

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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará  
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> 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](http://www.arenaeditora.com.br)  
[contato@arenaeditora.com.br](mailto: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  
Jaciera 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>

<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>223</b>
CONCRETO ECOLÓGICO: SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DA AREIA PELO PÓ DE VIDRO Rafael Dantas Ribeiro  <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140716">https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140716</a>	
<b>CAPÍTULO 17</b> .....	<b>237</b>
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  <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140717">https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140717</a>	
<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>253</b>
REDES NEURAIS ARTIFICIAIS APLICADAS NA MODELAGEM DA DIFUSÃO DE CO <sub>2</sub> NO CONCRETO Emerson Felipe Felix Renan do Vale Leonel de Assis  <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140718">https://doi.org/10.22533/at.ed.02321140718</a>	
<b>SOBRE O ORGANIZADOR</b> .....	<b>272</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO</b> .....	<b>273</b>

## A SIMULAÇÃO NUMÉRICA NA RESOLUÇÃO DE DESAFIOS DA ENGENHARIA ESTRUTURAL

Data de aceite: 01/07/2021

Data de submissão: 29/04/2021

### Tainá Mascarenhas Borghi

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos  
São Carlos – São Paulo  
<https://orcid.org/0000-0002-7139-8541>

### Ana Lucia Homce de Cresce El Debs

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos  
São Carlos – São Paulo  
<https://orcid.org/0000-0001-6359-7674>

**RESUMO:** A Engenharia Estrutural é um ramo da Engenharia Civil que trata do planejamento, projeto, construção e manutenção de sistemas estruturais. O estudo do comportamento desses sistemas é amplamente realizado por meio de ensaios experimentais, mas, com o rápido avanço tecnológico, a simulação numérica vem possibilitando uma melhor compreensão dos fenômenos de maneira bem próxima à realidade. Além disso, quando tem-se a necessidade de avaliar muitos modelos, com alto grau de refinamento, um estudo experimental demandaria grande quantidade de recursos financeiros, humanos e de tempo, sendo, por vezes, inexecutável. Dessa forma, o presente capítulo traz uma visão geral de como ocorre uma simulação numérica e apresenta resultados de um estudo de caso, em que foi analisado numericamente um tipo estrutural inovador e em

ascensão no mercado mundial, chamado de piso misto de pequena altura ou *slim floor*. A partir da análise teórica e dos resultados do estudo de caso conclui-se que a simulação numérica é bastante acessível e permite encontrar resultados concretos sobre parâmetros que não foram analisados no ensaio experimental, ampliando o estudo de interesse.

**PALAVRAS-CHAVE:** Simulação numérica, Engenharia Estrutural, Piso misto de pequena altura.

### NUMERICAL ANALYSIS IN SOLVING CHALLENGES IN STRUCTURAL ENGINEERING

**ABSTRACT:** Structural Engineering is a branch of Civil Engineering that deals with the planning, design, construction and maintenance of structural systems. The study of these systems behavior is widely carried out through experimental tests. However, with the fast technological advancement, the numerical analysis has enabled a better understanding of the phenomena in a real way. In addition, when there is a need to evaluate many models, with a high degree of refinement, an experimental study would require a large amount of financial, human and time resources, being impracticable. Thus, this work provides an overview of a numerical analysis and presents the results of a case study, in which an innovative structural type on the world market, called *slim floor*, was numerically analyzed. From the theoretical analysis and the results of the case study, it is concluded that the numerical analysis is quite accessible and allows finding real results on parameters that were not

analyzed in the experimental test, expanding the study.

**KEYWORDS:** Numerical analysis, Structural Engineering, Slim floor.

## 1 | INTRODUÇÃO

Sistemas estruturais convencionais e inovadores são estudados diariamente no ramo da Engenharia Estrutural. Soluções cada vez mais econômicas, práticas e sustentáveis são apresentadas à indústria, colaborando para o crescimento do país. Os meios utilizados para esses estudos também são aprimorados a cada dia e, atualmente, modelos computacionais numéricos são utilizados com veemência na Engenharia Estrutural.

Não há dúvidas de que os ensaios experimentais, quando realizados em escala real e em condições semelhantes às existentes na prática, constituem a melhor forma de analisar o comportamento da estrutura. Entretanto, na Engenharia Estrutural, cada estrutura é única e replicar prédios, pontes, barragens e túneis, por exemplo, é uma tarefa impraticável. Assim, os ensaios experimentais se limitam a estudar elementos estruturais isolados ou em pequenos conjuntos, com parâmetros e condições pré-determinadas, sendo uma prática bastante consolidada no país.

Outro ponto a se considerar é a demanda financeira e de tempo para realizar ensaios, fatores que podem se tornar empecilhos quando tem-se a necessidade de ensaiar estruturas com muitos materiais ou de realizar muitas análises. Nesse contexto, a simulação numérica surge para complementar as práticas laboratoriais, visto que, a partir de resultados iniciais de um modelo físico já ensaiado, possibilita alcançar um maior número de análises e ampliar a abrangência dos resultados.

