

# Engenharia Mecânica: Inovações Tecnológicas de Elevado Valor

Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta  
(Organizadores)

**Atena**  
Editora  
Ano 2021



# Engenharia Mecânica: Inovações Tecnológicas de Elevado Valor

Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta  
(Organizadores)

**Atena**  
Editora  
Ano 2021

**Editora Chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Assistentes Editoriais**

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto Gráfico e Diagramação**

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

**Imagens da Capa**

Shutterstock

**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.



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

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  
Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Daniel Richard Sant’Ana – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo  
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá  
Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima  
Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Ivone Goulart Lopes – Instituto 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  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. 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<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia  
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará  
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

### **Ciências Biológicas e da Saúde**

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Prof<sup>ª</sup> Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Linguística, Letras e Artes**

Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza  
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba  
Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí  
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais  
Prof. Me. Aleksandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás  
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Anne Karynne da Silva Barbosa – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais  
Prof. Me. Armando Dias Duarte – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar

Profª Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos  
Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Me. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná  
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  
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes – Instituto Edith Theresa Hedwing Stein  
Prof. Me. Ezequiel Martins Ferreira – Universidade Federal de Goiás  
Profª Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora  
Prof. Me. Fabiano Eloy Atilio Batista – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas  
Prof. Me. Francisco Odécio Sales – Instituto Federal do Ceará  
Profª Drª Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo  
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária  
Prof. Me. Givanildo de Oliveira Santos – Secretaria da Educação de Goiás  
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Me. Gustavo Krahl – Universidade do Oeste de Santa Catarina  
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro  
Profª Ma. Isabelle Cerqueira Sousa – Universidade de Fortaleza  
Profª Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College  
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará  
Prof. Dr. José Carlos da Silva Mendes – Instituto de Psicologia Cognitiva, Desenvolvimento Humano e Social  
Prof. Me. Jose Elyton Batista dos Santos – Universidade Federal de Sergipe  
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay  
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco  
Profª Drª Juliana Santana de Curcio – Universidade Federal de Goiás  
Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/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  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Lillian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> 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. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Luma Sarai de Oliveira – Universidade Estadual de Campinas  
Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos  
Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva – Governo do Estado do Espírito Santo  
Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior  
Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie  
Prof<sup>ª</sup> Dr<sup>ª</sup> Poliana Arruda Fajardo – Universidade Federal de São Carlos  
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof. Me. Renato Faria da Gama – Instituto Gama – Medicina Personalizada e Integrativa  
Prof<sup>ª</sup> 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  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo  
Prof<sup>ª</sup> Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana  
Prof<sup>ª</sup> 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



## Engenharia mecânica: inovações tecnológicas de elevado valor

**Editora Chefe:** Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira  
**Bibliotecária:** Janaina Ramos  
**Diagramação:** Maria Alice Pinheiro  
**Correção:** Flávia Roberta Barão  
**Edição de Arte:** Luiza Alves Batista  
**Revisão:** Os Autores  
**Organizadores:** Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia mecânica: inovações tecnológicas de elevado valor / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, João Dallamuta. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5706-782-6

DOI 10.22533/at.ed.826210902

1. Engenharia mecânica. I. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). II. Dallamuta, João (Organizador). III. Título.  
CDD 621

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

**Atena Editora**

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

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

## 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.

Nos dias atuais a busca pela redução de custos, aliado a qualidade final dos produtos é um marco na sobrevivência das empresas, reduzindo o tempo de execução e a utilização de materiais.

Neste livro são apresentados trabalho teóricos e práticos, relacionados a área de mecânica e materiais, 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.

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

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
THICKNESS CONTROL OF COATINGS DEPOSITED BY CO <sub>2</sub> LASER FOR AERONAUTICAL TURBINE BLADES	
Jéssica Fernanda de Azevedo	
Viviane Teleginski Mazur	
Daniele Cristina Chagas	
Júlio César Gomes Santos	
Maurício Marlon Mazur	
Getúlio de Vasconcelos	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8262109021</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>8</b>
CORRELATION BETWEEN THE TOPOGRAPHY OF THE TOOL'S WORN SURFACE AND THE RESULTING WORKPIECE ROUGHNESS IN THE MILLING PROCESS OF THE INCONEL 718	
Leonardo Rosa Ribeiro da Silva	
André Rezende de Figueiredo Oliveira	
Álisson Rocha Machado	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8262109022</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>22</b>
LEVANTAMENTO DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE TAYLOR PARA FORÇA DE USINAGEM EM TORNEAMENTO DE INCONEL COM PCBN	
Leonardo Rosa Ribeiro da Silva	
Felipe dos Anjos Rodrigues Campos	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8262109023</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>36</b>
CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, MECÂNICA, TÉRMICA E MICROESTRUTURAL DAS FIBRAS DE TIMBÓ-AÇU	
José Maria Braga Pinto	
Douglas Santos Silva	
Roberto Tetsuo Fujiyama	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8262109024</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>52</b>
“FAILURE ANALYSIS OF A 3102 ALUMINUM TUBE OF AN AUTOMOTIVE AIR CONDITIONING CONDENSER”	
Miguel Angel Neri Flores	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8262109025</b>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES</b> .....	<b>66</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO</b> .....	<b>67</b>

## LEVANTAMENTO DOS COEFICIENTES DA EQUAÇÃO DE TAYLOR PARA FORÇA DE USINAGEM EM TORNEAMENTO DE INCONEL COM PCBN

Data de aceite: 04/02/2021

**Leonardo Rosa Ribeiro da Silva**

Federal University of Uberlandia, School of  
Mechanical Engineering  
Uberlândia, MG  
<https://orcid.org/0000-0003-2777-4500>

**Felipe dos Anjos Rodrigues Campos**

Federal University of Uberlandia, School of  
Mechanical Engineering  
Uberlândia, MG  
<http://lattes.cnpq.br/2028604721240846>

