

ENGENHARIAS:

Metodologias e Práticas de
Caráter Multidisciplinar

Henrique Ajuz Holzmann
João Dallamuta
(Organizadores)

ENGENHARIAS:

Metodologias e Práticas de
Caráter Multidisciplinar

Henrique Ajuz Holzmann
João Dallamuta
(Organizadores)

Editora Chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes Editoriais

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto Gráfico e Diagramação

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da Capa

Shutterstock

Edição de Arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os Autores

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-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.

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

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

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

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

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

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

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

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília

Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Daniel Richard Sant’Ana – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Profª Drª Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

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

Ciências Biológicas e da Saúde

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

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

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

Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Linguística, Letras e Artes

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

Conselho Técnico Científico

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Me. Adalto Moreira Braz – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí
Prof. Me. Alexsandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional
Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa
Profª Drª Andreza 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. Ma. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Profª Drª Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas
Prof. Me. Clécio Danilo Dias da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Profª Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília
Profª Ma. Daniela Remião de Macedo – Universidade de Lisboa
Profª Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás
Prof. Me. Edevaldo de Castro Monteiro – Embrapa Agrobiologia
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases
Prof. Me. Eduardo Henrique Ferreira – Faculdade Pitágoras de Londrina
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
Prof. Me. Ernane Rosa Martins – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí
Profª Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora
Prof. Dr. Fabiano Lemos Pereira – Prefeitura Municipal de Macaé
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas
Profª Drª Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
Prof. 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 Alborno – University of Miami and Miami Dade College
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará
Prof. Dr. José Carlos da Silva Mendes – Instituto de Psicologia Cognitiva, Desenvolvimento Humano e Social
Prof. Me. Jose Elyton Batista dos Santos – Universidade Federal de Sergipe
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco
Profª Drª Juliana Santana de Curcio – Universidade Federal de Goiás
Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFPA
Prof. Dr. Kárpio Márcio de Siqueira – Universidade do Estado da Bahia
Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis
Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFPR
Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Ma. Lillian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
Profª Drª Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná
Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos
Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior

Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

Profª Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará

Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco

Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal

Prof. Me. Robson Lucas Soares da Silva – Universidade Federal da Paraíba

Prof. Me. Sebastião André Barbosa Junior – Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profª Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão

Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo

Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana

Profª Ma. Thatianny Jasmine Castro Martins de Carvalho – Universidade Federal do Piauí

Prof. Me. Tiago Silvio Dedoné – Colégio ECEL Positivo

Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Engenharias: metodologias e práticas de caráter multidisciplinar

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Bibliotecária: Janaina Ramos
Diagramação: Luiza Alves Batista
Correção: Emely Guarez
Edição de Arte: Luiza Alves Batista
Revisão: Os Autores
Organizadores: Henrique Ajuz Holzmann
João Dallamuta

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia: metodologias e práticas de caráter multidisciplinar / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, João Dallamuta. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2020.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-5706-560-0
DOI 10.22533/at.ed.600200511

1. Engenharia. 2. Metodologias e Práticas. I. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). II. Dallamuta, João (Organizador). III. Título.

CDD 620

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

APRESENTAÇÃO

Um dos grandes desafios enfrentados atualmente pelos engenheiros nos mais diversos ramos do conhecimento, é de saber ser multidisciplinar, aliando conceitos de diversas áreas. Hoje exige-se que os profissionais saibam transitar entres os conceitos e práticas, tendo um viés humano e técnico.

Neste sentido este livro traz capítulos ligados a teoria e prática em um caráter multidisciplinar, apresentando de maneira clara e lógica conceitos pertinentes aos profissionais das mais diversas áreas do saber.

Para isso o mesmo foi dividido em dois volumes, sendo que o volume 1 apresenta temas relacionados a área de engenharia mecânica, química e materiais, dando um viés onde se faz necessária a melhoria continua em processos, projetos e na gestão geral no setor fabril.

Já o volume 2 traz, temas correlacionados a engenharia civil e de minas, apresentando estudos sobre os solos e obtenção de minérios brutos, bem como o estudo de construções civis e suas patologias, estando diretamente ligadas ao impacto ambiental causado e ao reaproveitamento dos resíduos da construção.

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.

Aos autores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura!

Henrique Ajuz Holzmann

João Dallamuta

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA DE DOBRA DE UM VERGALHÃO PARA A MELHORIA DE UM PROCESSO DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA

Efraim Ribas Linhares Bruno
Thiago Monteiro Maquiné
Perla Alves de Oliveira
Marcia Cristina Gomes de Araújo Lima
Suelem de Jesus Pessoa

DOI 10.22533/at.ed.6002005111

CAPÍTULO 2..... 13

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO SUPERFICIAL NA MANUFATURA CNC DE MATERIAL LAMINADO EM PLACAS DE RENSHAPÉ 440

Walkiria Kohmoto Nishimurota
Marco Stipkovic Filho

DOI 10.22533/at.ed.6002005112

CAPÍTULO 3..... 23

A INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NA ANÁLISE DE DUREZA E MICRODUREZA EM AÇO AO CARBONO FUNDIDO

Ronan Geraldo Moreira

DOI 10.22533/at.ed.6002005113

CAPÍTULO 4..... 29

CONCEITOS BÁSICOS DE MICROUSINAGEM: UMA REVISÃO

Ainá Winnie Carlos Riomar
Esther Samila Santana Barbosa
Lucas Winterfeld Benini

DOI 10.22533/at.ed.6002005114

CAPÍTULO 5..... 46

ANÁLISE DE FALHA POR CORROSÃO EM REVESTIMENTO DE PRODUÇÃO DE UM CAMPO MADURO DO ESTADO DE SERGIPE

André Vieira da Silva
Wilson Linhares dos Santos
Cochiran Pereira dos Santos
Soraia Simões Sandes

DOI 10.22533/at.ed.6002005115

CAPÍTULO 6..... 59

MICRODUREZA NO PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO LINEAR DA LIGA DE LATÃO BINÁRIO C260

Lucas Freitas de Medeiros Pimentel
Monique Valentim da Silva Frees
Ariane Rebelato Silva dos Santos

DOI 10.22533/at.ed.6002005116

CAPÍTULO 7..... 67

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ALÍVIO DE TENSÃO EM COMPONENTES DE AÇO AAR M201 GRAU E RECUPERADOS POR SOLDAGEM

Natanael Pinho da Silva Alves

Ronan Geraldo Moreira

DOI 10.22533/at.ed.6002005117

CAPÍTULO 8..... 79

ESTUDO DA GERAÇÃO DE NOVOS MATERIAIS COMPÓSITOS A PARTIR DO GESSO E DO RESÍDUO DE GESSO COM ADITIVOS DESINCORPORADORES DE AR E SUPERPLASTIFICANTES

Tássila Saionara Gomes Galdino

Pâmela Bento Cipriano

Andréa de Vasconcelos Ferraz

DOI 10.22533/at.ed.6002005118

CAPÍTULO 9..... 93

DESENVOLVIMENTO DE PLACAS DE CELERON

Karla Hikari Akutagawa

Caroline da Silva Neves

Celia Kimie Matsuda

Nabi Assad Filho

DOI 10.22533/at.ed.6002005119

CAPÍTULO 10..... 99

PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CATALISADORES METÁLICOS SUPORTADOS EM ALUMINA PARA OBTENÇÃO DE BIODIESEL

Normanda Lino de Freitas

Talita Kênya Oliveira Costa

Joelda Dantas

Elvia Leal

Julyanne Rodrigues de Medeiros Pontes

Pollyana Caetano Ribeiro Fernandes

DOI 10.22533/at.ed.60020051110

CAPÍTULO 11 113

SIMULAÇÃO DE ESPECTROMETRIA DE MASSA DE ÍONS SECUNDÁRIOS

Gabriel dos Santos Onzi

Igor Alencar Vellame

DOI 10.22533/at.ed.60020051111

CAPÍTULO 12..... 117

ANÁLISE DE UM MOTOR 3 CILINDROS SOBREALIMENTADO

Bruno Barreto Irmão

Alexsander Velasco Cardoso

Gustavo Simão Rodrigues

DOI 10.22533/at.ed.60020051112

CAPÍTULO 13..... 131

PROTÓTIPO DE UMA ESTEIRA AUTOMATIZADA PARA ÂMBITO INDUSTRIAL

Mateus dos Santos Correia
Déborah da Costa Sousa Carvalho
Luiz Eduardo Borges de Lima
Elton Santos Dias Sales

DOI 10.22533/at.ed.60020051113

CAPÍTULO 14..... 134

DETERMINAÇÃO DE RITMO CARDÍACO A PARTIR DE SINAIS DE FOTOPLETISMOGRAFIA

Lucas Fernandes Alves dos Anjos
Sergio Okida

DOI 10.22533/at.ed.60020051114

CAPÍTULO 15..... 140

MODELAGEM E SIMULAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE LTNLG (COAXIAL E DE FITA) PARA GERAÇÃO DE RF UTILIZANDO O CST STUDIO

André Ferreira Teixeira
Ana Flávia Guedes Greco
José Osvaldo Rossi
Joaquim José Barroso
Fernanda Sayuri Yamasaki
Elizete Gonçalves Lopes Rangel

DOI 10.22533/at.ed.60020051115

CAPÍTULO 16..... 150

SIMULAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO NÃO LINEARES GIROMAGNÉTICAS UTILIZANDO MODELAGEM NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL

Ana Flávia Guedes Greco
André Ferreira Teixeira
José Osvaldo Rossi
Joaquim José Barroso

