

COLEÇÃO

DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO



ERNANE ROSA MARTINS
(ORGANIZADOR)

 **Atena**
Editora
Ano 2021

COLEÇÃO
DESAFIOS
DAS
ENGENHARIAS:

ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO



ERNANE ROSA MARTINS
(ORGANIZADOR)

Atena
Editora
Ano 2021

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes editoriais

Natalia Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

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
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Daniel Richard Sant’Ana – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª 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
Profª Drª 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
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Profª Drª 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
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª 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
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Ribeiro Simon Cavalcanti – Universidade Católica do Rio de Janeiro
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
Profª Drª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª 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
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural 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
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª 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 Gonçalves 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

Coleção desafios das engenharias: engenharia de computação

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Maiara Ferreira
Indexação: Gabriel Motomu Teshima
Revisão: Os autores
Organizador: Ernane Rosa Martins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C691 Coleção desafios das engenharias: engenharia de computação / Organizador Ernane Rosa Martins. - Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-387-0

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.870211808>

1. Engenharia da computação. I. Martins, Ernane Rosa (Organizador). II. Título.

CDD 621.39

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos - CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa - Paraná - Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

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

DECLARAÇÃO DA EDITORA

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

APRESENTAÇÃO

A Engenharia de Computação tem como definição ser o ramo da engenharia que se caracteriza pelo projeto, desenvolvimento e implementação de sistemas, equipamentos e dispositivos computacionais, segundo uma visão integrada de hardware e software, apoiando-se em uma sólida base matemática e conhecimentos de fenômenos físicos. O objetivo é a aplicação das tecnologias de computação na solução de problemas de Engenharia.

Deste modo, este livro, aborda diversos aspectos tecnológicos computacionais, tais como: o desenvolvimento de um jogo de RPG acessível em LIBRAS; uma reflexão quanto à necessidade de aplicação de supressores de surto como proteção de transformadores devido a eventos transitórios em manobras de disjuntores; um algoritmo para geração de contorno 2D envolvendo regiões irregulares; avaliação da influência das tensões residuais e imperfeições geométricas iniciais em colunas de aço submetidas à flexão em torno do eixo de menor inércia; os esforços em estruturas laminares, de características de geometria e carregamentos diversos através da implementação computacional de um elemento finito sólido hexaédrico de 8 nós programado com uma linguagem computacional de alto nível; uma análise computacional realizada através do programa SAP2000; a estabilidade e as vibrações de anéis e tubulações apoiados em uma fundação elástica de Pasternak; um controlador neural para dois elos de um robô manipulador de três graus de liberdade (3 GDL); uma ferramenta de autoria para livros relacionados a área da educação; um aplicativo com propósito de aumentar a taxa de reciclagem e minimizar os danos ambientais devido ao descarte incorreto de resíduos na natureza; a conscientização de crianças e adolescentes sobre as ocorrências de bullying; uma aplicação web interativa, de fácil utilização e interface amigável, por meio do pacote Shiny, destinada aos tópicos de intervalo de confiança e dimensionamento de amostra para o parâmetro proporção; segmentar e detectar, por meio de redes neurais convolutivas, as pás dos raspadores de escória em painéis de ferro gusa do Reator Kambara de uma siderúrgica; integrar a Biblioteca Digital de Artigos (IFPublica) e a Plataforma de Digital de Inscrição e Administração de Projetos (PDIAP), por meio de adaptações nos dois projetos, para impedir erros humanos e automatizar o processo de cadastro de artigos do PDIAP na base de dados do IFPublica.

Assim, espero que a presente obra venha a se tornar um guia aos estudantes e profissionais da área de Engenharia de Computação, auxiliando-os em diversos assuntos relevantes da área, fornecendo a estes novos conhecimentos para poderem atender as necessidades informacionais, computacionais e de automação das organizações de uma forma geral. Por fim, agradeço aos autores por suas contribuições na construção desta importante obra e desejo muito sucesso a todos os nossos leitores.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

A ELASTO-PLASTIC CONSTITUTIVE MODEL BASED ON CHABOCHE KINEMATIC HARDENING OF ALUMINUM ALLOY 7050-T7451

Renzo Fernandes Bastos

Daniel Masarin

Ernesto Massaroppi Junior

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8702118081>

CAPÍTULO 2..... 11

ACANNO: UM JOGO DE RPG COM UMA PROPOSTA DE ACESSIBILIDADE USANDO LIBRAS

Gabriel Barroso da Silva Lima

Marcos Roberto dos Santos

Almir de Oliveira Costa Junior

Jucimar Maia da Silva Junior

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8702118082>

CAPÍTULO 3..... 23

A IMPORTÂNCIA ATUAL DE ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS PARA DEFINIÇÃO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES CONTRA SOBRETENSÕES E AS APLICAÇÕES RECENTES COM A INSTALAÇÃO DE SUPRESSORES DE SURTO

Nelson Clodoaldo de Jesus

João Roberto Cogo

Luiz Marlus Duarte

Luis Fernando Ribeiro Ferreira

Éverson Júnior de Mendonça

Leandro Martins Fernandes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8702118083>

CAPÍTULO 4..... 38

ALGORITMO PARA GERAÇÃO DE CONTORNO DE MALHAS RETANGULARES PARA CÁLCULO DE DIFERENÇAS FINITAS

Pedro Zaffalon da Silva

Neyva Maria Lopes Romeiro

Rafael Furlanetto Casamaximo

Iury Pereira de Souza

Paulo Laerte Natti

Eliandro Rodrigues Cirilo

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8702118084>

CAPÍTULO 5..... 53

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DE PILARES DE AÇO SOB A INFLUÊNCIA DE TENSÕES RESIDUAIS E IMPERFEIÇÕES GEOMÉTRICAS INICIAIS

Jefferson Alves Ferreira

Giovani Vitório Costa
Harley Francisco Viana
Renata Gomes Lanna da Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8702118085>

CAPÍTULO 6..... 70

ANÁLISE DE ESTRUTURAS LAMINARES UTILIZANDO UM ELEMENTO SÓLIDO DE BAIXA ORDEM ENRIQUECIDO COM MODOS INCOMPATÍVEIS

Erijohnson da Silva Ferreira
William Taylor Matias Silva
Sebastião Simão da Silva
Adenilda Timóteo Salviano
José Lucas Pessoa de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8702118086>

CAPÍTULO 7..... 84

ANÁLISE ESTRUTURAL DO EDIFÍCIO SEDE DA PROCURADORIA GERAL DA REPÚBLICA: O ESTUDO DE CASO DO BLOCO “A”

Stefano Galimi
Márcio Augusto Roma Buzar
Marco Aurélio Bessa
Leonardo da Silveira Pirillo Inojosa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8702118087>

CAPÍTULO 8..... 103

ANÁLISE ESTRUTURAL DO EDIFÍCIO SEDE DA PROCURADORIA GERAL DA REPÚBLICA: O ESTUDO DE CASO DO BLOCO “B”