**RESUMO:** Embora ainda sejam estudados de forma majoritariamente empírica, existem várias tentativas de modelagem dos processos de usinagem, de forma que o uso da Equação de Taylor seja a forma mais utilizada. Embora essa equação relacione a vida da ferramenta às condições de corte, ela pode ser adaptada para representar a força de corte durante o torneamento. Neste trabalho, foi levantada a curva que modela a força durante o torneamento da liga Inconel 718 com ferramentas de PCD em diferentes condições de lubrificação, de corte e desgaste da ferramenta. Os coeficientes da Equação de Taylor adaptada foram determinados ao resolver um problema de otimização pelo Método dos Mínimos Quadrados utilizando métodos clássicos para solução de problemas multidimensionais restritos. Os coeficientes otimizados produziram um ajuste adequado

para alguns casos de torneamento. O algoritmo demonstrou sensibilidade considerável a parâmetros numéricos e ao chute inicial dos coeficientes.

**PALAVRAS - CHAVE:** otimização clássica, equação de Taylor, método da penalidade interna, método da variável métrica.

**ABSTRACT:** Although they are still studied in a mostly empirical way, there are several of the modeling of machining processes, so that the use of the Taylor Equation is the most used form. Although this equation relates tool life to cutting conditions, it can be adapted to represent the cutting force during turning. In this work, the curve that shapes the force during the turning of the Inconel 718 alloy was lifted with PCD tools in different conditions of lubrication, cutting and tool wear. The Taylor coefficients adapted were determined when solving an optimization problem using the Least Squares Method using classics for solving restricted multidimensional problems. The optimized coefficients produce an adequate fit for some turning cases. The algorithm is sensitive to sensitivity to numerical parameters and to the initial guess of the coefficients.

**KEYWORDS:** classical optimization, Taylor equation, internal penalty method, metric variable method.

### 1 | INTRODUÇÃO

Os processos convencionais de usinagem visam a obtenção de uma peça final ou semiacabada através da remoção de material na forma de cavaco. Uma das configurações mais

comuns é o torneamento, no qual a peça rotaciona e uma ferramenta avança na direção de seu eixo, gerando uma superfície de revolução. De forma geral, as características que mais influenciam a qualidade e custo da peça nesse caso são os parâmetros de corte (avanço, velocidade de corte), o tipo de lubrificação, os materiais da peça e da ferramenta, e o tipo e forma da ferramenta.

A escolha correta desses itens é fundamental para evitar o desgaste prematuro da ferramenta, quebras ou danos a máquina, e ocorrência de vibração, visto que esse fenômeno tende a piorar a rugosidade da peça e facilitar a quebra dos equipamentos. Sobretudo durante o trabalho com materiais de baixa usinabilidade, como as ligas de níquel, bastante utilizadas na indústria aeroespacial, graças as suas excelentes propriedades mecânicas (resistência a tração e tenacidade) e resistência a corrosão, as quais são conservadas mesmo em altas temperaturas. No caso do Inconel 718, liga a base de níquel, ferro e cromo, principalmente, o material é capaz de conservar alta dureza mesmo nas altas temperaturas observadas na interface cavaco ferramenta durante a usinagem, fazendo com a força de corte continue alta e com que a ferramenta se desgaste mais rápido (Santos e Sales, 2007).

Embora testes práticos ainda sejam a forma mais comum de estudar a usinabilidade de um material, existem várias tentativas de modelar os resultados encontrados a fim de determinar os parâmetros ótimos de operação. Dentre as possíveis estratégias, a mais utilizada tem sido a Equação de Taylor para vida da ferramenta, representada na Equação 1 (Dos Santos et. Al., 1998), no qual a vida útil da ferramenta  $T$  é função da velocidade de corte  $V_c$ , avanço  $f$ , profundidade  $ap$ , desgaste de flanco da ferramenta  $VB$ , para determinadas condições experimentais representadas pela constante  $K$  (material, ferramenta, máquina, lubrificante).

$$T = K \cdot V_c^a \cdot f^b \cdot ap^c \cdot VB^d \quad (1)$$

Outras grandezas, como a força de corte, também podem ser modeladas através desta equação (Barrow, 1971), fazendo-se a analogia de que variam de forma exponencial também. Essa premissa tem base nas observações experimentais, de forma que a função utilizada seja válida para todo o domínio ou pelo menos um intervalo das variáveis, como mostrado na Figura 1. Caso a função não seja adequada para modelar o comportamento prático para os intervalos utilizados, haverá um erro considerável. Dessa forma, a definição dos parâmetros de corte dos experimentos também influencia bastante a qualidade do ajuste pela função exponencial citada.

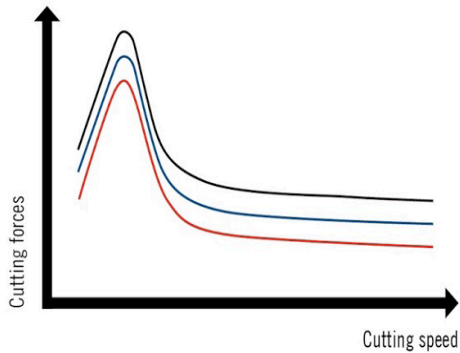


Figura 1. Relação entre força de corte e velocidade de corte numa situação genérica de torneamento. Inicialmente, a maior taxa de deformação leva a maiores forças. No entanto, com aumento da velocidade o material aquece e sua resistência diminui. A configuração específica do gráfico depende de várias outras características, como materiais, máquina e parâmetros selecionados, entre outras. Adaptado de Metalworking (2019).

