

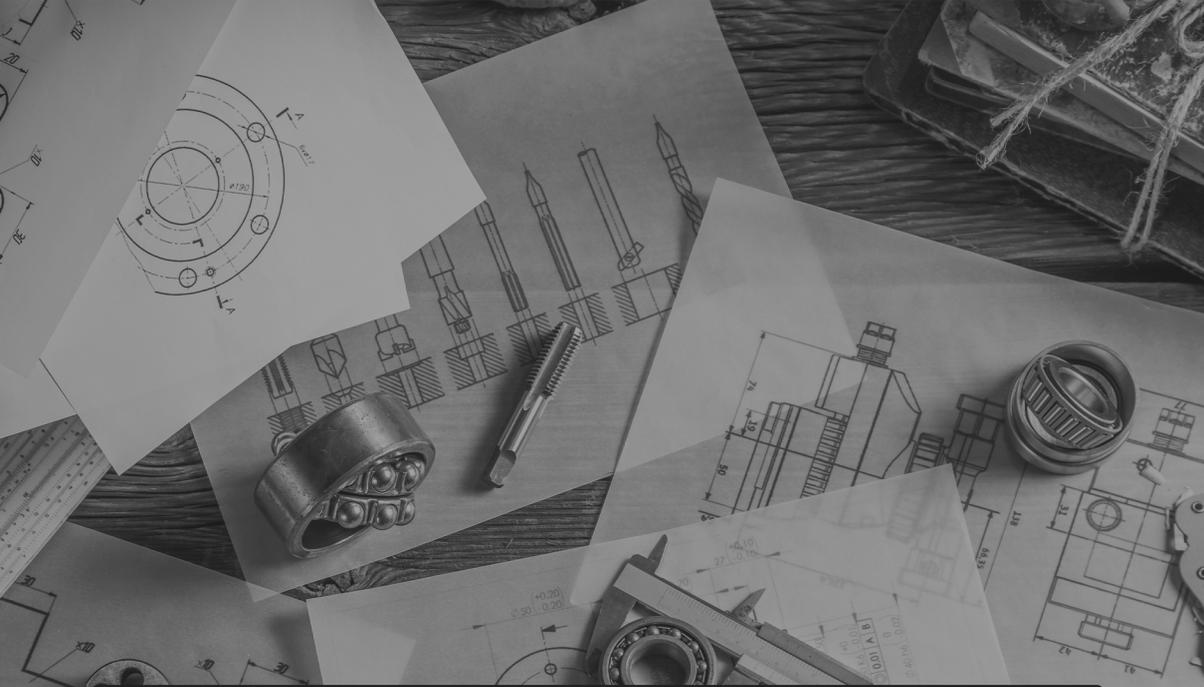


Henrique Ajuz Holzmann
João Dallamuta
(Organizadores)

A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Mecânica

2

Atena
Editora
Ano 2020



Henrique Ajuz Holzmann
João Dallamuta
(Organizadores)

A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Mecânica

2

Atena
Editora
Ano 2020

Editora Chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes Editoriais

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecário

Maurício Amormino Júnior

Projeto Gráfico e Diagramação

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Karine de Lima Wisniewski

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da Capa

Shutterstock

Edição de Arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os Autores

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 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.

A Atena Editora não se responsabiliza por eventuais mudanças ocorridas nos endereços convencionais ou eletrônicos citados nesta obra.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas

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

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. Carlos Antonio de Souza Moraes – 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
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador
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
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. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
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
Profª Drª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
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. 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
Prof^ª Dr^ª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof^ª Dr^ª 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
Prof^ª Dr^ª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Prof^ª Dr^ª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof^ª Dr^ª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof^ª Dr^ª 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
Prof^ª Dr^ª 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
Prof^ª Dr^ª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof^ª Dr^ª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Prof^ª Dr^ª 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
Prof^ª Dr^ª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino
Prof^ª Dr^ª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof^ª Dr^ª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof^ª Dr^ª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Prof^ª Dr^ª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof^ª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Prof^ª Dr^ª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
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
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Conselho Técnico Científico

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Me. Adalto Moreira Braz – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí
Prof. Me. Alexsandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Ma. Anne Karynne da Silva Barbosa – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Profª Drª Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais
Prof. Me. Armando Dias Duarte – Universidade Federal de Pernambuco
Profª Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Profª Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Ma. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª Drª Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas
Prof. Me. Clécio Danilo Dias da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Profª Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília
Profª Ma. Daniela Remião de Macedo – Universidade de Lisboa
Profª Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás
Prof. Me. Edevaldo de Castro Monteiro – Embrapa Agrobiologia
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases
Prof. Me. Eduardo Henrique Ferreira – Faculdade Pitágoras de Londrina

Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Me. Ernane Rosa Martins – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí
Profª Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora
Prof. Dr. Fabiano Lemos Pereira – Prefeitura Municipal de Macaé
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
Profª Drª Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro
Profª Ma. Isabelle Cerqueira Sousa – Universidade de Fortaleza
Profª Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará
Prof. Dr. José Carlos da Silva Mendes – Instituto de Psicologia Cognitiva, Desenvolvimento Humano e Social
Prof. Me. Jose Elyton Batista dos Santos – Universidade Federal de Sergipe
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco
Profª Drª Juliana Santana de Curcio – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFPA
Prof. Dr. Kárpio Márcio de Siqueira – Universidade do Estado da Bahia
Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis
Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFPR
Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Ma. Lillian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Profª Drª Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná
Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos
Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior
Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
Profª Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará
Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco
Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal

Prof. Me. Robson Lucas Soares da Silva – Universidade Federal da Paraíba
Prof. Me. Sebastião André Barbosa Junior – Universidade Federal Rural de Pernambuco
Profª Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão
Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana
Profª Ma. Thatianny Jasmine Castro Martins de Carvalho – Universidade Federal do Piauí
Prof. Me. Tiago Silvio Dedoné – Colégio ECEL Positivo
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Bibliotecário Maurício Amormino Júnior
Diagramação: Luiza Alves Batista
Edição de Arte: Luiza Alves Batista
Revisão: Os Autores
Organizadores: Henrique Ajuz Holzmann
João Dallamuta

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

A639 A aplicação do conhecimento científico na engenharia mecânica 2 [recurso eletrônico] / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, João Dallamuta. – Ponta Grossa, PR: Atena, 2020.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

ISBN 978-65-5706-376-7

DOI 10.22533/at.ed.767201109

1. Automação industrial. 2. Engenharia mecânica – Pesquisa – Brasil. 3. Produtividade industrial. 4. Tecnologia. I. Holzmann, Henrique Ajuz. II. Dallamuta, João.

