

P

Patologia 93, 109, 169, 170, 268

Piso misto de pequena altura 79, 80, 83, 89, 90, 92

Pó de balão 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252

Polímero 125, 126, 127, 129, 130, 131, 132, 136, 194, 195, 209, 217, 221

Polistireno expansível 162

Pórticos planos 43, 48, 49, 61

Pós-tensionado 93

Propriedades mecânicas e físicas 125, 127, 136

Punção 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 39, 40, 41, 42

R

RAA 108, 109, 110, 119, 123, 169, 171, 172, 173, 175, 176, 184, 185, 187

Reciclagem 137, 155, 159, 160, 163, 223, 224, 225, 234, 235, 236, 251

Reforço 86, 93, 123, 131, 167, 187, 201, 202, 203, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 220, 221

Resíduos da siderurgia 237

Resíduos sólidos 126, 137, 162, 163, 224, 238

Resina poliuretana vegetal 125, 127, 135

S

Simulação numérica 79, 80, 81, 83, 85, 87, 91, 92

Spray drying 189, 190, 191

Sustentabilidade 125, 126, 127, 137, 139, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 162, 224, 235, 252

V

Vidro 161, 201, 209, 213, 223, 224, 225, 226, 227, 229, 231, 232, 233, 234, 235, 236

Vigas de concreto armado 15, 16, 26, 64, 65, 66, 74, 78, 201, 206, 216, 218, 221

Vigas T 64, 210


COLEÇÃO DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA CIVIL



 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 @atenaeditora

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br



 Atena
Editora

Ano 2021

COLEÇÃO DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA CIVIL



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

Atena
Editora
Ano 2021