O objetivo deste trabalho foi levantar a equação de Taylor adaptada para representar a força de corte em função da velocidade de corte, avanço e desgaste de flanco da ferramenta. Para tal, uma barra de Inconel 718 foi torneada em diferentes condições, sendo registrada a força de corte através de um dinamômetro piezolétrico. Utilizando-se os métodos dos mínimos quadrados, através dos dados experimentais foi montado um problema de otimização clássica com objetivo de minimizar a diferença entre a força medida e a força calculada segundo a equação, fazendo-se um processo iterativo para ajustar os coeficientes da equação. A função objetiva foi otimizada pelo Método da função Penalidade Interna (Vanderplaats, 1999), o qual é utilizado para resolver problemas multidimensionais restritos e que consiste na utilização das restrições para deformação da função em torno de uma referência e sua consequente transformação num problema multidimensional irrestrito. Esse último pode ser resolvido por diferentes estratégias, como Método de Newton, das Direções Conjugadas ou da Máxima Descida, por exemplo. Neste caso foi usado Método da Variável Métrica, que consiste na transformação do problema multidimensional em um equivalente unidimensional com aproximação do inverso da matriz Hessiana durante o cálculo da direção de busca. Este último problema fica dependente apenas do passo de busca  $\alpha^*$ , o qual foi calculado pelo Método da Seção Áurea a cada iteração.

## 2 | METODOLOGIA

### 2.1 Testes práticos

Uma barra de Inconel 718, cuja composição química é exibida na Tabela 1, foi torneada no torno CNC ROMI Multiplic 35D com pastilhas de diamante poli cristalino (PCD) DA1000 da marca Sumitomo, de geometria quadrada. Dessas, 4 possuíam ângulo de saída positivo (P) e outras 4 com ângulo negativo (N). Cada ferramenta realizou dois passes na barra, sendo o desgaste de flanco medido ao fim de cada passe em microscópio ferramenteiro. Foi realizado um planejamento experimental fatorial reduzido  $2^{5-1}$ , com os níveis e variáveis mostrados na Tabela 2. As forças foram medidas num dinamômetro Kistler® 9265B, com sinal adquirido a 4 kHz durante 30 segundos, adotando-se a média dos valores adquiridos nesse tempo. Como lubrificante, foi utilizado um fluido vegetal misturado a ar-comprimido, sendo direcionado a superfície de saída da ferramenta no torno com pressão de aproximadamente 3 bar.

Elemento	Ni	Cr	Fe	Nb+Ta	Mo	Ti	Al	Co
% Peso	50,0	17,0	Bal.	4,75	2,80	0,65	0,20	1,0
	55,0	21,0		5,50	3,30	1,15	0,80	máx

Elemento	C	Mn	Si	P	S	B	Cu	Pb
% Peso	0,08	0,35	0,35	0,015	0,015	0,006	0,30	0,001
	máx	máx	máx	máx	máx	Máx	máx	máx

Tabela 1. Faixa de composição química para os elementos do material usinado.

Vc (m/min)	f (mm/rotação)	Ferramenta	MQL (mL/h)	Desgaste
75	0,03	P	50	após 1º passe
150	0,05	N	150	após 2º passe

Tabela 2. Níveis das variáveis do planejamento experimental.

Os valores medidos estão expostos na Tabela 3, tendo sido utilizados para ajustar os coeficientes da Equação de Taylor pelo Método dos Mínimos Quadrados. Foi montado um problema de otimização clássica, resolvido por métodos numéricos, que serão detalhados adiante. Os resultados experimentais foram separados por casos, conforme a primeira coluna da Tabela 3.

Isso foi feito, primeiramente, porque o tipo de ferramenta é uma variável qualitativa, o que dificultaria sua consideração como variável no problema de otimização. Segundo, no caso da lubrificação, a análise de variância (ANOVA) mostrou que este é o parâmetro que mais influencia a força de corte, conforme indicado na Figura 2. Dessa forma, é provável que um ajuste das duas situações de lubrificação por uma única função não seria adequado,



visto que provocam efeitos muito diferentes nas forças observadas. Dessa forma, optou-se por aplicar o mesmo método numérico para cada caso, a fim de obter-se 4 conjuntos diferentes de coeficientes otimizados.

Ferramenta, MQL (mL/h)	Vc (m/min)	f (mm/rot.)	VB (mm)	Fexp (N)
P, 50	75	0,03	0,036	10,31
	75	0,03	0,054	23,31
	150	0,05	0,030	10,51
	150	0,05	0,037	17,58
N, 50	75	0,05	0,047	3,98
	75	0,05	0,047	13,62
	150	0,03	0,023	5,49
	150	0,03	0,049	10,10
P, 150	75	0,05	0,079	7,05
	75	0,05	0,079	5,20
	150	0,03	0,044	3,41
	150	0,03	0,122	12,14
N, 150	75	0,03	0,080	4,11
	75	0,03	0,187	8,66
	150	0,05	0,018	2,95
	150	0,05	0,034	11,50

Tabela 3. Resultados experimentais da força de corte para cada caso estudado, segundo os diferentes parâmetros de usinagem.

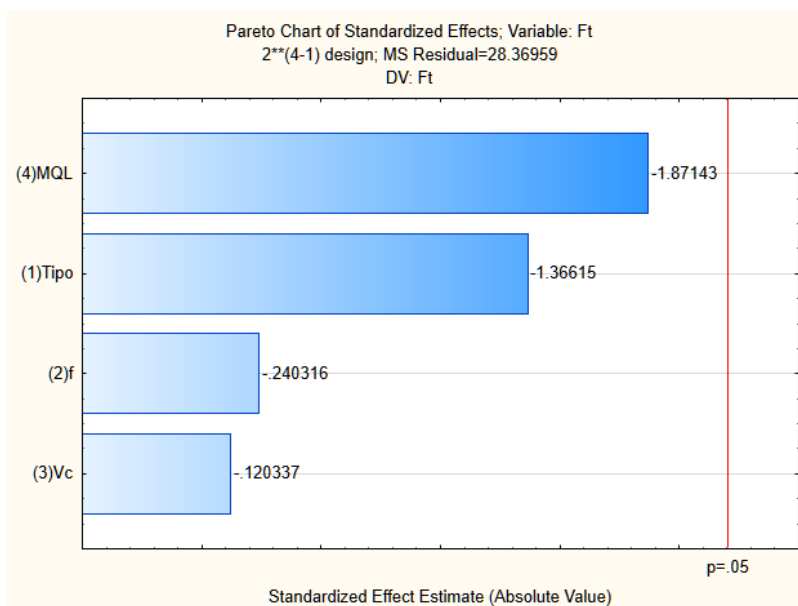


Figura 2. Diagrama de Pareto para força de corte calculado segundo análise de variância.