DOI 10.22533/at.ed.60020051116

CAPÍTULO 17..... 160

DESENVOLVIMENTO DE OBJETOS EDUCACIONAIS: ATIVIDADE PRÁTICA DE VAZÕES EM ORIFÍCIOS

Thais Esmério Pimentel
Henrique da Silva Pizzo

DOI 10.22533/at.ed.60020051117

CAPÍTULO 18..... 172

APLICAÇÃO TÉCNICAS E FERRAMENTAS DE PLANEJAMENTO, GESTÃO E CONTROLE, BASEADOS NO CONCEITO DA CONSTRUÇÃO ENXUTA

Elaine Garrido Vazquez

Renata Gonçalves Faisca

Joyce Dias da Costa

DOI 10.22533/at.ed.60020051118

CAPÍTULO 19..... 183

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E VOLUME DE ÁCIDOS NA LIXIVIAÇÃO DE CU E PB PRESENTES EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Alexandre Candido Soares

Yara Daniel Ribeiro

Sara Daniel Ribeiro

DOI 10.22533/at.ed.60020051119

CAPÍTULO 20..... 189

ANÁLISE DA SINTERIZAÇÃO E DENSIFICAÇÃO DE LIGA Nb-Ni-Fe-Si VIA SINTERIZAÇÃO POR PLASMA PULSADO (SPS)

Yara Daniel Ribeiro

Alexandre Candido Soares

Sara Daniel Ribeiro

DOI 10.22533/at.ed.60020051120

CAPÍTULO 21..... 198

ESTUDO CINÉTICO DA LIXIVIAÇÃO DE COBRE UTILIZANDO ÁCIDO NITRÍCO

Alexandre Candido Soares

Yara Daniel Ribeiro

Sara Daniel Ribeiro

DOI 10.22533/at.ed.60020051121

SOBRE OS ORGANIZADORES 209

ÍNDICE REMISSIVO..... 210

CAPÍTULO 1

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA DE DOBRA DE UM VERGALHÃO PARA A MELHORIA DE UM PROCESSO DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA

Data de aceite: 01/11/2020

Efraim Ribas Linhares Bruno

UEA – Departamento de Ciências e Engenharia dos Materiais – Manaus – AM.

Thiago Monteiro Maquiné

UEA – Departamento de Ciências e Engenharia dos Materiais – Manaus – AM.

Perla Alves de Oliveira

UEA – Departamento de Ciências e Engenharia dos Materiais – Manaus – AM

Marcia Cristina Gomes de Araújo Lima

UEA – Departamento de Ciências e Engenharia dos Materiais – Manaus – AM.

Suelem de Jesus Pessoa

UEA – Departamento de Ciências e Engenharia dos Materiais – Manaus – AM.

RESUMO: Este artigo apresenta uma melhoria no processo de dobra de um vergalhão em uma determinada empresa do ramo de ferramentaria em Manaus, onde foi identificada a necessidade de melhorar o seu processo. Foi utilizada uma metodologia descritiva, onde se observou um problema ergonômico de um colaborador, e com a finalidade de organizar o raciocínio em discussão do problema, pode-se mostrar uma análise crítica através do Diagrama de Ishikawa, conhecido também como Diagrama de peixe ou causa e efeito. Visando a flexibilidade, o custo benefício, a otimização e principalmente os

aspectos ergonômicos, houve a necessidade de se adequar a novas tecnologias no processo de conformação mecânica. Empresas do ramo estão se adequando as exigências do mercado, pois os clientes priorizam empresas que estejam qualificadas, certificadas, com embasamentos técnicos, para que haja uma confiança maior. Através do estudo de caso, desenvolveu-se uma ferramenta de dobra, a qual facilitou a fabricação do produto, abrindo-se um leque para novos projetos. Foi mostrado o desenvolvimento do projeto de fabricação da ferramenta, a elaboração dos desenhos 2D e 3D no software CAD SolidWorks, metodologias aplicadas e os resultados satisfatórios que foram essenciais para o crescimento profissional.

PALAVRAS-CHAVE: CAD, Estampagem, Vergalhão, Ishikawa.

DEVELOPMENT OF A DOUBLE TOOL OF A VERGALION FOR THE IMPROVEMENT OF A MECHANICAL CONFORMATION PROCESS

ABSTRACT: This article presents an improvement in the bending process of a rebar in a certain company of the tooling industry in Manaus, where it was identified the need to improve its process. It was used a descriptive methodology, where an ergonomic problem of a collaborator was observed, and with the purpose of organizing the reasoning in discussion of the problem, a critical analysis can be shown through the Ishikawa Diagram, also known as Diagram of fish or cause and effect. Aiming at flexibility, cost benefit, optimization and especially

the ergonomic aspects, it was necessary to adapt to new technologies in the process of mechanical conformation. Companies in the industry are adjusting to the requirements of the market, since customers prioritize companies that are qualified, certified, with technical bases, so that there is greater confidence. Through the case study, a bending tool was developed, which facilitated the manufacture of the product, opening a range for new projects. The development of the tool manufacturing project, the development of 2D and 3D drawings in Solid Works CAD software, applied methodologies and the satisfactory results that were essential for professional growth were shown.

KEYWORDS: CAD, Stamping, Rebar, Ishikawa.

1 | INTRODUÇÃO

Os setores de Metalurgia e Metal mecânicos mostram uma série de atividades que conferem riscos diferenciados à saúde e segurança do trabalhador.

Segundo dados da Previdência Social (2014), a quantidade total de acidentes de trabalho segundo setor de atividade econômica de 2011/2013, o número de acidentes registrados no setor metalúrgico foi de 10.625 em 2011, 10.300 em 2012, e 10.439 em 2013. Os custos de acidentes de trabalho afetam não só o empregado, mas a empresa, em diversas formas, como aumento dos custos de produção, máquinas e equipamentos danificados, atrasos na entrega do produto, custos com novas contratações, treinamentos desses substitutos, enfim, a empresa tem que lidar com gastos não esperados e isso faz com que a produtividade da empresa caia. (Nascimento, 2016).

Máquinas de usinagens se tornou comum na indústria de fabricação metal mecânica, e ao decorrer dos anos, muitas empresas especializadas, tem procurado adequar seus processos com melhores tecnologias, máquinas mais rápidas, eficientes, que garantam a fabricação de peças em pouco tempo, em grande quantidade e de forma automatizada.

A estampagem é um processo de conformação mecânica realizado geralmente a frio por meio de operações de corte, dobra e embutimento, nas quais chapas planas adquirem uma forma geométrica conforme o projeto.

A estampagem é um processo de conformação mecânica, sem produção de cavacos, geralmente realizado a frio, que compreende uma série de operações como a de corte, dobra e embutimento, tendo em vista uma chapa plana ser submetida a uma ou mais transformações, com a finalidade de obtermos peças com geometrias diferentes da sua forma original. (SENAI, 2011).

O enfoque principal neste estudo é mostrar a melhoria feita no processo de dobramento de um vergalhão liso, o desenvolvimento de uma ferramenta de dobra utilizando o aço SAE 1020 e o aço ferramenta ANSI O1, visto que esta é a forma utilizada para a fabricação do mesmo, os tipos de máquinas utilizadas para a fabricação da ferramenta e os tipos de prensas usadas para a conformação mecânica.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Para iniciar o projeto se fez necessário mapear todo o processo da empresa especializada em dobras de vergalhões situada na cidade de Manaus-AM. Para que isso aconteça, veremos a seguir o fluxograma do processo e a descrição de cada etapa, desde a compra da matéria prima até a entrega no cliente.

Uma das ferramentas de qualidade utilizadas para diagnóstico no processo foi o Diagrama de Ishikawa, “conhecido como Espinha de Peixe, Diagrama 6M ou Diagrama de Causa e Efeito tem o objetivo de indicar a relação entre o efeito e as causas que contribuem para a sua ocorrência”. Identificado o problema, com o desenvolvimento de um novo método, a fabricação de uma nova ferramenta de dobra, automaticamente a melhoria trará benefícios para a empresa.

Fazer um estudo ergonômico do operador da máquina, pois trata-se de uma importante ferramenta que influencia diretamente na capacidade produtiva e na saúde do trabalhador. Divide-se em três campos: o campo físico (biomecânica da tarefa), o campo cognitivo (aspectos psicológicos) e o campo ambiental (área organizacional; meio ambiente do trabalho) e está baseado na Norma NR-17.

Para confecção da ferramenta para efetuar as dobras em vergalhões, utilizou-se um Software de CAD SolidWorks para elaborar os desenhos 2D e 3D. O Software baseia-se em computação paramétrica, criando formas tridimensionais a partir de formas geométricas elementares. (Wikipedia.org, 2017).

2.1 Etapas para o desenvolvimento de um projeto de Ferramenta de Dobra

O desenvolvimento de um projeto passa por várias etapas, fase de planejamento, concepção, esboço, elaboração, aprovação da produção, do setor de qualidade e produção.

2.2 Desenho do produto

Para que seja desenvolvida a ferramenta de dobra, é necessário o desenho do produto para o embasamento técnico.

Na figura 1 mostra o vergalhão dobrado e suas dimensões para que seja calculado o desenvolvimento da Linha Neutra e o comprimento da peça dobrada.