Stefano Galimi
Márcio Augusto Roma Buzar
Marco Aurélio Bessa
Marcos Henrique Ritter de Gregorio

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8702118088>

CAPÍTULO 9..... 119

APPLICATION OF A MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION PARETO APPROACH TO DESIGN THE SDRE CONTROLLER FOR A RIGID-FLEXIBLE SATELLITE

Luiz Carlos Gadelha de Souza

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8702118089>

CAPÍTULO 10..... 131

APPLICATION OF DEEP LEARNING FOR ANALYSIS OF CRACKS IN PELLET FALLING TESTS

Marconi Junio Henriques Magnani
Jorge José Fernandes Filho
Thyago Rosa Souza
Marco Antonio de Souza Leite Cuadros

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180810>

CAPÍTULO 11	143
FLAMBAGEM E VIBRAÇÃO DE ANÉIS E TUBULAÇÕES ESBELTAS EM UMA FUNDAÇÃO ELÁSTICA	
Mariana Barros dos Santos Dias Paulo Batista Gonçalves	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180811	
CAPÍTULO 12	155
CALIDAD ÁGIL: PATRONES DE DISEÑO EN UN CONTEXTO DE DESARROLLO DIRIGIDO POR PRUEBAS	
Anna Grimán Padua Manuel Capel Tuñón Eladio Garví	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180812	
CAPÍTULO 13	168
CONTROLE NEURAL DE DOIS ELOS DE UM ROBÔ DE TRÊS GRAUS DE LIBERDADE	
José Antonio Riul Paulo Henrique de Miranda Montenegro	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180813	
CAPÍTULO 14	181
SUBOPTIMAL CONTROL ON NONLINEAR SATELLITE SIMULATIONS USING SDRE AND H-INFINITY	
Alessandro Gerlinger Romero Luiz Carlos Gadelha de Souza	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180814	
CAPÍTULO 15	193
CREATE REALITY IN BOOKS (CRINB) - PROPOSTA DE FERRAMENTA DE AUTORIA DE LIVROS COM REALIZADADE AUMENTADA	
Lucas Velho Gomes Felipe Zunino Gabriel Abreu Freire Sidney Ferreira Coutinho Rogério Grijo Biazotto Eduardo Henrique Gomes Nelson Nascimento Júnior	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180815	
CAPÍTULO 16	198
DESENVOLVIMENTO DE ATIVIDADES DE ORIENTAÇÃO E CAPACITAÇÃO EM SISTEMAS DE COMPUTAÇÃO - RECYCLING IS BETTER	
Líbero Passador Neto Dimitre Moreira Ort	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180816	

CAPÍTULO 17	206
DESENVOLVIMENTO DE UM JOGO DIGITAL (2D) PARA CONSCIENTIZAÇÃO DE CRIANÇAS CONTRA O BULLYING	
Rafael Guedes da Silva	
Anderson Fabian Melo Nakanome	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180817	
CAPÍTULO 18	215
DESENVOLVIMENTO DE UMA APLICAÇÃO WEB PARA PROPORÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE AMOSTRA POR MEIO DO PACOTE SHINY	
Pablo Fellipe de Souza Almeida	
Cristina Henriques Nogueira	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180818	
CAPÍTULO 19	226
DESIGN PATTERNS FOR SOFTWARE EVOLUTION REQUIREMENTS	
Anna Grimán Padua	
Manuel Capel Tuñón	
Eladio Garví	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180819	
CAPÍTULO 20	240
DETECTION AND SEGMENTATION OF PIG IRON SLAG SCRAPERS USING MASK RCNN FOR WEAR CONTROL	
Carlos Eduardo Oliveira Milanez	
Marco Antonio de Souza Leite Cuadros	
Gustavo Maia de Almeida	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180820	
CAPÍTULO 21	252
DIMENSIONAMENTO DE BLOCOS SOBRE ESTACAS METÁLICAS	
Fernanda Calado Mendonça	
Bernardo Horowitz	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180821	
CAPÍTULO 22	268
ESTIMATION OF STELLAR PARAMETERS FOR J-PLUS SURVEY WITH MACHINE LEARNING	
Carlos Andres Galarza Arevalo	
Simone Daflon	
Vinicius Moris Placco	
Carlos Allende-Prieto	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180822	
CAPÍTULO 23	279
ESTUDO ANALÍTICO E NUMÉRICO VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DA	

RIGIDEZ DOS PILARES DE PONTES EM CONCRETO ARMADO

Sávio Torres Melo
Rebeka Manuela Lobo Sousa
Pablo Juan Lopes e Silva Santos
Francisca Itaynara de Souza Araújo
Thiago Rodrigues Piauilino Ribeiro
Amanda Evelyn Barbosa de Aquino
Diogo Raniere Ramos e Silva
Tiago Monteiro de Carvalho
Carlos Henrique Leal Viana
João Paulo dos Santos Silva
Madson Nogueira da Silva
Ilanna Castelo Branco Mesquita

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180823>

CAPÍTULO 24..... 290

ESTUDO ANALÍTICO E NUMÉRICO VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS DOS EFEITOS DE SEGUNDA ORDEM EM PILARES DE PONTES EM CONCRETO ARMADO

Sávio Torres Melo
Rebeka Manuela Lobo Sousa
Pablo Juan Lopes e Silva Santos
Francisca Itaynara de Souza Araújo
Thiago Rodrigues Piauilino Ribeiro
Amanda Evelyn Barbosa de Aquino
Diogo Raniere Ramos e Silva
Tiago Monteiro de Carvalho
Carlos Henrique Leal Viana
João Paulo dos Santos Silva
Madson Nogueira da Silva
Ilanna Castelo Branco Mesquita

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180824>

CAPÍTULO 25..... 311

ESTUDO DO MOVIMENTO DOS CORPOS MOEDORES NO PROCESSO DE MOAGEM UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

Wladimir José Gomes Florêncio
Neilor Cesar dos Santos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180825>

CAPÍTULO 26..... 329

FLUID FLOW SUMMARIZATION USING DYNAMIC MULTI-VECTOR FEATURE SPACES

Renato José Policani Borseti
Leandro Tavares da Silva
Gilson Antonio Giraldi

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180826>

CAPÍTULO 27	351
GESTÃO DE PROCESSOS: ALINHAMENTO ESTRATÉGICO ENTRE TI E NEGÓCIO COM BPMN	
Aryel Evelin Vieira Garcia Rodrigo Elias Francisco	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180827	
CAPÍTULO 28	359
IFINTEGRA - INTEGRADOR DA PLATAFORMA DE REGISTRO DE PROJETOS COM A BIBLIOTECA DIGITAL DE ARTIGOS DE UM CAMPUS DO IFSUL	
Mateus Roberto Algayer Geovane Griesang	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.87021180828	
SOBRE O ORGANIZADOR	366
ÍNDICE REMISSIVO	367