## 2.2 Problema de otimização clássica

Para cada um dos casos citados, o objetivo foi determinar os coeficientes da Equação 2, de forma que a função objetivo  $FO$  da Equação 3, a qual descreve o erro acumulado dentro do Método dos Mínimos Quadrados, fosse o menor possível. Nesta última equação  $n$  é igual a 4, pois essa é a quantidade de valores experimentais (obtidos para diferentes condições de corte e desgaste) medidos dentro de cada caso.

$$F_{teo} = K \cdot Vc^x \cdot f^y \cdot VB^z \quad (2)$$

$$FO = \sum_{i=1}^n (F_{exp}^{(i)} - F_{teo}^{(i)})^2 \quad (3)$$

A partir de um chute inicial para os coeficientes  $K$ ,  $x$ ,  $y$  e  $z$ , foi montado um processo iterativo de aproximação das variáveis conforme o Método da função Penalidade Interna, no qual a função pseudo objetivo  $\Phi$  é montada conforme a Equação 4, multiplicando um fator de ponderação  $Rp$  (o qual diminui a cada iteração, tendendo a 0) à soma do inverso das restrições de desigualdade  $g_j$ . Foram consideradas as restrições de que todos os coeficientes, exceto  $x$ , devem ser maiores que 0, conforme Equação 5. Isso garante que a força não seja negativa e que aumente com o avanço e o desgaste, em concordância com o descrito na literatura (Santos e Sales, 2007). Assim, a função pseudo objetivo obtém a forma da Equação 6. Os algoritmos completos são apresentados no Anexo I, implementados para o software Matlab®. De forma simplificada, consiste no uso do algoritmo de Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno (BFGS), substituindo a função objetivo pela pseudo objetivo, conforme Equação 7, e transformando o problema multidimensional em unidimensional, para aproximação das variáveis de entrada  $VP$  até que o critério de tolerância de 10E-6 fosse atingido, segundo norma Euclidiana quadrática.

$$\Phi = FO - Rp * \left( \sum_{j=1}^3 \frac{1}{g_j} \right) \quad (4)$$

$$g_1 \equiv -c \quad ; \quad g_2 \equiv -y \quad ; \quad g_3 \equiv -z \quad (5)$$

$$\Phi = \left[ \sum_{i=1}^4 (F_{exp}^{(i)} - F_{teo}^{(i)})^2 \right] - Rp * \left( \frac{1}{-c} + \frac{1}{-y} + \frac{1}{-z} \right) \quad (6)$$

$$VP^{K+1} = VP^K - \alpha * (H^K + D^K) * \nabla \Phi^K \quad (7)$$

Devido a sensibilidade do problema em relação ao chute inicial para os coeficientes, valores entre 0 e 3 foram testados para  $K$ ,  $y$  e  $z$ , enquanto o intervalo de  $-1.5$  a  $1.5$  foi testado para  $x$ . Para isso, o algoritmo de resolução do problema multidimensional irrestrito foi avaliado para as possíveis combinações dos coeficientes chutados, variados de um em um. Como cada coeficiente foi variado de um em um (por exemplo, 0, 1, 2 e 3), foram geradas  $4^4$  combinações, resultando em 256 chutes diferentes. Para cada chute, os coeficientes ótimos foram encontrados para cada um dos 4 casos, totalizando 1024 chamadas do algoritmo, de forma que os valores otimizados  $VP^*$ , os chutes que geraram esse resultado, o valor de  $FO$  avaliada para  $VP^*$  e o número de avaliações da função e de sua derivada fossem registrados. Esses dados dão uma ideia da convergência do problema e do custo computacional da solução.

A sensibilidade com relação ao valor inicial e ao ritmo de variação do fator de ponderação  $Rp$  a cada iteração também foi avaliada. Vanderplaats (1999) recomenda que seja adotado um valor alto na primeira iteração, e que caia num ritmo adequado, o qual dependerá de cada problema. Para divisão de  $Rp$  por 1,5 foram testados valores iniciais de 100, 10 e 1. E ao fixar o valor inicial em 1, foram testados variação dividindo por 1,5 e por 5. Em relação ao intervalo de busca dentro do Método da Seção Áurea, foi fixado o intervalo de 0 a 1, a fim de garantir que o passo de busca fosse pequeno e evitasse problemas na convergência do resultado.

### 3 | RESULTADOS

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos a partir do algoritmo do Anexo I. Pode-se notar que para cada caso, modificam-se os chutes iniciais que originaram os valores ótimos assim como a qualidade do ajuste. O caso melhor representado pelo modelo da Equação de Taylor foi o primeiro, indicado pelo baixo valor da função objetivo e pela proximidade dos valores experimentais e teóricos. Já no segundo caso obteve-se o pior ajuste, indicado pelo alto valor da função objetivo, que indica os grandes desvios entre os valores práticos e teóricos. É provável que funções exponenciais não sejam as mais adequadas para representar os fenômenos experimentais nas condições ensaiadas.

Percebe-se também que dentro de cada caso podem existir vários pontos ótimos que produzem o mesmo mínimo, cada um sendo encontrado para um valor de chute diferente. Nestas situações, no entanto, o coeficiente  $z$ , é aproximadamente constante em cada uma, o que pode indicar uma dependência mais estrita do modelo em relação a essa variável, já que o mínimo é mantido mesmo quando as outras variáveis se modificam.

