

COLEÇÃO **DESAFIOS** DAS **ENGENHARIAS:**

ENGENHARIA MECÂNICA



HENRIQUE AJUZ HOLZMANN
JOÃO DALLAMUTA
(ORGANIZADORES)

Atena
Editora
Ano 2021

COLEÇÃO
DESAFIOS
DAS
ENGENHARIAS:

ENGENHARIA MECÂNICA



HENRIQUE AJUZ HOLZMANN
JOÃO DALLAMUTA
(ORGANIZADORES)

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 Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



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

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

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

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

Conselho Editorial**Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

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

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

Profª Drª Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa

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

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

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília

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

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

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

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

Ciências Biológicas e da Saúde

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

Diagramação: Maria Alice Pinheiro
Correção: Mariane Aparecida Freitas
Revisão: Os autores
Organizadores: Henrique Ajuz Holzmann
João Dallamuta

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
C691	<p>Coleção desafios das engenharias: engenharia mecânica / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, João Dallamuta. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-5983-259-0 DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.590212107</p> <p>1. Engenharia mecânica. I. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). II. Dallamuta, João (Organizador). III. Título. CDD 621</p>
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 Mecânica pode ser definida como o ramo da engenharia que aplica os princípios de física e ciência dos materiais para a concepção, análise, fabricação e manutenção de sistemas mecânicos. O aumento no interesse por essa área se dá principalmente pela escassez de matérias primas, a necessidade de novos materiais que possuam melhores características físicas e químicas e a necessidade de reaproveitamento dos resíduos em geral. Além disso a busca pela otimização no desenvolvimento de projetos, leva cada vez mais a simulação de processos, buscando uma redução de custos e de tempo.

Neste livro são apresentados trabalho teóricos e práticos, relacionados a área de mecânica, materiais e automação, dando um panorama dos assuntos em pesquisa atualmente. A caracterização dos materiais é de extrema importância, visto que afeta diretamente aos projetos e sua execução dentro de premissas técnicas e econômicas. Pode-se ainda estabelecer que estas características levam a alterações quase que imediatas no projeto, sendo uma modificação constante na busca por melhores respostas e resultados.

De abordagem objetiva, a obra se mostra de grande relevância para graduandos, alunos de pós-graduação, docentes e profissionais, apresentando temáticas e metodologias diversificadas, em situações reais. Sendo hoje que utilizar dos conhecimentos científicos de uma maneira eficaz e eficiente é um dos desafios dos novos engenheiros.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann
João Dallamuta

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

MODELAGEM DE UM MANIPULADOR PARALELO 3RRR PARA INCLUSÃO DE ELOS FLEXÍVEIS

André Vecchione Segura

Fernanda Thaís Colombo

Maíra Martins da Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121071>


CAPÍTULO 2..... 9

MODELAGEM NUMÉRICA DE SUSPENSÃO DE ¼ DE VEÍCULO

Lucas Alves Torres

Lucas Messias Cunha de Araújo

João Gabriel Paulino de Souza

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121072>

CAPÍTULO 3..... 20

OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA DA SUSPENSÃO DE UM CAMINHÃO COM RESTRIÇÃO DE CONFIABILIDADE

José Gilberto Picoral Filho

Ewerton Grotti

Herbert Martins Gomes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121073>

CAPÍTULO 4..... 38

ANÁLISE DE FADIGA PARA OS AÇOS ABNT 1045 E ABNT 4140 PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Brenda Martins Fernandes

Reny Angela Renzetti


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121074>

CAPÍTULO 5..... 48

ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS FREQUÊNCIAS DOMINANTES DE UM VIOLÃO ACÚSTICO

Marco Túlio Santana Alves

Felipe Iglesias

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121075>

CAPÍTULO 6..... 56

VORTEX-INDUCED VIBRATIONS MODEL WITH 2 DEGREES OF FREEDOM OF RIGID CYLINDERS NEAR A FIXED WALL BASED ON WAKE OSCILLATOR

Rafael Fehér

Juan Pablo Julca Avila

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121076>

CAPÍTULO 7.....67

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE UM COLETOR SOLAR DE TUBO EVACUADO ECCÊNTRICO

Mavd de Paula Ribeiro Teles

Kamal Abdel Radi Ismail

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121077>

CAPÍTULO 8.....79

RADIÔMETRO SOLAR DE BAIXO CUSTO USANDO A PLATAFORMA ABERTA ARDUINO

Elson Avallone

Cristiano Pansanato

Átila Negretti Faro

Dionísio Igor Alves da Silva


Jhonatas Wendel da Silva

Guilherme Biazzi Gonçalves

Mário César Ito

Rafael Paiva Garcia

Paulo César Mioralli

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121078>


CAPÍTULO 9.....92

TURBULENT FORCED CONVECTION IN THE THERMAL ENTRANCE OF RECTANGULAR DUCTS: ANALYSIS FOR DIFFERENT MODELS OF VELOCITY DISTRIBUTION AND MOMENTUM EDDY DIFFUSIVITY