Dessa forma, por meio de uma análise teórica e um estudo de caso, esse capítulo apresenta a simulação numérica como solução para muitos desafios da Engenharia Estrutural. O estudo de caso trata de uma simulação numérica de um piso misto de pequena altura (*slim floor*), mostrando que, a partir de um estudo experimental pré-existente (calibração), é possível realizar inúmeras análises adicionais (estudo paramétrico) com o auxílio de programas computacionais.

Para o estudo de caso foi escolhido o *slim floor* por se tratar de um sistema estrutural inovador, que, além de possuir todas as qualidades das estruturas mistas convencionais, tem o adicional de reduzir a altura total do piso por meio do acoplamento da laje na altura da viga. Assim, na próxima seção são apresentados os conceitos fundamentais da simulação numérica e, em seguida, é mostrado um estudo de caso da simulação numérica utilizando o Método dos Elementos Finitos.

## 2 | SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A simulação numérica destina-se a representar o comportamento de um modelo

físico já ensaiado para que seja possível analisar outras características e parâmetros, conseguindo alcançar um maior número de avaliações e ampliar a abrangência dos resultados obtidos nos modelos físicos experimentados (BORGHI, 2020). Isso significa que, para a realização de uma simulação numérica, é necessário possuir resultados experimentais e empregar uma prática denominada calibração.

A representação numérica de um modelo físico costuma envolver diversas simplificações, fazendo com que o modelo numérico necessite de ajustes baseados em dados experimentais. A essa técnica dá-se o nome de calibração. Para a realização da calibração, é necessário desenvolver inicialmente um modelo numérico com geometria, propriedades dos materiais, condições de contorno e carregamento iguais às do modelo ensaiado experimentalmente. Então, deve-se ajustar parâmetros numéricos, a fim de obter resultados na modelagem que representem adequadamente os fenômenos e assemelhem-se aos obtidos experimentalmente (BORGHI, 2020).

Assim, a simulação é iniciada com a definição de um problema e criação de um modelo. A análise numérica é representada por um sistema de equações (tradução do problema de engenharia para a matemática), simplificado e aproximado por métodos, gerando o modelo final e ocorrendo em três etapas:

- Pré-processamento: consiste na definição dos parâmetros necessários para a execução da análise, gerando o arquivo de entrada de dados que contém a geometria, propriedades do material, condições de contorno e de carregamento e a malha.
- Processamento: se caracteriza pela execução em si, através de análises que podem ser lineares, não-lineares físicas e/ou geométricas, dinâmica, térmica, entre outras. Além disso, envolve a escolha dos critérios de convergência e das técnicas de solução.
- Pós-processamento: possibilita a visualização dos resultados, tanto de maneira gráfica quanto em forma de lista e figuras.

A Figura 1 retrata o fluxograma de uma simulação numérica.