ANÁLISE DE ESTRUTURAS LAMINARES UTILIZANDO UM ELEMENTO SÓLIDO DE BAIXA ORDEM ENRIQUECIDO COM MODOS INCOMPATÍVEIS

Data de aceite: 02/08/2021

Data de submissão: 06/05/2021

Erijohnson da Silva Ferreira

Instituto Federal de Ciência, Educação e
Tecnologia da Paraíba, Curso de Bacharelado
em Engenharia Civil
Cajazeiras – PB
<http://lattes.cnpq.br/5832579675687558>

William Taylor Matias Silva

Universidade de Brasília, Faculdade de
Tecnologia
Brasília - DF
<http://lattes.cnpq.br/3850624538330903>

Sebastião Simão da Silva

Instituto Federal de Ciência, Educação e
Tecnologia da Paraíba, Curso de Bacharelado
em Engenharia Civil
Cajazeiras – PB
<http://lattes.cnpq.br/6023548428079039>

Adenilda Timóteo Salviano

Instituto Federal de Ciência, Educação e
Tecnologia da Paraíba, Curso de Bacharelado
em Engenharia Civil
Cajazeiras – PB
<http://lattes.cnpq.br/5502070750007299>

José Lucas Pessoa de Oliveira

Instituto Federal de Ciência, Educação e
Tecnologia da Paraíba, Curso de Bacharelado
em Engenharia Civil
Cajazeiras – PB
<http://lattes.cnpq.br/6709461469265977>

RESUMO: Este trabalho propõe-se a estudar os esforços em estruturas laminares, de características de geometria e carregamentos diversos através da implementação computacional de um elemento finito sólido hexaédrico de 8 nós programado com uma linguagem computacional de alto nível. Este elemento é aprimorado através do método dos modos incompatíveis, que tem por finalidade melhorar a desempenho do elemento em situações de esforços multiaxiais, comumente presentes em estruturas de superfície. A metodologia de criação do código e execução das análises é discutida. Então, são feitas análises comparativas através de exemplos numéricos de estruturas laminares, com o propósito de estudar o desempenho do algoritmo desenvolvido e comparar seus resultados com os valores finais de análises feitas por outros autores, através de métodos teóricos e obtidos por meio de modelagem das estruturas em software comercial. As análises se dão no âmbito estático, linear e elástico. Verifica-se que o enriquecimento do elemento sólido hexaédrico de oito nós, de baixa ordem, melhora significativamente seu desempenho em análises de estruturas laminares, o tornando uma alternativa viável para a aplicação. Atesta-se o bom desempenho do algoritmo desenvolvido, por meio da comparação de seus resultados com aqueles obtidos via software comercial.

PALAVRAS-CHAVE: Estruturas Laminares, Modos Incompatíveis, Método dos Elementos Finitos; elemento hexaédrico de baixa ordem.

ANALYSIS OF PLATES AND SHELLS USING AN INCOMPATIBLE 3D SOLID ELEMENT

ABSTRACT: The objective of this work is to study plates and shells, with different geometry and loadings through the computational implementation of an 8-node hexahedral solid finite element programmed with a high-level computational language. This element is improved through the method of incompatible modes, which aims to improve the performance of the element in situations of multiaxial efforts state, commonly present in plate and shells. Analyzes are made through numerical examples, with the purpose of studying the performance of the developed algorithm and comparing its results with analyzes made by other authors, through theoretical methods and obtained by modeling the structures in packages commercial. It is verified that the enrichment of the hexahedral solid element of low order, significantly improves its performance in analyzes of plates and shells, making it a viable alternative for application. The good performance of the developed algorithm is attested, by comparing its results with those obtained via commercial software.

PALAVRAS-CHAVE: Plates and shells, Incompatibles modes, FEM, lower order brick element.

1 | INTRODUÇÃO

As estruturas laminares têm vasta aplicação na engenharia, desde as mais comuns estruturas planas, como as placas, até aplicações mais complexas e não-planas, como as cascas. Por serem caracterizadas por geometrias onde uma das dimensões (espessura) é muito menor que suas outras (comprimento e largura), existem muitas opções geométricas possíveis para a concepção de seus modelos. Assim, pode-se aumentar o grau de complexidade da modelo de uma estrutura laminar, adicionando curvaturas em sua superfície, modificando as condições de contorno e aplicando diferentes configurações de cargas.

Estas estruturas requerem soluções analíticas complexas para a obtenção de seus esforços solicitantes, essenciais para seu posterior dimensionamento, com emprego de equações diferenciais e soluções via séries, como a Solução de Navier ou Solução de Levy, entre outros métodos. A complexidade da solução analítica varia de acordo com a complexidade geométrica da estrutura laminar, bem como de suas condições de contorno. Considerando que sua solução analítica com condições de carregamento e contorno simples já apresenta elevado grau de complexidade, a análise dessas estruturas submetidas a condições menos comuns se torna ainda mais difícil.

Em casos onde métodos simplificados não podem ser aplicados restam duas opções: a complexa solução analítica ou a aplicação de métodos numéricos. Estes últimos fornecem uma solução aproximada para a análise estrutural, e são, geralmente, a melhor alternativa quando se precisa obter resultados detalhados. O método numérico tratado neste trabalho é o Método dos Elementos Finitos (MEF), que possui ampla aplicação na análise de estruturas de diferentes tipos. Seu conceito consiste na discretização do domínio da

estrutura em elementos, resultando na composição de uma malha de elementos finitos. Os elementos presentes na malha interagem entre si através de seus nós, quando a estrutura é submetida a uma condição de carregamento.

Interação dos elementos resulta em uma análise numérica que retorna resultados aproximados para a condição geométrica e de carregamento submetida. Desta forma, o MEF é um método numérico que entrega resultados que se aproximam das soluções obtidas através dos métodos analíticos, sendo possível obter um grande volume de informações acerca do estado de carregamento interno da estrutura.

A proposta deste trabalho é a aplicação do elemento sólido hexaédrico enriquecido com modos incompatíveis na análise de placas no âmbito linear e elástico, demonstrando sua eficácia para este tipo de aplicação. Os resultados de análises lineares são usualmente empregados na verificação de estados limite último e de serviço de estruturas.

Elemento sólido hexaédrico padrão e o elemento sólido incompatível foi implementado em rotina própria, utilizando linguagem de programação MATLAB®, e sua formulação é brevemente discutida nos tópicos posteriores. São feitas análise de modelos numéricos de estruturas laminares e seus resultados são comparados com resultados obtidos através da modelagem CAE executada no software comercial ABAQUS®, resultados obtidos por outros autores e soluções analíticas de referência.