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

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. Nos dias atuais a busca pela redução de custos, aliado a qualidade final dos produtos é um marco na sobrevivência das empresas. Nesta obra é conciliada duas atividades essenciais a um engenheiro mecânico: Projetos e Simulação.

A área de projetos, simulação bem como o desenvolvimento de novo materiais vem ganhando amplo destaque, pois através de simulações pode-se otimizar os projetos realizados, reduzindo o tempo de execução, a utilização de materiais e os custos finais.

Outra área de grande importância é o estudo das naturezas térmicas, pois devido a mudanças significativas no meio ambiente, gradientes cada vez maiores de amplitude térmica vêm sendo registrados. Estes afetem diretamente a processos, previsões de para projetos e ainda aos custos finais de produtos.

Dessa forma, são apresentados trabalhos teóricos e resultados práticos de diferentes formas de aplicação e abordagens nos projetos dentro da grande área das engenharias. Trabalhos envolvendo simulações devido a inserção de novos softwares dedicados a áreas específicas, auxiliando o projetista em suas funções. Sabe-los utilizar de uma maneira eficaz e eficiente é um dos desafios dos novos engenheiros.

Neste livro são apresentados vários trabalhos, alguns com resultados práticos, sobre simulações em vários campos da engenharia industrial, elementos de maquinas e projetos de bancadas práticas.

Um compendio de temas e abordagens que constituem a base de conhecimento de profissionais que se dedicam a projetar e fabricar sistemas mecânicos e industriais.

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.

Boa leitura!

Henrique Ajuz Holzmann
João Dallamuta

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE EQUAÇÃO TEÓRICA NA PREDIÇÃO DE RUGOSIDADE DO AÇO ABNT 1045 SUBMETIDO AO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Mayara Fernanda Pereira

Bruno Souza Abrão

Rosemar Batista da Silva

DOI 10.22533/at.ed.7672011091

CAPÍTULO 2..... 8

AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL DO AÇO N2711 APÓS RETIFICAÇÃO COM REBOLO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO

Henrique Butzlaff Hübner

Rosemar Batista da Silva

Marcus Antônio Viana Duarte

Eduardo Carlos Bianchi

DOI 10.22533/at.ed.7672011092

CAPÍTULO 3..... 15

AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE DO INCONEL 718 APÓS RETIFICAÇÃO COM REBOLOS DE DIFERENTES ABRASIVOS CONVENCIONAIS

Rodrigo de Souza Ruzzi

Raphael Lima de Paiva

Otávio de Souza Ruzzi

Rosemar Batista da Silva

DOI 10.22533/at.ed.7672011093

CAPÍTULO 4..... 22

AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE GERADA PELO PROCESSO DE JATEAMENTO EM DIFERENTES DISTÂNCIAS DO BOCAL À PEÇA

Henrique Butzlaff Hübner

Antonio Favero Filho

Freddy Alejandro Portillo Morales

Mayara Fernanda Pereira

Rosemar Batista da Silva

DOI 10.22533/at.ed.7672011094

CAPÍTULO 5..... 31

ENSAIO BALÍSTICO DE LAMINADOS DE AÇO PARA FUTURA APLICAÇÃO EM BLINDAGEM ADD-ON ESPAÇADA

João Pedro Inácio Varela

Ednaldo Gomes da Rocha Júnior

Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

DOI 10.22533/at.ed.7672011095

CAPÍTULO 6..... 47

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE FILMES HÍBRIDOS BIODEGRADÁVEIS

COMPOSTOS POR FÉCULA DE BATATA (FB), GELATINA BOVINA (GB) E QUITOSANA (QT)

Francielle Cristine Pereira Gonçalves
Kristy Emanuel Silva Fontes
Elano Costa Silva
Arthur Domingos Mesquita De Moraes
Dyana Alves De Oliveira
Théo Martins De Alencar Paiva
Ricardo Alan Da Silva Vieira
Manoel Quirino da Silva Júnior
Francisco Leonardo Gomes de Menezes

DOI 10.22533/at.ed.7672011096

CAPÍTULO 7..... 60

REFLECTIVITY BEHAVIOR IN X-BAND OF MICROWAVE ABSORBERS BASED ON CU SUBSTITUTED NIZN SPINEL NANOCRYSTALLINE FERRITE

Valdirene Aparecida da Silva
Evandro Luis Nohara
Mirabel Cerqueira Rezende

DOI 10.22533/at.ed.7672011097

CAPÍTULO 8..... 71

DESENVOLVIMENTO DE PRÓTESE PERSONALIZADA DA ATM ATRAVÉS DA GERAÇÃO DE IMAGEM 3D BIOMECÂNICA A PARTIR DE TOMOGRAFIA

Rafael Ferreira Gregolin
Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia
Ruís Camargo Tokimatsu
João Antônio Pereira
Bruna Beatriz de Paiva

DOI 10.22533/at.ed.7672011098

CAPÍTULO 9..... 81

PROJETO ROBUSTO DE CIRCUITO *SHUNT* RESSONANTE PARA ATENUAÇÃO PASSIVA DE VIBRAÇÕES EM VIGA COMPÓSITA

Lorrane Pereira Ribeiro
Antônio Marcos Gonçalves de Lima

DOI 10.22533/at.ed.7672011099

CAPÍTULO 10..... 93

ESTUDO COMPARATIVO DE DESEMPENHO ENTRE GLP E GNV EM GERADOR À COMBUSTÃO

Paulo Roberto Hahn
Jorge Luis Plácido de Borba
Marco Antônio Frölich
Moisés de Mattos Dias
Elienai Josias Brum Dutra
Monir Göethel Borba
Patrice Monteiro de Aquim

Eduardo Luis Schneider
José Lesina Cezar
Lirio Schaeffer

DOI 10.22533/at.ed.76720110910

CAPÍTULO 11 104

MODELAGEM DE ESCOAMENTOS GÁS-LÍQUIDO INTERMITENTES: CORRELAÇÕES PARA O COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Lucas Avosani
Luiz Eduardo Melo Lima

DOI 10.22533/at.ed.76720110911

CAPÍTULO 12..... 117

RADIAÇÃO TÉRMICA EM SUPERFÍCIES SELETIVAS

Gustavo César Pamplona de Sousa
Raimundo Nonato Calazans Duarte
Wanderley Ferreira de Amorim Júnior
Kelly Cristiane Gomes da Silva