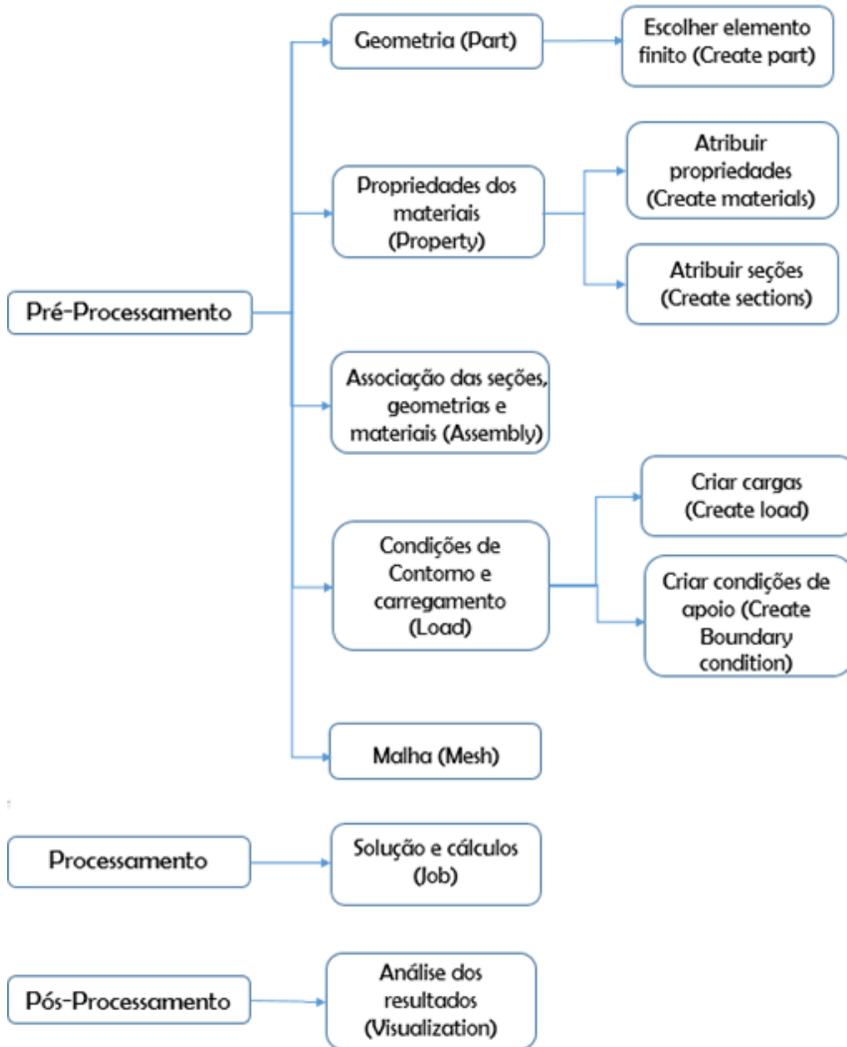


Figura 1: Fluxograma da análise numérica.

Observa-se que a primeira parte, de pré-processamento, é aquela em que são definidos os parâmetros de entrada e que exige mais esforço do analista. Nas fases de processamento e pós-processamento acontece o oposto, visto que o operador não mais interfere nos parâmetros de entrada e saída, sendo responsável, porém, pela análise dos resultados.

No processo de definição do problema em Engenharia Estrutural, pode-se encontrar desafios matemáticos de grande complexidade, sendo necessária a utilização de aproximações para resolvê-los. Com o rápido desenvolvimento tecnológico, os métodos numéricos se tornaram uma alternativa rápida, barata e precisa para encontrar soluções aproximadas. Em suma, métodos numéricos são a aplicação de algoritmos que ajudam na

formulação e resolução de problemas complexos, a partir de aproximações por operações aritméticas menos complexas.

Os métodos mais utilizados na engenharia são o Método dos Elementos Finitos (FEM), Método dos Elementos de Contorno (BEM), Método dos Volumes Finitos (FVM) e Método dos Elementos Discretos (DEM). O Método dos Volumes Finitos é mais utilizado em problemas da mecânica de fluidos ou que envolvam transferência de calor ou massa e o Método dos Elementos Discretos é aplicado em problemas de escoamento, movimento ou dinâmica de partículas discretas. Para a análise estrutural, os Métodos dos Elementos Finitos e dos Elementos de Contorno são os mais aplicados em softwares de modelagem numérica.

O Método dos Elementos Finitos trata-se de uma análise matemática em que um meio contínuo é discretizado (dividido) em pequenos elementos (malha) que são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos. Na Engenharia de Estruturas, o Método dos Elementos Finitos tem como objetivo a determinação do estado de tensão e de deformação de uma estrutura sujeita a ações externas, como carregamento e temperatura. Softwares como ABAQUS® e ANSYS® utilizam o FEM como método de aproximação.

O Método dos Elementos de Contorno (MEC) é um método matemático que utiliza equações integrais escritas no contorno do sólido (ROCHA, 2020). Uma vez encontrada a solução no contorno, no estágio de pós-processamento, as equações integrais são novamente usadas para calcular a solução em qualquer ponto no interior do contorno.

A simulação numérica é, atualmente, uma ferramenta essencial na resolução de problemas da Engenharia Estrutural. Sua aplicação tem permitido economia de tempo e de custos e ajudado a identificar falhas estruturais em diversos tipos de análises, como: análise estática linear/não-linear (tensões e deslocamentos); análise modal (modos e frequências naturais); de flambagem linear/não-linear; de transferência de calor; análises não-lineares com contato e montagem; análise dinâmica de resposta (vibrações, abalos sísmicos); de fadiga e de tolerância a dano (propagação de trincas); entre outras.

No processo de simulação numérica desenvolvido no estudo de caso foi utilizado o programa computacional ABAQUS®, que permite a construção, simulação e visualização dos resultados. Esse software utiliza o Método dos Elementos Finitos.

### 3 | ESTUDO DE CASO: PISO MISTO DE PEQUENA ALTURA

O piso misto de pequena altura, também conhecido como *slim floor*, tem o intuito de reduzir a altura total do sistema, através do acoplamento da laje na altura da viga metálica, sendo apoiada na mesa inferior da viga (Figura 2). Embora esse sistema estrutural seja usado desde o século XVIII, ele começou a ser estudado apenas em meados do século XX (BAILEY, 1999).