Os resultados mostram que existe mais de uma combinação de coeficientes que modele os resultados experimentais com a mesma qualidade, o que geraria dúvida em qual modelo adotar para representar o processo de usinagem estudado. É provável que caso a curva fosse levantada para mais de 4 condições (de corte e desgaste de ferramenta), as

soluções seriam mais restringidas e os coeficientes poderiam ser determinados de forma mais específica para cada caso.

CASO	K*	x*	y*	z*	FO	Nº aval FO	Nºav gradFO	K	x	y	z	Fexp	Fteo	Fexp	Fteo	Fexp	Fteo	Fexp	Fteo
1	1.881,120	0,562	0,191	2,105	0,571	55	1.351	1	0,5	1	2	10,31	9,99	23,31	23,45	10,51	11,07	17,58	17,22
2	1,030	14,507	19,068	1,102	46,465	17	405	1	1,5	1	3	3,98	8,80	13,62	8,80	5,49	5,49	10,10	12,63
	2,653	10,761	13,984	1,102	46,465	15	358	1	1,5	2	2	3,98	8,80	13,62	8,80	5,49	5,49	10,10	12,63
	4,827	8,390	10,767	1,102	46,465	21	521	2	-1,5	1	1	"	"	"	"	"	"	"	"
	6,230	7,380	9,396	1,102	46,465	14	329	3	0,5	1	1	"	"	"	"	"	"	"	"
	6,036	7,505	9,567	1,102	46,465	22	555	3	0,5	3	3	"	"	"	"	"	"	"	"
3	6,649	8,868	11,753	1,245	1,711	24	603	2	-1,5	1	2	7,05	6,12	5,20	6,12	3,41	3,41	12,14	12,14
	4,350	10,548	14,033	1,245	1,711	21	520	2	1,5	3	3	7,05	6,12	5,20	6,12	3,41	3,41	12,14	12,14
	8,469	7,910	10,453	1,245	1,711	25	629	3	-1,5	2	2	"	"	"	"	"	"	"	"
	6,183	9,156	12,144	1,245	1,711	22	543	3	0,5	2	3	"	"	"	"	"	"	"	"
	7,199	8,554	11,327	1,245	1,711	22	561	3	0,5	3	2	"	"	"	"	"	"	"	"
4	3,020	2,492	2,031	1,510	4,545	20	467	1	0,5	2	3	4,11	2,53	8,66	9,10	2,95	4,22	11,50	11,01
	3,120	2,488	2,036	1,510	4,545	17	408	3	0,5	3	2	4,11	2,53	8,66	9,10	2,95	4,22	11,50	11,01
	3,142	2,487	2,037	1,510	4,545	16	374	3	1,5	3	3	"	"	"	"	"	"	"	"

Tabela 4. Coeficientes da Equação de Taylor otimizados para cada caso, junto ao chute que os geraram, o valor mínimo da função objetivo encontrado, número de avaliações e os valores da força teórica comparados aos experimentais.

Em relação ao fator  $R_p$ , seu valor inicial afetou a convergência do algoritmo no primeiro caso, em especial. Embora inicialmente seu valor deva ser alto, devido a configuração das desigualdades, nesse problema específico o valor do resíduo ponderado se torna extremamente alto se durante o processo iterativo se algum dos coeficientes assumir valor entre 0 e 1, o que ocorre logo após a primeira iteração. Isso se deve ao fato de que o gradiente da função pseudo objetiva  $\Phi$  inclui um termo onde os coeficientes elevados ao quadrado aparecem no denominador e  $R_p$  aparece no numerador. Para valor inicial de 1, na segunda iteração a parcela do resíduo ponderado no gradiente já era da ordem de  $10E9$ . Caso o fator inicial tivesse ordens de grandeza maiores, essa parcela teria ordens de grandeza muito maiores do que o resto da função gradiente, causando uma deformação que atrapalharia a convergência do método. Já em relação ao ritmo de variação de  $R_p$ , tanto o número de avaliações da função objetivo e de sua derivada como os valores ótimos dos coeficientes parecem ter sido afetados. Como o valor da função nos pontos ótimos não se alterou, é provável que a função tenha vários mínimos locais similares, de forma que uma deformação maior leve a convergência para valores ligeiramente diferentes.

## 4 | CONCLUSÕES

Operações de torneamento foram realizadas numa barra de Inconel 718 para diferentes condições de velocidade de corte, avanço, desgaste de flanco, ângulo de saída da ferramenta e vazão de MQL. Este último foi indicado como o parâmetro mais influente na força de corte.

Uma adaptação da Equação de Taylor foi utilizada para modelar o comportamento

experimental da força de corte nas situações ensaiadas, separando o problema por casos de acordo com o tipo de ferramenta e a lubrificação. Para cada caso, foram determinados os coeficientes ótimos que geram melhor ajuste dos dados experimentais pelo modelo utilizado, de funções exponenciais. Os ajustes, avaliados pelo valor dos mínimos quadrados entre valores teóricos e experimentais, foram adequados, exceto para o segundo caso. É provável que, para a faixa de valores utilizados, o comportamento empírico do processo de torneamento nessas condições se distancie do modelo exponencial.

O problema de otimização levantado para determinar os coeficientes possui vários mínimos locais e as soluções apresentadas são sensíveis aos valores de chute inicial e a variação do fator de ponderação ao longo das iterações. Como foi resolvido pelo Método da Penalidade Interna, é provável que devido à natureza das inequações e da configuração da função pseudo objetivo e sua derivada, variações na deformação da função induzam aos pontos ótimos distintos observados ao variar os parâmetros numéricos do algoritmo.

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao CNPq, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia e ao professor Dr. Fran Sérgio Lobato pelo apoio na realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

Santos, S.C. and Sales, W.F., 2007. *Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais*. Artliber Editora, 1ª edição.