DOI 10.22533/at.ed.76720110912

CAPÍTULO 13..... 128

RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE CONTROLE ÓTIMO UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

Arthur Henrique Iasbeck
Fran Sérgio Lobato

DOI 10.22533/at.ed.76720110913

CAPÍTULO 14..... 139

CONSTRUÇÃO DO TEODOLITO CASEIRO:UMA ALTERNATIVA BARATA E EFICIENTE

Ronis Cley Fontes da Silva
Lourivan Carneiro de Souza

DOI 10.22533/at.ed.76720110914

CAPÍTULO 15..... 151

ANÁLISE DA POTÊNCIA ELÉTRICA NA RETIFICAÇÃO DO AÇO ENDURECIDO SAE 52100 EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE CORTE

Raphael Lima de Paiva
Rodrigo de Souza Ruzzi
Otávio de Souza Ruzzi
Rosemar Batista da Silva

DOI 10.22533/at.ed.76720110915

SOBRE OS ORGANIZADORES 159

ÍNDICE REMISSIVO..... 160

PROJETO ROBUSTO DE CIRCUITO *SHUNT* RESSONANTE PARA ATENUAÇÃO PASSIVA DE VIBRAÇÕES EM VIGA COMPÓSITA

Data de aceite: 01/09/2020

Data submissão: 04/06/2020

Lorrane Pereira Ribeiro

Universidade Federal de Uberlândia,
Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus
Santa Mônica
Uberlândia, Minas Gerais, Brasil
<https://orcid.org/0000-0001-7317-9599>

Antônio Marcos Gonçalves de Lima

Universidade Federal de Uberlândia,
Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus
Santa Mônica
Uberlândia, Minas Gerais, Brasil
<https://orcid.org/0000-0003-0170-6083>

RESUMO: Estruturas compósitas em engenharia contendo elementos piezelétricos acoplados a circuitos elétricos *shunt*, para fins de atenuação passiva dos níveis de vibração, apresentam incertezas inerentes em seus parâmetros de projeto, as quais, podem afetar significativamente a eficiência dos circuitos elétricos passivos. Neste contexto, este trabalho apresenta a modelagem por elementos finitos estocásticos de uma estrutura em material compósito laminado contendo elemento piezelétrico acoplado a circuitos elétricos *shunt*, de modo que, parâmetros incertos, como direções das fibras, espessuras das camadas e a resistência e indutância do circuito *shunt*, são assumidos como sendo variáveis aleatórias e, a dispersão destas variáveis, é caracterizada nas respostas

estocásticas obtidas após a propagação das incertezas no modelo. Os resultados obtidos, em termos dos envelopes das respostas em frequência para uma viga compósita contendo elemento piezelétrico mais circuito *shunt*, evidenciam a importância de se considerar as incertezas durante as fases de concepção inicial e/ou pré-projeto de sistemas dinâmicos incorporando circuitos *shunt* para o controle passivo de vibrações.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem estocástica, Controle passivo de vibrações, Material compósito, Propagação de incertezas, Circuitos *shunt* piezelétricos

ROBUST DESIGN OF RESONANT SHUNT CIRCUIT FOR PASSIVE VIBRATIONS ATTENUATION IN COMPOSITE BEAM

ABSTRACT: Engineering composite structures containing piezoelectric elements coupled with the so-named shunt circuits, with the aim of passive vibration attenuation, are characterized by inherent uncertainties in their parameters, which can affect significantly performance of the passive shunt circuit. In this context, this work presents the stochastic finite element modeling of a composite structure containing piezoelectric element to be coupled with a shunt circuit, in such a way, that uncertain parameters such as the fiber's orientation, layer thicknesses and the resistance and inductance in the shunt circuit are assumed as uncertain variables and, their corresponding dispersion, is characterized in the stochastic response by propagating the uncertainties into the model. The obtained results for a composite beam incorporating piezoelectric

material and shunt circuit, in terms of the stochastic envelopes of the frequency response functions, demonstrate the interest in considering the uncertainties in the preliminary design phase of the shunt circuits to control the undesired vibrations.

KEYWORDS: Stochastic modeling, Passive vibration control, Composite material, Uncertainty propagation, Piezoelectric shunt circuits

1 | INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os materiais compósitos têm sido cada vez mais utilizados na engenharia. Esse fato ocorre principalmente devido às melhores propriedades mecânicas que podem ser alcançadas ao se realizar um projeto utilizando-se de um material compósito. (REDDY, 1997; GAY et al., 2003).

Estruturas compósitas são frequentemente expostas a cargas dinâmicas. Portanto, há interesse de atenuação de vibrações nessas estruturas, pois as vibrações podem reduzir a vida estrutural e contribuir para falhas mecânicas. A aplicação de circuitos *shunt* monomodais, para controle de vibração de apenas um modo de vibrar de cada vez, foi pioneira em Hagood e von Flotow (1991). O circuito implementado na presente contribuição é o *shunt* ressonante na topologia em série, com foco em sua aplicação para o amortecimento estrutural de vigas compósitas finas. O circuito ressonante se assemelha fisicamente de um absorvedor dinâmico de vibrações, exigindo que seja sintonizado para as frequências nas quais o amortecimento é desejado (HAGOOD e VON FLOTOW, 1991; FARIA, 2006).

Uma extensão natural do procedimento de modelagem determinística é a consideração de incertezas presentes nos parâmetros físicos e/ou geométricos, com o objetivo de avaliar o grau de influência da variabilidade nas previsões de desempenho. Essa análise de propagação da incerteza se torna especialmente interessante para aplicação em circuitos shunt, uma vez que o desempenho dessa estratégia de controle passivo depende de parâmetros como resistores e indutores.

Uma ferramenta muito utilizada em mecânica computacional estocástica denomina-se Método de Elementos Finitos Estocásticos (SFEM), a qual permite uma combinação da análise clássica por elementos finitos e uma análise estatística. Neste trabalho, as variáveis de projeto são modeladas como campos Gaussianos homogêneos estocásticos e o método de expansão de Karhunen-Loève (KL) usado para discretizar esses campos (GHANEM e SPANOS, 1991; RIBEIRO, et al., 2020). Posteriormente, a variabilidade da resposta pode ser avaliada usando a propagação da incerteza no modelo via Simulação de Monte Carlo (MCS) combinada com a amostragem por Latin Hypercube (LHC) (FLORIAN, 1992) como um solver estocástico.

