

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

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

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

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

Ciências Biológicas e da Saúde

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

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

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

Data de aceite: 01/07/2021

Data de submissão: 06/05/2021

Thariany Sanches Leme

Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT/Unesp
Presidente Prudente – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/1843387011378590>

Flavia Landgraf Cuzzati

Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT/Unesp
Presidente Prudente – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/6318015591805062>

Silvio Rainho Teixeira

Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT/Unesp
Presidente Prudente – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/9256541983393135>

Agda Eunice de Souza

Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT/Unesp
Presidente Prudente – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/6770941534966452>

RESUMO: O setor de fundição tem um papel importante na economia do Brasil. Além de fornecer seus produtos para diversos segmentos, também contribui para a sociedade atendendo à demanda da reciclagem de sucata metálica. No entanto, ao mesmo tempo, geram diversos resíduos sólidos, alguns deles, considerados perigosos, contaminantes ou prejudiciais ao meio ambiente, se dispostos de maneira incorreta.

Dentre estes resíduos, estão as escórias, um subproduto proveniente do processo de fundição do metal. Para este trabalho, foi estudado o potencial da escória de fundição de ferro para o desenvolvimento de um material vítreo e vitrocerâmico. A escória foi combinada com cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e carbonato de potássio (K_2CO_3), mediante cálculos estequiométricos para obtenção de um vidro do sistema SiO_2 - CaO - Al_2O_3 . Para isso, a escória e a cal hidratada foram caracterizadas, inicialmente, por fluorescência de Raios X (FRX) para determinação sua composição química. Essa mistura foi fundida à uma temperatura de 1450°C e vertida em água destilada para promover um resfriamento rápido (método melt-quenching). O vidro e o material vitrocerâmico foram caracterizados usando diferentes técnicas analíticas, como difratometria de Raios X (DRX), FRX, calorimetria exploratória de varredura (DSC) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados mostraram que o material obtido após a fundição foi um vidro silicato, com temperatura de transição vítrea em torno de 715°C e temperatura de cristalização de fases em torno de 900°C . O vidro obtido foi pulverizado, pastilhado e tratado termicamente para obtenção do vitrocerâmico. O material vitrocerâmico apresentou três fases cristalinas em meio à matriz vítrea, a Akermanite, a Mervinite e um Silicato de Alumínio-Cálcio. As imagens de MEV deste material mostraram uma variação na morfologia, possivelmente relacionada às diferentes fases formadas, além de regiões características de uma matriz vítrea.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos, Escória, Vidros, Vitrocerâmico.

FOUNDRY INDUSTRY WASTE: SOURCE FOR GLASS AND VITROCERAMIC DEVELOPMENT

ABSTRACT: The foundry sector has an important role in the Brazilian economy. In addition to supplying its products to several segments, it also contributes to society by meeting the demand for recycling metallic waste. However, at the same time, they generate several solid residues, some of which are considered dangerous, contaminants or harmful to the environment, if disposed of incorrectly. Among these wastes are slag, a by-product from the metal smelting process. For this work, the potential of iron smelting slag for the development of a glassy and glass-ceramic material was studied. The slag was combined with hydrated lime ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) and potassium carbonate (K_2CO_3), using stoichiometric calculations to obtain the glass of SiO_2 - CaO - Al_2O_3 system. For this, the slag and hydrated lime were initially characterized by X-ray fluorescence (FRX) to determine their chemical composition. This mixture was melted at a temperature of 1450°C and poured into distilled water to promote rapid cooling (melt-quenching method). Glass and glass-ceramic materials were characterized using different analytical techniques, such as X-ray diffractometry (XRD), FRX, differential scanning calorimetry (DSC) and scanning electron microscopy (SEM). The results showed that the obtained material after casting was silicate glass, with a glass transition temperature around 715°C and phase crystallization temperature around 900°C . The glass obtained was pulverized, pelleted and thermally treated to obtain the glass ceramic. The glass-ceramic material presented three crystalline phases in the middle of the glass matrix, Akermanite, Mervinite and Aluminum-Calcium Silicate. The SEM images of this material showed a variation in morphology, possibly related to the different phases formed, in addition to characteristic regions of a vitreous matrix.

KEYWORDS: Waste, Slag, Glass, Vitroceramic.

1 | INTRODUÇÃO

A indústria de fundição representa um importante segmento econômico destacando-se pela produção de bens intermediários, fornecendo seus produtos para as indústrias de diversas áreas. Entre estes, sobressaem as indústrias automobilísticas, de construção ferroviária e naval, de bens de capital (principalmente máquinas e implementos agrícolas) e de base, como a siderúrgica (CASOTTI, et al., 2011).