Dhiego Luiz de Andrade Veloso

Carlos Antônio Cabral dos Santos

Fábio Araújo de Lima


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121079>

CAPÍTULO 10.....109

SELEÇÕES DE SUBSTITUIÇÃO EM UM ALGORITMO GENÉTICO DE CODIFICAÇÃO REAL APLICADO À OTIMIZAÇÃO DE UM CICLO RANKINE ORGÂNICO DE DUPLO ESTÁGIO

Guilherme de Paula Prado

Renan Manozzo Galante

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210710>

CAPÍTULO 11.....124

DINÂMICA LINEAR PLANA DE UM TUBO ENGASTADO TRANSPORTANDO FLUIDO COM UMA MASSA ANEXADA NA EXTREMIDADE LIVRE

Milton Aparicio de Oliveira


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210711>

CAPÍTULO 12..... 138

SENSOR CAPACITIVO PARA DETECÇÃO DE FRAÇÃO DE VAZIO EM ESCOAMENTO BIFÁSICO ÁGUA-AR

Anderson Giacomeli Fortes

Jeferson Diehl de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210712>

CAPÍTULO 13..... 150

STUDY OF STATIC AND DYNAMIC LEVELS OF UNDERGROUND AQUIFER WELLS TO MAINTAIN THEIR BALANCE LEVEL IN THE PROVINCE OF ICA - 2014

Primitivo Bacilio Hernández Hernández

Omar Michael Hernández García


Aníbal Bacilio Hernández García

Jessenia Leonor Loayza Gutiérrez

Walter Merma Cruz

Marcos Luís Quispe Pérez

Edward Paul Sueros Ticona

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210713>

CAPÍTULO 14..... 164

SISTEMAS COMPUTACIONAIS INTELIGENTES E CONTROLE AVANÇADO COM ÊNFASE EM MAPAS COGNITIVOS FUZZY EM SISTEMAS DINÂMICOS APLICADOS EM DIFERENTES ÁREAS, COM ÊNFASE EM ROBÓTICA