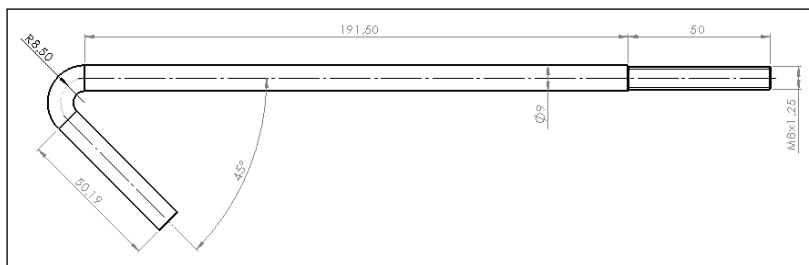


Figura 1 - Fenômenos da dobra

Fonte: (Elaborada pelos autores, 2020)

Visando a melhoria do processo de fabricação do produto, houve a necessidade de desenvolver uma ferramenta de dobra para melhorar a qualidade do processo, otimizar o tempo de produção, reduzir custos, melhorar a ergonomia de trabalho do operador, garantir a satisfação da empresa, colaborador e cliente final.

2.3 Descrição do processo a ser modificado

Para otimizar o processo e desenvolver uma ferramenta apropriada, se fez necessário um estudo completo do processo de fabricação, antes de ser efetuado a mudança. O acompanhamento deu início no momento da especificação e compra da matéria prima, que se trata de vergalhões de 3/8" x 6000 mm. O material é cortado em partes iguais que dá origem ao blank. O setor de recebimento de materiais, o recebe juntamente com a nota fiscal, e realiza uma inspeção visual e dimensional para garantir a qualidade no envio para o processo.

O Setor de recebimento envia o material para o setor de torneamento, onde é feita a rosca conforme especificado no desenho do cliente. Em seguida o operador realiza o Set-up de máquina, inserindo a pastilha inserto rosca no suporte, e fixa no magazine da máquina, depois é feito um programa na máquina para realizar o processo.

A primeira peça é levada para o controle de qualidade para realizar a inspeção visual, dimensional e o teste prático. Depois que o inspetor do controle de qualidade libera a primeira peça, o operador inicia a produção em série.

O blank é posicionado na máquina, onde começa o processo de torneamento da rosca, que dura 10 (dez) segundos. Para uma produção de 1000 peças por semana, o operador leva 02h46minh (Duas horas e quarenta e seis minutos). Durante o processo, é feito a checagem das roscas com um calibrador de rosca e uma porca, garantindo a qualidade, o dimensional e o controle do desgaste das arestas das pastilhas e encaminha o material para o setor de dobramento.

Quando o material se encontra no setor de dobramento, o operador realizará o *Set-Up*. Primeira monta o dispositivo de dobra em uma morsa, em seguida o *blank* é fixado no dispositivo, referenciando seu comprimento de dobra por meio de uma trena. A dobra é feita manualmente, onde o operador segura a barra de dobragem, e puxa até dar o ângulo de dobra desejado, mostrado na Figura 2:

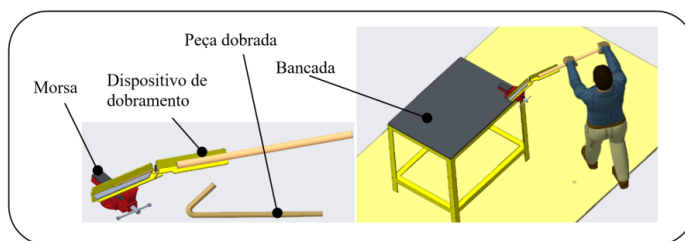


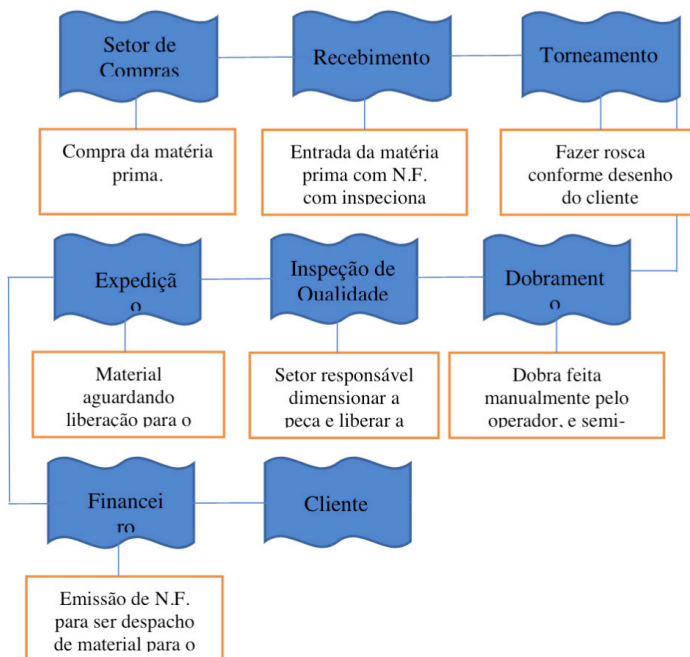
Figura 2 – Processo de dobra manual

Fonte: (Elaborada pelos autores, 2018)

Tendo confeccionado as primeiras peças, esta é levada para o controle de qualidade e conferida conforme projeto, caso seja aprovada, o processo é liberado, caso contrário, o operador volta a dobrar novas peças ajustando-as até que fique dentro do especificado. Esses ajustes, requer bastante atenção e precisão do operador.

Esse processo de dobra exige muito esforço físico, por ser manual, ergonomicamente, é um trabalho inadequado, pois o operador precisa fazer muito esforço nos braços, nas pernas, prejudicando a coluna, ocasionando dores musculares no decorrer do processo. Isso ocasiona um desgaste físico e mental, pois não é fácil garantir uma produção de 1000 peças dobradas manualmente.

Depois que o inspetor de qualidade aprovar a primeira peça, começa a produção em série. Cada peça leva em média 30s para ser dobrada. Em uma produção de 1000 peças feitas por semana, o operador leva 8 horas para dobrar. Durante o processo, são realizadas checagens dimensionais para garantir as medidas para evitar erros durante a fabricação. Após a produção das peças, o material é lubrificado, embalado, etiquetado, e enviado para a expedição aguardando a emissão da nota fiscal para ser despachado ao cliente. Para melhor compreensão o mapeamento desse processo é descrito em etapas através do Fluxograma 1.



Fluxograma 1 – Visão geral do processo de Fabricação (Autores,2020)

2.4 Diagnóstico das Debilidades Produtivas no Processo

Após o mapeamento do processo, aplicou-se o diagrama de Ishikawa para diagnosticar e analisar a causa raiz do problema, conforme Figura 3.

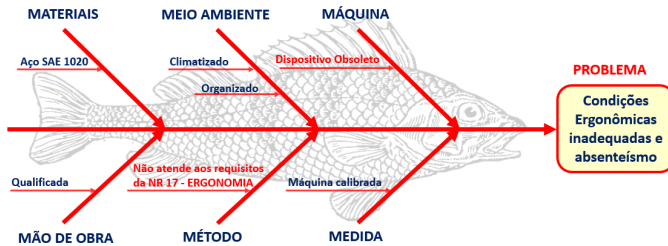


Figura 3 – Diagrama de Ishikawa

Fonte: (Elaborada pelos autores, 2020)

Através da ferramenta de qualidade aplicada na Figura 3, constatou-se que o problema se encontra no método, que não atende aos requisitos da Norma Regulamentadora (NR-17 - ERGONOMIA) e máquina, pois o dispositivo de dobra manual está ultrapassado, ocasionando possíveis riscos de acidentes, comprometendo a integridade física do colaborador.

Para a fabricação da Espiga, foi utilizado uma máquina de torneamento convencional, pastilhas para desbaste, acabamento e rosca. Na figura 4, mostra o desenho de fabricação da espiga conforme as dimensões especificadas no Quadro 1 do referencial teórico.

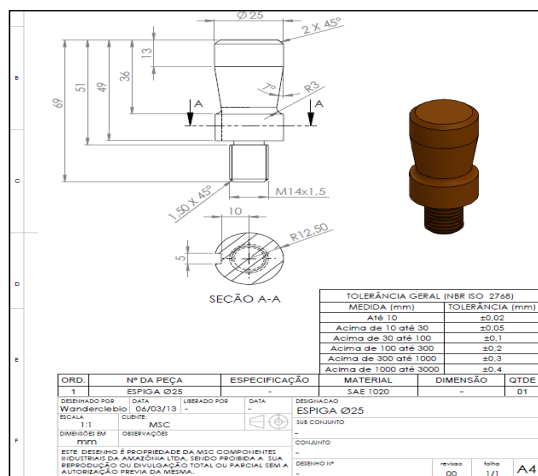


Figura 4 – Projeto da Espiga

Fonte: (Elaborada pelos autores, 2020)

Para a fabricação da Punção, da Matriz e do Bloco limitador foram utilizadas máquinas de usinagem como a fresa convencional e um centro de usinagem com quatro eixos. As Figuras 5, 6 e 7, mostram os desenhos de fabricação da punção, da matriz e do bloco limitador, acessório que compõe a matriz.

