



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<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> 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<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> 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. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí  
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. 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<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

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

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

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

*Data de aceite: 01/09/2020*

*Data de submissão: 31/07/2020*

### **Lucas Avosani**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná,  
Câmpus Ponta Grossa, Departamento  
Acadêmico de Mecânica  
Ponta Grossa — Paraná  
<http://lattes.cnpq.br/9317146985380710>

### **Luiz Eduardo Melo Lima**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná,  
Câmpus Ponta Grossa, Departamento  
Acadêmico de Mecânica  
Ponta Grossa — Paraná  
<https://orcid.org/0000-0002-3084-5720>

**RESUMO:** escoamentos gás-líquido são de grande importância em muitas aplicações, por exemplo, na indústria de petróleo, onde gás natural e óleo escoam simultaneamente nas linhas de produção. A transferência de calor é um fenômeno relevante nestas aplicações e, conseqüentemente, estudos têm sido realizados para melhor compreender a sua influência na dinâmica do escoamento. Este trabalho tem por objetivo realizar uma análise comparativa de correlações para o coeficiente convectivo de transferência de calor aplicáveis em escoamentos gás-líquido, apresentando suas características e limitações. Deste modo, algumas correlações disponíveis na literatura foram analisadas numericamente, a fim de verificar os desvios destas correlações quando comparadas contra

dados experimentais, também da literatura, de escoamentos gás-líquido intermitentes em tubulações. Os resultados das correlações foram analisados, em termos do número de Nusselt, considerando limites de  $\pm 30\%$  de desvio em relação aos dados experimentais. As correlações que mostraram menores desvios são aquelas desenvolvidas em condições semelhantes as dos dados experimentais utilizados, uma vez que seus parâmetros de fechamento são definidos com base em informações empíricas. As correlações que mostraram maiores desvios são aquelas que possuem significativas diferenças nas definições dos parâmetros empíricos utilizados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Escoamento multifásico, Padrão intermitente, Transferência de calor, Coeficiente convectivo, Correlações.

### INTERMITTENT GAS-LIQUID FLOWS MODELING: CORRELATIONS FOR THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT

**ABSTRACT:** Gas-liquid flows are of great importance in many applications, for example, in the oil industry, where natural gas and oil flow simultaneously in production lines. Heat transfer is a relevant phenomenon in these applications and, consequently, studies have been carried out to better understanding its influence on flow dynamics. This work aims to perform a comparative analysis of correlations for the convective heat transfer coefficient applicable to gas-liquid flows, presenting its characteristics and limitations. Thus, some correlations available in the literature were numerically analyzed to verify the deviations of these correlations when

compared against experimental data, also of the literature, of gas-liquid intermittent flows in pipes. The correlations results were analyzed in terms of the Nusselt number, considering limits of  $\pm 30\%$  of deviation concerning the experimental data. The correlations that showed smaller deviations are those developed in conditions similar to those of the experimental data used since their closure parameters are defined based on empirical information. The correlations that showed the highest deviations are those that have significant differences in the definitions of the empirical parameters used.

**KEYWORDS:** Multiphase flow, Intermittent pattern, Heat transfer, Convective coefficient, Correlations.

## 1 | INTRODUÇÃO

Escoamentos multifásicos são encontrados em diversas aplicações, como por exemplo, nas indústrias de refrigeração, de geração de energia, de petróleo, química e alimentícia. O estudo da transferência de calor em escoamentos multifásicos é de grande importância em muitas destas aplicações, pois permite o aperfeiçoamento de processos, bem como uma maior segurança em projetos de trocadores de calor, tubulações, bombas, entre outros dispositivos (SHOHAM, 2006).

Escoamentos gás-líquido podem ocorrer em linhas horizontais, inclinadas e verticais, apresentando-se na forma de diferentes padrões que são divididos em três tipos principais: disperso, separado e intermitente. O escoamento disperso é aquele no qual uma das fases está dispersa na forma de inúmeras bolhas ou gotas na outra fase (contínua). O escoamento separado é aquele onde há uma interface bem definida separando as fases, que escoam de forma contínua. O escoamento intermitente pode ser considerado uma combinação dos dois primeiros, onde as características de cada uma se repetem com determinada frequência. A ocorrência destes padrões de escoamento é afetada pela geometria da tubulação, velocidades das fases e propriedades dos fluidos, influenciando assim, a perda de carga do sistema e, principalmente, a transferência de calor entre as fases do escoamento (SHOHAM, 2006).

A transferência de calor nestes casos se dá principalmente por meio da convecção (forçada ou natural), que é a transferência de calor que ocorre entre uma superfície estática ou não e um fluido em movimento, quando há uma diferença de temperatura. A importância de se ter conhecimento da transferência de calor nos escoamentos gás-líquido se dá devido sua influência na velocidade do escoamento, no gradiente de pressão e nas propriedades dos fluidos, podendo causar mudanças de fases indesejadas ou não para uma determinada aplicação (SHOHAM, 2006).