A Indústria de fundição é dividida de acordo com a composição dos metais a serem fundidos e com o tipo de processo de fundição utilizado. Em relação à composição química dos metais, os fundidos utilizados são classificados como ferrosos, aço e não ferrosos. Os metais ferrosos são ligas de ferro com carbono, contendo teores de carbono superiores a 2%, ou ainda ferro fundido branco, mesclado, cinzento, nodular, vermicular e maleável. Já o aço é uma liga de ferro-carbono contendo valores inferiores a 2% de carbono em sua composição. Entre os metais não ferrosos, estão presentes os fundidos em alumínio, zinco, cobre e magnésio (TAKATA, 2002; BNDS, 2011).

Na indústria global de fundição, a China se destaca como a maior produtora, com mais de um terço da produção mundial, seguida pelos Estados Unidos e a Rússia. Já o Brasil, ocupa a sétima posição nesta lista, entregando um total de 3 milhões de toneladas

por ano (BNDS, 2011).

De acordo com a ABIFA – Associação Brasileira de Fundição, os fundidos de ferro representam a maior parcela da produção da indústria de fundição, ocupando o primeiro lugar num ranking produtivo. Somente no primeiro mês do ano de 2021, a produção de fundidos ferrosos alcançou 145.907 toneladas. A principal demanda para essa produção é o setor automotivo, responsável por quase 50% do mercado nacional (ABIFA,2020).

É evidente, que ao mesmo tempo em que o setor de fundição contribui com a economia do país e, conseqüentemente, com a sociedade, atendendo à demanda da reciclagem de sucata metálica, também possui um alto risco de impacto ambiental por gerar uma série de resíduos potencialmente contaminantes (DIEHL, 1996; MORAES, 2013).

De uma maneira geral, o processo de fundição consiste na preparação, fusão e refino de insumos metálicos, seu vazamento em moldes e na limpeza e acabamento das peças brutas assim obtidas (MOTICELLI, 1994). Em outras palavras, o processo de fundição consiste na fabricação de peças metálicas por meio do preenchimento, com metal líquido, de um molde cuja cavidade apresenta dimensões similares às da peça que se deseja produzir (BNDS, 2011). O molde de areia verde é o mais usado, graças ao seu baixo custo, facilidade tecnológica e também de restauração e reutilização. Ela é composta por sílica, cromita, zircônia, entre outros, e é associada à uma argila e uma resina.

Os resíduos sólidos gerados são constituídos em sua maioria pelas areias, usadas na confecção dos moldes e machos e escórias, que são geradas como um subproduto no processo de fundição, dentre outros em menor escala. Estima-se que, para cada quilo de peça fundida produzida, são utilizadas entre 0,8 e 1 Kg de areia para confecção do molde (DANTAS, 2003). Após o processo de desmoldagem e reaproveitamento da areia para novos moldes, 10% deve ser rejeitada, passando a ser considerada como resíduo (BNDES, 2011).

Já a geração de escória no processo de fundição, por exemplo, chega a 5 kg de resíduo a cada 100 kg de ferro fundido (SIEGEL 1982; CASPERS, 1999). A escória é, portanto, o segundo resíduo mais produzido pela indústria de fundição e se classifica como Escória de Fundição e Escória de Alto Forno. Devido às elevadas temperaturas de fusão, originam-se impurezas não metálicas, que, graças à diferença de densidade e insolubilidade, se separam do metal. A escória formada varia de acordo com o metal utilizado e também com o processo de fundição escolhido. A partir da Escória de Fundição, há a Escória Granulada, que é resfriada rapidamente com jatos de água frios. Essa é amorfa, ou seja, não possui uma organização cristalina. Outro processo utilizado é a inserção da escória em uma roda dentada com água, a qual arremessa os grãos ao ar, gerando a chamada Escória Pelotizada. Tratando-se da Escória de Alto Forno, vindo da produção de Ferro Gusa, há ainda, mais duas classificações: a Escória Bruta de Alto Forno, resfriada ao ar livre e lentamente, gerando pedras brutas e maciças, e a Escória Granulada de Alto Forno, também resfriada rapidamente e com jatos de água fria, porém, ao se granular, acaba se

vitrificando (BNDS, 2011).

Além destes, há outros resíduos em menor quantidade, tais como o cavaco da usinagem, a lama de tratamento de água e o pó de exaustão da preparação da areia, moldes, entre outros. Desse processo, são gerados resíduos sólidos, que caracteriza o maior problema enfrentado pelas indústrias de fundição (DENG e TIKALSKY, 2006).

A composição química destes resíduos varia de acordo com o metal fundido e o tipo de processamento, porém alguns elementos são comuns e majoritários. A escória, por exemplo, possui, majoritariamente, óxido de silício (SiO_2), óxido de magnésio (MgO), óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de alumínio (Al_2O_3) (FREITAS, 2018).

Em função da geração destes resíduos, muitos estudos têm sido desenvolvidos visando seu aproveitamento como subprodutos para materiais da construção civil, dando a eles possibilidades de utilização, agregando valores e possibilitando sua destinação ambientalmente adequada.