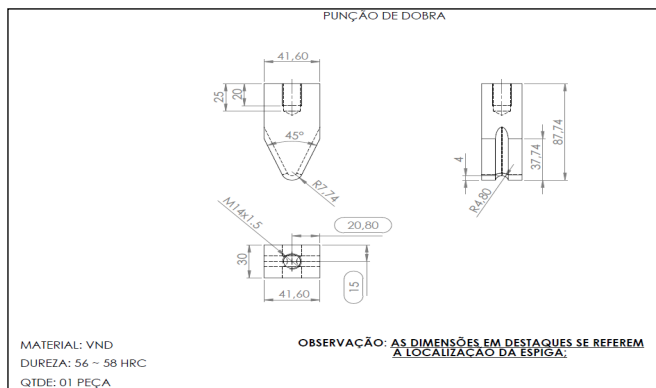


Figura 5 - Desenho de fabricação da punção

Fonte: (Elaborada pelos autores, 2020)

A punção de dobra foi projetada baseada na curvatura da peça dobrada, obedecendo as dimensões específicas no desenho, como raio, ângulo e a área necessária para execução da dobra. Conforme o projeto da espiga obedeceu-se ao padrão de rosca conforme especificado na tabela. Baseado nas especificações do fornecedor de aço VILLARES METALS, foi definido o material VND, por ser de alta resistência ao desgaste, baixa deformação e dureza elevada.

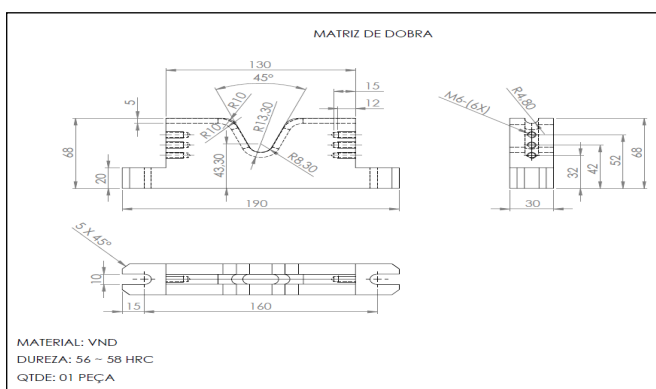


Figura 6 - Desenho de fabricação da matriz

Fonte: (Elaborada pelos autores, 2018)

A Matriz de dobra foi projetada não diferente da punção, foi baseada na curvatura da peça dobrada, obedecendo às dimensões específicas no desenho, porém foi necessário limitar o comprimento do vergalhão a ser dobrado, com sistema de regulação para facilitar o ajuste. A matriz possui uma região de apoio e uma região curva acrescidos de raios que facilitam a conformação do vergalhão. Obedeceu-se ao padrão de rosca conforme especificado na norma ABNT NBR 9527 Rosca métrica ISO. Baseado nas especificações do fornecedor de aço VILLARES METALS, foi definido o material VND, por ser de alta resistência ao desgaste, baixa deformação e dureza elevada.

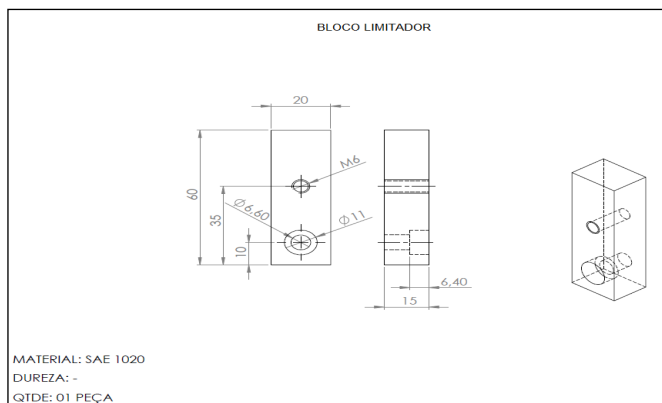


Figura 7 - Desenho de fabricação do Bloco limitador

Fonte: (Elaborada pelos autores, 2020)

O bloco limitador foi desenvolvido para limitar o comprimento do vergalhão a ser dobrado, com o auxílio de um parafuso, é possível fazer o ajuste necessário para que se consiga atingir as medidas necessárias para a dobra. Na sua funcionalidade, não exige esforço, e a partir desta análise, foi definido um material mais dúctil SAE 1020.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a fabricação da ferramenta de dobra, são realizados os primeiros testes para assegurar todas as etapas do desenvolvimento, onde o operador da prensa excêntrica realiza um novo *Set-Up* da peça a ser produzida. A ferramenta de dobra será montada na prensa excêntrica que é composta pela Espiga, Punção, Matriz e o Bloco limitador, fixando-a com parafusos, porcas e arruelas, que são os acessórios de fixação, conforme visto na Figura 8.



Figura 8: Prensa Excêntrica, após a melhoria

Fonte: (Foto tirada pelos autores, 2020)

Depois de montada a ferramenta de dobra, o operador produz as primeiras peças, conforme é mostrado na Figura 9.

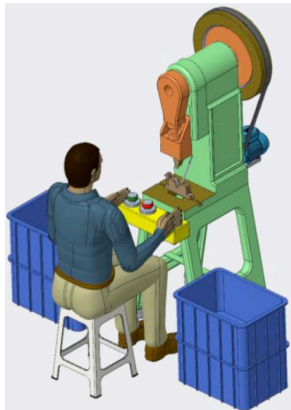


Figura 14: Processo de produção atual

Fonte: (Elaborada pelos autores, 2020)

A peça dobrada é levada para o controle de qualidade para realizar as medições conforme o desenho do cliente. Após o inspetor de qualidade aprovar as primeiras peças, começa a produção do primeiro lote piloto. Cada peça leva em média 7,2s para ser dobrada. Em uma produção de 1000 peças, o operador leva 2 horas para dobrar. Durante o processo, são realizadas checagens dimensionais para garantir as medidas e evitar erros de fabricação.

Fazendo um comparativo do processo de fabricação manual com o semiautomática, pode-se observar que no processo manual se produzia 1000 peças em 8 horas de trabalho, onde existiam várias paradas durante a produção das peças, por motivo de cansaço físico, posições de dobramento irregular, fora dos padrões ergonômicos (NR-17), o operador no dia seguinte faltava trabalho por se sentir cansado. Já no processo atual, se produz 1000 peças em duas horas, onde o operador apenas ficará sentado, acionando botões, conforme mostrado na Figura 8, garantindo uma postura ergonômica adequada e não havendo a necessidade de fazer paradas de linha.

Com a implementação do setor de dobras, houve um aumento de 416% na fabricação das peças, onde isso gerou maior lucratividade, redução de custos, otimização de tempo, qualidade na prestação de serviços, satisfação de todas as pessoas envolvidas desde o operador de máquina até a gerencia, incluindo o cliente final.

Antes se produzia menos em mais tempo, e hoje se produz mais em menos tempo. No gráfico 1, é possível visualizar a diferença do antes e depois.

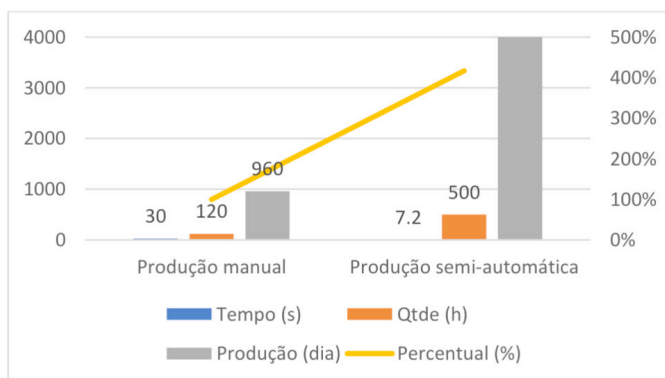


Gráfico 1 – Comparativo da produção antes e depois da melhoria

Fonte: (Elaborada pelos autores, 2020)

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A eficiência de uma ferramenta certamente depende de um bom projeto e de um bom projetista que faça a escolha correta dos materiais empregados na sua confecção, sem esquecer o designer e dos tratamentos dados aos seus elementos com um custo adequado para o mercado. Baseado nesses itens tem-se a certeza que os envolvidos em todas as etapas do projeto, tiveram a oportunidade de melhorar o processo de conformação mecânica, dobra de vergalhões, que outrora a empresa praticava de maneira manual, e após o projeto, a produção com a aplicação das melhorias, de forma semiautomática, impactando ergonomicamente todos os funcionários envolvidos no processo de dobra.

Os resultados obtidos foram totalmente satisfatórios onde se pode proporcionar conforto, segurança e desempenho eficiente para o trabalhador.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6022*: informação e documentação: artigo em publicação periódica científica impressa: apresentação. Rio de Janeiro, 2003a. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6023*: informação e documentação: elaboração: referências. Rio de Janeiro, 2002a. 24 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6024*: Informação e documentação: numeração progressiva das seções de um documento. Rio de Janeiro, 2003c, 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6028*: resumos. Rio de Janeiro, 2003b. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10520*: informação e documentação: citação em documentos. Rio de Janeiro, 2002b. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14724*: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro, 2011. 11 p.

ABNT NBR ISO 9001, de 2008 – Gestão de Qualidade. Disponível em: <<http://gestao-de-qualidade.info/iso-9001.html>>. Acesso em: 20 dez. 2017.

CONFORMAÇÃO PLÁSTICA DOS METAIS. Coord. ver. E. Bresciani Filho; pesq. Atual. I.B. Silva; transc. Dig. G.F. Batalha; ver. ed. Dig. S.T. Button. 1 ed. Dig. São Paulo: EPUSP, 2011.

ESCOLA SENAI ROBERTO SIMONSEN. Projeto de ferramentas. SP, 2006. 189p.

FRANÇA, Júnia Lessa et al. *Manual para normalização de publicações técnico-científicas*. 6. ed. rev. e ampl. Belo Horizonte: UFMG, 2003. 230 p.