2 | ELEMENTO SÓLIDO INCOMPATÍVEL

2.1 Formulação do elemento hexaédrico de baixa ordem

O elemento sólido hexaédrico de baixa ordem é caracterizado como trilinear tendo, portanto, geometria tridimensional. O elemento possui 8 nós, localizados em cada um de seus vértices. Este elemento é mapeado para um hexaedro através do uso de coordenadas naturais ξ , η , e μ , o que pode ser visto na Fig. 1 a seguir, portanto apresenta funções de forma em termos deste sistema (KATTAN, 2008). Estas funções são lineares, portanto, o elemento padrão apresenta maior rigidez quanto a representação de estados de carregamento flexionais. Para isto a inserção de modos incompatíveis melhora significativamente seu desempenho pela natureza quadrática de suas funções interpoladoras adicionais (SILVA e SILVA, 2017).

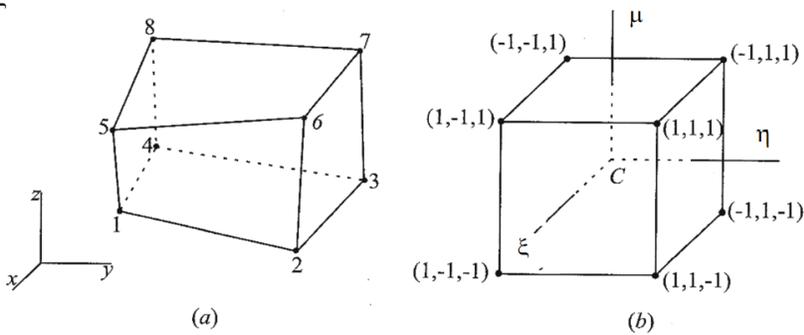


Figura 1 - Elemento sólido hexaédrico de 8 nós. a) coord. cartesianas; b) coord.naturais.

Fonte: Vázquez e López, 2001.

As funções de deslocamento para um elemento isoparamétrico são dadas por,

$$u(x, y, z) = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \mu) u_i; \quad (1a)$$

$$v(x, y, z) = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \mu) v_i; \quad (1b)$$

$$w(x, y, z) = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \mu) w_i. \quad (1c)$$

em que ξ , η , μ e são as coordenadas para os eixos naturais. As coordenadas cartesianas em qualquer ponto do elemento são:

$$x = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \mu) x_i; \quad (2a)$$

$$y = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \mu) y_i; \quad (2b)$$

$$z = \sum_{i=1}^8 N_i(\xi, \eta, \mu) z_i. \quad (2c)$$

E suas funções de forma, também conhecidas como funções de interpolação são dadas por,

$$N_1 = 1/8(1 - \xi)(1 - \eta)(1 + \mu); \quad (3a)$$

$$N_2 = 1/8(1 - \xi)(1 - \eta)(1 - \mu); \quad (3b)$$

$$N_3 = 1/8(1 - \xi)(1 + \eta)(1 - \mu); \quad (3c)$$

$$N_4 = 1/8(1 - \xi)(1 + \eta)(1 + \mu); \quad (3d)$$

$$N_5 = 1/8(1 + \xi)(1 - \eta)(1 + \mu); \quad (3e)$$

$$N_6 = 1/8(1 + \xi)(1 - \eta)(1 - \mu); \quad (3f)$$

$$N_7 = 1/8(1 + \xi)(1 + \eta)(1 - \mu); \quad (3g)$$

$$N_8 = 1/8(1 + \xi)(1 + \eta)(1 + \mu). \quad (3h)$$

O Jacobiano do elemento é expresso pela matriz,

$$[J_e] = \sum \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \mu} & \frac{\partial y}{\partial \mu} & \frac{\partial z}{\partial \mu} \end{vmatrix} \quad (4)$$

Assim, a matriz de deformação do elemento é,

$$[B_e] = [I^\alpha][J_e^{-1}][\partial N^\alpha] \quad (5)$$

Expressa de maneira explícita, como sendo,

$$[B_e] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{vmatrix} N_1 & 0 & 0 & \dots & N_8 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & \dots & 0 & N_8 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & \dots & 0 & 0 & N_8 \end{vmatrix}. \quad (6)$$

A matriz constitutiva para 3 dimensões, levando em consideração as características do material, o módulo de elasticidade E e coeficiente de Poisson ν é dada por:

$$[D] = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 - \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 - \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1 - 2\nu)/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1 - 2\nu)/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1 - 2\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Finalmente, a matriz de rigidez do elemento sólido hexaédrico de 8 nós é expressa por:

$$[K_e] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 [B_e]^T [D] [B_e] \det(J) d\xi d\eta d\mu. \quad (8)$$

Assim, pode-se calcular os deslocamentos da estrutura, por meio de:

$$\{F\} = [K] \cdot \{U\}. \quad (9)$$

Sendo que $\{F\}$ é o vetor contendo as forças internas em cada um dos graus de liberdade dos nós da estrutura (3 graus de liberdade por nó para o elemento hexaédrico), $[K]$ é a matriz de rigidez global da estrutura e $\{U\}$ é o vetor de deslocamentos dos graus de liberdade nodais.

As deformações (10a) e tensões (10b) compatíveis na estrutura são calculados através das equações,

$$[\varepsilon] = [B] \cdot \{U\}, \quad (10a)$$

$$[\sigma] = [C] \cdot [\varepsilon]. \quad (10b)$$

Tendo como resultado da equação, seis componentes de deformação (11a) e seis componentes de tensão (11b) por ponto de integração do elemento,

$$[\varepsilon] = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \varepsilon_{xy} \ \varepsilon_{yz} \ \varepsilon_{zx}], \quad (11a)$$

$$[\sigma] = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{xy} \ \tau_{yz} \ \tau_{zx}]. \quad (11b)$$

Por fim, as forças nodais internas do elemento, são dadas pela integral:

$$f = \int_V [B^T][\sigma]dV. \quad (12)$$

2.2 Formulação do elemento hexaédrico incompatível

Por meio do método dos modos incompatíveis adiciona-se um novo campo de deslocamento ao elemento sólido padrão, melhorando sua resposta a situações de esforços multiaxiais. A seguir, sua formulação matemática é discutida.