Machado, A.R., Coelho, R.T., Abrão, A.M., Da Silva, M.B., 2015. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. Edgar Blucher, São Paulo, 3ª edição.

Dos Santos, A.L.B., Duarte, M.A.V., Abrão, A.M. e Machado, A.R., 1998. "An optimisation procedure to determine the coefficients of the extended Taylor's equation in machining". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp. 17–31.

Barrow, G., 1971. "Tool life equations and machining economics". Em *Proceedings of the 12th International MTDR Conference*, Manchester, UK, pp. 481–493.

Metalworking World Magazine. "Mechanical loads and cutting geometries in turning operations". Disponível em: < <https://www.metalworkingworldmagazine.com/mechanical-loads-and-cutting-geometries-in-turning-operations/>> Acessado em 11/12/2019.

Vanderplaats, G.N., 1999. *Numerical optimization techniques for engineering design*. Vanderplaats Research & Development. Inc., Colorado Springs, 3ª edição.

## ANEXO I

Algoritmos utilizados implementados para Matlab®.

### MPIeMultidimChutsnegVc

```
clc; clear all; close all;

RESULT = []; cont = 0;
for IndK = 0:1:3
    for IndX = 0:1:3
        for IndY = 0:1:3
            for IndZ = 0:1:3
                [VPotim, RES, Neval_gradFO, Neval_FO] =
MPIeMultidimBuscanegVc(IndK, IndX, IndY, IndZ);
                MATRIZ_LINHA = VPotim;
                MATRIZ_LINHA(:, 5) = RES';
                MATRIZ_LINHA(:, 6) = Neval_gradFO';
                MATRIZ_LINHA(:, 7) = Neval_FO';
                MATRIZ_LINHA(:, 8) = IndK;
                MATRIZ_LINHA(:, 9) = IndX;
                MATRIZ_LINHA(:, 10) = IndY;
                MATRIZ_LINHA(:, 11) = IndZ;
                RESULT = [RESULT ; MATRIZ_LINHA];
            end
        end
    end
end

RESULT_1 = []; RESULT_2 = []; RESULT_3 = []; RESULT_4 = [];
for varred = 1:256
    RESULT_1 = [RESULT_1; RESULT(varred*4-3, :)];
    RESULT_2 = [RESULT_2; RESULT(varred*4-2, :)];
    RESULT_3 = [RESULT_3; RESULT(varred*4-1, :)];
    RESULT_4 = [RESULT_4; RESULT(varred*4, :)];
end

solucao1 = RESULT_1(find(RESULT_1(:, 5) == min(RESULT_1(:, 5))), :);
solucao2 = RESULT_2(find(RESULT_2(:, 5) == min(RESULT_2(:, 5))), :);
solucao3 = RESULT_3(find(RESULT_3(:, 5) == min(RESULT_3(:, 5))), :);
solucao4 = RESULT_4(find(RESULT_4(:, 5) == min(RESULT_4(:, 5))), :);
```