FLEURY & FLEURY. *Estratégias empresariais e formação de competências*: um quebra-cabeça caleidoscópico da indústria brasileira. São Paulo: Atlas, 2001.

FREES, Monique Valentim da Silva. Avaliações sobre o processo de dobramento do aço NBR 6656 LNE 380. Porto Alegre, 2017. 100p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Normas de apresentação tabular*. 3.ed. Rio de Janeiro, 1993.

NASCIMENTO, Joyce Kellen de Machado. Riscos ambientais causadores de acidentes de trabalho no setor produtivo de metalúrgicas em Presidente Médici. Cacoal/RO, 2016. 46p.

PROJETO DE FERRAMENTAS PARA CONFORMAÇÃO DE CHAPAS. Prof. Marcondes, Paulo. DEMEC/UFPR. PR, Fevereiro/2008.

RELATÓRIO final de projetos de pesquisa: modelo de apresentação de artigo científico. Disponível em: <>. Acesso em: 03 dez. 2003.

ROCHA, Otávio Fernandes Lima da. Conformação mecânica. Belém: IFPA; Santa Maria: UFSM, 2012. 68p.

SENAI- DR BA. Ferramentaria: corte, dobra e repuxo de metais. Salvador, 2006. 117p.

TECNOLOGIA DE ESTAMPAGEM 2: dobra e repuxo. Prof. Eng. Junior, Ivar Benazzi; Prof. Caversan, Elpidio Gilson. Fatec – So. SP, 2012.

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO SUPERFICIAL NA MANUFATURA CNC DE MATERIAL LAMINADO EM PLACAS DE RENSHAPE 440

Data de aceite: 01/11/2020

Data de submissão: 05/08/2020

Walkiria Kohmoto Nishimurota

Universidade Presbiteriana Mackenzie, Escola
de Engenharia Mackenzie
São Paulo – SP
<http://lattes.cnpq.br/6975012510039736>

Marco Stipkovic Filho

Universidade Presbiteriana Mackenzie, Escola
de Engenharia Mackenzie
São Paulo – SP
<http://lattes.cnpq.br/9316920224105682>

RESUMO: Este artigo propõe estudar o comportamento superficial na manufatura CNC do Renshape 440, um material não muito utilizado, sendo ele, uma resina de poliuretano com propriedades mecânicas que permitem obter modelagens rápidas e acabamentos superficiais de qualidade. Experimentalmente, será realizada em laboratório de usinagem a fabricação de amostras de peças com o material, para posteriormente ser analisadas individualmente com o auxílio do ensaio de rugosidade que determinará a qualidade que cada parâmetro de corte fornecerá ao material. Estes parâmetros possibilitarão ao usuário do material obter resultados positivos, sem a necessidade prévia de realizar tentativas de ajustes das máquinas para alcançar o seu objetivo próprio, sendo somente necessário verificar quais parâmetros mais se adequam a suas necessidades, otimizando o tempo de execução em um projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Renshape, Parâmetros de corte, Manufatura CNC, Comportamento Superficial.

ANALYSIS OF SURFACE BEHAVIOR IN THE CNC MANUFACTURING OF LAMINATED MATERIAL ON RENSHAPE 440 PLATES

ABSTRACT: This article proposes to study the surface behavior in the CNC manufacture of the Renshape 440, a material that is not widely used, being it, a polyurethane resin with mechanical properties that allow to obtain fast modeling and quality surface finishes. Experimentally, samples of parts with the material will be carried out in the machining laboratory, to subsequently be individually analyzed with the aid of the roughness test that will determine the quality that each cutting parameter provides to the material. These parameters will allow the user of the material to obtain positive results, without the prior need to make attempts to adjust the machines to achieve their own objective, it being only necessary to check which parameters best fit their needs, and thus optimize the time in the execution project.

KEYWORDS: Renshape, Cutting Parameters, Manufacturing CNC, Surface Behavior.

1 | INTRODUÇÃO

O Renshape 440[®] também conhecido como “Cibatool”, é um material composto de poliuretano normalmente misturado de forma aleatória em uma matriz epóxi, que fornece características físicas e mecânicas,

apresentadas na tabela 1, que permitem que o material possua maleabilidade e performance de acabamento em diversas aplicações feitas em máquinas CNC.

Material	Cor	Densidade	Tensão última a tração	Módulo de elasticidade
Renshape 440®	Marrom Avermelhado	0,55 g/cm ³	1300 psi	10500 psi

Tabela 1: Propriedades Físicas e Mecânicas da Resina

Fonte: (SOUZA, 2010, p.2)

Devido à escassez de materiais de estudo sobre esta resina, verificou-se a possibilidade de estudo do comportamento superficial do material, quando manufaturado, para incentivar engenheiros e projetistas a substituírem a madeira em seus projetos.

O trabalho foi realizado em formato experimental, com a base de dados relacionada aos ensaios de rugosidade, que permitiu avaliar o acabamento superficial de acordo com os parâmetros de corte estabelecidos previamente, tendo em vista o ganho de tempo para o usuário.

2 | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No desenvolvimento deste trabalho foram utilizados recursos existentes dentro dos laboratórios de usinagem da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como, por exemplo, as máquinas CNC e os equipamentos de ensaio de rugosidade, não sendo necessária a utilização de outros recursos, tornando o início do experimento mais ágil.

As amostras foram confeccionadas, inicialmente, a partir de placas de Renshape 440 e usinadas em formato de blanks (peças padrão inacabadas) cilíndricos simples.

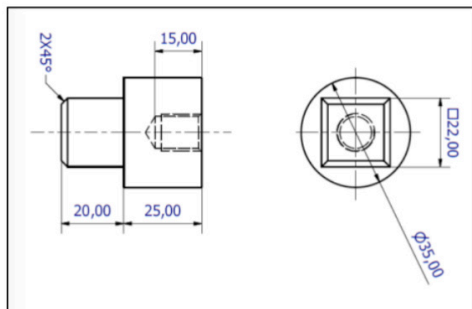
Para o maquinário CNC foi utilizado o torno mecânico Centur 30D e o centro de usinagem Romi D600. E para a formatação dos corpos de prova do projeto, foram gerados parâmetros de rotação, avanço e profundidade com programações em código G padrão para o maquinário CNC.

Para análise numérica do comportamento superficial dos corpos de prova, após serem usinados, utilizou-se do método de ensaio de rugosidade com o medidor de rugosidade Mitutoyo SJ-210.

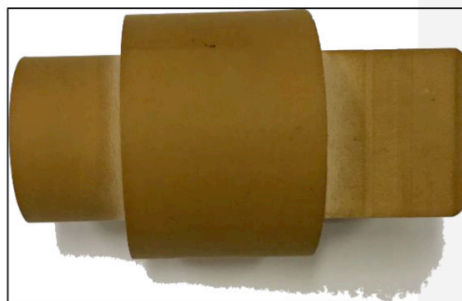
Todas essas fases do processo serão mostradas no decorrer do trabalho, para melhor compreensão.

2.1 Formatação das peças

A partir da placa de Renshape 440, que possuía medidas de fabricação de (2'x20'x60') mm, foram confeccionados blanks (peças padrão inacabadas) cilíndricos simples com medidas equivalentes a (Φ 46,5 x 62,5) mm. E para a formatação dos corpos de prova do projeto, as peças foram manufaturado em CNC utilizando medidas de Φ 40 x 42 x 62,5, com uma rosca M12X15 em uma das faces para fixação como mostrado na figura 2.1.1 desenhada em CAD



(a)



(b)

Figura 2.1.1: Croqui em CAD do Corpo de prova (a) e seu formato físico usinado (b)

Fonte: Acervo pessoal

2.2 Programação do torno e da fresadora CNC

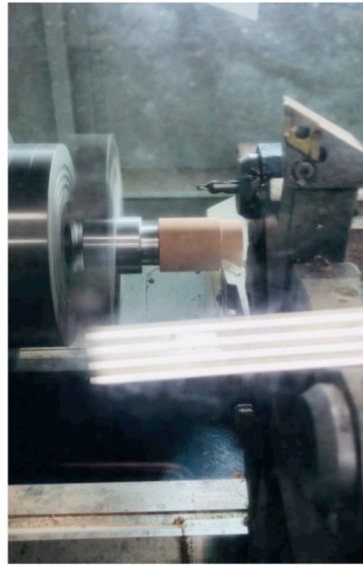
Foi executada uma programação em código G padrão para o Torno ROMI Centur 30D, que poderá ser vista como exemplo na figura 2.2.1(a), e também para fresadora ROMI D600, localizada ao lado na figura 2.2.2(a), onde as variações se encontram nos parâmetros de rotação, avanço e profundidade.

Os códigos demonstrados servem como referência explicativa sobre como foram utilizadas as máquinas CNC para manufaturar as peças de Renshape 440. Salienta-se que esta programação somente é utilizada para a formatação da figura 2.1.1 em específico.

TORNO

```
G291
G21 g40 g90 g95
G54 g00 x100 z100
T0301
G97 "rpm variado" m03
G00 x40 z2
G01 z-30 f0.3
G00 x41
G00 z2
G00 X36
g01 z-30 f"avanço"
g00 x40
g00 x100 z100
m30
```

(a)



(b)

Figura 2.2.1: Código G padrão (a) e Torno CNC em funcionamento experimental (b)

Fonte: Acervo Pessoal

Para o torno, desenvolveu-se a programação em código G padrão, com possibilidade de variação na rotação e no avanço, que poderão ser substituídos nos espaços indicados "rpm variado" e "avanço" do código.