Márcio Mendonça

Marina Souza Gazotto

Marina Sandrini

Marta Rúbia Pereira dos Santos


Rodrigo Henrique Cunha Palácios

Fábio Rodrigo Milanez

Lillyane Rodrigues Cintra

Francisco de Assis Scannavino Junior

Wagner Fontes Godoy

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210714>

CAPÍTULO 15..... 181

ROBÔ AUTÔNOMO PARA ESTACIONAMENTO

Lucas Netto Luzente de Almeida

Graziele Barreto da Costa Almeida

Heitor Gomes de Souza Batista

Armando Carlos de Pina Filho

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210715>

CAPÍTULO 16..... 193

PROTOTIPAGEM RÁPIDA 3D APLICADA AO ÂMBITO UNIVERSITÁRIO

Vitória de Oliveira Mattos

Lucas Ruzzon de Jesus Ortega

Rafael Issao Fukai

Milena de Sousa Ferreira
João Pedro Monterani Laguna
Marcelo Sampaio Martins


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210716>

CAPÍTULO 17..... 199

**UMA SOLUÇÃO ANALÍTICA PARA EFEITOS MECÂNICOS EM TUMORES SÓLIDOS
AVASCULARIZADOS**

Francisco Jose Vargas da Silva

Fernando Pereira Duda

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210717>

SOBRE OS ORGANIZADORES 206

ÍNDICE REMISSIVO..... 207

UMA SOLUÇÃO ANALÍTICA PARA EFEITOS MECÂNICOS EM TUMORES SÓLIDOS AVASCULARIZADOS

Data de aceite: 01/07/2021

Francisco Jose Vargas da Silva

Programa de engenharia mecanica
COPPE/UFRJ
Rio de Janeiro, Brasil

Fernando Pereira Duda

Programa de engenharia mecanica
COPPE/UFRJ
Rio de Janeiro, Brasil

RESUMO: Neste artigo apresenta-se uma solução matemática para cálculo de efeitos mecânicos: tensão e deformação. Em tumores sólidos avascularizados, instalados e crescendo em um tecido biológico. Metodologia: tendo como base uma revisão da literatura da área; considerando as características físicas, biológicas do meio. O tumor pode ser visto como um meio poroso deformável, tendo dois principais componentes: uma matriz elástica, que lhe dá forma uma parte fluida, as células tumorais, que proliferam e migram pela estrutura produzindo os efeitos mecânicos. A formulação matemática teve como base uma equação de balanço de massa para descrever a proliferação, o crescimento e migração da massa tumoral, uma de reação e difusão para captação e distribuição de nutrientes no interior do tumor. A essas equações acrescentou-se uma equação de movimento, onde desprezou-se forças de corpo e efeitos inerciais. Desenvolveu-se um tensor tendo como base conceitual: a parte mecânica

da 2 lei da termodinâmica, a teoria do potencial químico, considerando o regime de pequenas deformações. No item, 3.1.1, apresentam-se, soluções analíticas, item 4, alguns gráficos, item 5 a conclusão.

PALAVRAS - CHAVE: tumor, matriz, stress, tensão, deformação.

ABSTRACT: This article presents a mathematical solution for calculating mechanical effects: stress and strain. In solid avascularized tumors, installed and growing in biological tissue. Methodology: based on a review of the literature in the area; considering the physical, biological characteristics of the environment. The tumor can be seen as a deformable porous medium, having two main components: an elastic matrix, which forms a fluid part, the tumor cells, which proliferate and migrate through the structure producing the mechanical effects. The mathematical formulation was based on a mass balance equation to describe the proliferation, growth and migration of the tumor mass, one of reaction and diffusion for the capture and distribution of nutrients inside the tumor. To these equations was added an equation of motion, where body forces and inertial effects were neglected. A tensor was developed with the conceptual basis: the mechanical part of the 2 law of thermodynamics, the theory of chemical potential, considering the regime of small deformations. In item 3.1.1, analytical solutions are presented, item 4, some graphs, item 5 the conclusion.

KEYWORDS: tumors, matriz ,tension, strains, stress.

1 | INTRODUÇÃO

O câncer é uma das doenças que mais matam no mundo ocidental. Sua complexidade e variedade de causas e sintomas tornam o seu tratamento e detecção difíceis, e em geral, quando diagnosticado já se encontra em estágios avançados com grande índice de mortalidade.

Um tumor sólido, durante sua evolução passa por vários estágios desde sua instalação em um determinado local conforme se encontra em Ambrosi et al (2002), Cristini et al (2003), Lowengrub et al (2007). Ele é classificado como maligno ou benigno.

Se for benigno, crescerá de forma simétrica e localizada e não possui poder de invasão ou migração para outras regiões. Sendo maligno, assume contornos irregulares devido a invasão local e pode migrar para outros locais.

Suas dimensões, fornecem, muitas informações sobre o estágio de seus processos fisiológicos; quando instalado em um tecido biológico. Em geral, até o diâmetro de 2 mm possui forma simétrica e não se pode afirmar se é maligno ou benigno; a partir desse diâmetro e até aproximadamente 4 mm dá início às fases e aos processos mais letais da doença. Principalmente, metástases e invasão local.

Os tempos de execução dos processos variam no interior do tumor. Alguns eventos iniciam de forma simultânea, mais sua realização pode demorar horas, minutos e segundos; como por exemplo: a divisão descontrolada das células tumorais ou levarem dias, meses e anos, como o crescimento da massa tumoral e metástases.

Nutrientes e oxigênio, atravessam o contorno do tumor e migram para o interior por difusão. À medida que o tumor vai crescendo, as células vão se superpondo dificultando o alcance dessas substâncias químicas ao seu interior. Ao longo do tempo, as localizadas no interior vão morrendo por falta de nutrientes e oxigênio.

Três grandes regiões surgem: uma formada por células mortas e em vários estágios de deterioração, uma em torno a ela, onde as células estão vivas, mais em estado inerte; e uma mais na periferia onde encontram-se células vivas e em proliferação.

