

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

**ENGENHARIA DE MATERIAIS E METALÚRGICA**



**HENRIQUE AJUZ HOLZMANN**

**JOÃO DALLAMUTA**

(ORGANIZADORES)

**Atena**  
Editora

Ano 2021

# COLEÇÃO DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

## ENGENHARIA DE MATERIAIS E METALÚRGICA



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 Cremona

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

**Imagens da Capa**

iStock

**Edição de Arte**

Luiza Alves Batista

**Revisão**

Os autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



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

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

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

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

**Conselho Editorial**

**Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

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

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

Profª Drª Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa

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

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

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

#### **Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

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

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

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

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

### **Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto  
Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie  
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás  
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás  
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

#### **Linguística, Letras e Artes**

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro  
Profª Drª Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará  
Profª Drª Edna Alencar da Silva Rivera – Instituto Federal de São Paulo  
Profª Drª Fernanda Tonelli – Instituto Federal de São Paulo,  
Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná  
Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará  
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

#### **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  
Profª Ma. Adriana Regina Vettorazzi Schmitt – Instituto Federal de Santa Catarina  
Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais  
Prof. Me. Alexsandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional  
Profª Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás  
Profª Drª Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras  
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Profª Drª Andrezza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Profª Drª Andrezza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia  
Profª Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá  
Profª 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  
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. Me. Carlos Augusto Zilli – Instituto Federal de Santa Catarina  
Prof. Me. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná  
Profª Drª 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. Edson Ribeiro de Brito de Almeida Junior – Universidade Estadual de Maringá  
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 Atílio Batista – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas  
Prof. Me. Francisco Odécio Sales – Instituto Federal do Ceará  
Prof. Me. Francisco Sérgio Lopes Vasconcelos Filho – Universidade Federal do Cariri  
Profª Drª Germana Ponce de Leon Ramirez – 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/UFGA  
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. Lillian de Souza – Faculdade de Tecnologia de Itu  
Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ  
Profª Drª Lúvia 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  
Profª Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz  
Profª Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados  
Prof. Me. Luiz Renato da Silva Rocha – Faculdade de Música do Espírito Santo  
Profª 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. Me. Marcos Roberto Gregolin – Agência de Desenvolvimento Regional do Extremo Oeste do Paraná  
Profª Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará  
Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
Prof. Dr. Pedro Henrique Abreu Moura – Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais  
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie  
Profª Drª Poliana Arruda Fajardo – Universidade Federal de São Carlos  
Prof. Me. Rafael Cunha Ferro – Universidade Anhembi Morumbi  
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof. Me. Renan Monteiro do Nascimento – Universidade de Brasília  
Prof. Me. Renato Faria da Gama – Instituto Gama – Medicina Personalizada e Integrativa  
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. Dr. Sullivan Pereira Dantas – Prefeitura Municipal de Fortaleza  
Profª Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Universidade Estadual do Ceará  
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

## Coleção desafios das engenharias: engenharia de materiais e metalúrgica

**Bibliotecária:** Janaina Ramos  
**Diagramação:** Camila Alves de Cremo  
**Correção:** Giovanna Sandrini de Azevedo  
**Edição de Arte:** Luiza Alves Batista  
**Revisão:** Os autores  
**Organizadores:** Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta

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

C691 Coleção desafios das engenharias: engenharia de materiais e metalúrgica / 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 978-65-5983-290-3

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.903211207>

1. Engenharia de materiais. 2. Engenharia metalúrgica.  
I. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). II. Dallamuta, João (Organizador). III. Título.

CDD 669

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

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

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

## DECLARAÇÃO DA EDITORA

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

## APRESENTAÇÃO

A engenharia de materiais, se tornou um dos grandes pilares da revolução técnica industrial, principalmente quando se diz a indústria 4.0, devido a necessidade de desenvolvimento de novos materiais, que apresentem melhores características e propriedades físico-químicas. Para obtenção desses novos materiais, muitos processos precisaram de alterações e de novos métodos, exigindo um desprendimento de força elevado nesta área. Grandes empresas e centros de pesquisa investem maciçamente em setores de P&D a fim de tornarem seus produtos e suas tecnologias mais competitivas.

Destaca-se que a área de material compreende três grandes grupos, a dos metais, das cerâmicas e dos polímeros, sendo que cada um deles tem sua importância na geração de tecnologia e no desenvolvimento dos produtos. Aliar os conhecimentos pré-existentes com novas tecnologias é um dos grandes desafios da nova engenharia.

Neste livro são explorados trabalhos teóricos e práticos, relacionados as áreas de materiais, dando um panorama dos assuntos em pesquisa atualmente. Apresenta capítulos relacionados ao desenvolvimento de novos materiais, com aplicações nos mais diversos ramos da ciência, bem como assuntos relacionados a melhoria em processos e produtos já existentes, buscando uma melhoria e a redução dos custos.

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 a todos.

Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

#### **EVALUATION OF THERMAL PROPERTIES OF PBAT MATRIX COMPOSITES REINFORCED WITH DIFFERENT JUTE AND COTTON FABRICS**

Jane Maria Faulstich de Paiva  
Cristiane Carla Maciel  
Amanda Alves Domingos Maia  
Anderson Pires Fernandes  
Maria Natália Castanho

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9032112071>

### **CAPÍTULO 2..... 10**

#### **EFEITO DE DIFERENTES MISTURAS PP-RECICLADO / PP-VIRGEM EM SUAS PROPRIEDADES MECÂNICAS**

Vladymyr Alves de Figueiredo  
José Costa de Macêdo Neto  
Joaquim Souza de Oliveira  
Ricardo Cruz da Silva  
Adalberto Gomes de Miranda  
Luiz Antônio de Verçosa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9032112072>

### **CAPÍTULO 3..... 18**

#### **DETERMINAÇÃO DA DUREZA E MÓDULO DE ELASTICIDADE POR NANOINDENTAÇÃO BERKOVICH DE VIDRO NIOBOFOSFATO SINTETIZADO COM ESCÓRIA DE ACIARÁ LD**