A areia descartada de fundição, por exemplo, tem sido avaliada como aditivo e/ou substituinte em matriz de cerâmica vermelha (LUO et al, 2014; HOSSINEY et al, 2018; PALUDO e BRAGANÇA, 2020), concreto (MARTINS et al, 2019; GURUMOORTHY e ARUNACHALAM, 2016; ANDRADE et al, 2018; MAKUL e SUA-IAM, 2018) e pavimentação (YAZOGHLI-MARZOUK et al, 2014; DYER et al. 2018).

As escórias de fundição também têm sido utilizadas em diversos materiais do setor civil, incorporados e/ou em substituição a algum componente, tais como em argamassas (ROSSA JR e PORTELLA, 2012; LEONARDO, 2006), concreto (RESCHKE, 2003; PAGNUSSAT, 2004; CECATTO, 2003, SANTOS, 2021) e cerâmica (BIGÉLLI, 2005; RIBEIRO, 2008; TEIXEIRA, 2014; TEIXEIRA, 2018).

No que diz respeito à produção de vidros e vitrocerâmicos, poucos trabalhos da literatura têm mostrado o uso dos resíduos da indústria de fundição como componente de produção destes materiais. SILVA et al., (2020), por exemplo, utilizou areia descartada de fundição associado a um resíduo indústria de papel e celulose (grits e lama de cal) para a fabricação de materiais vitrocerâmicos.

Neste contexto, buscou-se, neste trabalho, avaliar o potencial de utilização da escória da indústria de fundição de ferro para o desenvolvimento de um material vítreo e vitrocerâmico para ser aplicado no setor de construção civil.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Desenvolvimento do material vítreo

O Resíduo de fundição utilizado neste trabalho para o desenvolvimento do material vítreo foi à escória de fundição de ferro. O resíduo foi triturado em um britador de mandíbula, passado na peneira com abertura de 0,595 mm (30 mesh) e misturado com carbonato de potássio (K_2CO_3) e cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). O carbonato de potássio foi utilizado para

diminuir o ponto de fusão do dióxido de silício presente nas escórias (principal componente de formação do vidro silicato), e a cal hidratada, para favorecer um equilíbrio químico devido às quebras de ligações induzidas pelo carbonato de potássio.

A composição para obtenção do vidro foi elaborada a partir dos dados da análise química por fluorescência de Raios X (FRX) da escória, calculados estequiometricamente e com o auxílio do diagrama de fases do sistema ternário SiO_2 - Al_2O_3 - CaO (Figura 1).

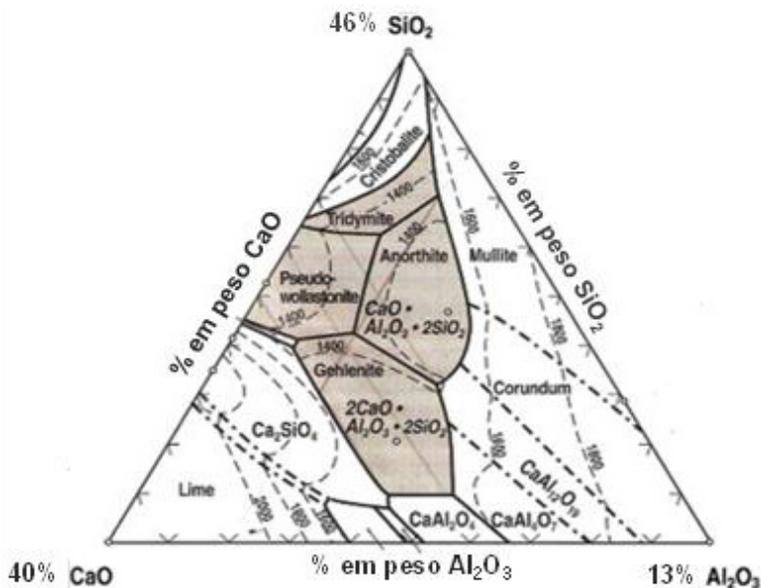


Figura. 1: Diagrama de fase do sistema SiO_2 - Al_2O_3 - CaO .

Fonte: HOLLAND and BEALL (2012).

A Tabela 1 mostra a composição da mistura utilizada para a obtenção do vidro.

Mistura (g)		Óxidos (%)	
Escória	90	SiO_2	46
Ca(OH)_2	60	CaO	40
K_2CO_3	30	Al_2O_3	13

Tabela 1: Composição da mistura para obtenção do vidro.

Fonte: Autora.