2 I MODELAGEM DETERMINÍSTICA: COMPÓSITO-PZT-SHUNT

Esta seção é dedicada à modelagem de uma placa plana retangular compósita que incorpora um elemento piezelétrico. Este é um resumo dos desenvolvimentos originais feitos por Chee et al. (2000), Saravanos e Heyliger (1995) e implementados por Faria (2006) e Ribeiro et al. (2020).

2.1 Problema mecânico

A modelagem dos campos de deslocamentos mecânicos foi realizada via teoria FSDT, a qual considera cinco graus de liberdade na definição do seu campo de deslocamentos, e um elemento finito da família Serendipity, o qual possui oito nós sem a presença de nó central. A matriz de massa elementar é obtida por meio da equação da energia cinética, como apresentado na Eq. (1). Já a matriz de rigidez mecânica elementar é obtida por meio da energia potencial de deformação e dada na Eq. (2).

$$\mathbf{M}_{uu}^e = \sum_{k=1}^n \int_{V_e} \rho_k \mathbf{N}^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{N} dV_e \quad (1)$$

$$\mathbf{K}_{uu}^e = \int_{V_e} \mathbf{B}_u^T \mathbf{C}_t \mathbf{B}_u J dV_e \quad (2)$$

onde $(\bullet)^T$ é utilizado para indicar a transposição das matrizes; $\mathbf{A}_u(\mathbf{z})$ é a matriz contendo o termo fatorado, \mathbf{z} , que diz respeito a espessura; ρ_k é a densidade do material da k -ésima camada; V_e é o volume do elemento finito; $\mathbf{N}(\xi, \eta)$ são as Funções de Forma; $\mathbf{B}_u = \mathbf{D}(\mathbf{z})\mathbf{N}(\xi, \eta)$ sendo $\mathbf{D}(\mathbf{z})$ a matriz dos operadores diferenciais; \mathbf{C}_t é a matriz de propriedades mecânicas (já considerando-se a influência dos ângulos de direção das fibras do compósito laminado).

2.2 Problema eletromecânico-shunt

Para modelagem de estruturas compósitas laminadas contendo piezelétricos, a teoria FSDT é utilizada na aproximação dos deslocamentos mecânicos e os potenciais elétricos distribuídos ao longo das espessuras das camadas. O potencial elétrico da k -ésima camada, Eq. (3), pode ser escrito em termos das funções de forma, das funções layerwise transversais, $\mathbf{L}_k(\mathbf{z})$, e dos potenciais elétricos nodais, $\Phi_{ek}(t)$. Na Eq. (4), campo elétrico é dado pelo gradiente negativo do potencial elétrico.

$$\Phi_{(k)}(\xi, \eta, \mathbf{z}, t) = \mathbf{L}_k(\mathbf{z})\mathbf{N}(\xi, \eta)\Phi_{ek}(t) = \mathbf{N}_\phi(\xi, \eta, \mathbf{z})\Phi_{ek}(t) \quad (3)$$

$$\mathbf{E}_{(k)}(\xi, \eta, \mathbf{z}, t) = -\nabla\Phi_{(k)}(\xi, \eta, \mathbf{z}, t) = -\nabla\mathbf{N}_\phi(\xi, \eta, \mathbf{z})\Phi_{ek}(t) = -\mathbf{B}_\phi(\xi, \eta, \mathbf{z})\Phi_{ek}(t) \quad (4)$$

As matrizes de rigidezes elementares do sistema eletromecânico são obtidas a partir da equação da energia de deformação do sistema envolvendo a contribuição elétrica. A matriz de rigidez eletromecânica elementar é apresentada na Eq. (5.a) e a de rigidez elétrica elementar na Eq. (5.b).

$$\mathbf{K}_{\phi u}^e = \sum_{k=1}^n \int_{z=z_k}^{z_{k+1}} \int_{\xi=-1}^{\xi=1} \int_{\eta=-1}^{\eta=1} (\mathbf{B}_u^T \mathbf{e}_t \mathbf{B}_\phi) J d\eta d\xi dz \quad (5.a)$$

$$\mathbf{K}_{\phi\phi}^e = \sum_{k=1}^n \int_{z=z_k}^{z_{k+1}} \int_{\xi=-1}^{\xi=1} \int_{\eta=-1}^{\eta=1} (-\mathbf{B}_\phi^T \chi_t \mathbf{B}_\phi) J d\eta d\xi dz \quad (5.b)$$

onde $\mathbf{K}_{u\phi}^e = \mathbf{K}_{\phi u}^{eT}$; \mathbf{e}_t são as constantes dielétricas e χ_t é a matriz de permissividade elétrica, ambas levando-se em consideração as direções das fibras do compósito laminado.

A obtenção das matrizes de massa e rigidezes globais se dá por meio de procedimentos clássicos de montagem por elementos finitos conhecendo-se a conectividade dos nós. A equação do movimento para o sistema eletromecânico é apresentada na Eq. (6).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{uu} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}(t) \\ \ddot{\Phi}(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu} & \mathbf{K}_{u\phi} \\ \mathbf{K}_{\phi u} & \mathbf{K}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}(t) \\ \Phi(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{f}(t) \\ \mathbf{q}(t) \end{Bmatrix} \quad (6)$$

onde \mathbf{M}_{uu} , \mathbf{K}_{uu} , $\mathbf{K}_{u\phi}$ e $\mathbf{K}_{\phi\phi}$ são as matrizes globais; $\mathbf{K}_{u\phi} = \mathbf{K}_{\phi u}^T$, $\Phi(t)$ são os potenciais elétricos globais, $\mathbf{q}(t)$ é o vetor das cargas elétricas a nível global.