Camila Ferreira da Silva  
Patrícia Guimarães Monteiro de Freitas  
Ronaldo Gomes de Castro Medeiros

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9032112073>

### **CAPÍTULO 4..... 26**

#### **RESÍDUO DE INDÚSTRIA DE FUNDIÇÃO: FONTE PARA DESENVOLVIMENTO DE VIDROS E VITROCERÂMICOS**

Thariany Sanches Leme  
Flavia Landgraf Cuzzati  
Silvio Rainho Teixeira  
Agda Eunice de Souza

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9032112074>

### **CAPÍTULO 5..... 41**

#### **CARACTERIZAÇÃO DA CARBURIZAÇÃO EM AÇOS HP POR MICROSCOPIA MAGNETO-ÓTICA KERR**

Cayo Vinicius da Silva Lima  
Thiago Tôres Matta Neves  
Clara Johanna Pacheco  
Luiz Henrique de Almeida

Gabriela Ribeiro Pereira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9032112075>

**CAPÍTULO 6..... 53**

**EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE ZINCO NA ELETROGALVANIZAÇÃO DO AÇO CARBONO EM MEIO ÁCIDO CONTENDO SULFATO EMPREGANDO BAIXA DENSIDADE DE CORRENTE**

Gabriel Abelha Carrijo Gonçalves

Tácia Costa Veloso

Vera Rosa Capelossi

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9032112076>

**CAPÍTULO 7..... 66**

**COMPORTAMENTO EM FADIGA DA LIGA TI-30TA APÓS TRATAMENTO ALCALINO E TÉRMICO - APLICAÇÕES BIOMÉDICAS**

Kerolene Barboza da Silva

Valdir Alves Guimarães

Ana Paula Rosifini Alves Claro

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9032112077>

**CAPÍTULO 8..... 81**

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIOMATERIAIS DE BAIXO CUSTO**

Alessandra Ames

Ricardo Yoshimitsu Miyahara

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.9032112078>

**SOBRE OS ORGANIZADORES ..... 90**

**ÍNDICE REMISSIVO..... 91**

## CARACTERIZAÇÃO DA CARBURIZAÇÃO EM AÇOS HP POR MICROSCOPIA MAGNETO-ÓTICA KÉRR

*Data de aceite: 01/07/2021*

*Data de submissão: 07/05/2021*

### **Cayo Vinicius da Silva Lima**

Universidade Federal do Rio de Janeiro  
– LNDC/Departamento de Engenharia  
Metalúrgica e de Materiais  
Rio de Janeiro – RJ  
<http://lattes.cnpq.br/9529017580030658>

### **Thiago Tôres Matta Neves**

Universidade Federal do Rio de Janeiro  
– LNDC/Departamento de Engenharia  
Metalúrgica e de Materiais  
Rio de Janeiro - RJ  
<http://lattes.cnpq.br/6140889200647784>

### **Clara Johanna Pacheco**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro –  
Instituto de Física  
Rio de Janeiro - RJ  
<https://orcid.org/0000-0002-1130-4910>

### **Luiz Henrique de Almeida**

Universidade Federal do Rio de Janeiro –  
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de  
Materiais  
Rio de Janeiro - RJ  
<https://orcid.org/0000-0002-1129-2024>

### **Gabriela Ribeiro Pereira**

Universidade Federal do Rio de Janeiro  
– LNDC/Departamento de Engenharia  
Metalúrgica e de Materiais  
Rio de Janeiro - RJ  
<http://lattes.cnpq.br/3243313265625272>

**RESUMO:** Aços austeníticos HP são usados na produção de tubos para fornos de reforma a vapor em função de suas propriedades a altas temperaturas. Devido às condições de operação a que são submetidos, estes tubos tendem a apresentar falhas principalmente pelo surgimento de trincas de fluência. No entanto, em alguns casos, danos moderados por carburização na parede interna foram identificados, o que pode ocasionar uma falha prematura. Neste fenômeno a matriz austenítica apresenta um empobrecimento de cromo gerando alterações em seu comportamento magnético. A fim de caracterizar magneticamente esta região, neste trabalho foi empregada a técnica de Microscopia Magneto-Ótica Kerr, que consiste na observação de alterações da polarização de um feixe de luz refletido resultantes da interação entre um feixe de luz linearmente polarizado com os elétrons da superfície de um material. Foram realizadas análises qualitativas, por meio de imagens, e análises quantitativas, através do levantamento da curva de histerese, em uma amostra de aço HP que sofreu carburização durante a operação. A partir destas análises foi possível identificar, na região carburizada, o comportamento ferromagnético da matriz e o comportamento paramagnético dos carbetos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Microscopia Kerr, domínios magnéticos, aço HP, danos por carburização.

## CHARACTERIZATION OF CARBURIZATION IN HP STEELS BY MAGNETO-OPTICAL KERR MICROSCOPY

**ABSTRACT:** HP austenitic steels are used in the production of reformer furnace tubes as a result of their properties at high temperatures. Due to the service conditions to which they are exposed, these tubes tend to present creep failure. In some cases, however, it was identified moderate carburization damage on their internal walls, which may lead to premature failure. In this phenomenon, the austenitic matrix presents a chromium depletion and affects its magnetic behaviour. In order to magnetically characterize the region, in this study it was utilized the Magneto-Optical Kerr Microscopy, which consists of observing polarization changes on a reflected light beam arising from the interaction between a linearly polarized light beam with the surface electrons of a material. Using a HP steel sample from a reformer furnace tube that presented carburization during service, qualitative analysis was performed by imaging and quantitative analysis was performed by elaborating its hysteresis curve. The results allowed the identification of ferromagnetic behaviour on its carburized matrix and paramagnetic behaviour on its carbides.