Após a composição ter sido formulada, utilizou-se o método de Chengyu e Ying (1983) para determinar a temperatura de fusão do vidro. Este método é válido apenas para temperaturas de fusão abaixo de 1500°C , para vidros de silicatos. Ele fornece uma

expressão empírica, descrita pela equação (1), que permite determinar a temperatura de fusão para a composição desejada de acordo com as porcentagens de massa de óxidos presentes.

$$T_m = 1400 + C_i \cdot P_i + \dots C_n \cdot P_n \quad (1)$$

A Tabela 2 apresenta as constantes numéricas associadas às porcentagens de óxidos que podem estar presentes na composição formulada. A constante numérica na equação (1) é representada por C_i ($i = 1, 2, \dots, n$) e o P_i são as frações (%) de óxidos presentes.

Óxidos	Constante Numérica (C_i)		Óxidos	Constante Numérica (C_i)	
SiO₂	3.6 ($\geq 75\%$) 5.1 (50-60%) 5.9 (30-40%)	4.4 (60-70%) 5.5 (40-50%)	BaO	-3.0 ($>15\%$) -4.5 ($<10\%$)	-3.9 (10-15%)
Al₂O₃	3.0 ($>20\%$) 5.5 (10-15%) 6.5 ($<5\%$)	4.5 (15-20%) 6.0 (5-10%)	ZnO	-5.0 ($>5\%$)	-3.5 ($<5\%$)
B₂O₃	-5.0 ($>15\%$) -7.0 ($<10\%$)	-6.0 (15-10%)	SrO	-5.0	
CaO	-5		Li₂O	-12	
MgO	-3		Na₂O	-10.0 ($>15\%$)	-11.0 ($<15\%$)
PbO	-3.5 ($>60\%$) -3.5 ($<15\%$)	-4.0 (15-60%)	K₂O	-9.0 ($>15\%$)	-10.0 (5-15%)

Tabela 2: Constantes numéricas para diferentes óxidos (%) para vidro de silicato.

Fonte: CHIANG (1983).

A composição foi colocada em cadinhos de alumina (5 cm de diâmetro por 10 cm de altura) e levadas ao forno (equipamento SERVIFOR-1700°C, modelo SF-M220605) para fusão. O processo de fusão foi realizado a partir da temperatura ambiente, utilizando taxa de aquecimento de 20°C/min até 1450°C, na qual foi mantida por uma hora. Posteriormente, o cadinho de alumina foi retirado e o líquido foi vertido rapidamente em um recipiente contendo água destilada, para que ocorresse o resfriamento rápido do vidro sem passar por processos de cristalização (processo *melt-quenching*). O vidro obtido foi macerado em almofariz de alumina, passado na peneira com abertura de 0,088 mm (170 mesh) e caracterizado por difração e fluorescência de Raios X (DRX, Shimadzu XRD-6000 e FRX, Shimadzu EDX-7000, respectivamente) e técnicas de análise térmica (análise térmica

diferencial (DTA), calorimetria exploratória diferencial (DSC) e termogravimetria (TG), TA Instruments, SDQ-600).

2.2 Desenvolvimento do material vitrocerâmico

Para o desenvolvimento do material vitrocerâmico, uma parcela de pó do vidro, obtido pelo processo de fusão e resfriamento (melt-quenching), foi utilizada para confeccionar pastilhas de 1 cm de diâmetro e massa igual a 0,5 g. As pastilhas foram prensadas com uma força de 20 KN, aplicada por 3 min, usando uma prensa manual uniaxial Shimadzu. As pastilhas foram submetidas ao tratamento térmico até a temperatura do pico de cristalização (900°C), com uma taxa de aquecimento 10°C/min, com permanência 90 min, para obtenção de um material vitrocerâmico. A temperatura de cristalização usada para o tratamento térmico foi obtida mediante os dados de análise térmica do vidro preparado inicialmente.

As pastilhas tratadas foram caracterizadas por DRX, para determinar as fases cristalinas, por FRX para determinação da porcentagem dos óxidos majoritários e por microscopia eletrônica de varredura (MEV, Carl Zeiss, EVO LS 15) para observar a morfologia dos cristais em meio a região amorfa. Para obtenção das imagens, uma pastilha do material vitrocerâmico foi submetida a um ataque químico com solução aquosa de 0,5% de ácido fluorídrico (HF) por 60 segundos, para evidenciar as possíveis regiões cristalizadas da amostra.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização da escória e do material vítreo

3.1.1 Análise Química

Os resultados quali-quantitativos da análise química por FRX (% óxidos) da composição da escória e da cal hidratada, utilizadas na composição do vidro, são observados na Tabela 3.

Óxidos	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	SrO	P.F
Escória (%massa)	49,0	16,4	11,5	5,2	2,6	2,0	0,8	0,5	0,4	-	10,0
Cal Hidratada (%massa)	1,37	0,21	0,31	0,07	39,97	27,91	-	-	0,09	0,05	30,13

Tabela 3: Análise química por FRX da escória e da cal hidratada.

Fonte: Autora.