Este estudo tem por objetivo realizar uma análise comparativa de correlações para o coeficiente de transferência de calor em escoamentos gás-líquido, no padrão intermitente, contra dados experimentais disponíveis na literatura. As correlações analisadas foram implementadas computacionalmente utilizando o programa MATLAB®, com a finalidade

de automatizar os cálculos dos diversos parâmetros necessários à solução algébrica das correlações. Além disto, esta ferramenta computacional pode ser utilizada como uma biblioteca auxiliar em outras ferramentas ou códigos computacionais para a simulação de escoamentos gás-líquido, na solução de problemas que necessitem de uma estimativa para o coeficiente de transferência de calor bifásico, dentro de limites aceitáveis.

## 2 | REVISÃO DA LITERATURA

Inúmeros trabalhos da literatura apresentam correlações para o coeficiente convectivo de transferência de calor em escoamentos gás-líquido, sendo estas divididas em dois grupos: as empíricas, baseadas em dados experimentais; as mecanicistas, baseadas nos fenômenos físicos.

Groothuis e Hental (1959) coletaram dados da transferência de calor em uma bancada experimental vertical para escoamentos de ar-água e gás-óleo. A transferência de calor para esses escoamentos gás-líquido foram representadas por correlações entre os números de Nusselt ( $Nu$ ), de Reynolds ( $Re$ ) e de Prandtl ( $Pr$ ). Nessas correlações,  $Pr$  foram tomados com base nas propriedades do líquido. Para o escoamento ar-água,  $Pr$  ficou em torno de 5000, considerado regime turbulento. Já para o escoamento gás-óleo,  $Pr$  variou no intervalo de 1400 até 3500, considerado regime laminar.

Hughmark (1965) propôs uma estimativa da fração de gás relacionada com a velocidade da bolha e o do líquido, para escoamentos em golfadas (intermitente) horizontais, utilizando dados experimentais obtidos por outros autores. Para isso, propôs dois métodos a partir de duas correlações de transferência de calor. Na primeira, para regime turbulento, houve uma modificação na analogia entre o atrito superficial e a transferência de calor sugerida por Carr e Kropholler (1962). Na segunda, para regime laminar, foi sugerido uma modificação da equação de Graetz-Leveque.

Shah (1981) utilizou dados experimentais obtidos por diferentes autores para propor uma correlação para o cálculo do coeficiente de transferência de calor bifásico,  $h$ , válida para todos os padrões de escoamento. O número de Froude ( $Fr$ ) do líquido foi utilizado como parâmetro para identificar os padrões de escoamento. O autor considerou a transição entre os regimes laminar e turbulento para um  $Fr$  do líquido de 170.

Kago et al. (1986) utilizaram uma tubulação horizontal com diâmetro interno de 5,15 mm, aquecida através de um fluxo de calor uniforme na parede externa, para obtenção de dados experimentais da fração de líquido, da queda de pressão e do coeficiente de transferência de calor. Trabalharam apenas com o escoamento intermitente horizontal, utilizando ar e diversas misturas de aditivos com água para alterar a viscosidade e a tensão superficial. As correlações obtidas por eles foram comparadas contra dados experimentais próprios e também de outros trabalhos disponíveis na literatura.

Deshpande, Bishop e Karandikar (1991) obtiveram dados experimentais da transferência de calor em tubos horizontais, aquecidos eletricamente, utilizando ar e água como fluidos de trabalho, para o estudo do padrão de golfadas. Eles desenvolveram correlações de transferência de calor para a parte inferior do tubo, para a parte superior do tubo e para a média global do tubo. Eles verificaram que os coeficientes de transferência de calor no topo do tubo eram menores que na parte inferior do tubo e que ambos aumentavam com o aumento da velocidade do líquido, apesar disso, não houve alterações significativas com o aumento da velocidade do gás.

Kim, Ghajar e Dougherty (2000) propuseram uma correlação para a transferência de calor de escoamentos gás-líquido em regime turbulento na vertical. Esta correlação foi baseada nas propriedades tanto do líquido quanto do gás e depende da relação entre os títulos mássicos do gás e do líquido, mesmo para um coeficiente de transferência de calor relativamente baixo. Para o cálculo da transferência de calor no líquido, foi utilizada a correlação de Sieder e Tate (1936). A fração de gás foi calculada pela equação de Chisholm (1973). A correlação mostrou bons resultados para o coeficiente de transferência de calor para os 255 pontos experimentais analisados, considerando água-ar, silicone-ar, água-hélio e água-fréon.