De posse das equações do movimento a nível global, é realizada a inclusão do circuito elétrico *shunt* no modelo. Assim, a função de resposta em frequência (FRF) do sistema, levando-se em consideração a impedância do circuito, $\mathbf{Z}(\omega)$, é dada na Eq. (7).

$$\mathbf{H}(\omega) = \left[-\omega^2 \mathbf{M}_{uu} + \mathbf{K}_{uu} - \mathbf{K}_{u\phi} \left(\mathbf{K}_{\phi\phi} - \frac{1}{j\omega} \mathbf{Z}^{-1}(\omega) \right)^{-1} \mathbf{K}_{\phi u} \right]^{-1} \quad (7)$$

3 | MODELAGEM ESTOCÁSTICA ELETROMECÂNICA-SHUNT

Nesta etapa, os parâmetros de projeto são modelados como campos estocásticos gaussianos, $H(\mathbf{x}, \theta)$, e estes campos, discretizados via expansão em série de Karhunen-Loève (KL), seguindo os desenvolvimentos originais de Ghanem e Spanos (1991). Pela utilização da expansão de KL é possível encontrar as matrizes aleatórias elementares de massa e rigidezes do sistema. Observa-se que as matrizes possuem uma parcela determinística que é calculada como apresentado na seção anterior e uma parcela estocástica.

$$\mathbf{M}_{uu}^e(\theta) = \mathbf{M}_{uu}^e + \sum_{k=1}^n \xi_r^k \sqrt{\lambda_i} \sqrt{\lambda_j} \int_{\Omega_y} f_j(\mathbf{y}) \int_{\Omega_x} f_i(\mathbf{x}) \mathbf{N}^T \mathbf{N} d\Omega_x d\Omega_y \quad (8)$$

$$\mathbf{K}_{uu}^e(\theta) = \mathbf{K}_{uu}^e + \sum_{k=1}^n \xi_r^k \sqrt{\lambda_i} \sqrt{\lambda_j} \int_{\Omega_y} f_j(\mathbf{y}) \int_{\Omega_x} f_i(\mathbf{x}) (\mathbf{B}_u^T \mathbf{C}_t \mathbf{B}_u) d\Omega_x d\Omega_y \quad (9)$$

$$\mathbf{K}_{u\phi}^e(\theta) = \mathbf{K}_{u\phi}^e + \sum_{k=1}^n \xi_r^k \sqrt{\lambda_i} \sqrt{\lambda_j} \int_{\Omega_y} f_j(\mathbf{y}) \int_{\Omega_x} f_i(\mathbf{x}) (\mathbf{B}_u^T \mathbf{e}_t \mathbf{B}_\phi) d\Omega_x d\Omega_y \quad (10)$$

$$\mathbf{K}_{\phi\phi}^e(\theta) = \mathbf{K}_{\phi\phi}^e + \sum_{k=1}^n \xi_r^k \sqrt{\lambda_i} \sqrt{\lambda_j} \int_{\Omega_y} f_j(\mathbf{y}) \int_{\Omega_x} f_i(\mathbf{x}) (\mathbf{B}_\phi^T \chi_t \mathbf{B}_\phi) d\Omega_x d\Omega_y \quad (11)$$

onde k é o número de camadas do compósito, $\{\xi_r, r \in N^*\}$ são as variáveis ortogonais de médias zero; as funções determinísticas dadas por $f_i(\mathbf{x})$ e $f_j(\mathbf{y})$ que são os autovetores da função de covariância e os valores escalares, λ_i e λ_j que são os autovalores da função de covariância.

A resposta em frequência do sistema eletromecânico, de posse do circuito elétrico *shunt* e considerando-se as matrizes estocásticas globais é apresentada na Eq. (12).

$$\mathbf{H}(\omega, \theta) = \left[-\omega^2 \mathbf{M}(\theta) + \mathbf{K}_{uu}(\theta) - \mathbf{K}_{u\phi}(\theta) \left(\mathbf{K}_{\phi\phi}(\theta) - \frac{1}{j\omega} \mathbf{Z}^{-1}(\omega, \theta) \right)^{-1} \mathbf{K}_{\phi u}(\theta) \right]^{-1} \quad (12)$$

4 | APLICAÇÕES NUMÉRICAS E DISCUSSÕES

Nesta seção, simulações numéricas foram realizadas com uma viga compósita engastada contendo um elemento piezolétrico acoplado de um circuito *shunt* ressonante, conforme mostrado na Fig. 1, onde dimensões são dadas em metros. A malha de elementos finitos utilizada é composta por seis elementos na extensão da viga. A viga possui quatro camadas de material compósito todas com a mesma espessura, 0,002 m. As densidades de massa dos materiais compósitos e PZT são de, $\rho = 1566 \text{ kg/m}^3$ e $\rho = 7700 \text{ kg/m}^3$, respectivamente, com os seguintes ângulos de orientação das fibras para as camadas de compósito $[0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]$ e com um coeficiente proporcional de rigidez, $\beta = 5 \times 10^{-8}$, para consideração do amortecimento inerente a estrutura.

A Tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas do material compósito e a Tabela 2 as propriedades elétricas e eletromecânicas do PZT G1195.

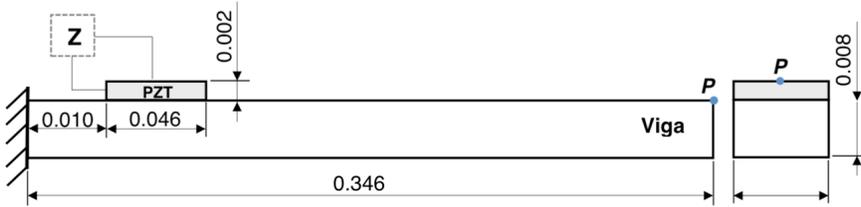


Fig. 1. Viga composta engastada com piezolétrico acoplado de circuito *shunt*.

| Material | E_1 (Pa) | E_2 (Pa) | E_3 (Pa) | G_{12} (Pa) | G_{13} (Pa) | G_{23} (Pa) | ν_{12} | ν_{13} | ν_{23} |
|------------------|-----------------------|--------------------|------------|-----------------------|---------------|--------------------|------------|------------|------------|
| Compósito | 1.72×10^{11} | 6.89×10^9 | E_2 | 3.45×10^9 | G_{12} | 1.38×10^9 | 0.25 | 0.25 | 0.30 |
| PZT G1195 | 6.90×10^{10} | E_1 | E_1 | 2.59×10^{10} | G_{12} | G_{12} | 0.33 | 0.33 | 0.33 |

Tabela 1. Propriedades mecânicas do material compósito.

| Material | e_{15} (C/m ²) | e_{24} (C/m ²) | e_{31} (C/m ²) | e_{32} (C/m ²) | e_{33} (C/m ²) | C_{11} (F/m) | C_{22} (F/m) | C_{33} (F/m) |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| PZT G1195 | 0.00 | 0.00 | -18.30 | -9.01 | -9.01 | 1.59×10^8 | C_{11} | C_{11} |

Tabela 2. Propriedades eletromecânicas e elétricas do PZT.