A energia de deformação de um corpo elástico é definida por,

$$U = \frac{1}{2} \int_V \{d^T B_u^T + \alpha^{*T} B_\alpha^T\} [D] \{B_u d + B_\alpha \alpha^*\} dV. \quad (13)$$

Que quando derivada em relação aos deslocamentos d e aos parâmetros α^* resulta nas equações de equilíbrio do elemento expressas por,

$$\begin{bmatrix} K_{uu} & K_{ua} \\ K_{au} & K_{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ \alpha^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

em que q é o vetor de forças nodais equivalentes e α^* é dado por:

$$\{\alpha^*\} = [K_{aa}^{-1}][K_{au}]\{d\}. \quad (15)$$

Assim, as submatrizes de rigidez do sistema são definidas pelas equações,

$$[K_{uu}] = \int_V [B^T][D][B]dV, \quad (16a)$$

$$[K_{ua}] = \int_V [B^T][D][B_\alpha]dV, \quad (16b)$$

$$[K_{au}] = \int_V [B_\alpha^T][D][B]dV, \quad (16c)$$

$$[K_{aa}] = \int_V [B_\alpha^T][D][B_\alpha]dV. \quad (16d)$$

em que B_α é a matriz deformação-deslocamento para modos incompatíveis, expressa por

$$B_\alpha = \begin{bmatrix} \frac{\partial M_1}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial M_2}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial M_3}{\partial x} & 0 & 0 \\ \frac{\partial M_1}{\partial y} & \frac{\partial M_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial M_2}{\partial y} & \frac{\partial M_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial M_3}{\partial y} & \frac{\partial M_3}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial M_1}{\partial z} & 0 & 0 & \frac{\partial M_2}{\partial z} & 0 & 0 & \frac{\partial M_3}{\partial z} \\ \frac{\partial M_1}{\partial y} & \frac{\partial M_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial M_2}{\partial y} & \frac{\partial M_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial M_3}{\partial y} & \frac{\partial M_3}{\partial x} & 0 \\ \frac{\partial M_1}{\partial z} & 0 & \frac{\partial M_1}{\partial x} & \frac{\partial M_2}{\partial z} & 0 & \frac{\partial M_2}{\partial x} & \frac{\partial M_3}{\partial z} & 0 & \frac{\partial M_3}{\partial x} \\ 0 & \frac{\partial M_1}{\partial z} & \frac{\partial M_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial M_2}{\partial z} & \frac{\partial M_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial M_3}{\partial z} & \frac{\partial M_3}{\partial y} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

e M_1 , M_2 e M_3 são as funções de interpolação para modos incompatíveis, expressas por,

$$M_1 = 1 - \xi^2, \quad (18a)$$

$$M_2 = 1 - \eta^2, \quad (18b)$$

$$M_3 = 1 - \mu^2. \quad (18c)$$

Estas funções de forma, juntamente com o vetor de deslocamentos generalizados da formulação incompatível são responsáveis por acrescentar aos deslocamentos no interior do elemento (u_u) uma parcela de deslocamentos incompatível (u_α). Desta forma os deslocamentos para o elemento se tornam,

$$u = u_u + u_\alpha = [N]\{d\} + [M]\{\alpha\}. \quad (19)$$

Retornando à equação (14), após a derivação dos termos, temos

$$B_\alpha = \begin{bmatrix} -2\xi\overline{J_{011}} & 0 & 0 & -2\eta\overline{J_{012}} & 0 & 0 & -2\mu\overline{J_{013}} & 0 & 0 \\ 0 & -2\xi\overline{J_{021}} & 0 & 0 & -2\eta\overline{J_{022}} & 0 & 0 & -2\mu\overline{J_{023}} & 0 \\ 0 & 0 & -2\xi\overline{J_{031}} & 0 & 0 & -2\eta\overline{J_{032}} & 0 & 0 & -2\mu\overline{J_{033}} \\ -2\xi\overline{J_{021}} & -2\xi\overline{J_{011}} & 0 & -2\eta\overline{J_{022}} & -2\eta\overline{J_{012}} & 0 & -2\mu\overline{J_{023}} & -2\mu\overline{J_{013}} & 0 \\ -2\xi\overline{J_{031}} & 0 & -2\xi\overline{J_{011}} & -2\eta\overline{J_{032}} & 0 & -2\eta\overline{J_{012}} & -2\mu\overline{J_{033}} & 0 & -2\mu\overline{J_{023}} \\ 0 & -2\xi\overline{J_{031}} & -2\xi\overline{J_{021}} & 0 & -2\eta\overline{J_{032}} & -2\eta\overline{J_{022}} & 0 & -2\mu\overline{J_{033}} & -2\mu\overline{J_{023}} \end{bmatrix} \quad (20)$$

em que ξ , η e μ são os valores das coordenadas de Gauss para cada nó e os coeficientes J_0 são os valores do Jacobiano avaliado no centroide do elemento, onde as coordenadas ξ , η e μ assumirão valor igual a zero. Sendo assim, a matriz de rigidez do elemento será dada pela expressão:

$$[K] = [K_{uu}] - [K_{ua}][K_{ua}^{-1}][K_{au}]. \quad (21)$$

Desta forma, obtidos a matriz de rigidez global da estrutura e o vetor de forças nodais, segue-se o cálculo dos deslocamentos para o elemento hexaédrico enriquecido com modos incompatíveis.

As tensões e deformações agora têm uma parcela de contribuição referente aos modos incompatíveis, que deve ser somada à parcela compatível, tendo como resultado o aprimoramento nos valores obtidos da análise. Desta forma, temos que as deformações (22) e tensões (23) para o elemento incompatível, são expressas por:

$$[\varepsilon] = [\varepsilon_u] + [\varepsilon_a] = [B] \cdot \{U\} + [B_a] \cdot \{\alpha^*\}, \quad (22)$$

$$[\sigma] = [C] \cdot [\varepsilon] = [C]([\varepsilon_u] + [\varepsilon_a]). \quad (23)$$

3 I ANÁLISES E RESULTADOS

A seguir são feitas análises de problemas *benchmarks* de estruturas laminares no âmbito isotrópico linear-elástico, com a finalidade de demonstrar a capacidade do elemento implementado para este tipo de aplicação. Os resultados obtidos são comparados com aqueles encontrados na literatura ou calculados utilizando software comercial. É realizada uma breve discussão dos resultados obtidos.

3.1 Viga fina torcida

A viga exposta na Fig. 2 tem comprimento $L = 12$ mm, largura de $W = 1,1$ mm e espessura $t = 0,05$ mm. A estrutura é submetida a dois tipos de carregamento – um deles perpendicular ao plano da face da viga e outro paralelo a esta. Ambas as cargas são de magnitude $F = 1,0$ N, aplicadas na borda. Seu material apresenta Módulo de Elasticidade $E = 29 \times 10^6$ N/mm² e Coeficiente de Poisson $\nu = 0,22$. Os resultados são apresentados nas Tabelas 1 e 2. Nestas, as soluções obtidas são divididas pela solução de referência indicada, sendo portanto, adimensionais.

De acordo com Mostafa (2013) este exemplo foi inicialmente proposto por McNeal

e Harder (1985) com o propósito de testar a performance do elemento em situações de distorção. Foram obtidos ótimos resultados para o elemento implementado, em comparação à solução analítica de referência e aos resultados obtidos por Mostafa (2013), utilizando 48 elementos.