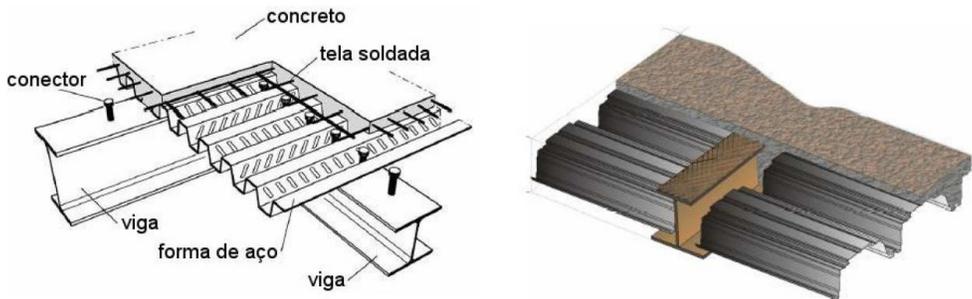


Figura 2: *Slim floor* (Ramos, 2010).

Algumas características desse sistema atribuem a ele vantagens únicas. O sistema apresenta um aumento da rigidez, da resistência ao fogo e às instabilidades locais da seção de aço devido à viga metálica estar revestida pelo concreto (DE NARDIN; EL DEBS, 2008). Outras vantagens também podem ser citadas, como o aumento da capacidade resistente; economia de material contribuindo com a ideia de construção sustentável; redução da mão de obra e do número de vigas secundárias; velocidade na construção; segurança e atendimento das demandas arquitetônicas modernas (MULLET, 1992).

Apesar de ser composto basicamente por vigas metálicas e lajes de concreto ou mistas, o *slim floor* consegue ter uma grande versatilidade, combinando diferentes características (BORGHI, 2020). Além de ser possível variar o tipo de laje empregada, o sistema permite também a variação da viga metálica. O *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB) é um dos perfis usualmente aplicados na composição do *slim floor*, sendo assimétrico, com a mesa inferior maior que a superior, com ranhuras na face externa da mesa superior, como mostrado na Figura 3.

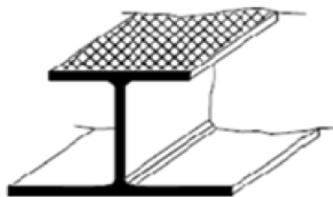


Figura 3: *Asymmetric Slimflor Beam*.

Assim, o presente estudo de caso visa realizar uma análise numérica do *slim floor* composto pelo *Asymmetric Slimflor Beam*, utilizando o Método dos Elementos Finitos. Como mencionado anteriormente, essa análise inicia-se pela calibração do modelo, com a definição da geometria, das propriedades mecânicas e das condições de contorno e carregamento. A segunda etapa foi composta pela elaboração de um estudo paramétrico,

analisando a influência de quatro parâmetros no comportamento a flexão da estrutura, sendo eles altura da capa de concreto, resistência do concreto, espessura da mesa inferior do perfil e resistência do perfil.

Para a realização da primeira fase da simulação numérica, encontrou-se na literatura dados e resultados de estudos experimentais já realizados para o *slim floor* composto pelo ASB. O programa utilizado na simulação numérica foi o ABAQUS®, no qual foram inseridas as características do estudo experimental estudados por Lawson, Mullet e Rackham (1997).

Nesse estudo foi utilizada uma laje mista do tipo Comflor 210, as vigas foram biapoiadas com 7500 mm de vão livre e seção transversal da laje de largura 1000 mm, carregada em quatro pontos, com cargas concentradas de mesmo valor. O esquema estrutural está ilustrado na Figura 4.

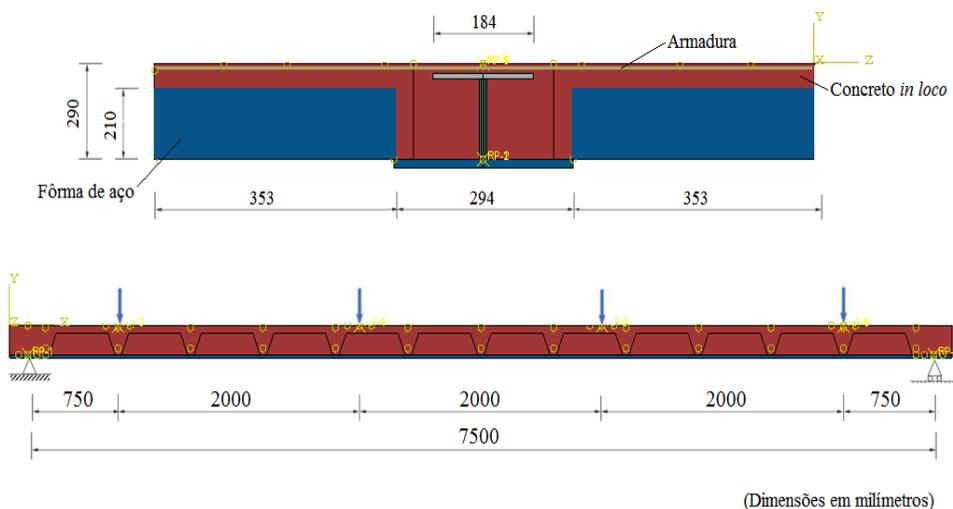


Figura 4: Modelo físico ASB Lawson, Mullet e Rackham (1997).