Para propósitos de atenuação de vibração passiva, o circuito *shunt* foi utilizado para atenuar as amplitudes de vibrações para o primeiro modo. Em um primeiro momento, para modelagem determinística do problema, foi realizada uma comparação entre o *shunt* resistivo e ressonante (resistivo-indutivo) no controle passivo de vibrações. O valor da resistência do circuito resistivo, $R = 96907.00\Omega$, e os valores de resistência e indutância do circuito ressonante, $R = 17016.00\Omega$ e $L = 111.81H$, foram calculados como ótimos de acordo com as equações de Hagood e Flotow (1991). Ressalta-se que estes valores são os nominais considerados nas simulações determinísticas e estocásticas apresentadas na sequência.

A Figura 2 apresenta a comparação entre as três FRFs para o primeiro modo de vibrar da estrutura: sem *shunt*, onde apenas o amortecimento inerente estrutural é considerado; sistema amortecido via *shunt* resistivo e sistema amortecido via *shunt* ressonante.

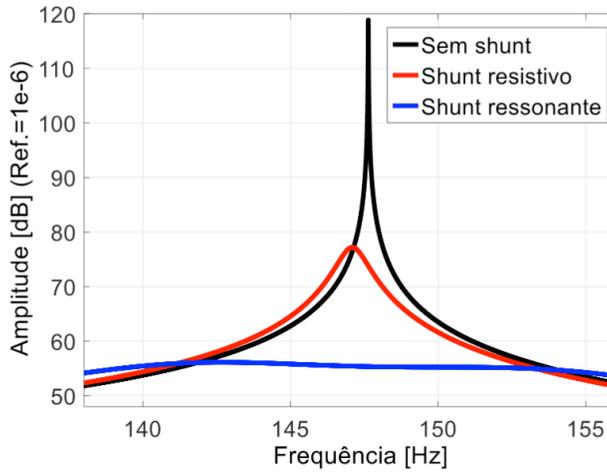


Fig. 2. FRFs determinísticas para o primeiro modo de vibrar da estrutura.

A atenuação dos níveis de vibrações fornecida pelos circuitos pode ser imediatamente observada. Nota-se que com o *shunt* resistivo a amplitude foi reduzida em aproximadamente 40dB e, via *shunt* ressonante, a redução é de aproximadamente 60dB . Assim, destaca-se o melhor desempenho do circuito ressonante em termos de mitigação de vibrações. Além disso, observa-se que, o uso do circuito resistivo leva a um ligeiro deslocamento de frequência para o modo de interesse, semelhante aos resultados obtidos pelo uso de materiais viscoelásticos. Já para o circuito ressonante, a FRF é semelhante à obtida pelo uso de absorvedores dinâmicos de vibrações (ADV) pela presença de dois novos modos e uma antirressonância.

Na sequência de simulações, incertezas serão consideradas nos parâmetros estruturais e elétricos que foram fatorados das matrizes. Estes parâmetros incertos são modelados como campos estocásticos e discretizados pela expansão em série de KL. O domínio estocástico utilizado está de acordo com os desenvolvimentos de Ghanem e Spanos (1991) e Ribeiro et al. (2020), com um comprimento de correlação igual ao comprimento do elemento finito e dez termos na expansão em série de KL. Além disso, o sistema eletromecânico estocástico foi resolvido usando a amostragem Latin Hypercube (LHC) (Florian, 1992), onde o número de amostras N_s a serem usadas nas simulações estocásticas foi obtido através de uma análise de convergência e baseado no cálculo do desvio quadrático médio (RMSD), Eq. (13).

$$RMSD = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} \|\mathbf{H}_i(\omega, \theta) - \bar{\mathbf{H}}(\omega)\|^2 \quad (13)$$

onde $\mathbf{H}_i(\omega, \theta)$ são as amplitudes das FRFs estocásticas para uma determinada realização, θ , e $\bar{\mathbf{H}}(\omega) = E[\mathbf{H}(\omega, \theta)]$ é o valor médio na banda de frequência de interesse, ω .

Para o estudo da convergência, considerou-se o pior caso: nível de incerteza de 20% e todos os parâmetros possíveis considerados como incertos. Nota-se que o uso de 500 amostras nas simulações estocásticas é satisfatório com convergência garantida, como é apresentado na Fig. 3.

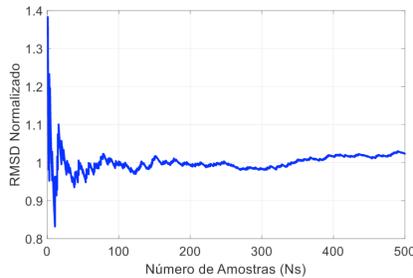


Fig. 3. Análise de convergência.

4.3 Análise estocástica: sistema amortecido via *shunt* ressonante

Nesta aplicação, o PZT representado na Fig. 1 foi acoplado de um circuito ressonante e seus parâmetros, resistência e indutância, assim como os parâmetros estruturais, espessura das camadas e ângulos das fibras, foram considerados incertos.

No primeiro conjunto de simulações, apenas a resistência do circuito foi considerada incerta. O restante dos parâmetros foram simulados com seus valores nominais. A Figura 4 apresenta os quatro cenários de incertezas para um valor nominal de resistência $R = 17016,00 \Omega$.

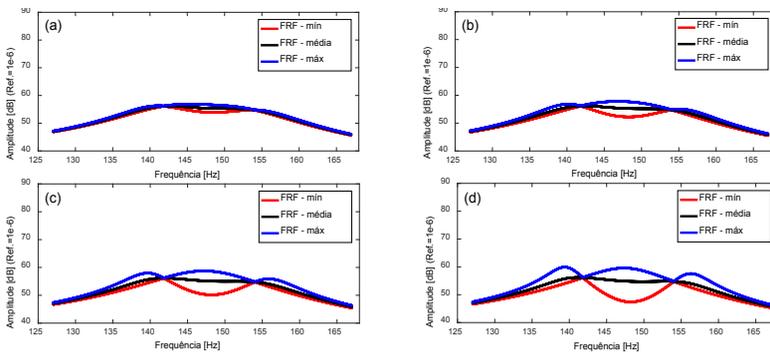


Fig. 4. Variável estocástica: resistência do circuito ressonante. Envelopes de FRFs estocásticas com um nível de incerteza: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%; (d) 20%.

Pela Fig. 4 observa-se que, os envelopes de FRFs se expandem com o aumento do nível de incerteza introduzido no parâmetro resistivo do circuito ressonante. Além disso, nota-se que as FRFs médias estocásticas estão dentro dos envelopes soluções, confirmando uma boa previsão do modelo. Para o pior cenário, considerando um nível de dispersão de 20% no valor nominal da resistência, a diferença entre as amplitudes máxima e mínima de vibração foi de aproximadamente 10dB.