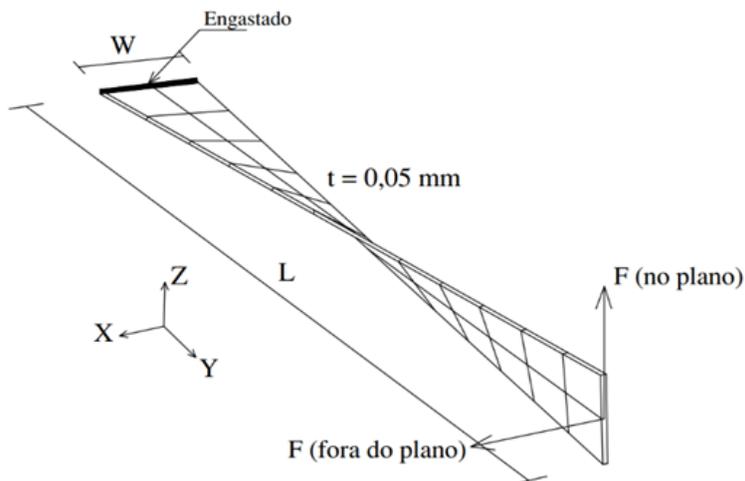


Figura 2: Viga torcida com aplicação de forças fora do plano no plano e fora do plano.

Núm. de Elem.	Mostafa (2013)	Presente trabalho
48x8	1,000	1,003

Tabela 1: Viga torcida – força no plano (solução de referência = 1,378 mm).

3.2 Placa engastada com carga pontual central

A placa apresenta comprimento e largura iguais, sendo $L = W = 100 \text{ mm}$. Sua espessura é $t = 1 \text{ mm}$. O módulo de elasticidade do seu material é $E = 10^4 \text{ N/mm}^2$ e seu coeficiente de Poisson é $\nu = 0,3$. É submetida a uma carga pontual $P = 20 \text{ N}$ em seu centro. Aproveitando a simetria, apenas $\frac{1}{4}$ da placa foi discretizado para a análise. Foram adotadas 4 malhas com $N_e = 4 (2 \times 2 \times 1)$, $16 (4 \times 4 \times 1)$, $64 (8 \times 8 \times 1)$ e $256 (16 \times 16 \times 1)$. A Fig. 3 ilustra a estrutura em questão.

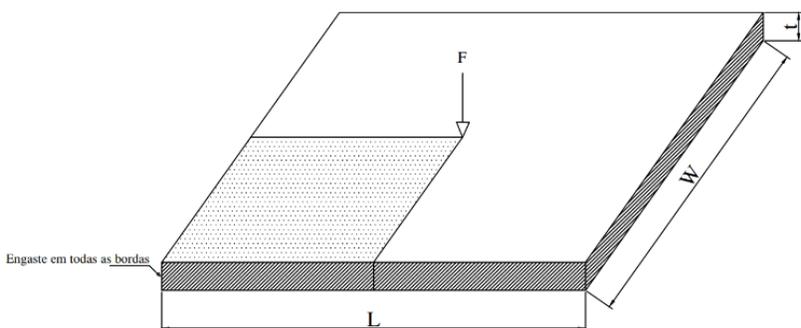


Figura 3: Placa engastada com carga pontual central.

A Tabela 4 apresenta os resultados em comparação com os dados obtidos por Silva e Silva (2017) e através do software comercial ABAQUS®. As soluções obtidas são divididas pela solução de referência indicada, sendo portanto, adimensionais.

Número de Elementos	Silva e Silva (2017)	Presente trabalho	ABAQUS ®
4	0,074	0,073	0,073
16	0,553	0,553	0,556
64	0,941	0,941	0,943
256	0,998	0,998	0,999

* Solução de referência = -1,22304 mm.

Tabela 4: Deslocamentos (em mm) na direção da carga divididos pela solução de referência*.

Também é possível observar a melhoria de performance obtida através da implementação de modos incompatíveis em relação ao elemento padrão através deste exemplo. A Tabela 5 expõe os resultados para os dois métodos. É visto que os valores obtidos para o elemento padrão são consideravelmente distantes do valor teórico obtido via método analítico, mesmo para malhas com maiores quantidades de elementos (64 e 256). O erro relativo, quando comparados o elemento padrão e sua versão melhorada com modos incompatíveis, é de 90% para a malha de 64 elementos e de 73% para a malha de 256 elementos. Este percentual demonstra o quão distante estão os valores para os dois tipos de elementos, sendo que a versão com modos incompatíveis apresenta uma solução muito mais próxima do valor teórico calculado, apresentando um erro relativo em relação ao valor de deslocamento teórico de apenas 0,17% para a malha de 256 elementos. Isso se dá porque os resultados do elemento padrão para os deslocamentos não conseguem representar, do ponto de vista quantitativo, o comportamento físico da placa, visto que este tipo de elemento é apropriado para situações onde o elemento estrutural está sujeito apenas a tração e compressão simples (Silva & Silva, 2017).

Número de Elementos	Presente Trabalho - Elemento Padrão	Presente Trabalho - Elemento com Modos Incompatíveis
4	0,006	0,073
16	0,025	0,553
64	0,089	0,941
256	0,268	0,998

* Solução de referência = -1,22304 mm.

Tabela 5: Deslocamentos (em mm) na direção da carga divididos pela solução de referência*.

3.3 Cilindro comprimido com diafragmas rígidos em suas bordas

O cilindro apresentado na Fig. 4 está submetido a duas cargas diametralmente opostas, que o submetem a um estado de compressão, de magnitude $P = 1,0 N$. Apresenta módulo de elasticidade de $E = 3 \times 10^6 N/mm^2$ e coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$. Seu raio é de $R = 300 mm$, com comprimento $L = 600 mm$ e espessura $t = 3,0 mm$. Foram adotadas 4 malhas, cuja referência para o número de elementos é a quantidade de elementos presente na borda do cilindro, para $\frac{1}{4}$ de sua circunferência total, com um elemento ao longo da altura.

A Tabela 6 apresenta os valores obtidos com o elemento em estudo em comparação aos resultados obtidos pelo software ABAQUS® com emprego do elemento C3D8I, presente em sua biblioteca. Isto é feito com a finalidade de comparar a formulação implementada com os resultados obtidos por uma formulação similar, porém, em software comercial Segundo Mostafa (2013) este modelo foi inicialmente proposto por Belytschko (1984) para elementos de casca, avaliando a performance do elemento para a flexão multiaxial e modos de membrana complexos.

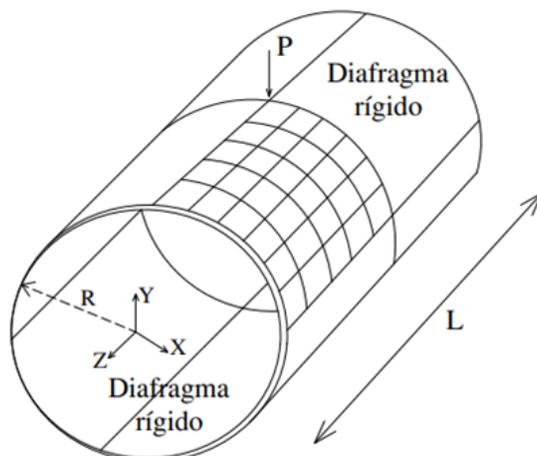


Figura 4: Cilindro comprimido com diafragmas rígidos em suas bordas.