Nas últimas décadas, a pesquisa científica vem destacando a importância dos efeitos mecânicos no entendimento, tratamento e detecção do câncer, isto pode ser visto em Araujo et al (2004), Ambrosi et al (2002), Lowengrub et al (2007).

Em termos matemáticos, geralmente, tem-se para modelagem do crescimento e migração das células tumorais equações de balanço de massa e para distribuição e captação de substância químicas equação de reação e difusão.

A essas equações, neste artigo, desenvolveu-se um tensor. Tendo como base as equações anteriores, acrescentando-se a teoria do potencial químico, a parte mecânica da 2ª lei da termodinâmica para o cálculo da tensão e deformação da matriz extracelular no interior e imediação do tumor durante seu crescimento.

Em termos materiais, o tumor pode ser visto como um meio poroso, deformável.

Possuindo, dois grandes componentes. uma estrutura rígida elástica; que lhe dá forma a matriz extracelular a ECM. Uma fluida, que prolifera e migra através da ECM causando os efeitos mecânicos as células do tumor.

Uma solução analítica é apresentada para a descrição do campo de tensões e deformação no interior do tumor; tomando-se como base, uma expressão para pressão apresentada em Lowengrub et al (2007).

Um estudo dos efeitos mecânicos em forma de gráfico é apresentado, considerando-se, um valor hipotético para módulo de rigidez da matriz extracelular (ECM).

2 | METODOLOGIA

Inicialmente, fez-se uma revisão bibliográfica na literatura sobre o que é o câncer. Considerando-se a medicina, biologia e artigos científicos que buscassem trazer uma visão de engenharia, ou equações matemáticas e conceitos de física para tentar traduzir uma patologia tão complexa.

A partir dessa análise, escolheu-se estudar, tumores sólidos avascularizados instalados e crescendo em um tecido biológico e como eram apresentadas equações para descrever o crescimento e a captação e distribuição de nutrientes no interior do tumor.

O passo seguinte, considerando as características físicas e biológicas. A matriz extracelular pode ser vista como um material visco-elástico. O tumor como um meio poroso deformável por onde as células proliferam e migram como um fluido.

A partir daí, uma equação de movimento poderia ser aplicada. As diferenças de tempo entre: a proliferação e a migração das células (minutos, hora) e o crescimento da massa tumoral (dias, meses, anos) apontou o surgimento de efeitos mecânicos: tensão e deformação.

Desenvolveu-se um tensor tendo como fonte: a teoria do potencial químico, a parte mecânica da 2 lei da termodinâmica, mecânica do contínuo.

Uma solução analítica, para tensão, deformação no interior do tumor; na geometria esférica em uma dimensão foi buscada.

Tomou-se, uma expressão analítica para pressão apresentada em Lowengrub et al (2007), com objetivo de se visualizar uma expressão matemática para tais efeitos.

2.1 Equações de Governo

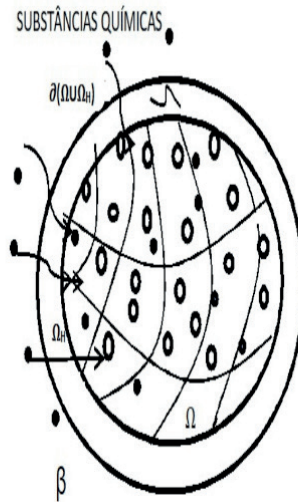


Figura 1: Esquema da interação entre as células e a ECM. A região Ω representa o tumor sólido. Os círculos as células tumorais. As linhas curvas a ECM. Pontos pretos as substâncias químicas. Ω_h a região em torno do tumor que sofre ação direta do crescimento.

Em qualquer ponto da região Ω A equação que descreve: o crescimento, migração e proliferação descontrolada das células tumorais.

$$\frac{\partial n(x,t)}{\partial t} = -\nabla \cdot J_n + P_n \quad (1)$$

A variável $n(x,t)$ representa o número de células tumorais por volume de referencia. J_n o termo de fluxo. P_n é o termo produtivo e está relacionado as características genéticas das células, e a velocidade de captação de nutrientes.

Para captação, distribuição de nutrientes, no interior do tumor:

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = \nabla \cdot J_c - R_c \quad (2)$$

$c(x,t)$ é a concentração de nutrientes em um determinado instante e posição. J_c é o termo de fluxo por difusão de nutrientes para o interior do tumor. R_c é o termo reativo e está relacionado a captação de nutrientes pelas células tumorais e varia ao longo do tempo e posição.