**KEYWORDS:** Kerr microscopy, magnetic domains, HP steel, carburization damage.

### 1 | INTRODUÇÃO

O efeito magneto-ótico Kerr é um fenômeno observado a partir das interação de um campo eletromagnético, proveniente de um feixe de luz linearmente polarizado, com os elétrons na superfície de um material. Esta interação, associada a um momento magnético, gera uma alteração na polarização do feixe de luz refletido (HUBERT; SCHAFFER, 1998).

Levando em consideração as variáveis envolvidas no fenômeno, como o feixe de luz incidente linearmente polarizado, a superfície do material e a direção do campo magnético aplicado, esse efeito pode ser classificado em três tipos: Efeito Kerr Longitudinal, Polar e Transversal. (SOLDATOV; SCHAFFER, 2017).

A Microscopia Magneto-Ótica Kerr permite, em tempo real, a caracterização magnética de materiais, analisando as diferenças na polarização do feixe de luz refletido em distintas regiões da superfície da amostra em função do efeito Kerr. Essas leituras são convertidas em diferenças de intensidade e traduzidas em tons de cinza sobre uma imagem da superfície. Quando o material é ferromagnético são observadas regiões com diferentes contrastes, definidas como domínios magnéticos. Por outro lado, nos materiais paramagnéticos não são observadas variações de contraste (HUBERT; SCHAFFER, 1998).

Esta técnica permite realizar análises qualitativas, por meio das imagens geradas em função da resposta magnética na superfície do material, traduzido na visualização das alterações da geometria e orientação dos domínios magnéticos para diferentes valores de campo magnético aplicado (SCHAFFER, 2007). A Microscopia Magneto-Ótica Kerr permite também realizar análises quantitativas através do levantamento de curvas de histerese. Nesta análise, a partir de um intervalo de campo magnético aplicado, é registrada a intensidade da luz refletida em função da orientação dos domínios magnéticos para cada

valor do campo magnético aplicado (LEITE; FIGUEIREDO, 2007).

A técnica de Microscopia Magneto-Ótica Kerr vem sendo aplicada no estudo de aços HP modificados através da realização de análises qualitativas e quantitativas, caracterizando, dessa forma, diferentes aspectos microestruturais decorrentes da sua exposição em temperaturas elevadas. (NEVES; et. al., 2019).

Os aços HP apresentam propriedades que permitem seu uso em altas temperaturas e pressão, sendo usadas em larga escala na indústria petroquímica na forma de tubos dos fornos de reforma a vapor (DA SILVEIRA; LE MAY, 2006). Como consequência das condições de operação, o principal fator gerador de falha é o surgimento de trincas de fluência. Entretanto em alguns casos ocorrem também danos de carburização moderada e localizada em fornos de reforma a vapor podendo levar a uma falha prematura. (DA SILVEIRA; LE MAY, 1997; ARENAS; et. al., 2017). Cabe a observação que os danos de carburização ocorrem principalmente em tubos de fornos de pirólise.

A carburização em tubos de fornos de reforma a vapor ocorre na parede interna através da absorção de carbono, como consequência tem-se um aumento da precipitação de carbeto de cromo, ocasionando uma redução no teor de cromo da matriz austenítica tornando-a ferromagnética. (TAWANCY; ABBAS, 1992).

Diferentes técnicas têm sido usadas para estudar a resposta magnética da camada carburizada. Estas incluem, o Magnetômetro de Amostra Vibrante (LOPEZ; et. al., 2018), Correntes Parasitas (STEVENS; TROMPETTER, 2004) sensores magnéticos (LOPEZ; et. al., 2018; SILVA; et. al., 2007.) e a Microscopia de Força Magnética (STEVENS; et. al., 2003). Com o uso da técnica de Microscopia de Força Magnética é possível obter a resposta local da região carburizada, podendo identificar, através de imagens, as regiões ferromagnéticas nas quais permite distinguir os domínios magnéticos na matriz (SILVA; et. al., 2008). Entretanto, não têm sido apresentados estudos referentes a quantificação da resposta magnética local. Deste modo, o objetivo deste trabalho é detectar os domínios magnéticos e quantificar a resposta magnética local da camada carburizada de tubos de fornos de reforma a vapor por Microscopia Magneto-Ótica Kerr.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Amostra

A amostra utilizada neste trabalho é proveniente de um tubo de reforma a vapor que sofreu carburização, com 12.600 mm de comprimento e com 130.000h de operação. A composição química do aço HP modificado, apresentada na Tabela 1, foi determinada por fluorescência de raio-X e espectroscopia de plasma (ARENAS; et. al., 2017).

Tubo	C	Ni	Cr	Nb	Ti	Si	Mn	P	S	Mo
A	0,52	34,30	26,10	1,26	0,01	1,89	1,26	0,023	0,012	0,018

Tabela 1 - Composição química da liga de aço HP modificada ao nióbio utilizada (peso%).

Adaptado de: (ARENAS; et. al., 2017).

Foi retirada uma amostra de 5,0 x 5,0 x 3,0 mm, conforme ilustrado na Figura 1.a. A parede interna deste tubo sofreu carburização, e dessa forma a amostra apresenta em sua morfologia uma camada de óxido/coque, seguido da camada danificada pela carburização (LOPEZ; et. al. 2018). Na Figura 1.b. são representadas as camadas presentes na amostra: camada de óxido/coque na extremidade da parede interna (R1), camada danificada pela carburização do material (R2), e por fim, ao se afastar da superfície interna, a microestrutura de seu centro de parede (R3).