Ghajar (2005) apresentou um tutorial revisando os fundamentos físicos da transferência de calor em escoamentos gás-líquido, reunindo as principais correlações de diferentes autores publicadas nos últimos 60 anos e por meio de tabelas, realçou as validades e limitações de cada correlação. Posteriormente, Kim e Ghajar (2006) propuseram um aprimoramento da correlação de transferência de calor para escoamentos gás-líquido, desenvolvida pelos mesmos em 2002, chegando a uma correlação geral para o coeficiente de transferência de calor aplicável em diversos padrões de escoamentos em tubos horizontais. Para verificar esta correlação, eles utilizaram um aparato experimental com água e ar em um tubo (com diâmetro de 27,9 mm) horizontal, escoando em diferentes padrões de escoamento.

Lima (2009) determinou, utilizando um aparato experimental, o coeficiente de transferência de calor bifásico para o padrão intermitente gás-líquido horizontal. Utilizou uma mistura pré-aquecida de água e ar, variou parâmetros como as vazões mássicas de ar e de água e comparou seus resultados com os obtidos por correlações de outros autores, observando uma boa concordância entre os resultados.

### 3 | METODOLOGIA

A partir da análise dimensional é possível demonstrar que o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h$ ) está relacionado com o número de Nusselt ( $Nu$ ), de acordo com a Equação (1):

$$Nu = hD/k \quad (1)$$

Sendo o diâmetro da tubulação e  $k$  a condutividade térmica do fluido. Para escoamentos gás-líquido considera-se normalmente a condutividade da fase líquida ( $k_l$ ).

Muitas das correlações disponíveis na literatura, aplicáveis em escoamentos gás-líquido, são definidas com base na relação funcional definida por  $Nu = f(Re, Pr)$ , acrescida da dependência de outros parâmetros importantes para a dinâmica do escoamento, como por exemplo, razão de viscosidades (entre fases e entre fluido no meio e fluido na temperatura da parede), frações ou títulos das fases, entre outros.

### 3.1 Correlações para o Coeficiente de Transferência de Calor Bifásico

Da revisão bibliográfica realizada, foram selecionadas dezenove correlações para o coeficiente de transferência de calor em escoamentos gás-líquido no padrão intermitente. Estas correlações são apresentadas na Tabela 1 em termos do  $Nu$ , para permitir uma melhor comparação entre os resultados obtidos por estas correlações em relação aos dados experimentais utilizados nesta análise. As correlações na Tabela 1 são exibidas em ordem cronológica de publicação: C01 (SIEDER; TATE, 1936); C02 (KING, 1952); C03 (GROOTHUIS; HENDAL, 1959); C04 (OLIVER; WRIGHT, 1964); C05 (HUGHMARK, 1965); C06 (KUDIRKA; GROSH; MCFADDEN, 1965); C07 (DORRESTEIJN, 1970); C08 (MARTIN; SIMS, 1971); C09 (AGGOUR, 1978); C10 (RAVIPUDI; GODBOLD; 1978); C11 (CHU; JONES, 1980); C12 (SHAH, 1981); C13 (VIJAY; AGGOUR; SIMS, 1982); C14 (ELAMVALUTHI; SRINIVAS, 1984); C15 (KAGO et al., 1986); C16 (REZKALLAH; SIMS, 1987); C17 (DESHPANDE; BISHOP; KARANDIKAR, 1991); C18 (KIM; GHAJAR; DOUGHERTY, 2000); C19 (KIM; GHAJAR, 2006). Nas grandezas físicas (variáveis e parâmetros) exibidas ao longo do documento, consideram-se os subíndices  $g$  e  $l$  para as fases gasosa e líquida, respectivamente, e a ausência de subíndice para a mistura gás-líquido, usualmente.