No segundo conjunto de simulações, apenas a indutância do circuito ressonante é considerada incerta, sendo a dispersão inserida em seu valor nominal $L = 111,81H$. Novamente, a Fig. 5 mostra que, à medida que o nível de incerteza aumenta, as dispersões em torno dos valores médios das FRFs também aumentam. No entanto, comparando as Figs. 4 e 5, é possível concluir sobre a influência significativa da indutância na variabilidade das FRFs em comparação à resistência. Por exemplo, para o cenário (d) da Fig. 5, relacionado ao nível de incerteza de 20%, a diferença entre os valores mínimo e máximo das amplitudes de vibração foi de cerca de 25dB.

Neste momento, é importante discutir sobre o circuito ressonante para o amortecimento passivo: como mencionado anteriormente, ele tem um comportamento semelhante ao de um absorvedor dinâmico de vibração (ADV) e, os chamados pontos invariantes também são verificados nas FRFs estocásticas.

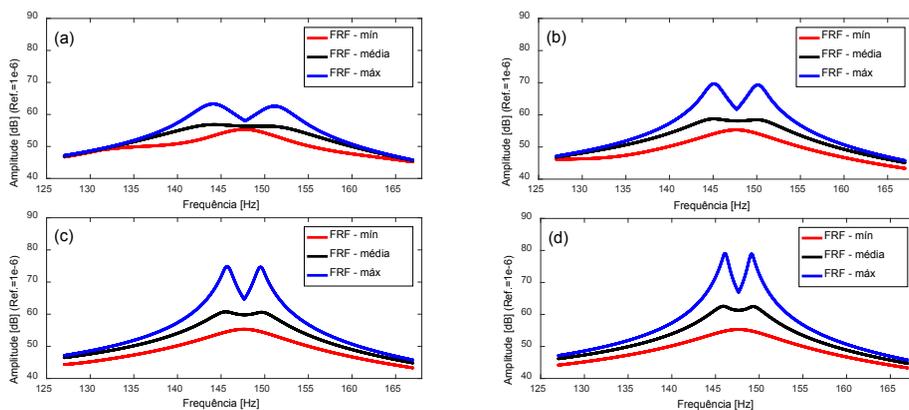


Fig. 5. Variável estocástica: indutância do circuito ressonante. Envelopes de FRFs estocásticas com um nível de incerteza: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%; (d) 20%.

No caso de um ADV, sabe-se que, com a variação do nível de amortecimento, os pontos invariantes não se movem. No entanto, como foi previamente mencionado e aqui demonstrado, a indutância elétrica ajusta o posicionamento do pico em uma determinada frequência, enquanto que resistência elétrica varia o nível de amortecimento passivo do circuito. Assim, no caso do sistema amortecido via *shunt* ressonante, quando apenas a

resistência foi considerada variável incerta, os pontos invariantes foram mantidos, pois a resistência apenas alteraria o amortecimento da estrutura, como foi verificado na Fig. 4. Entretanto, ao se considerar a indutância como variável incerta, não foi mais possível observar a presença dos pontos invariantes, pois houve uma mudança no comportamento do sistema, como se tivesse ocorrido uma mudança na massa da estrutura, resultando em uma alteração do posicionamento em frequência, como apresentado nas Figs. 5, 6 e 7.

No próximo conjunto de simulações, tanto a resistência quanto a indutância do circuito ressonante foram consideradas variáveis incertas e os resultados obtidos são apresentados na Fig. 6.

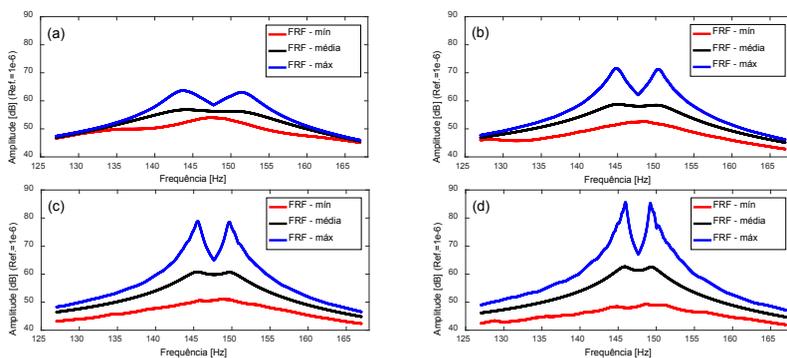


Fig. 6. Variáveis estocásticas: resistência e indutância do circuito ressonante. Envelopes de FRFs estocásticas com um nível de incerteza: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%; (d) 20%.

Ao aumentar o número de variáveis elétricas incertas, o intervalo de confiança também se expandiu, mas nota-se que as incertezas introduzidas na indutância têm mais influência sobre a variabilidade das FRFs do que as incertezas introduzidas pela resistência, como demonstrado nas Figs. 5 e 6.

Os resultados do último conjunto de simulações são apresentados na Fig. 7, que representa o caso em que as incertezas foram introduzidas tanto nas variáveis estruturais, espessura das camadas e ângulos das fibras do compósito, quanto nas variáveis elétricas, resistência e indutância do circuito, de maneira simultânea.

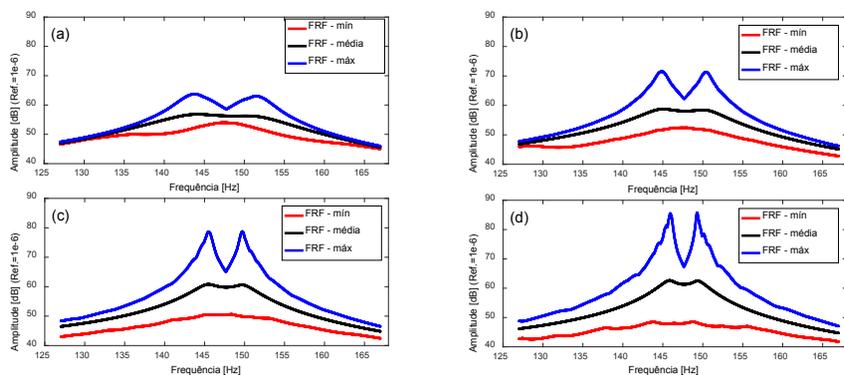


Fig. 7. Variáveis estocásticas: resistência e indutância do circuito ressonante e parâmetros estruturais. Envelopes de FRFs estocásticas com um nível de incerteza: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%; (d) 20%.