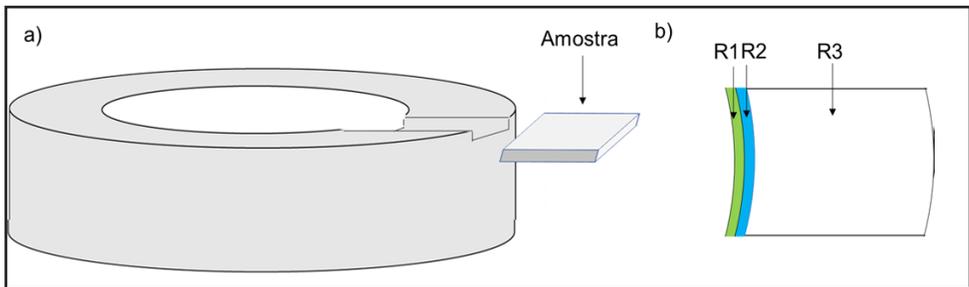


Figura 1 - a) Representação da retirada da amostra a partir do segmento do tubo.

b) esquema representativo das diferentes camadas microestruturais presentes na superfície da amostra, sendo a camada de óxido/coque (R1), a camada danificada pela carburização (R2) e por fim a região de centro de parede (R3).

Após o corte da amostra, foi realizada a preparação superficial através de lixamento com lixas de 100 até 1500, seguido de um polimento com pasta de diamante de 6  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ .

## 2.2 Caracterização magnética

Para caracterização magnética da amostra foi utilizado o microscópio magneto-ótico Kerr fabricado pela Evico-Magnetics®, Figura 2. O sistema empregado possui alta resolução, Figura 2.a, com eletroímãs externos rotativos, para aplicação do campo magnético (H), e plataforma piezelétrica para fixação da amostra e aumento de estabilidade durante a medida, Figura 2.b.

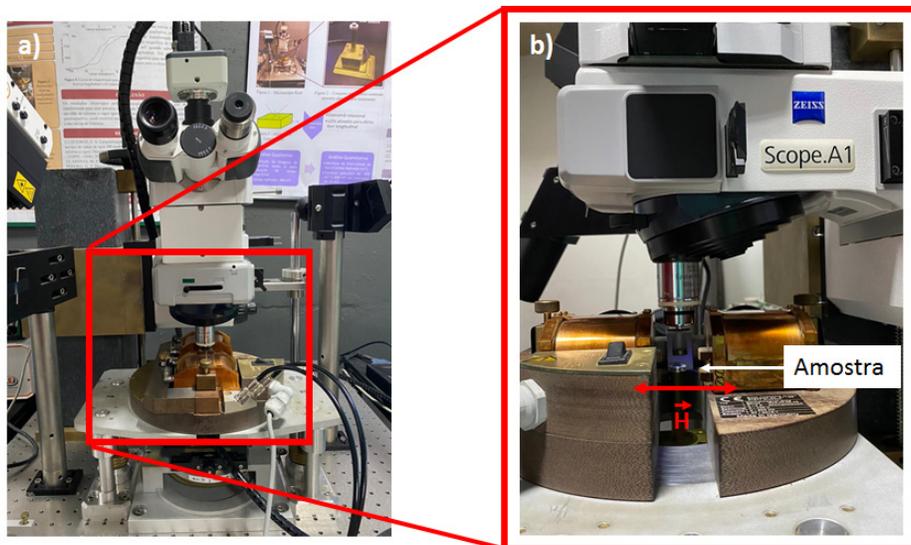


Figura 2 - (a) Conjunto de alta resolução do Microscópio Magneto-Ótico Kerr com destaque (b) para a vista lateral do conjunto dos eletroímãs indicando a direção do campo magnético aplicado e o posicionamento da amostra.

Dentre os três tipos do Efeito Kerr citados anteriormente neste trabalho foi avaliado o Efeito Kerr Longitudinal, para tal, na realização das análises qualitativas e quantitativas foi empregada a configuração do microscópio no modo puramente longitudinal, onde a direção de magnetização ( $M$ ), induzida pelo campo magnético aplicado, é paralela tanto ao plano de incidência do feixe de luz quanto à superfície do material, conforme ilustrado na Figura 3.

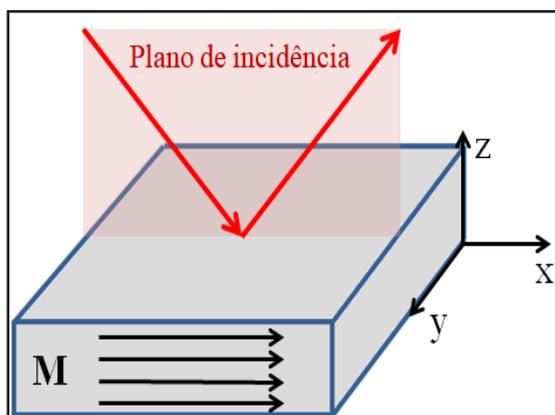


Figura 3 - Representação gráfica para a configuração longitudinal do Efeito Kerr onde, o plano de incidência do feixe de luz linearmente polarizado, em vermelho, é paralelo tanto à superfície a ser analisada quanto à direção de magnetização induzida no material.

Inicialmente, na camada carburizada foi tomada uma imagem de topografia utilizando a lente de 20 vezes de aumento com a finalidade de determinar a região a ser analisada. Posteriormente, uma nova imagem topográfica foi obtida utilizando a lente de 100 vezes de aumento.

O procedimento para análise qualitativa consistiu inicialmente do registro de uma imagem da superfície quando a amostra está sendo submetida a um campo magnético aplicado de  $\pm 300$  mT. Em seguida, foi realizado o registro de uma imagem após o campo externo ter sido removido e, por último, foi feita a subtração das duas imagens com a finalidade de eliminar informações topográficas, permanecendo somente as informações de natureza magnética. Visando analisar o comportamento dos domínios magnéticos, o mesmo procedimento foi realizado a partir da amostra desmagnetizada para os seguintes campos magnéticos aplicados: 0 mT,  $\pm 50$  mT,  $\pm 100$  mT e  $\pm 200$  mT.