N.	$Nu = hD/k_f$	Relações auxiliares
C01	$\begin{cases} 1,86 \left( Re_l Pr_l \frac{D}{L} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_l}{\mu_w} \right)^{0,14}, & \text{se laminar} \\ 0,027 Re_l^{4/5} Pr_l^{1/3} \left( \frac{\mu_l}{\mu_w} \right)^{0,14}, & \text{se turbulento} \end{cases}$	–
C02	$\frac{0,023 Re_l^{4/5} Pr_l^{2/5}}{(1+0,025 \sqrt{Re_g}) \phi_l^{0,52}} (\Phi_l^2)^{0,32}$	–
C03	$\begin{cases} 0,029 (Re_g + Re_l)^{0,87} Pr_l^{1/3} \left( \frac{\mu_l}{\mu_w} \right)^{0,14}, & \text{se ar – água} \\ 2,6 (Re_g + Re_l)^{0,39} Pr_l^{1/3} \left( \frac{\mu_l}{\mu_w} \right)^{0,14}, & \text{se gás – óleo} \end{cases}$	–
C04	$1,615 \left( Re Pr_l \frac{D}{L} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_l}{\mu_w} \right)^{0,14} \left( \frac{1,2}{\phi_l^{0,36}} - \frac{0,2}{\phi_l} \right)$	$Re = JD\rho/\mu$
C05	$1,75 \left( \frac{Q_l}{\phi_l \alpha_l L} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_l}{\mu_w} \right)^{0,14} \phi_l^{-1/2}$	–
C06	$125 Re_l^{1/4} Pr_l^{1/3} \left( \frac{J_g}{J_l} \right)^{1/8} \left( \frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{3/5} \left( \frac{\mu_l}{\mu_w} \right)^{0,14}$	–
C07	$0,0123 Re_l^{0,9} Pr_l^{1/3} \left( \frac{\mu_l}{\mu_w} \right)^{0,14} \phi_l^n$	$n = \begin{cases} -1/3, & \text{se laminar} \\ -0,8, & \text{se turbulento} \end{cases}$
C08	$Nu_{C01} \left( 1 + 0,64 \sqrt{\frac{J_g}{J_l}} \right)$	–
C09	$\begin{cases} 1,615 \left( Re_l Pr_l \frac{D}{L} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_l}{\mu_w} \right)^{0,14} \phi_l^{-1/3}, & \text{se laminar} \\ 0,0155 Re_l^{0,83} Pr_l^{1/2} \left( \frac{\mu_l}{\mu_w} \right)^{1/3} \phi_l^{-0,83}, & \text{se turbulento} \end{cases}$	–
C10	$0,56 Re_l^{3/5} Pr_l^{1/3} \left( \frac{J_g}{J_l} \right)^{0,3} \left( \frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{1/5} \left( \frac{\mu_l}{\mu_w} \right)^{0,14}$	–
C11	$0,43 \left( \frac{Re_l}{\phi_l} \right)^{0,55} Pr_l^{1/3} \left( \frac{\mu_l}{\mu_w} \right)^{0,14} \left( \frac{p_{atm}}{p} \right)^{0,17}$	–
C12	$\begin{cases} 1,86 \left( Re_l Pr_l \frac{D}{L} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_l}{\mu_w} \right)^{0,14} \psi_1, & \text{se laminar} \\ 0,023 Re_l^{4/5} Pr_l^{2/5} \left( \frac{\mu_l}{\mu_w} \right)^{0,14} \psi_1, & \text{se turbulento} \end{cases}$	$\psi_1 = (1 + J_g/J_l)^{1/4}$
C13	$Nu_{C09} (\Phi_l^2)^{0,451}$	–
C14	$\left[ 0,021 \left( \frac{Re_l}{\sqrt{\phi_l}} \right)^{4/5} + 0,45 \right] Pr_l^{1/3} \left( \frac{\mu_l}{\mu_w} \right)^{0,14} \psi_2$	–
C15	$\left[ 0,021 \left( \frac{Re_l}{\sqrt{\phi_l}} \right)^{4/5} + 0,45 \right] Pr_l^{1/3} \left( \frac{\mu_l}{\mu_w} \right)^{0,14} \psi_2$	$\psi_2 = 1 + 0,3e^{-0,5(\sqrt{Fr_l}-2)^2}$
C16	$Nu_{C01} \phi_l^{-0,9}$	–
C17	$0,023 Re^{0,83} Pr^{8/5} \left( \frac{J_g}{J_l} \right)^{0,76}$	$Re = JD\rho/\mu$ $Pr = C_n \mu/k$
C18	$Nu_{C01} \phi_l \left[ 1 + 0,27 \left( \frac{Pr_g}{Pr_l} \right)^{0,66} \left( \frac{\phi_g}{\phi_l} \right)^{1,21} \left( \frac{x_g}{x_l} \right)^{-0,04} \left( \frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{-0,72} \right]$	–
C19	$Nu_{C01} F_p \left[ 1 + 0,7 \left( \frac{1-F_p}{F_p} \right)^{0,06} \left( \frac{Pr_g}{Pr_l} \right)^{0,03} \left( \frac{x_g}{x_l} \right)^{0,08} \left( \frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{-0,14} \right]$	$F_p = \phi_l + \phi_g \psi_3^2$ $\psi_3 = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{J_g \phi_g - 1/\phi_l}{gD(\rho_l/\rho_g - 1)}} \right)$

Tabela 1 – Correlações para o coeficiente de transferência de calor bifásico

Fonte: autoria própria.

Na Tabela 1, têm-se:  $L$  é o comprimento da seção de troca de calor;  $p$  e  $P_{\text{atm}}$  são as pressões absoluta e atmosférica, respectivamente;  $Q$  é a vazão volumétrica (fase ou mistura);  $J$  é a velocidade superficial (fase ou mistura);  $\rho$  é a massa específica (fase ou mistura);  $\mu$  e  $\mu_{lw}$  são as viscosidades dinâmicas de fase ou mistura e do líquido na temperatura da parede, respectivamente;  $C_p$  é o calor específico isobárico (fase ou mistura);  $\alpha$  é a difusividade térmica (fase ou mistura);  $Pr = \mu C_p / k$  é o número de Prandtl (fase ou mistura);  $Re = JD\rho/\mu$  é o número de Reynolds (fase ou mistura);  $Fr = J/\sqrt{gD}$  é o número de Froude (fase ou mistura);  $\phi_g$  e  $\phi_l$  são as frações de gás e líquido, respectivamente;  $x_g = \dot{m}_g/\dot{m}$  e  $x_l = \dot{m}_l/\dot{m}$  são os títulos mássicos de gás e de líquido, respectivamente;  $Nu_{CO1}$  e  $Nu_{CO9}$  são os números de Nusselt definido por Sieder e Tate (1936) e Aggour (1978), respectivamente;  $\Phi_l^2$  é o multiplicador bifásico do líquido de Lockhart e Martinelli (1949). As correlações mostradas na Tabela 1 foram implementadas no programa MATLAB® para realização do cálculo do  $h$ , permitindo a comparação destas correlações contra dados experimentais obtidos por Lima (2009).