A esse cenário, supondo um regime de pequenas deformações, foi acrescentado a deformação da ECM.

Para descrição do deslocamento da ECM, em cada ponto da região Ω , desprezando-se forças de corpo e efeitos inerciais:

$$\text{Div } T = 0 \quad (3)$$

Sendo $T(x,t)$ o tensor tensões. Dado por:

$$T = 2G_r E - pI \quad (4)$$

G_r é o módulo de elasticidade, $E(x,t)$ é tensor pequenas deformações; p é a pressão um dado do problema, I é o tensor identidade.

$$E = \frac{1}{2}(\nabla u + \nabla u^T) \quad (5)$$

$u(x,t)$ representa o vetor deslocamento da matriz.

2.1.1 Soluções analíticas na geometria esférica

Os resultados a seguir, representam expressões para os efeitos mecânicos, na direção ur . A pressão é um dado do problema, tomou-se uma solução analítica, equação 6, proposta em Lowengrub et al (2007).

$$p(r) = -\frac{1}{R} \ln R + \ln R \ln R - G \ln R + \frac{1}{4} AGR^2 \ln R + G - \frac{1}{4} AGR^2 + \frac{1}{R} \ln r - \ln R \ln r + G \ln r - \frac{1}{4} AGR^2 \ln r - G \frac{I_0(r)}{I_0(R)} + \frac{1}{4} \quad (6)$$

Deslocamnto $u(r,t)$ em Ω :

$$u(r) = \frac{1}{2G_r R} \left[\left(-\frac{1}{R} \ln R + \ln R \ln R - G \ln R + G \right) \frac{r^3}{3} + \left(\frac{1}{R} - \ln R + G \right) \left[\frac{r^3 \ln r}{3} - \frac{1}{3} r^3 \right] - \frac{G}{I_0(r)} \frac{1}{3} r_1^3 F_2 \left(\frac{3}{2}; 1, \frac{5}{2}; \frac{r^2}{4} \right) \right] + c_1 \frac{r}{3}$$

tensão no interior do tumor:

$$\sigma_r(r) = \left\{ \frac{1}{R} \left[\left(-\frac{1}{R} \ln R + \ln R \ln R - G \ln R + G \right) r^2 + \left(\frac{1}{R} - \ln R + G \right) \left[r^2 \ln r + \frac{r^2}{3} - r^2 \right] - \frac{G}{I_0(r)} r_1^2 F_2 \left(\frac{3}{2}; 1, \frac{5}{2}; \frac{r^2}{4} \right) - 1,5 - \left(-\frac{1}{R} \ln R + \ln R \ln R - G \ln R + \frac{1}{4} AGR^2 \ln R + G - \frac{1}{4} AG \frac{1}{R} \ln r - \ln R \ln r + G \ln r - \frac{1}{4} AGR^2 \ln r - G \frac{I_0(r)}{I_0(R)} + \frac{1}{4} \right) \right] \right\} \quad (8)$$

Deformação

$$\epsilon(r) = \left\{ \frac{1}{2GR} \left[\left(-\frac{1}{R} \ln R + \ln R \ln R - G \ln R + G \right) r^2 + \left(\frac{1}{R} - \ln R + G \right) \left[r^2 \ln r + \frac{r^2}{3} - r^2 \right] - \frac{G}{I_0(r)} \left(r_1^2 F_2 \left(\frac{3}{2}; 1, \frac{5}{2}; \frac{r^2}{4} \right) + \frac{3}{5} r_1^3 F_2 \left(\frac{3}{2}; 1, \frac{5}{2}; \frac{r^2}{4} \right) \right) \right] \right\} - 1,5 - \left\{ -\frac{1}{R} \ln R + \ln R \ln R - G \ln R + \frac{1}{4} AGR^2 \ln R + G - \frac{1}{4} AGR^2 + \frac{1}{R} \ln r - \ln R \ln r + G \ln r - \frac{1}{4} AGR^2 \ln r - G \frac{I_0(r)}{I_0(R)} + \frac{1}{4} \right\} \quad (9)$$

A constante “A” ´mede a taxa de mitose em relação a apoptosi; G representa a agressividade do tumor. I_0 é a função de Bessel de ordem zero. F é a função hipergeométrica.