## MPIeMultidimBuscanegVc

```
function [VPotim, RES, Neval_gradFO, Neval_FO] = MPIeMultidimBuscanegVc(IndK,
IndX, IndY, IndZ)

% clc; clear all; close all;
% ===== AJUSTE DA EQUAÇÃO DE TAYLOR EM USINAGEM POR MÍNIMOS QUADRADOS =====

% FO: função de otimização, feita para 4 condições dentro de cada um dos 4
casos (tipo ferramenta, vazão MQL)
% Restrições: variação empírica das propriedades => k > 0 , x < 0 , y > 0
, z > 0

% min FO = somatório, ii=1:4, ( Fexp(ii) - Fteo(ii) )^2 - rp*(1/-k + 1/x + 1/-
y + 1/-z)
% Fteo(ii) = k * Vc(ii)^x * f(ii)^y * VB(ii)^z

% dados experimentais
% [P & 50mL/h ; N & 50mL/h ; P & 150mL/h ; N & 150mL/h]
Fexp = [10.31; 23.31; 10.51; 17.58; 3.98; 13.62; 5.49; 10.10; 7.05; 5.20;
3.41; 12.14; 4.11; 8.66; 2.95; 11.50];
Vc = [75; 75; 150; 150; 75; 75; 150; 150; 75; 75; 150; 150; 75; 75; 150; 150];
f = [0.03; 0.03; 0.05; 0.05; 0.05; 0.05; 0.05; 0.03; 0.03; 0.05; 0.05; 0.03; 0.03;
0.03; 0.03; 0.05; 0.05];
VB = [0.036; 0.054; 0.030; 0.037; 0.047; 0.047; 0.023; 0.040; 0.079; 0.079;
0.044; 0.122; 0.080; 0.187; 0.018; 0.034];

% ===== MINIMIZAÇÃO DE 'FO' POR MÉTODO DA FUNÇÃO PENALIDADE INTERNA (MPI)
=====
% Busca multidimensional por Método da Variável Métrica (MVM)
% Transformação em problema unidimensional e determinação do passo por Seção
Áurea (SA)

theta = 1 ; % Método da Variável Métrica: 0 = DFP ; 1 = BFGS
tol = 10e-6; % tolerância
rp = 1; % Rp > 0 , Rp -> 0
k = IndK; xx = IndX - 1.5; yy = IndY; zz = IndZ; % chute inicial para as
variáveis (xx variando de -1.5 a 1.5) !!!
VPchut = [k; xx; yy; zz]; % vetor do chute das variáveis de projeto

for caso = 1:4 % determina as 4 equações de Taylor (uma para cada
caso) numa mesma rodagem do código

Neval_FOcaso = 0;
for kk = 1:200 % N° máximo de iterações

if kk == 1 % na 1ª iteração, H é aproximada pela identidade
H = eye(4) ;
VP = VPchut;

for ii = (4*caso-3) : (4*caso)
vcor = Vc(ii); avan = f(ii); desg = VB(ii); forc = Fexp(ii);
[Fteo(ii, 1), dFODk(ii, 1), dFODx(ii, 1), dFODy(ii, 1),
dFODz(ii, 1)] = Fteorica(vcor, avan, desg, VP, forc);
end

gradFO = [dFODk(ii, 1)+dFODk(ii-3, 1)+dFODk(ii-2, 1)+dFODk(ii-1,
1)-rp/(VP(1)^2);
dFODx(ii, 1)+dFODx(ii-3, 1)+dFODx(ii-2, 1)+dFODx(ii-1,
1);
dFODy(ii, 1)+dFODy(ii-3, 1)+dFODy(ii-2, 1)+dFODy(ii-1,
1)-rp/(VP(3)^2);
dFODz(ii, 1)+dFODz(ii-3, 1)+dFODz(ii-2, 1)+dFODz(ii-1,
1)-rp/(VP(4)^2)];
end

if kk ~= 1
% atualizar H pelo MVM
```

```

p = VPprox - VP ;

for ii = (4*caso-3) : (4*caso)
    vcor = Vc(ii); avan = f(ii); desg = VB(ii); forc = Fexp(ii);
    [Fteo(ii, 1), dFodk(ii, 1), dFODx(ii, 1), dFODy(ii, 1),
dFodz(ii, 1)] = Fteoricaprox(vcor, avan, desg, VPprox, forc);
    end

    gradFOprox = [dFodk(ii, 1)+dFodk(ii-3, 1)+dFodk(ii-2, 1)+dFodk(ii-
1, 1)-rp/(VPprox(1)^2);
                dFODx(ii, 1)+dFODx(ii-3, 1)+dFODx(ii-2, 1)+dFODx(ii-
1, 1);
                dFODy(ii, 1)+dFODy(ii-3, 1)+dFODy(ii-2, 1)+dFODy(ii-
1, 1)-rp/(VPprox(3)^2);
                dFODz(ii, 1)+dFODz(ii-3, 1)+dFODz(ii-2, 1)+dFODz(ii-
1, 1)-rp/(VPprox(4)^2)];

    y = gradFOprox - gradFO ;

    sigma = p'*y ;    % sigma resulta em escalar
    T = y'*H*y ;    % tau (T) resulta em escalar

    H = H + ((sigma + theta*T)/(sigma)^2)*(p*p') + ((theta-
1)/T)*(H*y)*(H*y)'-(theta/sigma)*(H*y*p'+p*(H*y)') ;
    % atualização de x[ii], gradF[ii]
    VP = VPprox ;
    gradFO = gradFOprox ;
end

HgradFO = H*gradFO ;

% chamar Método da Seção Áurea para busca unidimensional (encontrar
alfa ótimo 'alfaO')
[alfaO, jj] = secaoaureaTaylorFOnegVc(VP, HgradFO, tol, Fexp, caso,
Vc, f, VB, rp);

% calcular VPprox segundo MN, a partir de alfaO obtido por SA
VPprox = VP - alfaO*HgradFO;

% FO é avaliada apenas dentro de SA (indicado pelo contador 'jj')
% gradFO é avaliada uma vez a cada iteração do MPI/MVM (indicado pelo
contador 'kk')
Neval_FOcaso = Neval_FOcaso + (2 + jj); % na SA, EP é avaliada 2 vezes
antes da 1ª iteração, e 1 vez a cada iteração

rp = rp/1.5;    % redução de Rp a cada iteração
% verificação do critério de parada
CP = sqrt( (VPprox(1) - VP(1))^2 + (VPprox(2) - VP(2))^2 + (VPprox(3)
- VP(3))^2 + (VPprox(4) - VP(4))^2 ) ;
if CP <= tol
    break
end
end

VPotim(caso, :) = VPprox;
residuo = 0; % residuo = FO (mudei nome para evitar confusão de variável)
for iii = (4*caso-3) : (4*caso) % loop de avaliação de FO, para comparação
entre casos

```



```

        Ft(iii) = VP(1) * ( Vc(iii)^VP(2) )*( f(iii)^VP(3) )*( VB(iii)^VP(4)
    );
        residuo = residuo + (Fexp(iii) - Ft(iii))^2;      % FO
    end
    RES(caso) = residuo;
    Neval_gradFO(caso) = kk;
    Neval_FO(caso) = Neval_FOcaso;
end
end

```

### secaoaureaTaylorFOnegVc

```

% Método da Seção Áurea para minimizar FO(alfa) unidimensional no intervalo de 'a'
até 'b'
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [alfa0, jj] = secaoaureaTaylorFOnegVc(VP, HgradFO, tol, Fexp, caso, Vc,
f, VB, rp)

    tau = 0.6180;
    a = -1; b = 1; % intervalo arbitrários de -1 a 1
    alfa = a + (1-tau)*(b-a);
    beta = a + tau*(b-a);

    % essas são as avaliações da 1ª iteração da Seção Áurea. As seguintes ficam
dentro do loop.
    VPalfa = VP - alfa*HgradFO; % transforma variável VP numa variável VP(alfa), e
já substitui os pontos de avaliação para o método da Seção Áurea
    VPbeta = VP - beta*HgradFO;

    FOalfa = 0; FOBeta = 0;      % FO é calculado por somatório de termos. Aqui
eu limpo o que estiver na memória
    for iii = (4*caso-3) : (4*caso) % loop de avaliação de FO
        Ftalfa(iii) = VPalfa(1) * ( Vc(iii)^VPalfa(2) )*( f(iii)^VPalfa(3) )*(
VB(iii)^VPalfa(4) );
        FOalfa = FOalfa + (Fexp(iii) - Ftalfa(iii))^2;      % FO alfa
        Ftbeta(iii) = VPbeta(1) * ( Vc(iii)^VPbeta(2) )*( f(iii)^VPbeta(3) )*(
VB(iii)^VPbeta(4) );
        FOBeta = FOBeta + (Fexp(iii) - Ftbeta(iii))^2;      % FO_beta
        if iii == (4*caso)      % depois de somar termos das 4 condições de
cada caso, soma o residuo rp
            FOalfa = FOalfa + rp*( (1/VPalfa(1))+(1/VPalfa(3))+(1/VPalfa(4)) );
            FOBeta = FOBeta + rp*( (1/VPbeta(1))+(1/VPbeta(3))+(1/VPbeta(4)) );
        end
    end

    for jj=1:1000 % % contador de iterações. Número máximo para SA: 1000

        if (b - a) >= tol      % se tolerância não foi atingida, entra aqui e
atualiza a, b, alfa, beta, FOalfa, FOBeta
            if FOalfa >= FOBeta
                a = alfa ;      alfa = beta ;      FOalfa = FOBeta ;      beta = a +
tau*(b-a) ;      VPbeta = VP - beta*HgradFO;
                FOBeta = 0; % FO é calculado por somatório de termos. Aqui eu
limpo o que estiver na memória
                for iii = (4*caso-3) : (4*caso) % loop de avaliação de FO
                    Ftbeta(iii) = VPbeta(1) * ( Vc(iii)^VPbeta(2) )*(
f(iii)^VPbeta(3) )*( VB(iii)^VPbeta(4) );
                    FOBeta = FOBeta + (Fexp(iii) - Ftbeta(iii))^2;      % FO_beta