Para a análise quantitativa foram selecionadas duas regiões de  $3,8 \times 5,2 \mu\text{m}$  aproximadamente, onde foram realizados os levantamentos das curvas de histerese no intervalo de -300 mT a 300 mT de campo magnético aplicado, utilizando um passo de 10 mT.

Para realização das análises, as especificações empregadas para os principais parâmetros estão descritas na Tabela 2. Sendo estas pré-definidas a partir de trabalhos anteriores no estudo das ligas de aço HP (NEVES; et. al., 2019).

Parâmetros	Especificações
Lente de aumento	Lente de 100 vezes de aumento
Configuração de LED	Puramente Longitudinal
Posição de eletroímã	Frontal
Campo magnético externo (Análise Qualitativa)	$\pm 300$ mT, $\pm 200$ mT, $\pm 100$ mT, $\pm 50$ mT, 0 mT
Faixa de campo magnético; Intervalo (Análise Quantitativa)	Entre -300 mT e 300 mT; 10 mT
Área de análise da curva de interesse	$3,8 \times 5,2 \mu\text{m}$

Tabela 2 - Especificações utilizadas para a caracterização magnética da camada carburizada.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4, obtida por meio da Microscopia Magneto-Ótica Kerr, apresenta a topografia da região analisada onde, utilizando a lente de 20 vezes de aumento, pode-se distinguir as regiões de camada de óxidos/coque e a que sofreu danos por carburização, como indicadas na Figura 4.a. A partir dessa imagem, foi selecionada uma região representativa na interface entre a camada de óxido e a camada carburizada. Utilizando a lente de 100 vezes de aumento é evidente a diferença topográfica entre o óxido, em preto, os carbeto de cromo e nióbio, em cinza escuro, e a matriz, em cinza claro, como

indicados na Figura 4.b.

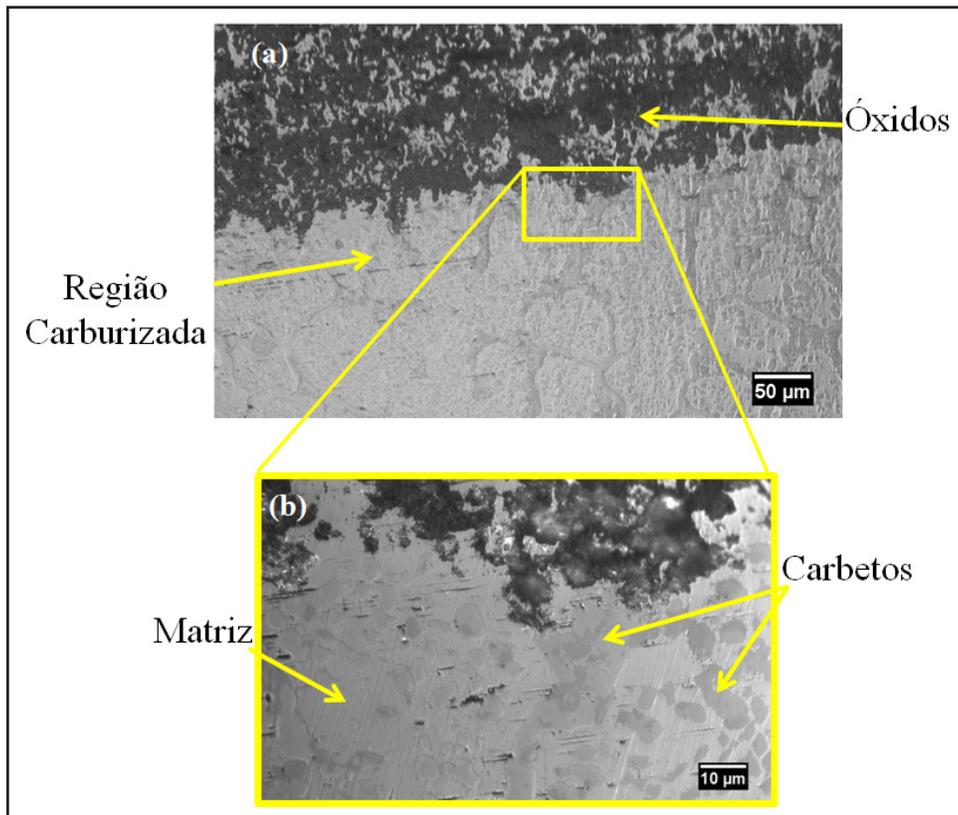


Figura 4 - Imagens topográficas obtidas por microscopia Magneto-Ótica Kerr de uma amostra da parede interna de um tubo aço HP que sofreu carburização em operação com (a) 20x de aumento e (b) 100x de aumento, permitindo distinguir as regiões de óxidos, a região carburizada e os carbetos presentes.

Em relação à análise qualitativa, nos itens da Figura 5 foram apresentados os resultados da subtração entre as imagens posterior e durante a aplicação de campo magnético de saturação de 300 mT (Figura 5.a) e -300 mT (Figura 5.b). Foi constatado que, para estas imagens, haviam novos padrões de contraste em tons de cinza nas imagens resultantes que não eram perceptíveis nas imagens de topografia (Figura 4.b). Estes contrastes, que formam uma estrutura semelhante a um labirinto, representam os domínios magnéticos. A confirmação da presença destes domínios magnéticos foi feita a partir da mudança de direção do campo aplicado e consequentemente a inversão de contrastes na imagem, indicando uma mudança de orientação destes domínios. Estas características são indicativas de um comportamento ferromagnético. A partir da imagem de topografia pode-se afirmar que essas regiões correspondem à matriz da camada carburizada. Em contrapartida, no interior dos carbetos observou-se um tom claro, homogêneo e que

não apresentou variação entre as imagens resultantes, indicando um comportamento paramagnético dos carbetos.