Nota-se que a composição química predominante da escória é SiO_2 , apresentando cerca de 49% da sua massa total, seguindo de Fe_2O_3 (16,4%) e Al_2O_3 (11,5%). É importante destacar que o alto teor de sílica presente na escória caracteriza-a como um material potencialmente importante para produção de vidros, tendo em vista que o SiO_2 corresponde ao óxido formador da rede de um material vítreo (vidro silicato).

A composição química da cal hidratada mostra a predominância de, aproximadamente, 40% em massa de óxido de cálcio (CaO). Essa concentração majoritária de CaO contribuiu para que composição elaborada fosse determinada por meio do diagrama de fases ternário SiO_2 - Al_2O_3 -CaO. Além do CaO, a cal hidratada também possui o óxido de magnésio (MgO) como um componente majoritário (~28% em massa).

3.1.2 Difratometria de Raios X (DRX)

A Figura 2 apresenta o difratograma de Raios X da escória. Observa-se, neste difratograma, picos correspondentes à fase cristalina de SiO_2 e picos com menor intensidade correspondentes às fases cristalinas de Fe_2O_3 e Al_2O_3 , confirmando os dados obtidos na análise química do resíduo, mostrada na Tabela 3.

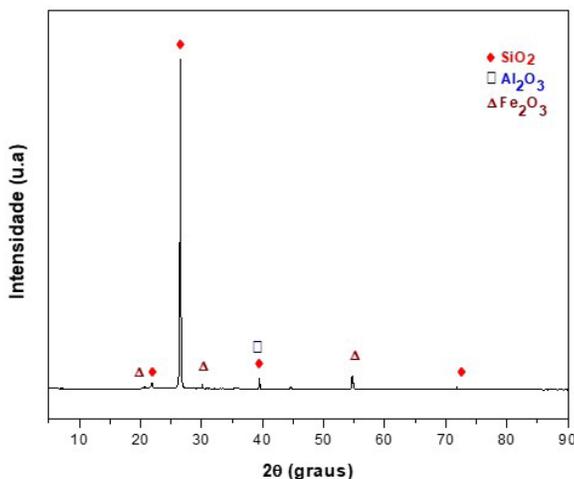


Figura 2: Difrátograma de Raio X da mistura das escórias.

Fonte: Autora.

A Figura 3 mostra o difratograma de Raios X do vidro obtido por meio do método fusão-resfriamento. Nele, observa-se ausência de picos de fases cristalinas, mostrando uma banda característica de material amorfo, em torno da posição $2\theta = 30^\circ$.

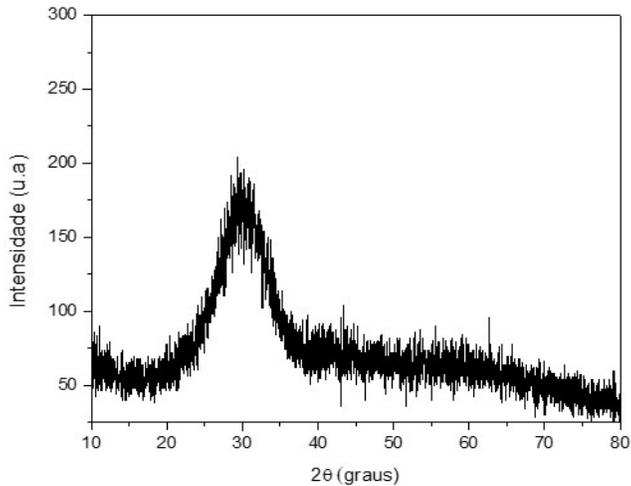


Figura 3: Difratoograma de Raio X do material vítreo.

Fonte: Autora.

3.1.3 Análise Térmica

Na Figura 4 pode-se observar os resultados da calorimetria exploratória diferencial (DSC) do vidro, durante o aquecimento até 1200°C, com taxa de 25°C/min. Pode-se observar reações térmicas características do vidro, como, por exemplo, a temperatura de transição vítrea (T_g) em 715°C, a temperatura de início de cristalização (T_x) em 857°C e a temperatura do pico de cristalização (T_p) em 900°C. A partir do valor da T_p foi possível tratar termicamente o material vítreo para obtenção do vitrocerâmico.

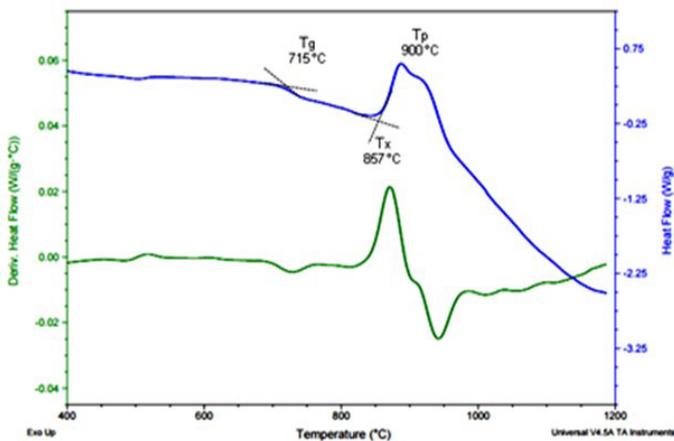


Figura 4: Termograma (DSC) 25°C /min do vidro.