O aço utilizado na confecção do perfil é o S355, com módulo de elasticidade variando de 190 a 200 GPa, tensão de escoamento mínima de 355 MPa e tensão limite última entre 470 e 630 MPa. O concreto é da classe C25/30, porém, os ensaios de caracterização especificaram características mecânicas equivalentes às de um concreto classe C35/40. As propriedades são mostradas na Tabela 1.

Componentes	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	E (MPa)	$f_{cm}$ (MPa)	$f_t$ (MPa)
Alma	384	516	200000	-	-
Mesa Inferior	423	516	200000	-	-
Mesa Superior	410	516	200000	-	-
Concreto	-	-	33837	42	3,15

Tabela 1: Propriedades dos materiais - ASB (Lawson, Mullet e Rackham, 1997).

Essa tipologia dispõe também de resultados numéricos já realizados, como o de Ramos (2010), calibrado com o mesmo estudo experimental e modelado com o DIANA, servindo também de referência para essa calibração.

Os tópicos seguintes dizem respeito à definição de parâmetros do pré-processamento, como a escolha dos elementos finitos empregados, malha, relações constitutivas dos materiais e contato entre componentes. A geometria do modelo, propriedades dos materiais e condições de contorno e carregamento são aquelas definidas na fase de calibração e mostradas anteriormente.

### 3.1 Elemento finito

Na criação de um modelo numérico, é de suma importância a escolha apropriada do elemento finito utilizado para cada componente, apresentando características que representem adequadamente seu comportamento. É possível escolher entre os elementos de barra, viga, chapa, casca e sólido, de modo que ofereça bons resultados e tenha o menor custo computacional possível. A representação do modelo físico pode ser constituída por diferentes elementos finitos, formando um modelo composto.

Dessa forma, para a modelagem da laje de concreto o elemento finito utilizado foi o sólido C3D8R, para o perfil de aço foi utilizado elemento de casca tipo S4R e para as barras de reforço, a modelagem foi feita utilizando o elemento de viga B3. Esses elementos finitos estão representados na Figura 5.

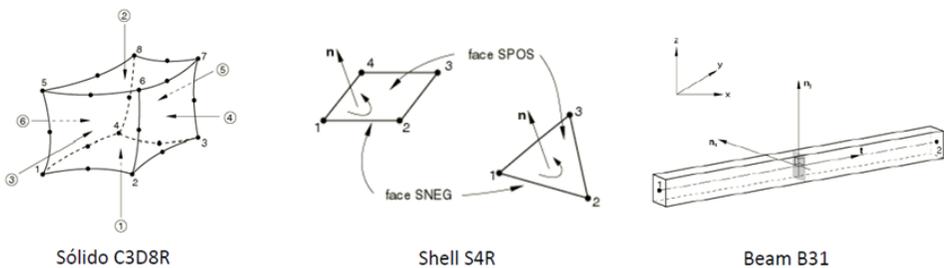


Figura 5: Elementos finitos para a representação do *slim floor* (Silva e Souza, 2018).

## 3.2 Malha

Dois fatores são importantes na definição da malha do modelo. O primeiro deles é o refinamento, pois uma malha mais refinada possibilita resultados mais próximos do real. O segundo fator é a regularização, garantindo que as dimensões de cada elemento sejam aproximadamente iguais. Assim, nas lajes de concreto em que foi utilizado o elemento finito sólido, buscou-se criar uma malha cujo os elementos tenham as três dimensões iguais, com tamanho de 50 mm x 50 mm x 50 mm. Para os perfis metálicos, que utilizaram o elemento finito de casca, a malha foi discretizada de forma que os elementos se assemelhem a quadrados, com tamanho de 50mm x 50mm, já para as armaduras o tamanho utilizado foi de 10 mm. As malhas das estruturas podem ser vistas na Figura 6.

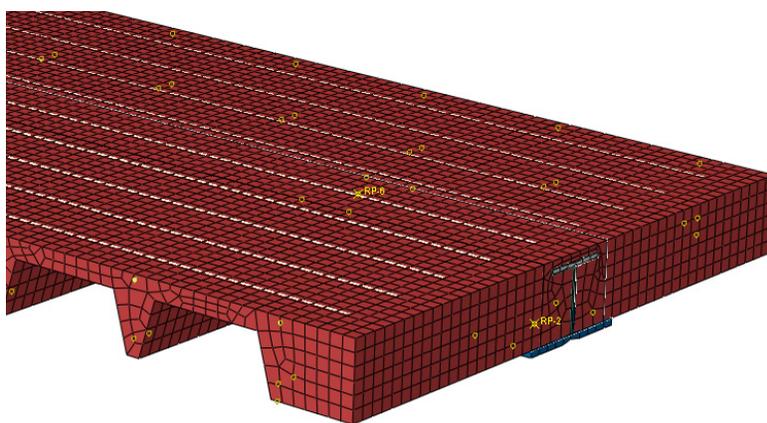


Figura 6: Geometria *Asymmetric Slimflor Beam* para calibração.