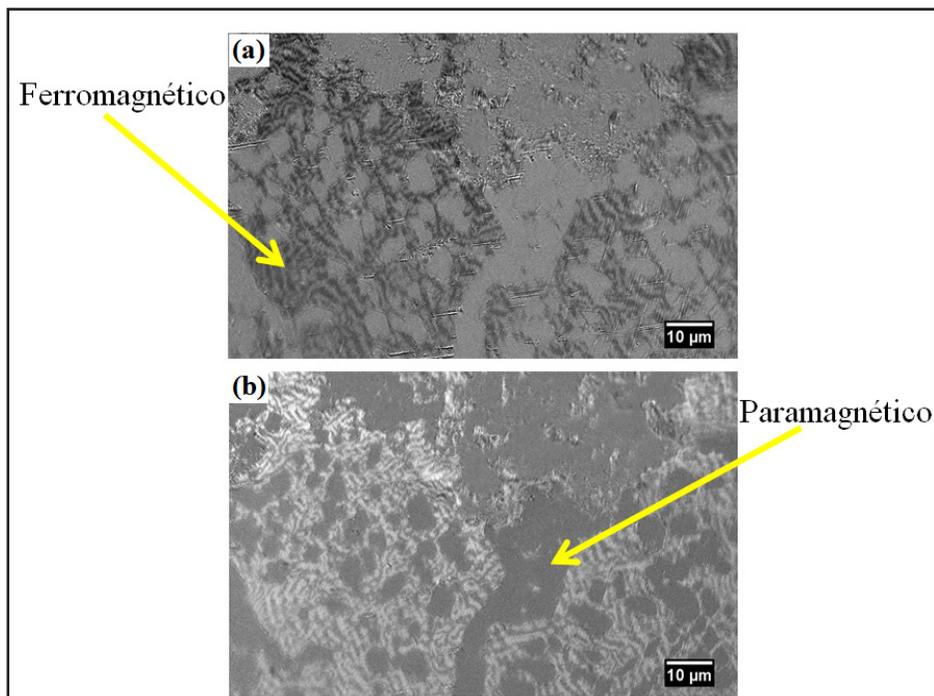


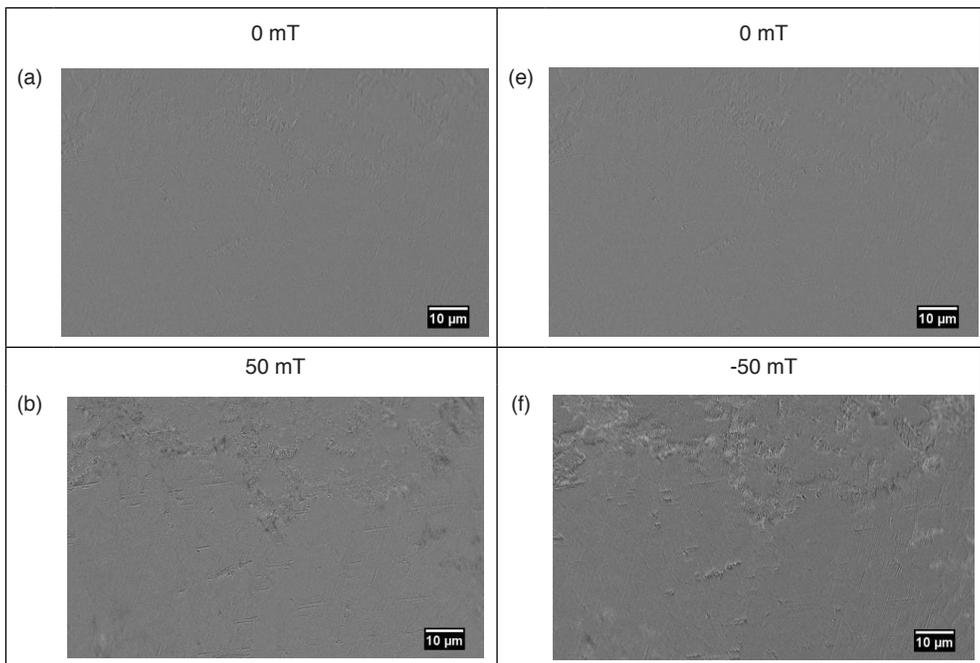
Figura 5 - Subtração de imagens evidenciando a presença de domínios magnéticos no aço HP utilizando campos de saturação de 300mT (a) e -300mT (b).

Com base nestas informações e procurando observar o comportamento destes domínios magnéticos, foram registradas imagens para diferentes valores de campo magnético aplicado, Figura 6. Partindo da amostra desmagnetizada e isenta da presença de um campo externo (0 mT), foram aplicados os campos magnéticos de 50 mT, 100 mT e 200 mT e posteriormente para os mesmos valores, porém com direção oposta de aplicação do campo magnético (valores negativos).

Nas Figuras 6.a e 6.e observou-se que para o campo de 0 mT a imagem é isenta de qualquer tipo de informação, seja de origem magnética ou topográfica. Quando aplicado um campo de 50 mT (Figura 6.b), foram identificadas pequenas variações de contraste em comparação com a primeira imagem, isso ocorreu devido a mudança de direção dos domínios que estavam mais próximos da direção de aplicação do campo magnético e por consequência se orientam de modo mais rápido (HUBERT; SCHAFFER, 1998). Ao aumentar a intensidade do campo magnético para 100 mT (Figura 6.c), verificou-se um aumento dos domínios magnéticos visíveis, porém ainda longe de alcançar a saturação magnética do material. Ao aplicar um campo de 200 mT (Figura 6.d) o material passou a atingir seu

estado saturado, não havendo mais alterações na morfologia destes domínios. As mesmas observações foram realizadas a partir da aplicação de um campo com valores negativos (Figuras 6.f, 6.g e 6.h) porém com pequenas variações nos estados não saturados.