Número de Elementos	ABAQUS C3D8I	Presente trabalho
4	0,145	0,146
8	0,402	0,401
16	0,575	0,553

* Solução de referência = $1,8248 \times 10^{-5}$ mm.

Tabela 6: Deslocamentos (em mm) na direção da carga divididos pela solução de referência*.

3.4 Casca hemisférica com abertura superior de 18°

A geometria da estrutura é exposta na Fig 5. Seu raio é de $R = 10,0$ mm com espessura $t = 0,04$ mm. A casca apresenta uma abertura de 18° com o eixo z, de acordo com o esquema de eixos representado na imagem. Sua borda esquerda apresenta deslocamento nulo em relação ao eixo x, assim como sua borda direita tem deslocamento nulo em relação ao eixo y, enquanto suas bordas inferior e superior apresentam deslocamento livre em todas as direções. Isto é dado para aproveitar-se da simetria do hemisfério, com discretização de $\frac{1}{2}$ da estrutura completa.

A casca é submetida a dois pares de forças, ao longo dos eixos x e y, de magnitude $F = 1,0$ N. O material apresenta comportamento isotrópico linear elástico com módulo de elasticidade $E = 6,825 \times 10^7$ N/mm² e coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para a formulação implementada em comparação com os resultados obtidos por Mostafa (2013), tendo como solução de referência $U_x = 0,0940$ mm. O elemento apresenta bons resultados, com convergência satisfatória dos resultados em relação à solução de referência, apresentando melhores resultados para malhas com mais elementos. Isto se dá devido à complexidade geométrica da estrutura.

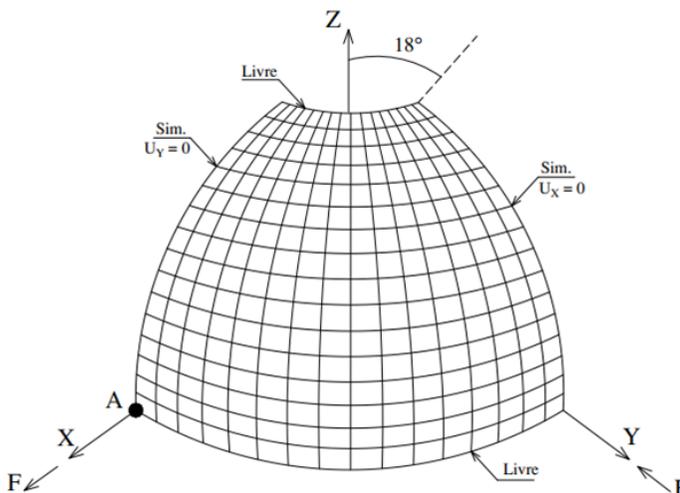


Figura 5: Casca hemisférica com abertura superior de 18°.

Número de Elementos	Mostafa (2013)	Presente trabalho
16 x 16	0,986	0,769
32 x 32	0,990	0,972

* Solução de referência = $1,8248 \times 10^{-5}$ mm.

Tabela 7: Deslocamentos (em mm) na direção da carga divididos pela solução de referência*.

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Comprova-se que a adição de modos incompatíveis ao elemento sólido hexaédrico de oito nós melhora de forma significativa o desempenho do elemento e, conseqüentemente, os resultados de sua aplicação na análise de estruturas laminares. É correto afirmar que no estudo de superfícies, a utilização de elementos sólidos pode ser vantajosa dada a simplicidade de sua formulação (em relação a outros elementos como casca/shell), afinal a aplicação de um elemento mais simples acarreta um menor custo computacional, principalmente quando se trata de análises mais complexas. Além disso, em análises em que processos iterativos estão presentes (não-linearidades geométricas e dos materiais), elementos com menos graus de liberdade são preferíveis. Observa-se que elementos mais complexos e robustos (como o EAS – *Enhanced Assumed Strain*) para aliviar travamentos estão disponíveis na literatura, entretanto, como demonstram as análises, o elemento incompatível apresenta excelente performance, mesmo quando utilizado para simular estruturas complexas. Cabe salientar que o método dos modos incompatíveis tem sido pouco utilizado recentemente em *benchmarks* mais exigentes de placas e cascas.

O desenvolvimento de ferramentas computacionais aprimoradas continua relevante, sobretudo, em problemas complexos que seriam inviáveis de solucionar analiticamente, ou que teriam uma solução analítica relativamente complexa ou impossíveis, como no caso das estruturas estudadas aqui.

O elemento implementado apresenta ótimos resultados nos comparativos com os resultados obtidos via software ABAQUS® e resultados de outros autores, demonstrando sua capacidade e a qualidade de sua implementação. Tendo em vista que softwares comerciais cobram um preço relativamente elevado para a compra de uma licença, ter um algoritmo próprio que executa as mesmas análises é viável. A versão estudantil do ABAQUS® apresenta uma limitação de 1000 nós por análise e outros softwares apresentam limitações de forma parecida ao usuário estudante, enquanto que na rotina desenvolvida não há essa limitação, permitindo a discretização de estruturas sem limites no número de nós ou elementos. Sendo assim, a rotina pode ser empregada de maneira didática, ao expor a metodologia de implementação do método e permitir a execução de análise estrutural de forma educacional. A rotina desenvolvida não está restrita apenas à análise de estruturas laminares, mas se estende para todos os tipos de estrutura que possam ser discretizadas através do uso de elementos sólidos. Desta forma, estruturas como vigas,

blocos e cascas podem ser analisadas.

AGRADECIMENTOS

Ao IFPB Campus Cajazeiras por todo suporte às atividades de desenvolvimento do projeto de iniciação científica que originou este trabalho. Nossa sincera gratidão.

REFERÊNCIAS

[1] KATTAN, P. **Matlab guide for finite elements: an interactive approach**. Berlin: Springer, 2008.

[2] DA SILVA, S. S.; SILVA, W. T. M. **Aplicação do Método dos Modos Incompatíveis na Análise de Peças Fletidas**. Science & Engineering Journal, v. 26, n. 1, p. 27-37, 2017. DOI:<https://doi.org/10.14393/19834071.v26.n1.2017.37718>. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/cieng/article/view/37718>. Acesso em: 25/06/2018.

[3] VÁZQUEZ, M.; LÓPEZ, E. **El Método de los Elementos Finitos Aplicado al Análisis Estructural**. Madrid: Editora Noela, 2001.

[4] MOSTAFA, M.; SIVASELVAN, M. V.; FELIPPA, C. A. **A solid-shell corotational element based on ANDES, ANS and EAS for geometrically nonlinear structural analysis**. International journal for numerical methods in engineering, v. 95, n. 2, p. 145-180, 2013.