Os conjuntos de variações poderão ser escolhidos na tabela 2.3.1 de acordo com a necessidade, visto que a escolha dos parâmetros também deverá ser influenciada pelos resultados numéricos da tabela 2.7.1, que indicam os ensaios de rugosidade de acordo com os parâmetros de corte.

A indicação, em vermelho no programa, mostra a diferença de 40 para 36 que nos dará um resultado no qual deverá ser dividido por 2 para obter a profundidade de corte do projeto.

FRESADORA

```
G17 G71 G90 G94
T02
M06
G54
G00 X-15 Y-15 Z5
G01 Z-20 F "avanço"
G01 X-10
S "rpm variado" M03
G41
G01 Y10
G01 X10
G01 Y-10
G01 X-20
G00 Z120
M30
```



(a)

(b)

Figura 2.2.2: Código G da fresadora (a) e sua execução durante o estudo (b).

Fonte: Acervo Pessoal

O código G padrão para fresadora também possui modificações em seus parâmetros de rotação e avanço, que deverão ser substituídos nos espaços "rpm variado" e "avanço" da mesma forma que as indicações do código G do torno CNC.

2.3 Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte da tabela 2.3.1 foram confeccionados de acordo com Souza (2010), que iniciou os estudos de caracterização da resina, mediante experimentos de usinagem. Porém, neste experimento, foi necessário criar mais conjuntos de parâmetros de corte para obter uma quantidade de amostras que fossem possíveis serem analisadas quantitativamente e qualitativamente.

Para isto, estabeleceu-se para o experimento 54 peças amostrais usinadas, de forma a obter variadas combinações de parâmetros para se verificar os melhores resultados de acabamentos superficiais do material, utilizando as máquinas CNC.

NP	ID	rpm	Av.[m m / v]	Prof. [m m]	Fres. rpm	Fres. Av.
1A	A111	1000	0.2	1.0	3000	100
	A112	1000	0.2	2.0	3000	200
	A113	1000	0.2	4.0	3000	300
2A	A121	1000	0.6	1.0	3000	400
	A122	1000	0.6	2.0	3000	500
	A123	1000	0.6	4.0	3000	600
3A	A132	1000	1.0	1.0	3000	700
	A132	1000	1.0	2.0	3000	800
	A133	1000	1.0	4.0	3000	900
4A	A211	2000	0.3	1.5	2000	100
	A212	2000	0.3	3.0	2000	200
	A213	2000	0.3	4.5	2000	300
5A	A221	2000	0.8	1.5	2000	400
	A222	2000	0.8	3.0	2000	500
	A223	2000	0.8	4.5	2000	600
6A	A231	2000	1.6	1.5	2000	700
	A232	2000	1.6	3.0	2000	800
	A233	2000	1.6	4.5	2000	900
7A	A311	2500	0.2	1.0	5000	100
	A312	2500	0.2	2.0	5000	200
	A313	2500	0.2	4.0	5000	300
8A	A321	2500	0.6	1.0	5000	400
	A322	2500	0.6	2.0	5000	500
	A323	2500	0.6	4.0	5000	600
9A	A331	2500	1.0	1.0	5000	700
	A332	2500	1.0	2.0	5000	800
	A333	2500	1.0	4.0	5000	900
10A	A411	3000	0.3	1.5	4000	100
	A412	3000	0.3	3.0	4000	200
	A413	3000	0.3	4.5	4000	300
11A	A421	3000	0.8	1.5	4000	400
	A422	3000	0.8	3.0	4000	500
	A423	3000	0.8	4.5	4000	600
12A	A431	3000	1.6	1.5	4000	700
	A432	3000	1.6	3.0	4000	800
	A433	3000	1.6	4.5	4000	900
13A	A511	3500	0.2	1.0	7000	100
	A512	3500	0.2	2.0	7000	200
	A513	3500	0.2	4.0	7000	300

14A	A521	3500	0.6	1.0	7000	400
	A522	3500	0.6	2.0	7000	500
	A523	3500	0.6	4.0	7000	600
15A	A531	3500	1.0	1.0	7000	700
	A532	3500	1.0	2.0	7000	800
	A533	3500	1.0	4.0	7000	900
16A	A611	4000	0.3	1.5	6000	100
	A612	4000	0.3	3.0	6000	200
	A613	4000	0.3	4.5	6000	300
17A	A621	4000	0.8	1.5	6000	400
	A622	4000	0.8	3.0	6000	500
	A623	4000	0.8	4.5	6000	600
18A	A631	4000	1.6	1.5	6000	700
	A632	4000	1.6	3.0	6000	800
	A633	4000	1.6	4.5	6000	900

Tabela 2.3.1: Conjuntos de parâmetros de corte da matéria-prima na mesma direção das fibras

Fonte: (SOUZA, 2010, p.2)

2.4 Medições de rugosidade

O ensaio de rugosidade foi realizado com um rugosímetro Mitutoyo SJ-210, que é mostrado na figura 2.6.1, devidamente calibrado e auxiliado por um aparato de medição, como um bloco em V para proporcionar maior estabilidade aos corpos de prova ensaiados.



Figura 2.6.1: Rugosímetro Mitutoyo SJ-210

Fonte: Acervo Pessoal

A coleta de dados do rugosímetro foi obtida em R_a [μm] e R_z [μm] que mensuram o acabamento superficial da peça em micrômetro (CAMARGO, 2002).

2.5 Resultados observados

Em vista das características superficiais dos corpos de prova analisados com o rugosímetro, após o processo de manufatura CNC do material, constataram-se variações de resultados, dependendo da forma em que se encaixava o corpo de prova no suporte, na seção de ensaios de rugosidade.

Então, foram adotados cuidados para erradicar qualquer forma de erro, visto que informações técnicas devem ser coerentes para obtenção de escolhas de parâmetros confiáveis.

Neste caso, por se tratar de um estudo experimental que possui escassez de material, não foi possível realizar uma análise comparativa com relação a outros dados. Somente verificou-se o comportamento superficial do material em função dos conjuntos de parâmetros relacionados a cada processo.

2.6 Características finais dos corpos-de-prova ensaiados

A análise do comportamento superficial do material em função dos conjuntos de parâmetros foi realizada qualitativamente, criando-se um conjunto comparativo visual, para que se tornasse possível realizar escolhas rápidas dos parâmetros ideais, de acordo com as necessidades do projetista.

A figura 2.6.1 apresenta as imagens dos corpos de prova ampliados, e a classificação visual estabelecida, com a seguinte ordem:

- **A**- Acabamento superficial excelente;
- **B**- Acabamento superficial aceitável;
- **C**- Acabamento superficial ruim

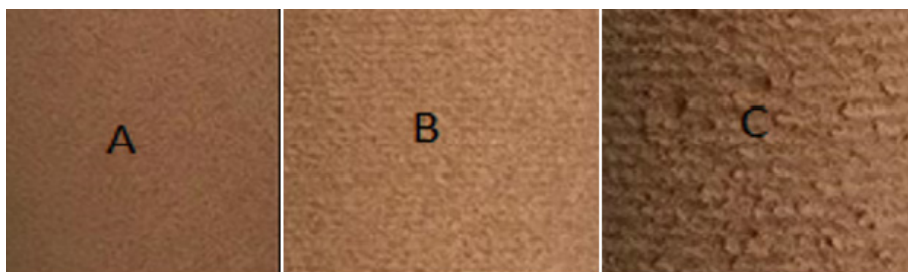


Figura 2.6.1: Análise do comportamento superficial dos corpos de prova usinados com aumento fotográfico

Fonte: Acervo Pessoal

2.7 Resultados dos ensaios de rugosidade

Foram coletadas três amostras para cada corpo de prova, juntamente com os parâmetros indicados para análise qualitativa, como indicadas na tabela 2.7.1, para aumentar a precisão dos dados e diminuir os possíveis erros.