Sabendo como os domínios magnéticos se comportam, com base na Figura 6, foi proposto quantificar essas variações de intensidade por meio do levantamento das curvas de histerese, Figura 7. Para a análise quantitativa, foram selecionadas duas regiões para obtenção das curvas de histerese, relativas às regiões da matriz e dos carbeto, uma vez que apresentaram diferenças em seus comportamentos magnéticos a partir das análises qualitativas. Essa análise foi realizada medindo a diferença de intensidade da luz sob uma área determinada da superfície em uma faixa de valores de campo aplicado. Na matriz, conforme a curva obtida na Figura 7.a, o comportamento não linear em função do campo magnético aplicado indicou que a região é efetivamente ferromagnética, apresentando saturação magnética próximo a 180 mT, fato este comprovado por meio das análises qualitativas apresentadas e tendo este valor quantificado por meio da curva de histerese. Por outro lado, a curva obtida para um carbeta, na Figura 7.b, apresentou comportamento linear durante toda a faixa de campo magnético, o que é característico dos materiais paramagnéticos, mais uma vez corroborando com os resultados observados por meio da análise qualitativa.



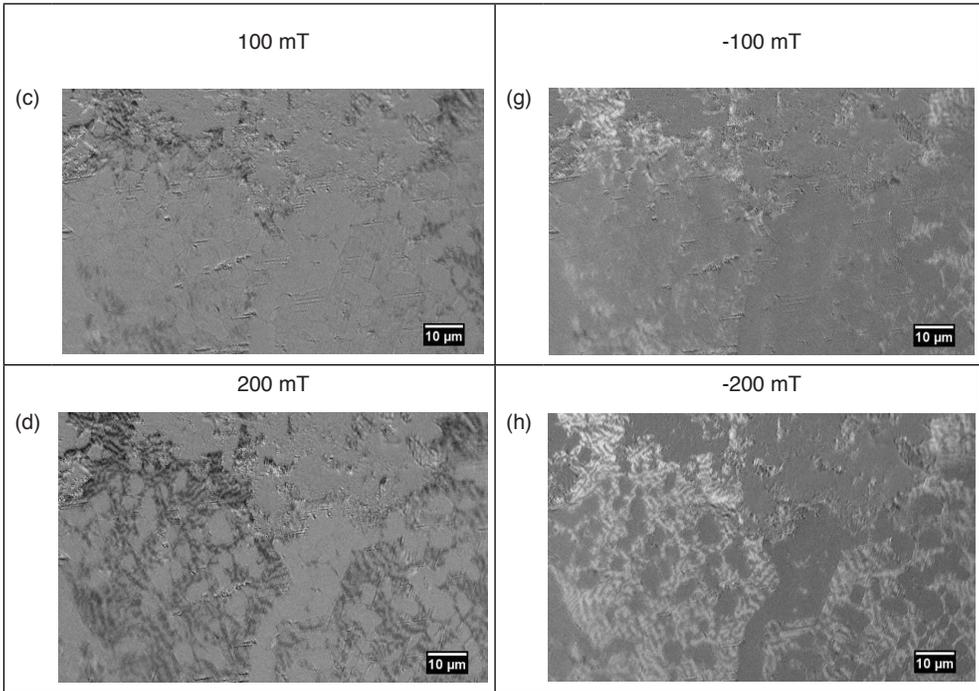


Figura 6 - Caracterização magnética qualitativa por Microscopia Magneto-Ótica Kerr da região carburizada para os campos magnéticos aplicados de (a) 0 mT, (b) 50 mT, (c) 100 mT, (d) 200 mT, (e) 0 mT, (f) -50 mT, (g) -100 mT, (h) -200 mT.

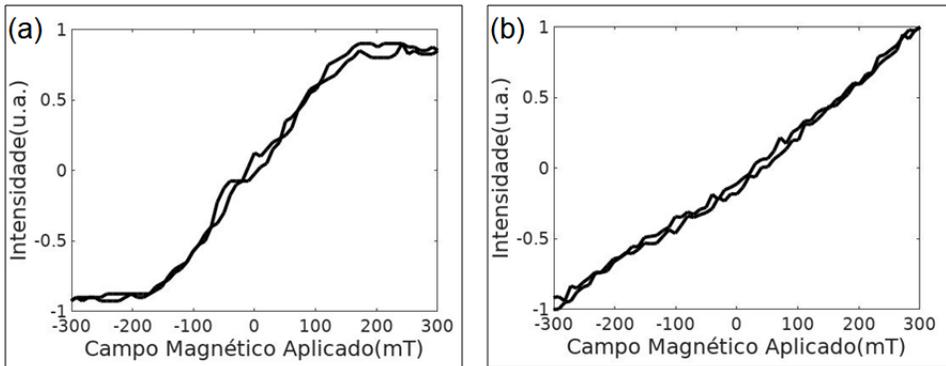


Figura 7 - Curva de histerese na matriz (a) e no carbetto (b).

## 4 | CONCLUSÃO

Com os resultados qualitativos obtidos por meio da Microscopia Magneto-Ótica Kerr foi possível evidenciar o comportamento ferromagnético na matriz carburizada, por meio da presença dos domínios magnéticos, e como estes se comportam em diferentes campos magnéticos aplicados. Nos carbetos não foram observadas a presença de domínios

magnéticos, comportamento típico de materiais paramagnéticos. Os resultados levantados a partir da análise qualitativa estão em concordância com as análises quantitativas, sendo possível observar na curva de histerese um campo de saturação de 180 mT para a região da matriz, enquanto os carbetos não apresentam saturação magnética. Por último, vale ressaltar que a avaliação do comportamento magnético obtida neste estudo é importante na implementação de ferramentas de inspeção usadas para detecção das regiões carburizadas.

## AGRADECIMENTOS

À CAPES, ao CNPq e à FAPERJ pelo suporte financeiro. À Petrobras pelo apoio financeiro e fornecimento das amostras.