3 | GRÁFICOS

Os gráficos a seguir, apresentam os resultados para deformação e tensão no interior de um tumor sólido. Supondo um valor, hipotético, de rigidez para a matriz extracelular de 450. Os valores de $A=0$, $G=20$ são dados fornecidos no artigo, em Lowengrub et al 2007.

Foi utilizado o aplicativo Matlab 2013b como apoio na elaboração de cada um dos

gráficos.

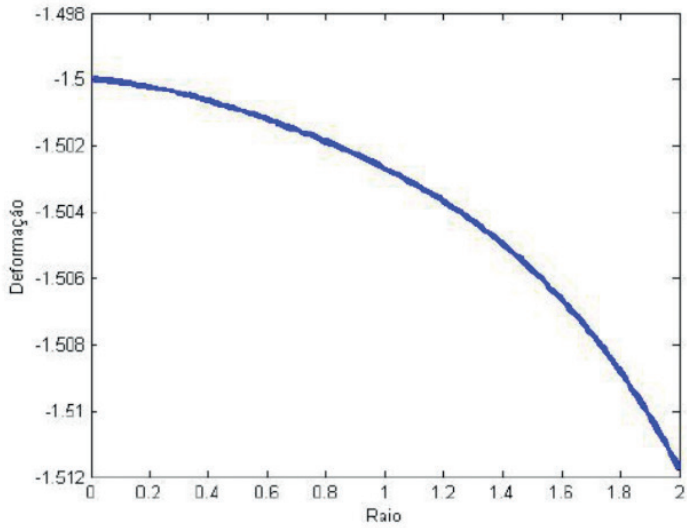


Figura 2. Deformação no interior do tumor.

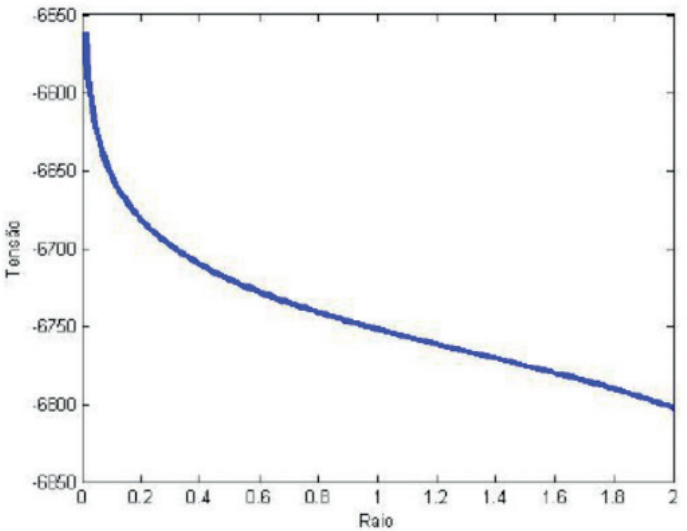


Figura 3. Tensão no interior do tumor.

4 | CONCLUSÃO

Neste artigo, mostrou-se, que assumindo-se certas condições , como por exemplo: geometria esférica e condições de simetria; é possível desenvolver-se, uma solução analítica, em uma dimensão, na direção ur , para efeitos mecânicos no interior de um tumor sólido avascularizado crescendo em uma determinada microrregião do tecido..

A expressão desenvolvida; trás consigo, a importância além dos aspectos genéticos,

relacionados as características das células tumorais e como inovação os efeitos das propriedades físicas, visco-elástica da matriz-extracelular nos processos fisiológicos de evolução e instalação do tumor em uma região do corpo.

As diferenças de tempos dos processos biológicos: minuto, hora para proliferação e migração das células tumorais, tendo em contrapartida, dia, meses e anos para o crescimento da massa tumoral. Além, das características visco-elástica da matriz extracelular.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, “in memoriam”, por tudo o que sou.

A minha esposa Vania, pelo amor, apoio e estímulo nesse e em tudo que almejei;

As minhas filhas: Thais e Louise. Que são a inspiração para tudo o que me tornei.

Ao amigo e orientador Dr Fernando Duda pelas horas de debates, por tudo que me ensinou e companheiro de outros projetos.

RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

Ambrosi D., Mollica F., 40 (2002) 1297-1396, *On the mechanics of a growing tumor, International Journal of Engineering Science.*

Angelis, E De and Preziosi, L, 2000, Advection-diffusion models for solid tumour evolution in vivo and related free boundary problem, *Journal Mathematical Models and Methods* in.