### 3.2 Determinação da Precisão das Correlações

A precisão de cada correlação para o coeficiente de transferência de calor bifásico, mostradas na Tabela 1, é estimada pelos valores médios dos desvios relativo e absoluto,  $\xi_{\text{rel}}$  e  $\xi_{\text{abs}}$ , assim como na média quadrática (RMS, do inglês *Root Mean Square*) entre o valor calculado com cada correlação e o valor medido para os  $N$  pontos experimentais obtidos por Lima (2009).  $\xi_{\text{rel}}$ ,  $\xi_{\text{abs}}$  e RMS são definidos pelas Equações (2), (3) e (4), respectivamente:

$$\xi_{\text{rel}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Nu_{i,\text{calc}} - Nu_{i,\text{med}}}{Nu_{i,\text{med}}} \quad (2)$$

$$\xi_{\text{abs}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Nu_{i,\text{calc}} - Nu_{i,\text{med}}}{Nu_{i,\text{med}}} \right| \quad (3)$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{Nu_{i,\text{calc}} - Nu_{i,\text{med}}}{Nu_{i,\text{med}}} \right)^2} \quad (4)$$

### 3.3 Dados Experimentais Utilizados na Análise Comparativa

Os dados experimentais selecionados na literatura para esta análise comparativa foram os obtidos por Lima (2009), que determinou o coeficiente convectivo de transferência de calor utilizando um aparato experimental para escoamentos gás-líquido intermitentes na horizontal, com água e ar como fluidos de trabalho em uma tubulação de diâmetro  $D = 0,052\text{m}$  e comprimento da seção de troca de calor de  $L = 6,071\text{m}$ . Na Tabela 2, são apresentadas as propriedades dos fluidos utilizadas para realização dos cálculos das correlações mostradas na Tabela 1, conforme descrito em Lima (2009).

Fase	$\rho_k$ /[kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu_k$ /[Pa.s]	$\mu_{kw}$ /[Pa.s]	$C_{pk}$ /[J/(kg.K)]	$k_k$ /[W/(m.K)]
Gás ( $k = g$ )	1,78	$1,9210^{-5}$	–	1018,8	0,027
Líquido ( $k = l$ )	992,8	$6,8710^{-4}$	$7,4510^{-4}$	3890,06	0,631

Tabela 2 – Propriedade dos fluidos

Fonte: adaptada de Lima (2009).

Na Tabela 3, são apresentadas as vazões mássicas do gás e do líquido para cada um dos 25 ensaios experimentais realizados por Lima (2009).

Ensaio	$\dot{m}_g$ /[kg/s]	$\dot{m}_l$ /[kg/s]	Ensaio	$\dot{m}_g$ /[kg/s]	$\dot{m}_l$ /[kg/s]
1	0,0015	1,34	14	0,0019	2,16
2	0,0019	1,52	15	0,0012	2,27
3	0,0018	1,93	16	0,0008	2,35
4	0,0017	2,21	17	0,0015	2,60
5	0,0016	2,22	18	0,0015	2,60
6	0,0026	2,06	19	0,0023	2,47
7	0,0027	1,42	20	0,0030	2,37
8	0,0013	1,63	21	0,0030	2,62
9	0,0012	1,39	22	0,0020	2,76
10	0,0007	1,47	23	0,0012	2,91
11	0,0026	1,22	24	0,0012	2,91
12	0,0026	2,05	25	0,0012	2,65
13	0,0025	2,07			

Tabela 3 – Vazões mássicas dos fluidos

Fonte: adaptada de Lima (2009).

## 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para permitir uma melhor comparação dos resultados obtidos pelas correlações contra os dados experimentais de Lima (2009), foram plotados quatro gráficos, apresentados na Figura 1a–d, contendo os valores referentes aos números de Nusselt (Nu) calculados pelas correlações em função dos respectivos valores de cada ensaio experimental. Foram estabelecidos limites de  $\pm 30\%$  para observação dos desvios entre os valores calculados e medidos.