N.P	ID	Teste 1 Ra (µm)	Teste 2 Ra (µm)	Teste 3 Ra (µm)	Ra médio (µm)	Teste 1 Rz (µm)	Teste 2 Rz (µm)	Teste 3 Rz (µm)	Rz médio (µm)	Classe
1A	A111	5,498	5,745	5,863	5,702	24,045	30,482	29,523	28,016	A
	A112	5,863	6,117	7,39	6,456	29,523	30,211	34,508	31,414	A
	A113	6,179	5,923	5,577	5,893	28,746	27,215	28,622	28,194	B
2A	A121	7,386	5,097	6,534	6,339	36,378	23,669	26,947	28,998	B
	A122	5,971	6,458	6,182	6,203	25,417	31,705	27,371	28,164	C
	A123	6,721	6,644	6,68	6,681	28,375	31,906	31,132	30,471	C
3A	A131	6,732	5,319	5,263	6,681	28,906	25,101	31,452	28,486	A
	A132	6,5	3,102	7,123	5,575	28,355	14,544	31,702	24,867	A
	A133	4,451	4,567	4,537	4,518	24,202	21,084	22,136	22,474	A
4A	A211	0	0	0	0	0	0	0	0	C
	A212	7,244	4,457	7,741	6,48	31,105	24,88	33,553	29,846	B
	A213	7,085	5,955	5,736	6,258	45,072	26,873	26,25	32,731	B
5A	A221	4,663	6,835	7,227	6,241	19,625	33,582	32,667	28,624	A
	A222	6,326	6,109	4,973	5,803	26,493	27,235	24,999	26,242	B
	A223	0	0	0	0	0	0	0	0	C
6A	A231	6,128	5,008	6,146	5,76	32,299	24,283	31,073	29,218	A
	A232	0	0	0	0	0	0	0	0	C
	A233	5,123	5,305	6,332	5,586	24,349	24,418	28,36	25,709	C
7A	A311	6,207	0	4,759	3,655	26,472	0	23,174	16,548	C
	A312	6,13	6,064	5,238	5,81	32,715	30,625	25,307	28,425	B
	A313	5,63	6,351	5,239	5,74	29,175	28,412	24,15	27,245	B
8A	A321	5,136	6,724	1,374	4,411	25,538	37,953	37,935	33,808	B
	A322	5,655	6,701	5,53	5,962	32,249	30,833	27,318	30,133	A
	A323	6,059	6,235	6,015	6,103	27,424	28,042	26,944	27,47	B
9A	A331	5,734	6,129	8,051	6,638	27,27	26,063	38,887	30,74	A
	A332	5,918	5,639	5,887	5,815	22,954	25,384	29,346	25,894	A
	A333	5,759	5,097	5,105	5,32	26,123	23,016	27,081	25,406	A
10A	A411	6,019	6,422	6,998	6,479	25,749	26,201	36,586	29,512	B
	A412	5,258	5,503	4,744	5,168	22,905	25,662	23,203	23,923	A
	A413	5,2	5,441	6,133	5,591	25,962	24,97	27,243	26,058	B
11A	A421	0	0	0	0	0	0	0	0	C
	A422	6,561	5,285	7,577	6,474	27,629	24,104	40,562	30,765	B
	A423	6,476	5,097	5,511	5,694	31,631	21,729	27,292	26,884	A
12A	A431	0	0	0	0	0	0	0	0	C
	A432	6,547	4,68	7,054	6,093	30,63	20,207	33,81	28,215	A
	A433	0	0	0	0	0	0	0	0	C
13A	A511	5,361	5,662	5,868	5,63	23,5	23,556	25,95	24,335	A
	A512	3,834	5,439	5,41	4,894	19,568	25,769	28,604	24,647	A
	A513	4,937	5,733	6,435	5,701	22,76	25,992	28,299	25,609	A
14A	A521	7,353	6,743	7,175	7,09	30,761	29,456	31,812	30,676	B
	A522	5,316	5,543	6,825	5,894	24,254	23,553	31,046	26,284	B
	A523	5,962	4,033	5,911	5,302	26,551	21,283	28,303	25,379	B
15A	A531	0	6,322	5,892	4,071	0	28,483	27,439	18,64	C
	A532	0	0	7,393	2,464	0	0	30,223	10,074	C
	A533	8,9	8,713	0	5,871	35,556	36,564	0	24,04	C
16A	A611	5	8,556	5,771	6,494	21,033	40,213	27,059	29,435	A
	A612	0	0	0	0	0	0	0	0	C
	A613	6,49	5,651	5,987	6,042	27,97	28,464	28,54	28,324	B
17A	A621	7,471	5,743	6,463	6,559	33,558	27,177	28,744	29,826	A
	A622	0	4,522	6,332	3,618	0	20,559	27,426	15,995	B
	A623	5,495	5,141	5,41	5,348	26,3	23,563	23,784	24,549	A
18A	A631	7,321	7,064	5,109	6,498	38,906	29,308	23,923	30,712	B
	A632	0	0	0	0	0	0	0	0	C
	A633	0	0	0	0	0	0	0	0	C

Tabela 2.7.1: Dados coletados do ensaio de rugosidade por peça usinada

Fonte: Acervo Pessoal.

3 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise do comportamento superficial do Renshape 440 forneceu conhecimento necessário para afirmar que o mesmo pode ser definido como um ótimo material para se trabalhar com qualquer tipo de modelagem.

Para se obter os melhores resultados de acabamentos superficiais visualmente ideais, é necessário utilizar os parâmetros de corte entre baixas e médias rotações juntamente com parâmetros de avanço e profundidade.

No caso da não utilização desses parâmetros ideais, constatou-se que o material obtém um resultado predominantemente ruim. Tecnicamente, é possível fazer essa análise na tabela 2.9.1, onde se encontram dados de coleta que demonstram o número “zero” em uma linha toda. Isso significa que não houve leitura pelo aparelho de medição, definindo a peça como superficialmente ruim.

Constatou-se que a utilização de escolhas adequadas de parâmetros de usinagem retifica possíveis erros dimensionais quando utilizados em programas CNC, tornando o material superficialmente mais adequado quando analisado nas perspectivas do comportamento superficial (POLLI, 2007).

Futuramente, espera-se que haja novos estudos para esse material utilizando máquinas CNC, pois existe uma escassez de conteúdo para verificação e comparação de dados. No entanto, acredita-se que esse material venha a ser um candidato ecologicamente viável para a substituição da madeira nos processos de fabricação de modelos.

Por existir esse propósito no mercado de modelos, esse artigo poderá ser efetivamente um estímulo para o uso do Renshape 440, visto que o comportamento superficial dele pode ser extremamente eficaz.

REFERÊNCIAS

CAMARGO, R. de. **Rugosidade superficial nas operações de torneamento**. SENAI. Departamento Regional de São Paulo. 2002.

FREEMAN MANUFACTURING & SUPPLY CO. **Renshape Modeling and Styling Boards**. Disponível em : < <https://www.freemansupply.com/tables/renshapemodeling.pdf>>. Acesso em: 24.fev.2017

POLLI, L.M. et al. **Influência dos Parâmetros de Corte Sobre os Erros Dimensionais no Fresamento de Material Polimérico para Moldes-Protótipo**. In: COBEF, n. IV,2007. Estância de São Pedro: ABCM, 2007

SOUZA J. F., V. Caracterização da Resina Renshape 440 do ponto de vista da usinagem e das propriedades mecânicas. In: COMEM, n. VI, 2010, Campina Grande. **VI Congresso nacional de engenharia mecânica**, Campina Grande: ABCM, 2010.

A INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NA ANÁLISE DE DUREZA E MICRODUREZA EM AÇO AO CARBONO FUNDIDO

Data de aceite: 01/11/2020

Data de submissão: 04/09/2020

Ronan Geraldo Moreira

IFMA – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Maranhão. Departamento de Engenharia de Materiais São Luís – MA.
<http://lattes.cnpq.br/4654253345929441>

RESUMO: A análise de dureza em aços requer alguns cuidados, seja pelo método laboratorial ou portátil, os quais nem sempre são observados pelos profissionais envolvidos, o que pode provocar perdas financeiras, de tempo e ainda gerar conflitos entre fabricante e comprador de peças mecânicas devido aos erros impostos nas medições pela não observância destes cuidados. O presente artigo avaliou a influência da rugosidade superficial na medição de dureza, laboratorial e portátil, em um aço ao carbono fundido, normalizado, de maneira que os valores obtidos sofreram considerável influência nos resultados, sendo considerado na análise a utilização de três padrões de rugosidade, 80, 220 e 2000 mesh.

PALAVRAS-CHAVE: Aços, medição, dureza, rugosidade superficial.

THE INFLUENCE OF SURFACE RUGOSITY IN THE ANALYSIS OF HARDNESS AND MICROHARDNESS IN CAST CARBON STEEL

ABSTRACT: The hardness analysis in steels requires some care, either by laboratory or portable method, which are not always observed by the professionals involved, which can cause financial losses, time and still generate conflicts between manufacturer and purchaser of mechanical parts due to errors entered in measurements for failure to observe these precautions. The present article evaluated the influence of surface roughness on the measurement of hardness, laboratory and portable, in a normalized cast carbon steel, so that the values obtained had a considerable influence on the results, considering in the analysis the use of three roughness standards, 80, 220 and 2000 mesh.

KEYWORDS: Steels, measurement, hardness, Surface roughness.

1 | INTRODUÇÃO

Toda análise para fins de verificação de conformidade técnica requer alguns cuidados para a obtenção de respostas confiáveis, como por exemplo na medição de dureza, cuja preparação superficial interfere diretamente nos resultados e está ligada ao valor da carga de teste utilizada (CIMM, 2017). A preparação superficial é associada ao grau de rugosidade do material, que pode ser definido como sendo um conjunto de desvios de ordem geométrica

ligados às reentrâncias e saliências que acometem superficialmente o material (Filho, 2011).

A análise de dureza se torna especial quando envolve uma relação comercial associada a aspectos técnicos que podem inviabilizar a utilização de um lote de peças, como por exemplo na inspeção onde se deve verificar a dureza Vickers superficial de um lote de peças. Sabe-se que o ensaio de dureza Vickers é baseado em norma, tal como a ASTM E92, que preconiza uma rugosidade superficial mínima para o bloco padrão de teste de rugosímetro da ordem de $0,1 \mu\text{m}$ (ASTM E92, 1992).

Um método alternativo utilizado para mensuração de dureza em aços ocorre pela técnica de dureza portátil, visando maior versatilidade e produtividade. No entanto a medição deve ser realizada conforme parâmetros mínimos de rugosidade superficial, tal como preconizado pelo padrão de dureza *Leeb ASTM A 956*, que determina uma rugosidade superficial máxima na região do ensaio de $2 \mu\text{m}$ (ASTM A956, 2002).