Araujo, R. P. and McElwain, D. L S., 2004, *A history of the study of solid tumour growth: The contribution of mathematical modeling. Bulletin of Mathematical Biology.*

Cristini V., Lowengrub J., Nie,Q, 46 (2003) 191-224, *Nonlinear simulation of tumor growth, J. Math. Biol.*

Duda, F.P., Souza, A. S., Fried, E., 58 (2010) 515-529, *A theory for species migration in a finitely strained solid with application to polymer network swelling, Journal of the Mechanics and Physics of Solids.*

Lowengrub J., Macklin P., 245 (2007) 677–704, *Nonlinear simulation of the effect of microenvironment on tumor growth, Journal of Theoretical Biology.*

SOBRE OS ORGANIZADORES

HENRIQUE AJUZ HOLZMANN - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes à corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

JOÃO DALLAMUTA - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia de Telecomunicações pela UFPR. MBA em Gestão pela FAE Business School, Mestre em Engenharia Elétrica pela UEL. Doutorando em Engenharia Espacial pelo INPE.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Aços 10, 38, 39, 40, 46

Algoritmo Genético 11, 109, 111, 112, 174

Arduino 11, 79, 80, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 172, 175, 190, 192

C

Campo de temperatura 92, 93

CitationID 112, 116

Citationitems 168

Confiabilidade 10, 20, 21, 22, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 79

Controle Adaptativo 165

Convecção Forçada 92, 93

E

Elementos Finitos 10, 1, 2, 6, 21, 38, 39, 45, 46, 47, 48, 50, 55, 128, 129, 131, 137

Energia renovável 67

Energia Solar 67, 79, 90, 91

EPI's 193, 196, 198

Escoamento bifásico 12, 138, 139, 140, 148

Escoamento Turbulento 92, 93

Estacionamento Autônomo 181

F

Fadiga 10, 21, 38, 39, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 125

Fluido-Estrutura 57, 124

Fração de vazio 12, 138, 139, 140, 142, 145, 146, 147, 148, 149

Frequência 6, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 21, 26, 48, 49, 52, 116, 125, 133, 135, 140, 142, 143, 145, 146

Função de transferência 9, 12, 14, 15

G

Graus de liberdade 9, 11, 23

I

Impressão 3D 193, 196

Instrumentação 80, 91, 144, 190

L

Lógica Fuzzy 165

M

Manipulador Flexível 1, 2

Manipulador Paralelo 10, 1, 2, 3, 6

Matriz 128, 129, 130, 131, 135, 166, 170, 187, 199, 200, 201, 203, 205

Modelo Multicorpos 1, 2, 6

N

Nusselt 92, 93, 99, 100, 101, 102, 103, 106

O

Otimização 9, 10, 11, 20, 21, 22, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 35, 36, 48, 49, 55, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 118, 119, 120, 121, 170, 175, 177, 192

P

PET 193, 194, 195, 198

Piranômetro 80, 81

Projeto mecatrônico 181

Protótipos 39, 165, 167, 172, 177

R

Radiação térmica 80, 82

Radiômetro 11, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 88, 89, 90, 91

Redes Neurais Artificiais 164, 165, 166, 168

S

Seleção 109, 111, 112, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 170, 171, 176, 185

Sensor capacitivo 12, 138, 140, 145

Simulação 9, 2, 3, 6, 17, 20, 25, 28, 35, 38, 40, 43, 44, 45, 46, 135, 167, 169

Sistemas Computacionais Inteligentes 12, 164, 168

Sistemas Dinâmicos 12, 124, 164, 167

Sistemas Térmicos 109, 111

Stress 199

Suspensão 10, 9, 10, 11, 13, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 184

T

Tensão 2, 3, 42, 43, 44, 45, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 187, 199, 200, 201, 203, 204

Tumor 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205

V

Vibração 1, 2, 5, 9, 10, 13, 16, 17, 20, 21, 26, 50, 133

Violão 10, 48, 49, 50, 51, 54

COLEÇÃO DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA MECÂNICA



www.atenaeditora.com.br



contato@atenaeditora.com.br



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



facebook.com/atenaeditora.com.br

Atena
Editora

Ano 2021

COLEÇÃO **DESAFIOS** DAS **ENGENHARIAS:**

ENGENHARIA MECÂNICA



www.atenaeditora.com.br



contato@atenaeditora.com.br



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



facebook.com/atenaeditora.com.br