## 3.3 Relações constitutivas e contato entre componentes

Para uma simulação numérica completa e mais coerente, deve-se considerar o comportamento não-linear dos materiais envolvidos, sendo necessário definir modelos constitutivos que representem essa não linearidade. Assim, através da reprodução do comportamento tensão x deformação, foi adotado o modelo constitutivo bi-linear com encruamento isótropo para o perfil metálico. Para a representação das armaduras, o modelo constitutivo utilizado foi o elasto-plástico perfeito.

Na representação da não linearidade física do concreto, o modelo constitutivo utilizado foi o Concrete Damaged Plasticity (CDP). O comportamento do concreto comprimido e tracionado tem curvas tensão x deformação diferentes, sendo que, para a tração, deve-se levar em consideração o efeito do concreto entre fissuras (Tension Stiffening). Assim, deve-se escolher um modelo que melhor retrate o comportamento do concreto à tração e à compressão, sendo utilizado para representar o comportamento do concreto à compressão

o modelo de Carreira e Chu (1986) e para o comportamento do concreto à tração o de Polak e Genikomsou (2015).

Além disso, para utilizar o CDP no ABAQUS® e representar corretamente o comportamento do concreto, são definidos parâmetros, como ângulo de dilatância, excentricidade, relação entre a resistência à compressão biaxial e uniaxial, fator de forma e viscosidade. Os valores dos parâmetros utilizados no presente trabalho são mostrados na Tabela 2.

Parâmetro	Valor
Ângulo de dilatância	36°
Excentricidade	0,06
$f_{b0} / f_{c0}$	1,16
Fator de forma	0,6667
Viscosidade	0,0001

Tabela 2: Parâmetros para o Concrete Damaged Plasticity.

Em um modelo numérico, além das não linearidades físicas e geométricas, é necessário definir também as não linearidades de contato, principalmente por se tratar de ligações mistas, garantindo que a laje de concreto e o perfil metálico tenham comportamento conjunto. Assim, deve-se escolher a vinculação entre as partes, sendo que para as armaduras e a laje de concreto foi utilizado o comando “Embedded region”, simulando a aderência do concreto armado com restrições referentes a um corpo embutido em outro. Para o contato entre o perfil metálico e a laje de concreto foi escolhida a ferramenta de interação “Surface-to-surface contact”, sendo definido o comportamento normal como “Hard contact”, em que a penetração entre as superfícies é considerada imperceptível, e o comportamento tangencial com a formulação “Penalty”, permitindo o movimento relativo das superfícies com um coeficiente de atrito igual a 0,4.

### 3.4 Calibração

A fase de calibração do modelo foi feita definindo inicialmente a geometria, as propriedades dos materiais e as condições de contorno e carregamento, de acordo com o estudo experimental de Lawson, Mullet e Rackham (1997), mostradas anteriormente.

O processo de calibração foi feito a partir da comparação da curva momento x deslocamento no meio do vão do estudo experimental com o numérico. Para a realização desse procedimento, foi executado uma análise de cada parâmetro separadamente, avaliando sua influência no comportamento da estrutura, para que, posteriormente, fosse feita a variação combinada dos parâmetros. Foram realizadas análises preliminares, fixando parâmetros que não exerciam influência significativa e variando aqueles que ajudavam a definir melhor o modelo.

Assim, foi implementado o comportamento não-linear do concreto e parâmetros como ângulo de dilatância, excentricidade e viscosidade sofreram variações. Além deles, a malha e o coeficiente de atrito também foram variados a fim de se obter a curva numérica mais próxima possível da experimental. Dessa forma, após a realização da calibração, obteve-se a curva momento x deslocamento no meio do vão mostrada na Figura 7.