## REFERÊNCIAS

ARENAS, M. P.; LOPEZ, J. E. C.; PACHECO, C. J.; ECKSTEIN, C. B.; JUNIOR, L. N.; ALMEIDA, L. H.; REBELLO, J. M. A.; PEREIRA, G. R. **Deteção de baixos níveis de carburização em tubos de reforma usando um sensor magnético**. p. 1897-1904. In: *72nd ABM Annual Congress*, São Paulo, 2017.

DA SILVEIRA, T.L.; LE MAY, I. **Damage assessment and management in reformer furnaces**. *J Press Vessel Technol*;119:423–7, 1997.

DA SILVEIRA, T.L.; LE MAY, I. **Reformer Furnaces: Materials, damage mechanisms and assessment**. *Arab J Sci Eng*.;31(2):99–119, 2006.

HUBERT, A.; SCHAFFER, R. **Magnetic domains: the analysis of magnetic microstructures**. Berlin, 1998.

LEITE, V. S.; FIGUEIREDO, W. **Determinação de curvas de histerese**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 29, n. 1, p. 53-56, 2007.

LOPEZ, J. E. C.; ARENAS, M. P.; PACHECO, C. J.; QUEIROZ, F. S.; ECKSTEIN, C. B.; JUNIOR, L. N.; ALMEIDA, L. H.; REBELLO, J. M. A.; PEREIRA, G. R. **Development of a magnetic sensor for detection of moderate carburization damages in heat-resistant HP-Nb tubes of steam reforming furnaces**. *Journal of Materials Research and Technology*, v.7, n. 3, p. 371-375, 2018.

NEVES, T. T. M.; LIMA, C. V. S.; PACHECO, C. J.; ECKSTEIN, C. B.; JUNIOR, L. N.; ALMEIDA, L. H.; PEREIRA, G. R. **Caracterização por microscopia magneto-ótica da região empobrecida de cromo associada à formação da camada de óxido em aço HP**. p. 2251-2261. In: *74º Congresso Anual da ABM*, São Paulo, 2019.

QUEIROZ, F. S. **Caracterização microestrutural em função da temperatura de serviço de tubos de aços HP-modificados ao Nb e Ti envelhecidos em fornos de reforma a vapor**. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2017.

SCHAFER, R., **Investigation of domains and dynamic of domain walls by magneto-optical Kerr effect.** Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstofforschung Dresden e. V., Dresden. p. 1-4, 2007.

SILVA, I. C.; REBELLO, J. M. A.; BRUNO, A.C.; JACQUES P. J.; NYSTEN, B.; DILLE, J. **Structural and magnetic characterization of a carburized cast austenitic steel.** Scripta Materialia, v 59, n. 9, p. 1010-1013, 2008.

SILVA, I. C.; SILVA, L. L.; SILVA, R. S.; BRUNO, A.C.; REBELLO, J. M. A. **Carburization of ethylene pyrolysis tubes determined by magnetic measurements and genetic algorithm.** Scripta Materialia, v. 56, n. 4, p. 317-320, 2007.

SOLDATOV, I. V.; SCHÄFER, R. **Advanced MOKE magnetometry in wide-field Kerr-microscopy,** Journal of Applied Physics, v. 122, n. 15, 2017.

STEVENS, K. J.; PARBHU, A.; SOLTIS, J.; STEWART, D. **Magnetic Force Microscopy of a carburized ethylene pyrolysis tube.** J. Phys. D: Appl. Phys, 36, pp. 164-168, 2003.

STEVENS, K. J.; TROMPETTER, W.J. **Calibration of eddy current carburization measurements in ethylene production tubes using ion beam analysis.** J Phys D Appl Phys, 37, pp. 501-509, 2004.

TAWANCY, H. M.; ABBAS, N. M. **Mechanism of carburization of high-temperature alloys.** Journal of Materials Science, v. 27, p. 1061-1069, 1992.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Aço HP 41, 43, 44, 46, 47, 48, 51

### B

Biomateriais 66, 67, 78, 79, 81, 82, 88, 89

### C

Carburização 41, 43, 44, 46, 47, 51

Corrosão 53, 55, 62, 63, 64, 67, 68, 90

### D

Domínios magnéticos 41, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 50

### E

Eficiência de corrente 53, 55, 56, 57, 58, 64

Eletro galvanização 53, 54, 55

Escória 18, 19, 20, 23, 24, 26, 28, 29, 30, 32, 33, 37, 38, 39, 40

### F

Fadiga 66, 67, 69, 70, 71, 75, 76, 77, 79

### H

Hidroxiapatita 81, 83, 84, 88, 89

### L

Ligas de titânio 66, 68, 72, 73, 74

### M

Microscopia Kerr 41

### N

Nanoindentação 18, 19, 20, 22, 23

### P

PBAT 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

Polímero natural 81, 86

PP 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 52

Propriedades mecânicas 10, 11, 12, 16, 18, 19, 38, 54, 66, 68, 71

### R

Reciclagem 10, 11, 17, 26, 28, 39

Resíduos 11, 13, 16, 26, 28, 29, 39

Resistência 10, 11, 12, 14, 15, 16, 19, 23, 53, 55, 57, 63, 64, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 77, 81, 82, 83, 84, 86, 88

Revestimento metálico 53, 54

## **T**

Tratamento alcalino 66, 69, 70, 71, 73, 74, 75, 76, 77

## **U**

Ultramicro dureza 18, 21, 23

## **V**

Vidro 18, 20, 21, 23, 24, 26, 30, 31, 32, 33, 34, 35

Vitrocerâmico 26, 29, 32, 34, 35, 36, 37

## **Z**

Zinco 27, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 61, 62, 63, 64, 65

# COLEÇÃO DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

## ENGENHARIA DE MATERIAIS E METALÚRGICA



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



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



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



[facebook.com/atenaeditora.com.br](https://facebook.com/atenaeditora.com.br)

**Atena**  
Editora

Ano 2021

# COLEÇÃO DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

## ENGENHARIA DE MATERIAIS E METALÚRGICA



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



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



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



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

**Atena**  
Editora

Ano 2021