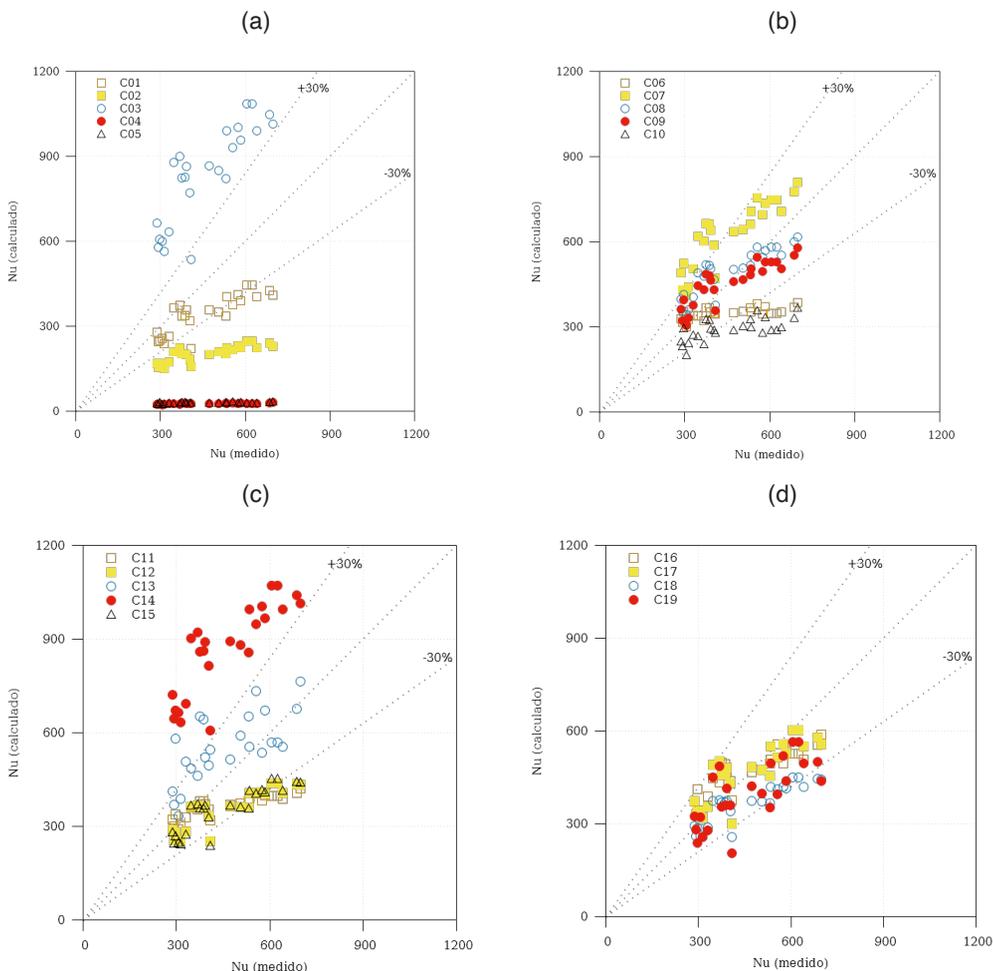


Figura 1 – Comparação dos resultados calculados e medidos, em termos do : (a) C01 a C05; (b) C06 a C10; (c) C11 a C15; (d) C16 a C19

Fonte: autoria própria.

As correlações C08, C15, C17 e C19 foram desenvolvidas especificamente para escoamento em tubulações horizontais, a correlação C12 é válida tanto para tubulações horizontais quanto verticais e as correlações C09, C11, C16 e C18 foram desenvolvidas apenas para tubulações verticais. Todas estas correlações mostraram resultados satisfatórios, mesmo as desenvolvidas apenas para tubulações verticais.

As correlações C02, C03, C06 e C14 não mostraram resultados satisfatórios. A correlação C02, apesar de válida para escoamentos horizontais de água e ar, possui uma razão  $L/D$  adotada na sua formulação que é 117% maior do que a dos ensaios experimentais

utilizado para comparação. Na correlação C03, de acordo com o autor, não foi possível verificar com exatidão o padrão de escoamento durante os experimentos, que variou de intermitente, passando pelo agitado, até o anular. As correlações C06 e C14 são válidas apenas para escoamentos verticais com razão  $L/D$  de 84% e de 26%, respectivamente, menor do que a dos ensaios experimentais, além disto, a correlação C06 é limitada às misturas de ar-glicol, ar-SCMC e ar-Poliox.

A correlação C01 foi utilizada para o cálculo do monofásico nas correlações C08, C16, C18 e C19, que mostraram resultados satisfatórios. Entretanto, seus resultados quando comparados com o experimental, apresentam uma pequena divergência, com apenas 7 dos 25 pontos fora dos  $\pm 30\%$  de desvio em relação ao experimental. A correlação C13 mostrou resultados razoáveis, porém, segundo Ghajar (2005), espera-se que ela seja melhor aplicável na predição para os padrões disperso e separado.