Fonte: Autora.

3.2 Caracterização do material vitrocerâmico

3.2.1 Análise Química (FRX)

A Tabela 4 apresenta os resultados quali-quantitativos da análise química por FRX do material vitrocerâmico, ou seja do vidro cristalizado, após o tratamento térmico.

Óxidos	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MnO	Fe ₂ O ₃
% em massa	44,85	18,49	12,36	10,9	10,81	2,67	1,44

Tabela 4: Análise química por FRX do material vitrocerâmico.

Fonte: Autora.

A partir dos dados mostrados na Tabela 4, pode-se observar, em porcentagem mássica, os principais óxidos encontrados na composição química da vitrocerâmica. É possível notar que, dentre os óxidos majoritários da composição, estão o óxido de silício (SiO₂), óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO). Como já mencionado, a sílica é um formador da rede vítrea, que, em condições usuais de fusão e resfriamento, formam os vidros de silicatos. Os óxidos de cálcio e magnésio atuam como modificadores de rede, pois rompem a estrutura vítrea quando são introduzidos, diminuindo a viscosidade e, conseqüentemente, a temperatura de fusão, auxiliando, também, na cristalização de algumas fases.

3.2.2 Difractometria de Raios X (DRX)

A Figura 5 mostra o difratograma de Raios X do material vitrocerâmico. Observa-se a formação de duas fases predominantes: Akermanite (Ca₂Mg(Si₂O₇)) e Merwinite (Ca₃Mg(SiO₄)₂), identificadas pelas fichas cristalográficas JPCDF 79-2424 e 35-591, respectivamente. A formação destas fases cristalinas concorda com a composição química do material vitrocerâmico mostrado da Tabela 4. Note que a presença do Mg na estrutura cristalina da Akermanite e Merwinite pode ser justificada pela sua concentração relevante na cal hidratada, utilizada na formulação do material vítreo. Além das fases Akermanite e Merwinite, foram identificados picos de uma terceira fase, que corresponde a um Silicato de Alumínio e Cálcio. Note ainda que a linha base do gráfico mostra um halo em torno de 2 θ = 35°, indicando que ainda há um percentual de fases amorfas na amostra, o que caracteriza-a como um material vitrocerâmico.

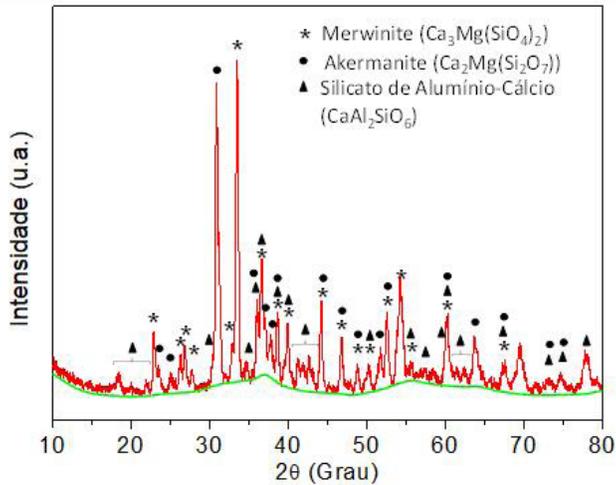


Figura 5: Difratoograma de Raio X do material vitrocerâmico.

Fonte: Autora.

3.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A morfologia do material vitrocerâmico pode ser observada nas imagens de MEV mostradas na Figura 6. Nota-se a presença de partículas com morfologias diferentes cristalizadas em meio à região vítrea. Essa região vítrea, indicada pelas setas nas imagens, tem uma aparência esponjosa decorrente do ataque químico com ácido fluorídrico. Já as partículas cristalinas, com morfologias diversas (octaedros, cuboides, cubos ou outras formas irregulares) podem estar associadas às diferentes fases cristalinas presentes na amostra, identificadas pela difração de Raios X.