```

```

        if iii == (4*caso) % depois de somar termos das 4
condições de cada caso, soma o residuo rp
            FObeta = FObeta + rp*(
(1/VPbeta(1))+(1/VPbeta(3))+(1/VPbeta(4)) );
        end
    end
end
if FOalfa < FObeta
    b = beta ; beta = alfa ; FObeta = FOalfa ; alfa = a + (1-
tau)*(b-a) ; VPalfa = VP - alfa*HgradFO;
    FOalfa = 0; % FO é calculado por somatório de termos. Aqui eu
limpo o que estiver na memória
    for iii = (4*caso-3) : (4*caso) % loop de avaliação de FO
        Ftalfa(iii) = VPalfa(1) * ( Vc(iii)^VPalfa(2) )*(
f(iii)^VPalfa(3) )*( VB(iii)^VPalfa(4) );
        FOalfa = FOalfa + (Fexp(iii) - Ftalfa(iii))^2; % FO_alfa
        if iii == (4*caso) % depois de somar termos das 4
condições de cada caso, soma o residuo rp
            FOalfa = FOalfa + rp*(
(1/VPalfa(1))+(1/VPalfa(3))+(1/VPalfa(4)) );
        end
    end
end
end
if (b - a) < tol % se tolerância foi atingida, sai do loop
    break
end
end
alfa0 = (alfa + beta)/2; % calcula alfa ótimo (alfa0), independente se
convergiu dentro do número máximo de iterações estabelecido
end

```

### Fteorica

```

function [Ft, dFdk, dFdx, dFdy, dFdZ] = Fteorica(vcor, avan, desg, VP, forc)

    Ft = VP(1) * ( vcor^VP(2) )*( avan^VP(3) )*( desg^VP(4) );

    dFdk = 2* (forc - Ft) * (-1* (vcor^VP(2)) * (avan^VP(3)) * (desg^VP(4)) );
    dFdx = 2* (forc - Ft) * (-VP(1)* log(vcor) * (vcor^VP(2)) * (avan^VP(3)) *
(desg^VP(4)) );
    dFdy = 2* (forc - Ft) * (-VP(1)* log(avan) * (vcor^VP(2)) * (avan^VP(3)) *
(desg^VP(4)) );
    dFdZ = 2* (forc - Ft) * (-VP(1)* log(desg) * (vcor^VP(2)) * (avan^VP(3)) *
(desg^VP(4)) );
end

```

### Fteoricaprox

```

function [Ft, dFdk, dFdx, dFdy, dFdZ] = Fteoricaprox(vcor, avan, desg, VPprox,
forc)

    Ft = VPprox(1) * ( vcor^VPprox(2) )*( avan^VPprox(3) )*( desg^VPprox(4) );

    dFdk = 2* (forc - Ft) * (-1* (vcor^VPprox(2)) * (avan^VPprox(3)) *
(desg^VPprox(4)) );
    dFdx = 2* (forc - Ft) * (-VPprox(1)* log(vcor) * (vcor^VPprox(2)) *
(avan^VPprox(3)) * (desg^VPprox(4)) );
    dFdy = 2* (forc - Ft) * (-VPprox(1)* log(avan) * (vcor^VPprox(2)) *
(avan^VPprox(3)) * (desg^VPprox(4)) );

    dFdZ = 2* (forc - Ft) * (-VPprox(1)* log(desg) * (vcor^VPprox(2)) *
(avan^VPprox(3)) * (desg^VPprox(4)) );
end

```

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Análise 5, 25, 26, 36, 42, 44, 49

Ar Condicionado 52

### C

Caracterização mecânica 36, 49

Condensador 52, 54, 55, 56, 58, 59, 60

Cutting Forces 9

### D

Deposição 2

### E

Equação de Taylor 6, 22, 23, 25, 28, 29

### F

Falha 52

### I

Inconel 718 6, 8, 9, 10, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 29

### L

Laser 6, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

### O

Otimização 22, 24, 25, 27, 30

### P

Palhetas 2

Penalidade Interna 22, 24, 27, 30

### S

Surface topography 8

### T

TBC 1, 2

Térmica 6, 2, 36, 38, 40, 42, 44, 49, 50

Timbó-Açu 6, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49

Tool Wear 8, 9, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22





Turbina 2

## V

Variável Métrica 22, 24

# Engenharia Mecânica: Inovações Tecnológicas de Elevado Valor

---

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

# Engenharia Mecânica: Inovações Tecnológicas de Elevado Valor

---

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