As correlações C07 e C10 mostraram um significativo desvio, pois a correlação C07 é válida somente para misturas ar-óleo e a correlação C10 é válida somente para o padrão de escoamento agitado (transição intermitente-separado). Por fim, as correlações que mostraram os desempenhos menos satisfatórios são as correlações C04 e C05, cujos valores ficaram aproximadamente constantes (com um crescimento pouco significativo) para toda a faixa de pontos experimentais, possivelmente devido à dependência de suas correlações com suas respectivas proposições de modelo para estimativa das frações das fases.

A Tabela 4 mostra os resultados para os desvios das correlações. Os valores de  $\xi_{rel}$ ,  $\xi_{abs}$  e RMS variam de -53,90% a 95,74%, de 14,25% a 95,74% e de 17,04% (C09) a 101,57% (C14), respectivamente.

N.	$\xi_{rel}/[\%]$	$\xi_{abs}/[\%]$	RMS/ $[\%]$	N.	$\xi_{rel}/[\%]$	$\xi_{abs}/[\%]$	RMS/ $[\%]$
C01	-22,56	23,17	26,08	C11	-16,00	18,85	23,51
C02	-53,90	53,90	54,58	C12	-19,80	20,24	23,69
C03	87,21	87,21	92,37	C13	24,88	27,82	36,31
C04	-93,70	93,70	93,71	C14	95,74	95,74	101,57
C05	-93,18	93,18	93,20	C15	-20,25	20,82	23,81
C06	-18,51	22,53	27,45	C16	4,60	15,31	18,31
C07	41,01	41,01	46,55	C17	4,50	14,25	17,91
C08	11,54	16,95	21,55	C18	-17,93	19,01	22,34
C09	2,71	14,57	17,04	C19	-11,36	18,25	21,80
C10	-33,25	33,25	36,32				

Tabela 4 – Desvios das correlações para o coeficiente de transferência de calor bifásico em relação aos valores obtidos experimentalmente por Lima (2009)

Fonte: autoria própria.

## 5 | CONCLUSÕES

Das dezenove correlações analisadas neste trabalho, nove mostraram resultados satisfatórios quando comparadas contra os dados experimentais, as demais mostraram resultados menos satisfatórios, em relação aos limites estabelecidos para os desvios. Foi observado que as divergências nos resultados apresentados, ocorrem devido à diferença nos parâmetros utilizados no desenvolvimento das correlações, como a razão entre o comprimento e o diâmetro da seção de troca de calor, a orientação do aparato experimental, o padrão de escoamento e os fluidos utilizados. Por sua vez, as correlações que mostraram resultados satisfatórios foram àquelas desenvolvidas em condições semelhantes aos dados utilizados na comparação. Este estudo demonstra que existe uma grande dependência dos parâmetros relacionados a cada correlação, que por sua vez permite realizar uma escolha mais apropriada de cada correlação em função das características do sistema. Em trabalhos futuros podem ser realizadas análises de novas correlações, bem como a comparação contra outros conjuntos de dados experimentais. Além disso, outros padrões de escoamento podem ser investigados nestas análises.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo apoio recebido para o desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

AGGOUR, M. A. **Hydrodynamics and heat transfer in two-phase two-component flows**. 1978. 435 p. Thesis (Doctorate) — University of Manitoba, Winnipeg, MB, Canada, 1978. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1993/14171>. Acesso em: 30 jul. 2019.

CARR, A. D.; KROPHOLLER, H. W. Vapor liquid equilibria at atmospheric pressure: binary systems of ethyl acetate-benzene, ethyl acetate-toluene, and ethyl acetate-p-xylene. **J. Chem. Eng. Data**, v. 7, n. 1, p. 26–28, 1962. DOI: 10.1021/je60012a007.

CHISHOLM, D. Void fraction during two-phase flow. **J. Mech. Eng. Sci.**, v. 15, n. 3, p. 235–236, 1973. DOI: 10.1243/JMES\_JOUR\_1973\_015\_040\_02.

CHU, Y. C.; JONES, B. G. Convective heat transfer coefficient studies in upward and downward, vertical, two-phase, non-boiling flows. **AIChE Symp. Series**, v. 76, p. 79–90, 1980.

DESHPANDE, S. D.; BISHOP, A. A.; KARANDIKAR, B. M. Heat transfer to air-water plug slug flow in horizontal pipes. **Ind. Eng. Chem. Res.**, v. 30, n. 9, p. 2172–2180, 1991. DOI: 10.1021/ie00057a018.

DORRESTEIJN, W. R. **Experimental study of heat transfer in upward and downward two-phase flow of air and oil through 70-mm tubes**. Proceeding of International Heat Transfer Conference 4. **Anais...** In: INTERNATIONAL HEAT TRANSFER CONFERENCE 4. Paris, France: Begellhouse, 1970. DOI: 10.1615/IHTC4.610.