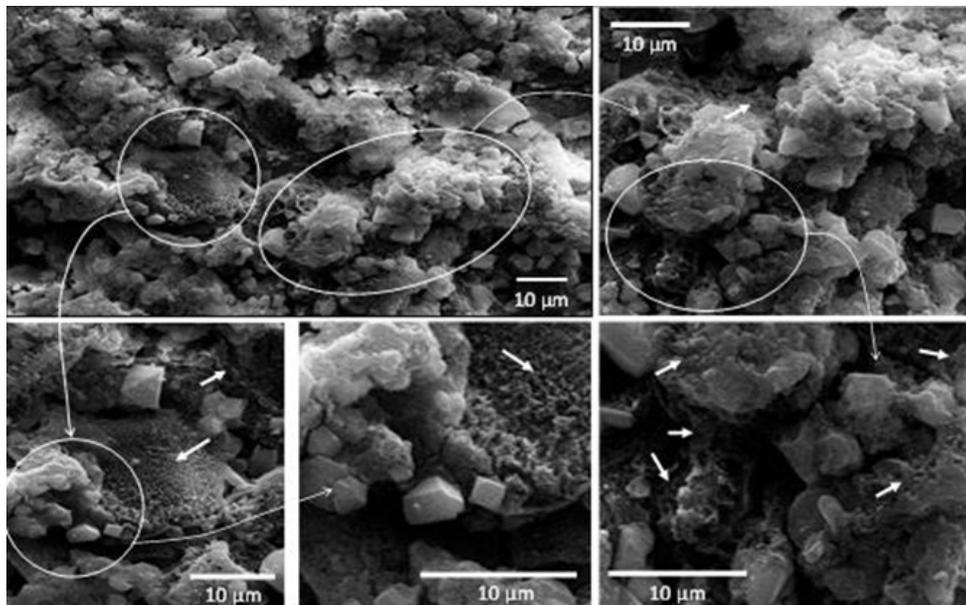


Figura 6: Imagem de MEV do material vitrocerâmico tratada a 900°C por 1,5h.

Fonte: Autora.

4 | CONCLUSÕES

Os estudos realizados neste trabalho mostraram que a escória da indústria de fundição de ferro com alto teor de SiO_2 presente em sua composição, aliada à cal hidratada, que possui alto percentual de CaO , permitiram obter um material vítreo pertencente ao sistema ternário $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$. A partir do material vítreo produzido, submetido a um tratamento térmico controlado, foi possível obter um material vitrocerâmico com três fases cristalinas (Akermanite, Merwinite e Silicato de Alumínio-Cálcio) em meio à matriz vítrea. Os resultados obtidos neste trabalho mostraram, portanto, o potencial de utilização do resíduo escória, produzido pela indústria de fundição de ferro, como um material potencialmente viável para fabricação de vidros e vitrocerâmicos. Estes resultados indicam, portanto, uma contribuição nesta área de conhecimento, sugerindo novos rumos à utilização deste resíduo, reduzindo impactos ambientais e contribuindo com o setor de construção civil no que diz respeito ao uso de vidros e vitrocerâmicos.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão de Bolsa de Mestrado e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia de Materiais.

REFERÊNCIAS

ABIFA. **Anuário ABIFA 2020**. Disponível em: <<https://www.abifa.org.br/revista32/>>. Acesso em: 03 maio 2021.

ABIFA. **Anuário ABIFA 2017**. Disponível em: <<https://www.abifa.org.br/industria-de-fundicao-inicia-2021-com-crescimento-da-producao-e-do-consumo-interno/>>. Acesso em: 03 maio 2021.

ANDRADE, L.B., CARNIN, R.L.P., ANDRADE PINTO, R.C. **Areia descartada de fundição para uso em concreto de cimento Portland: análise do agregado**. Revista Matéria, 23(3) (2018), 1-14.

BIGÉLLI, E.M. **Utilização de escória de chumbo em cerâmica vermelha**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

BNDES. **Indústria de fundição: situação atual e perspectivas**. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/1721/2/a_bs_33_industria_de_fundicao_-_situacao_atual_e_perspectivas_.pdf>. Acesso em: 06 fev.2019.

CASOTTI, B.P. et al. **Indústria de fundição: situação atual e perspectivas**. BNDES Setorial 33, p. 121-162

CASPERS, K. H. Fusão de ferro fundido sintético em forno cubilô. In: FUNDIÇÃO E SERVIÇOS. Aranda Editora Técnica: Março, 1999.

CECCATTO, D.M. **Avaliação da utilização de escória granulada de fundição (EGF) como substituição de parte do cimento em concreto – propriedades mecânicas**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003

CHENGYU, W and YING, T. **Calculation of the melting temperatures of silicate glasses**. Glass Technol. 24 (1983) 278–282.

CHIANG, Y. M.; BIRNIE, D. III; KINGERY, W.D. **Physical ceramics: Principles for ceramic science and engineering**. New York, John Wiley & Sons, 1997, cap. 1, p. 1-95.

DANTAS, J. M. **Montagem, Comissionamento e Operação de um Sistema de Recuperação de Areia de Fundição: Regenerador Térmico - Plano de Trabalho da Fase II**. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – São Paulo. Nov. 2003.

DENG A. and TIKALSKY, P.E. **Metallic characterization of foundry by-products per waste streams and leaching protocols**. Journal of Environmental Engineering. 2006

DIEHL, M.D. **Planejamento da regeneração de areias de fundição**. Anais do 51º Congresso Anual da ABM - Internacional; 1996; Porto Alegre, Brasil. São Paulo: ABM; 1996. p. 457-476.