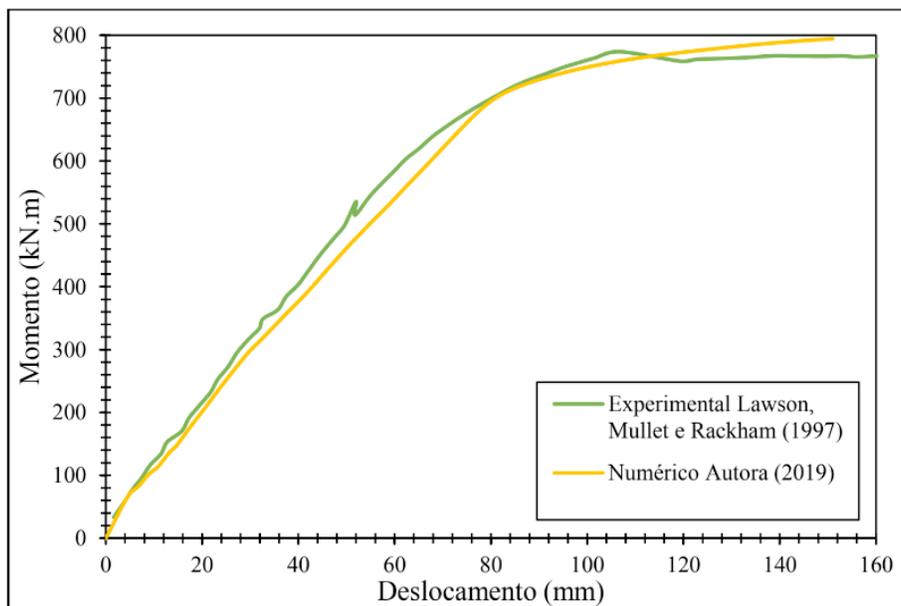


Figura7: Calibração da *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB).

A calibração da ASB mostrou que o modelo numérico desenvolvido no presente trabalho apresentou resultados compatíveis com o experimental, com erro relativo ao momento máximo de apenas 5,4%. Na fase linear, as curvas numérica e experimental ficaram quase sobrepostas.

Os modos de falha também foram comparados, a fim de comprovar que o comportamento desenvolvido pelo modelo numérico está de acordo com o experimental. Assim, observou-se que em ambos os estudos, a falha ocorreu quando o momento no meio do vão atingiu aproximadamente 790 kN.m, com o esmagamento do concreto, apresentando fissuras longitudinais no topo da laje, na região sobre a mesa do perfil metálico. A Figura 8 indica a deformada do piso misto de pequena altura mostrada no ABAQUS®.

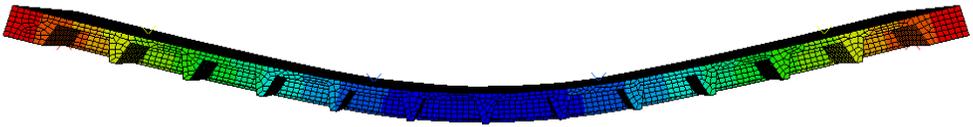


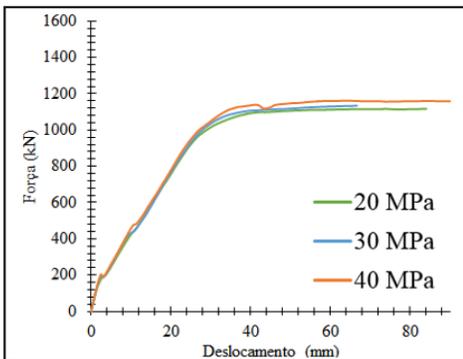
Figura 8: Estrutura deformada – Exemplo *Asymmetric Slimflor Beam* (ASB).

Os resultados mostrados permitem concluir que os modelos numéricos desenvolvidos são confiáveis, suficientemente precisos e podem ser usados para prever o comportamento a flexão do *slim floor*, estando o modelo calibrado.

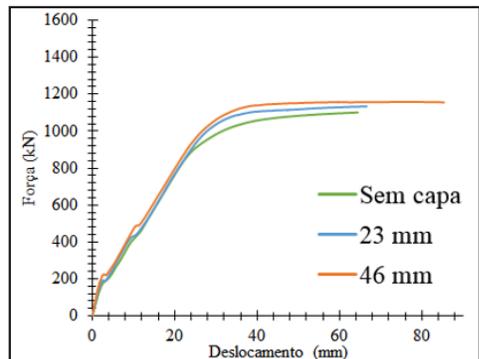
### 3.5 Análise paramétrica

A análise numérica é muito utilizada para extrapolar os resultados obtidos em estudos experimentais. Dessa forma, realiza-se a calibração a fim de encontrar o modelo que represente fielmente o ensaio realizado, sendo possível variar parâmetros para entender a influência deles no comportamento da estrutura. A essa prática dá-se o nome de estudo paramétrico e no presente capítulo foi realizada para entender a influência de quatro parâmetros no comportamento a flexão do piso misto de pequena altura.

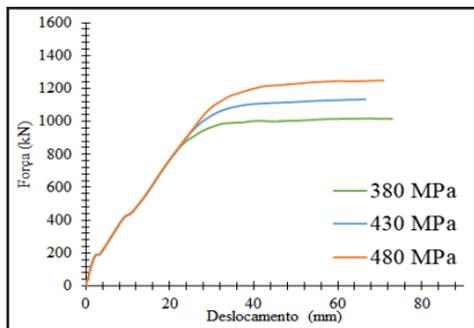
Por meio de revisão bibliográfica foram escolhidos os parâmetros resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ), altura da capa de concreto ( $h_c$ ), resistência mecânica do perfil metálico ( $f_y$ ) e espessura da mesa inferior do perfil metálico ( $t_b$ ). O estudo paramétrico foi realizado em relação à curva força x deslocamento no meio do vão. A Figura 9 apresenta os resultados obtidos.