Os resultados apresentados na Fig. 7 demonstram o maior grau de influência das variáveis elétricas nas amplitudes das FRFs estocásticas em comparação com os parâmetros estruturais.

5 | CONCLUSÕES FINAIS

Com base nos resultados, é possível verificar claramente a influência dos parâmetros estruturais e elétricos na variabilidade e desempenho do circuito de controle passivo. Para o sistema eletromecânico estocástico amortecido via *shunt* ressonante, foi possível concluir que as incertezas introduzidas nos parâmetros elétricos, resistência e indutância, possuem maior influência na variabilidade das respostas estocásticas se comparadas as incertezas introduzidas nos parâmetros estruturais.

Foi demonstrado também que circuitos ressonantes possuem um comportamento semelhante aos absorvedores dinâmicos de vibração. Assim, foi possível concluir sobre os pontos invariantes na resposta do sistema. Verificou-se que, quando apenas o parâmetro resistivo desse tipo de circuito foi considerado incerto, os pontos invariantes eram mantidos, uma vez que o resistor elétrico apenas altera o nível de amortecimento da estrutura. No entanto, considerando o parâmetro indutivo como incerto, não foi mais possível observar a presença dos pontos invariantes, pois ocorre uma espécie de modificação na massa da estrutura, causando um deslocamento em frequência.

Assim, com base nas simulações numéricas aqui realizadas, é possível destacar que, a metodologia sugerida permite melhorar a previsibilidade do desempenho de circuitos ressonantes, considerando suas incertezas e incertezas na estrutura, constituindo uma ferramenta útil na fase preliminar de projeto deste tipo de controle passivo de vibrações.

Destaca-se ainda a importância do uso de procedimentos de otimização combinados com a quantificação de incerteza de modo a se obter um controle ótimo e robusto no que

tange a atenuação passiva de vibrações. Este aspecto será considerado em trabalhos futuros.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES, ao CNPq, à FAPEMIG e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - FEMEC/UFU pelo suporte no desenvolvimento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

CHEE, C., TONG, L. e STEVEN, G. P. **A mixed model for adaptive composite plates with piezoelectric for anisotropic actuation**. *Comput. Struct.*, v. 77, p. 253–268, 2000.

FARIA, A. W. **Modelagem por Elementos Finitos de Placas Compostas Dotadas de Sensores e Atuadores Piezoelétricos: Implementação Computacional e Avaliação Numérica**, 152f. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, 2006.

FLORIAN, A. **An efficient sampling scheme: updates Latin Hypercube sampling**. *Probab. Eng. Mech.*, v. 7, p. 123–130, 1992.

GAY, D., HOA, S. V. e TSAI, S. W. **Composite Materials: Design and Applications**. CRC Press, New York, 2003.

GHANEM, R. G. e SPANOS, P. D. **Stochastic Finite Elements – A Spectral Approach**. Springer Verlag, 1991.

HAGOOD, N. W. e VON FLOTOW, A. **Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks**. *Journal of Sound and Vibration*, v. 146, n. 2, p. 243-268, 1991.

REDDY, J. N. **Mechanics of Laminated Composite Plates: Theory and Analysis**. 2. ed. Florida: CRC Press, 1997.

RIBEIRO, L. P., DE LIMA, A. M. G. e SILVA, V. A. C. **Robust project of resonant shunt circuit for passive vibration control of composite structures**. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, v. 42, p. 342, 2020.

SARAVANOS, D. A. e HEYLIGER P. R. **Coupled Layerwise Analysis of Composite Beams with Embedded Piezoelectric Sensors and Actuators**. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 6, n. 3, p. 350-363, 1995.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Acabamento 2, 3, 9, 10, 11, 15, 16, 17, 22, 25, 28, 75, 151, 152

Aço Carbono 22, 25

Aço N2711 8, 13

Algoritmos 128, 129, 131

Aplicações Matemáticas 128

Atmosfera de Corte 19, 151, 152, 154, 155, 156, 157

B

Biodegradável 49, 52

Biomodelos 71, 73

Blindagem 31, 32, 33, 34, 35, 36, 42, 45, 46

C

Caracterização Mecânica 47, 48

Carbeto de Silício 15, 16, 17, 18, 19, 20

Circuitos Shunt Piezelétricos 81

Coefficiente Convectivo 104, 106, 110

Coletor Solar 117, 126

Controle Ótimo 91, 128, 129, 130, 135, 138

Controle Passivo 81, 82, 86, 91

Correlações 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114

D

Distância de Aplicação 22, 24, 25, 29

E

Elementos Finitos 71, 74, 76, 77, 79, 80, 81, 82, 84, 85, 92

Embalagens 48, 52, 96

Energia Renovável 94, 101

Escoamento Multifásico 104

G

Gás Liquefeito de Petróleo 94, 96, 102, 103

Gás Natural Veicular 94, 95, 97

Grupo Motor-Gerador 93, 94, 95, 98, 99, 100, 102

I

Imagem Médica 71

Inconel 718 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21

Integridade da Superfície 8

J

Jateamento 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30

L

Laminados de Aço 31, 32, 36, 39

M

Materiais Absorvedores 60, 61, 70

Material Compósito 81, 82, 85, 86

Modelagem 71, 72, 76, 79, 81, 82, 83, 84, 86, 92, 104, 138, 141, 143

Modelo Teórico 1, 2

Módulos Balísticos 31

N

Nanopartículas 61

P

Padrão Intermitente 104, 105, 107, 108

Penetração de Trabalho 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 17, 18, 19, 20, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157

Potência Elétrica 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157

Propagação de Incertezas 81

Próteses 71, 73

R

Radiação Térmica 117, 118, 119, 122, 123, 126

Refletividade 60, 61, 122, 123, 124, 126

Retificação 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 28, 29, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157

Rugosidade 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 15, 17, 18, 19, 20, 22, 25, 27, 28, 29, 30, 151

S

Superfícies Seletivas 117, 118, 127

T

Teodolito 139, 140, 141, 143, 145, 146, 147, 148, 149, 150

Transferência de Calor 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 113, 115, 118, 126, 127

V

Velocidade da Peça 2, 3, 4, 5, 8, 10, 12, 17, 18, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157

 www.atenaeditora.com.br

 contato@atenaeditora.com.br

 @atenaeditora

 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Mecânica

2

 **Atena**
Editora

Ano 2020

 www.atenaeditora.com.br
 contato@atenaeditora.com.br
 @atenaeditora
 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Mecânica

2

 **Atena**
Editora
Ano 2020