ELAMVALUTHI, G.; SRINIVAS, N. S. Two-phase heat transfer in two component vertical flows. **Int. J. Multiphase Flow**, v. 10, n. 2, p. 237–242, 1984. DOI: 10.1016/0301-9322(84)90021-1.

GHAJAR, A. J. Non-boiling heat transfer in gas-liquid flow in pipes: a tutorial. **J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.**, v. 27, n. 1, p. 46–73, 2005. DOI: 10.1590/S1678-58782005000100004.

GROOTHUIS, H.; HENDAL, W. P. Heat transfer in two-phase flow. **Chem. Eng. Sci.**, v. 11, n. 3, p. 212–220, 1959. DOI: 10.1016/0009-2509(59)80089-0.

HUGHMARK, G. A. Holdup and heat transfer in horizontal slug gas-liquid flow. **Chem. Eng. Sci.**, v. 20, n. 12, p. 1007–1010, 1965. DOI: 10.1016/0009-2509(65)80101-4.

KAGO, T. et al. Heat transfer in horizontal plug and slug flow for gas-liquid and gas-slurry systems. **J. Chem. Eng. Jpn.**, v. 19, n. 2, p. 125–131, 1986. DOI: 10.1252/jcej.19.125.

KIM, J.; GHAJAR, A. J. A general heat transfer correlation for non-boiling gas-liquid flow with different flow patterns in horizontal pipes. **Int. J. Multiphase Flow**, v. 32, n. 4, p. 447–465, 2006. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2006.01.002.

KIM, D.; GHAJAR, A. J.; DOUGHERTY, R. L. Robust heat transfer correlation for turbulent gas-liquid flow in vertical pipes. **J. Thermophys. Heat Tr.**, v. 14, n. 4, p. 574–578, 2000. DOI: 10.2514/2.6559.

KING, C. D. G. **Heat transfer and pressure drop for an air-water mixture flowing in a 0.737 inch ID horizontal pipe**. 1952. Dissertation (Master Degree) — University of California, Berkeley, CA, USA, 1952.

KUDIRKA, A. A.; GROSH, R. J.; MCFADDEN, P. W. Heat transfer in two-phase flow of gas-liquid mixtures. **Ind. Eng. Chem. Fund.**, v. 4, n. 3, p. 339–344, 1965. DOI: 10.1021/i160015a018.

LIMA, I. N. R. C. **Estudo experimental da transferência de calor no escoamento bifásico intermitente horizontal**. 2009. 118 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/264629>. Acesso em: 14 ago. 2018.

LOCKHART, R. W.; MARTINELLI, R. C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. **Chem. Eng. Prog.**, v. 45, n. 1, p. 39–48, 1949.

MARTIN, B. W.; SIMS, G. E. Forced convection heat transfer to water with air injection in a rectangular duct. **Int. J. of Heat and Mass Transfer**, v. 14, n. 8, p. 1115–1134, 1971. DOI: 10.1016/0017-9310(71)90208-0.

OLIVER, D. R.; WRIGHT, S. J. Pressure drop and heat transfer in gas-liquid slug flow in horizontal tubes. **Brit. Chem. Eng.**, v. 9, n. 9, p. 590–596, 1964.

RAVIPUDI, S. R.; GODBOLD, D. M. **The effect of mass transfer on heat transfer rates for two-phase flow in a vertical pipe**. Proceeding of International Heat Transfer Conference 6. **Anais...** In: INTERNATIONAL HEAT TRANSFER CONFERENCE 6. Toronto, ON, Canada: Begellhouse, 1978. DOI: 10.1615/IHTC6.960.

REZKALLAH, K. S.; SIMS, G. E. An examination of correlations of mean heat-transfer coefficients in two-phase two-component flow in vertical tubes. **AIChE Symp. Series**, v. 83, p. 109–114, 1987.

SHAH, M. M. Generalized prediction of heat transfer during two component gas-liquid flow in tubes and other channels. **AIChE Symp. Series**, v 77, n. 208, p. 140–151, 1981.

SHOHAM, O. **Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes**. 1. ed. Richardson, TX, USA: Society of Petroleum Engineers (SPE), 2006.

SIEDER, E. N.; TATE, G. E. Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes. **Ind. Eng. Chem.**, v. 28, n. 12, p. 1429–1435, 1936. DOI: 10.1021/ie50324a027.

VIJAY, M. M.; AGGOUR, M. A.; SIMS, G. E. **A correlation of mean heat-transfer coefficients for two-phase two-component flow in a vertical tube**. Proceeding of International Heat Transfer Conference 7. **Anais...** In: INTERNATIONAL HEAT TRANSFER CONFERENCE 7. Munich, Germany: Begellhouse, 1982. DOI: 10.1615/IHTC7.4680.

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

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

 @atenaeditora

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

# A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Mecânica

# 2

 **Atena**  
Editora

Ano 2020

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

# A Aplicação do Conhecimento Científico na Engenharia Mecânica

# 2

 **Atena**  
Editora  
Ano 2020