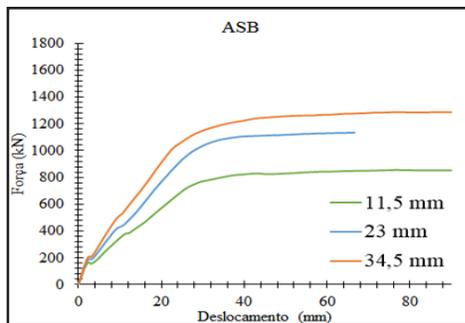
a) Resistência do concreto



b) Altura da capa de concreto



c) Resistência do perfil metálico



d) Espessura da mesa inferior do perfil

Figura 9: Curvas força x deslocamento - Estudo paramétrico.

Com base nos resultados obtidos mostrados na Figura 9, nota-se que a resistência do concreto e a altura da capa de concreto (Figura 9 (a) e (b)) pouco influenciaram no comportamento à flexão do *slim floor*. Para ambos os parâmetros, aumentando os seus valores, aumentou-se levemente a força máxima, sem afetar a rigidez da estrutura.

Por outro lado, a resistência do perfil metálico e a espessura da mesa inferior do perfil (Figura 9 (c) e (d)) exerceram forte influência no comportamento à flexão da estrutura. Percebe-se que a resistência do perfil tem grande influência na capacidade resistente última, porém a rigidez não é afetada. Já com o aumento da espessura da mesa inferior, ocorre um acréscimo considerável tanto na capacidade resistente quanto na rigidez do sistema.

## 4 | CONCLUSÕES

A simulação numérica no âmbito da Engenharia Estrutural se apresenta como uma alternativa aos ensaios experimentais, à medida que permite a extrapolação de resultados, economizando tempo e dinheiro e possibilitando uma melhor compreensão dos fenômenos. O Método dos elementos finitos é o mais utilizado em softwares de simulação numérica e permite a obtenção de resultados bem próximos aos reais.

A partir do estudo de caso pode-se concluir que a simulação numérica é bastante acessível e, por meio da etapa de calibração, permite encontrar resultados compatíveis com os ensaios experimentais. Assim, após essa etapa, é possível encontrar novos resultados sobre parâmetros que não foram ensaiados, ampliando o estudo de interesse. Isso foi mostrado na simulação numérica do *slim floor*, em que os resultados obtidos na calibração mostraram uma boa concordância com aqueles obtidos no estudo experimental e foi possível analisar a influência de quatro parâmetros no comportamento à flexão desse sistema estrutural.

Assim, por meio de uma análise teórica e um estudo de caso, esse capítulo mostrou

que a simulação numérica pode ser aplicada na Engenharia Estrutural, resolvendo inúmeros gaps dos estudos experimentais e ampliando o conhecimento acerca da estrutura estudada.

## REFERÊNCIAS

BAILEY, C. G. **The behaviour of asymmetric slim floor steel beams in fire.** Journal of Constructional Steel Research. v. 50, p. 235-257, 1999.

BORGHI, T. M. **Contribuição ao estudo do piso misto de pequena altura: análise numérica das tipologias.** Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2020.

CARREIRA, D. J.; CHU, K. **Stress-strain relationship for plain concrete in compression.** ACI Journal, vol. 82, pp. 797–804. 1985.

DE NARDIN, S; EL DEBS, A. L. H. C. **Avaliação da influência da posição dos conectores de cisalhamento no comportamento de vigas mistas parcialmente revestidas.** Revista Escola de Minas. Ouro Preto, v.61, n.2, p.239-247, 2008.

LAWSON, R. M.; MULLET, D. L.; RACKHAM, J. W. **Design of Asymmetric Slimflor Beams using Deep Composite Decking.** Relatório Técnico P175. The Steel Construction Institute, 1997.

MULLET, D. L. **Slim Floor Design and Construction.** Relatório Técnico P110. The Steel Construction Institute, 1992.

POLAK, M. A.; GENIKOMSOU, A. S. **Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS.** Engineering Structures. n. 98, p. 38-48, 2015.

RAMOS, A. L. **Análise numérica de pisos mistos aço-concreto de pequena altura.** Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2010.

ROCHA, M. **Análise da fratura coesiva com base em formulações enriquecidas do Método dos Elementos de Contorno tridimensional.** 2020. 189p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

SILVA, E. N.; SOUZA, A. S. C. **Simulação numérica do comportamento de vigas mistas de aço e concreto protendidas.** Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, [s.l.], v. 15, n. 1, p.52-68. 2018. Universidade Federal de Goiás.

## **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](http://www.atenaeditora.com.br)

 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

 @atenaeditora

 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](http://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

 **Atena**  
Editora

Ano 2021

# COLEÇÃO DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

## ENGENHARIA CIVIL



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

**Atena**  
Editora  
Ano 2021