DYER, P. P.O.L. et al. **Coppio. Environmental characterization of Foundry Waste Sand (WFS) in hot mix asphalt (HMA) mixtures**. Construction and Building Materials 171 (2018) 474-484.

FREITAS, S.M.A.C. **Escória de Aciaria: Caminhos para uma gestão sustentável**. Tese (Doutorado). Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

GOMES, M.T.O. et al. **Indústria brasileira de fundição: segmento de peças para o setor automotivo**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 4, p. [129]-144, set. 1996.

GURUMOORTHY, N. and ARUNACHALAM K. **Micro and mechanical behaviour of Treated Used Foundry Sand concrete**. Construction and Building Materials 123 (2016) 184-190.

HOLAND, W.; BEALL, G. **Glass-ceramic technology**. 2 ed. Westerville, The American Ceramic Society, 2002, 372 p.

HOSSINEY, N. et al. **In-plant production of bricks containing waste foundry sand - A study with Belgaum foundry industry**. Case Studies in Construction Materials 9 (2018) e00170.

LEONARDO, A. **Reciclagem de escória cristalizada para produção de argamassas**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

LUO, HUAN-LIN et al. **Waste Foundry Sand Reused as Clay Replacement for Tile Manufacture**. International Journal of Transportation Science and Technology 3(4) (2014) 339-351

MAKUL, N. and SUA-IAM, G. **Innovative utilization of foundry sand waste obtained from the manufacture of automobile engine parts as a cement replacement material in concrete production**. Journal of Cleaner Production 199 (2018) 305-320.

MARTINS, M.A.B. et al. **Study on waste foundry exhaust sand, WFES, as a partial substitute of fine aggregates in conventional concrete**. Sustainable Cities and Society 45 (2019) 187-196.

MORAES, C.A.M. et al. **Elaboração de plano de gerenciamento de resíduos sólidos de empresas de fundição de ferro fundido de pequeno porte**. Tecnol. Metal. Miner., São Paulo, v. 10, n. 4, p. 296-302, 2013

MOTICELLI, C.A. **A competitividade da Indústria Brasileira de Fundição**. Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação do Instituto de Economia. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

PAGNUSSAT, D.T. **Utilização de escória granulada de fundição (EGF) em blocos de concreto para pavimentação**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PALUDO, H.L. e BRAGANÇA S.R. **Maximization of the use of casting sand residue in the production of fired ceramic bricks**. REM, Int. Eng. J., Ouro Preto, 73(3), (2020), 337-343.

RESCHKE, J.S. **Escória Granulada de Fundição como substituição ao cimento em concretos: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

RIBEIRO, R.A.C. **Desenvolvimento de novos materiais cerâmicos a partir de resíduos industriais metal – mecânicos**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia (PIPE), Área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais, do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

ROSSA JR, J. e PORTELLA, K.F. **Adição de escória de alto forno em argamassas colantes do tipo AC-I**. Cerâmica, 58 (2012) 542- 548.

SANTOS, L.F. et al. **Characterization and reuse of spent foundry sand in the production of concrete for interlocking pavement.** Journal of Building Engineering (36) 2021, 102098.

SIEGEL, M. Fundição. São Paulo: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS, 1982.

SILVA, L.M. et al. **Utilization of discarded foundry sand (DFS) and inorganic waste from cellulose and paper industry for the manufacture of glass-ceramic materials.** Cerâmica, 66 (2020) 413-420.

TAKATA, J. T. **Análise do mercado de fundição dos metais ferrosos no brasil.** 2002. 141f. Dissertação de Mestrado, Escola de administração de empresas de São Paulo – FGV, São Paulo, SP, 2002.

TEIXEIRA, A.S.M.N. et al. **Uso da escória granulada de fundição em massa argilosa para produção de cerâmicas estruturais: uma prospecção tecnológica.** Revista GEINTEC, 4(3) (2014) 1244-1251.

TEIXEIRA, A.S.M.N.; SOARES, R.A.L.; TEIXEIRA, P.R.S. **Estudo e Avaliação do Uso e Escória Granulada de Fundição na Produção de Cerâmicas Estruturais.** Cerâmica Industrial, 23(2) (2018) 36-40.

TEIXEIRA, S.R. et al. **Characterization of a wollastonite glass-ceramic material prepared using sugar cane bagasse ash (SCBA) as one of the raw materials.** Materials Characterization 98 (2014) 209–214

YAZOGHLI-MARZOUK, O. et al. **Recycling foundry sand in road construction–field assessment.** Construction and Building Materials 61 (2014) 69-78

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



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

COLEÇÃO DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

ENGENHARIA DE MATERIAIS E METALÚRGICA



www.atenaeditora.com.br



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