[5] MACNEAL, Richard H. **A simple quadrilateral shell element**. Computers & Structures, v. 8, n. 2, p. 175-183, 1978.

[6] BELYTSCHKO, Ted; LIN, Jerry I.; CHEN-SHYH, Tsay. **Explicit algorithms for the nonlinear dynamics of shells**. Computer methods in applied mechanics and engineering, v. 42, n. 2, p. 225-251, 1984.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Algoritmo 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50, 70, 82, 120, 168, 169, 182, 257, 262, 265, 322, 330

Análise avançada 53, 54, 55, 68

Análise computacional 84, 103

Análise estrutural 55, 71, 82, 84, 85, 92, 93, 94, 95, 97, 103, 109, 110, 111

Aprendizado 13, 174, 193, 194, 197, 208, 215, 224, 268

B

Bullying 206, 207, 208, 210, 211, 212, 213, 214

C

Carga crítica 143, 144, 147, 148, 149, 152, 153

Computational fluid dynamics 329, 330, 350

Constitutive model 1, 2, 5, 6, 10

Contorno 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 71, 299

Controlador neural 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 179

Controle 19, 119, 120, 131, 168, 169, 171, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 240, 295, 312, 352, 353, 356, 358

D

Deep learning 131, 132, 134, 135, 136, 137, 138, 141, 142

Descarte adequado 198

Desenvolvimento 11, 12, 14, 15, 17, 20, 21, 35, 36, 40, 44, 82, 83, 193, 194, 195, 197, 198, 199, 200, 205, 206, 208, 209, 210, 211, 215, 216, 217, 221, 225, 226, 227, 254, 260, 265, 281, 294, 327, 352, 354, 357, 359, 361, 362, 363, 364

Design patterns 155, 156, 166, 167, 226, 227, 228, 230, 231, 234, 238

Diferenças finitas 38, 39, 40, 45, 50, 51, 52, 315

Digital 167, 197, 206, 207, 210, 213, 239, 243, 319, 320, 358, 359, 360, 362, 363, 365

Drop test 131, 132, 133, 134, 135, 141

E

Educação 12, 13, 14, 21, 53, 68, 70, 191, 193, 195, 197, 208, 212, 215, 225, 279, 290, 311, 326, 359, 366

Educacional 14, 82, 206, 208, 209

Elemento hexaédrico 70, 72, 75, 77

Elementos finitos 53, 55, 69, 70, 71, 72, 83, 279, 280, 281, 285, 286, 290, 291, 294, 297,

299, 303, 306, 309, 321

Equações diferenciais 39, 40, 44, 51, 71, 294

Estabilidade estrutural 143

Estatística 21, 215, 216, 217, 218, 224, 225

Estrutura 17, 38, 54, 71, 72, 75, 77, 78, 81, 82, 84, 85, 87, 89, 90, 91, 97, 98, 99, 101, 102, 103, 104, 106, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 152, 218, 221, 253, 266, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 286, 288, 291, 292, 293, 297, 298, 302, 309, 362, 363

F

Ferramenta 15, 18, 22, 39, 193, 194, 195, 196, 200, 204, 210, 211, 216, 224, 294, 313, 354, 356, 360, 361, 363

Frequências naturais 143, 144, 146, 147, 149, 150, 151, 152, 153

Fundação elástica 143

G

Geometria irregular 38

Gestão de processos 351, 352, 354, 355, 358

I

Imperfeições geométricas iniciais 53, 54, 55, 62, 64, 67, 69

Inclusão 29, 33, 35, 36, 67, 68, 197, 359, 360

Industrial process 131

Informação 12, 21, 193, 205, 216, 351, 354, 355, 356, 357, 358, 360, 366

Inovação 86, 104, 105, 193, 366

Interfaces 215, 216, 225, 231, 232, 233, 234, 235, 361

J

Jogo 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 206, 207, 209, 210, 211, 212, 213

L

Layout 221, 222, 359, 360, 362

Libras 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 22

M

Malha 38, 39, 40, 44, 45, 46, 49, 50, 72, 79, 108, 182, 285, 299, 303, 304, 313, 321, 322, 326

Modelagem 31, 33, 35, 36, 38, 39, 70, 72, 149, 194, 251, 255, 268, 280, 285, 294, 295, 299, 305, 351, 352, 353, 354, 356, 357, 358

Modos incompatíveis 70, 72, 75, 76, 77, 79, 80, 82, 83

O

Oscar Niemeyer 84, 85, 86, 87, 89, 101, 102, 103, 104, 105, 118

P

Pasternak 143, 144, 145, 149, 151, 153, 154

Processos 82, 171, 240, 312, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 361

Programação 72, 211, 215, 224, 361

Programas 55, 205, 206, 210, 214, 294, 359

Projeto socioambiental 198

R

Realidade aumentada 193, 194, 195, 196, 197

Rede neural 168, 169, 171, 175

Resistência 53, 54, 55, 56, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 89, 96, 131, 145, 255, 256, 258, 261, 262, 263, 280, 294, 314

Robô 168, 169, 170, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179

Robótica 168

RPG 11, 12, 15, 16, 18

RStudio 215, 216, 217, 218, 220, 224, 225

S

Shiny 215, 216, 217, 218, 220, 221, 224, 225

Simulações 23, 24, 30, 31, 33, 35, 38, 44, 50, 168, 169, 175, 181, 311, 312, 326, 329

Sobretensões de manobras 23, 24, 25, 29, 30

Software 1, 6, 12, 18, 40, 53, 55, 66, 70, 71, 72, 77, 79, 80, 82, 103, 155, 156, 157, 158, 159, 166, 167, 196, 210, 215, 216, 217, 218, 220, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 235, 237, 238, 239, 256, 257, 263, 265, 266, 267, 281, 285, 297, 299, 300, 311, 320, 321, 330, 356, 357, 359, 360, 363, 364

Stable hysteresis cycle 1, 3, 9

Summarization 329, 330, 331, 332, 343, 349, 350

Supressores de surto 23, 25, 28, 29, 30, 33, 34, 35, 36

Sustentabilidade 198, 199

T

Tecnologia 11, 12, 21, 54, 70, 168, 193, 194, 196, 197, 206, 208, 215, 279, 290, 311, 326, 351, 355, 358, 359, 362, 366

Tensão 1, 24, 25, 26, 27, 28, 33, 34, 59, 62, 63, 66, 67, 75, 170, 255, 256, 258, 260, 261,

266, 295

Tensões residuais 53, 54, 55, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69

Transformadores 23, 24, 25, 28, 30, 34, 35, 36

Transitórios eletromagnéticos 23, 24, 31

W

Web 54, 194, 195, 196, 200, 215, 216, 217, 218, 221, 222, 225, 355, 359, 360, 361, 362, 363, 365

COLEÇÃO

DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

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

COLEÇÃO

DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

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