O presente trabalho visou analisar os efeitos da rugosidade superficial na medição de dureza em um aço ao carbono no estado normalizado, considerando três condições de rugosidade superficial, 80, 220 e 1200 mesh, com a utilização dos métodos de microdureza *Vickers, HV*, padrão *ASTM E92*, e dureza portátil, na escala *Leeb, HL*, padrão *ASTM A956*, com conversão para *Brinell, HBW* (esfera de carbeto de tungstênio), conforme padrão *ASTM E140*.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Na análise foram utilizadas três amostras (AM) confeccionadas em aço ao carbono fundido do tipo *AAR, MSRP-S, specification M201, grade C*, cuja dureza varia entre 179 e 241 HBW. As amostras foram preparadas por embutimento em baquelite, conforme Figura 1, sendo lixadas em lixadeira de bancada. A amostra AM 01 foi preparada com lixa de granulometria final de 80 mesh, a AM 02 com 220 mesh (80mesh+ 220 mesh) e a AM 03 com 2000mesh (80, 220, 400, 600 e 2000 mesh). A amostra AM 03 passou por um polimento com pasta em alumina 1,0 micron. As lixas utilizadas seguem o padrão americano *CAMI*.

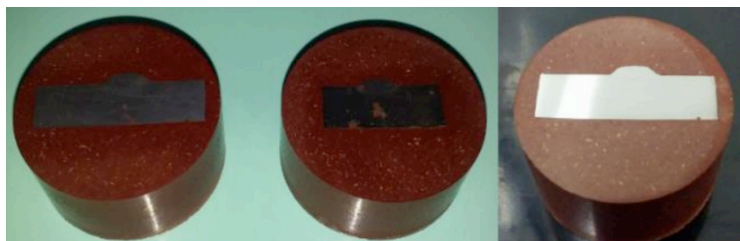


Figura 1 - Amostras AM 01, AM 02 e AM 03 embutidas.

Fonte: Autor.

No teste de dureza Vickers foi utilizado um microdurômetro do tipo *HMV, Shimadzu*, carga de 490,3 mN aplicada por 15 segundos. As amostras foram niveladas na horizontal, sendo realizados três testes para cada resultado na média, seguindo o padrão *ASTM E92*.

No teste de dureza portátil foi utilizado um durômetro portátil *Hardmatic, HH-411*, série *810*, com esfera de 3,0 mm, método *Leeb*. A dureza foi coletada em condições similares ao método anterior e convertida para a escala *Brinell (HBW)* conforme padrão.

O teste de rugosidade foi realizado conforme padrão *ISO 1997* com um rugosímetro *Surftest Mitutoyo*, do tipo *SJ-310*.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes *Vickers* foram realizados nas três amostras e os resultados podem ser visualizados pela Tabela 1. Observa-se que houve uma considerável alteração na média da microdureza entre as amostras AM 01, AM 02 e AM 03 quando a rugosidade situou-se em valor acima de 0,47 μm , corroborada pelo elevado desvio padrão. Isto ocorreu devido a baixa retilinearidade presente no perfil da superfície da amostra AM 01.

Conforme resultados de microdureza apresentados pela amostra AM 01, com rugosidade $R_a = 0,61$, percebe-se que os resultados entre ensaios apresentaram enorme variação, o que elevou o desvio padrão, tornando os resultados pouco confiáveis. Isto ocorreu devido a baixa retilinearidade microscópica da superfície.

As amostras AM 02 e AM 03, apresentaram menor diferença na média de microdureza e no desvio padrão, quando comparado com a amostra AM 01. Isto ocorreu devido a menor variação dos resultados durante a realização dos testes nas amostras AM 02 e AM 03, consequência da elevação da retilinearidade microscópica da superfície.

A variação da média de dureza obtida entre a amostra AM 01 e a AM 02 foi da ordem de 27%, por outro lado entre a amostra AM 01 e a AM 03 foi da ordem de 22%, ao passo que entre as amostras AM 02 e AM 03 esta foi de apenas 6%. A microdureza média da amostra AM 01 apresentou maior valor quando comparada a AM 03.

Rugosidade (μm)	Microdureza Vickers (HV)		
	0,61	0,47	0,037
Nº Teste	AM 01 (80 mesh)	AM 02 (220 mesh)	AM 03 (2000 mesh)
1	157	164	175
2	313	156	171
3	194	164	170
Média	221	161	172
Desvio Padrão	81,51	4,62	2,65

Tabela 1 - Microdureza Vickers referentes as amostras AM 01, 02 e 03.

Fonte: Autor.

Os testes de dureza portátil, pelo método *Leeb*, foram executados nas três amostras, conforme realizado no teste de microdureza *Vickers*, e os resultados podem ser visualizados pela Tabela 2 já convertidos para a escala HBW. O desvio padrão para as três amostras apresentaram resultados divergentes, havendo uma considerável alteração na média de dureza entre as amostras AM 01, AM 02 e AM 03 quando a rugosidade situou-se em valor acima de $0,47 \mu\text{m}$, corroborada pelo elevado desvio padrão. Isto ocorreu em função da baixa retilinearidade superficial na amostra AM 01.

Os resultados de dureza apresentados para as amostras AM 02 e AM 03, denotam menor diferença na média e no desvio padrão, quando comparado a AM 01. Isto ocorreu devido a menor variação dos resultados durante os testes nas amostras AM 02 e AM 03, consequência do aumento da retilinearidade microscópica das superfícies.

A variação na média de dureza obtida entre a amostra AM 01 e AM 02 foi da ordem de 27%, por outro lado entre a amostra AM 01 e a AM 03 foi da ordem de 40%, ao passo que entre as amostras AM 02 e AM 03 esta foi de apenas 10%. Houve a queda do valor da dureza na medida em que a rugosidade da superfície se apresentou em valores maiores.

Rugosidade (μm)	Dureza Brinell (HBW)		
	0,61	0,47	0,037
Nº Teste	AM 01 (80 mesh)	AM 02 (220 mesh)	AM 03 (2000 mesh)
1	95	135	149
2	120	133	148
3	105	140	152
Média	106,67	136,00	149,67
Desvio Padrão	12,58	3,61	2,08

Tabela 2 – Dureza *Brinell* referentes as amostras AM 01, 02 e 03.

Fonte: Autor.

Pela Figura 2 é possível verificar o gráfico comparativo entre as duas escalas de durezas realizadas nas amostras.

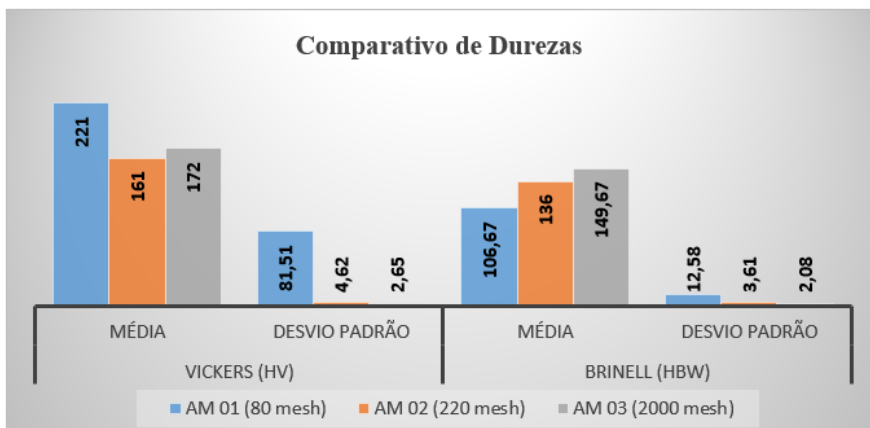


Figura 2 – Gráfico comparativo de durezas nas escalas *Vickers* e *Brinell*.

Fonte: Autor.

4 | CONCLUSÃO

A microdureza *Vickers* apresentou queda na medida em que a rugosidade superficial diminuiu, porém pelo método portátil *Leeb / Brinell* ocorreu a elevação.

O desvio padrão foi consideravelmente mais elevado na amostra AM 01 pelo método *Vickers* quando comparado ao método *Leeb/Brinell*.

As amostras AM 02 e AM 03 apresentaram resultados mais estáveis e menor desvio padrão pelos dois métodos de dureza.

Para rugosidades superficiais abaixo de $0,47 \mu\text{m}$, padrão granulométrico maior que 220 mesh, os resultados apresentam-se com valores de médias e desvios padrão mais estáveis, com menor variação, conferindo aos testes maior confiabilidade nas duas escalas de dureza.

REFERÊNCIAS

American Society for Testing and Materials. ASTM E92 - **Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials**. Pensilvânia, Outubro 1997.

American Society for Testing and Materials. ASTM A956 - **Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products**. Pensilvânia, 2012.

American Society for Testing and Materials. ASTM E140 - **Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness**. USA, 2012.

Ensaio de Dureza - Teste da Microdureza. Disponível em: http://www.cimm.com.br/porta/material_didatico/6560-teste-da-microdureza#.WL3ZFFXyviU. Acesso em: 07março, 2017, 23:05.

Filho, Antônio Piratelli. **Rugosidade Superficial**. Departamento de Engenharia – Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. Brasília, 2011.

International Organization for Standardization. ISO 1997 - **Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters**. USA, 1997.

CONCEITOS BÁSICOS DE MICROUSINAGEM: UMA REVISÃO

Data de aceite: 01/11/2020

Data de submissão: 05/08/2020

Ainá Winnie Carlos Riomar

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica
Viçosa – Minas Gerais
<http://lattes.cnpq.br/2978943699195922>

Esther Samila Santana Barbosa

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica
Viçosa – Minas Gerais
<http://lattes.cnpq.br/3326839154406873>

Lucas Winterfeld Benini

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica
Viçosa – Minas Gerais
<http://lattes.cnpq.br/7687650050636319>

RESUMO: A usinagem engloba os principais processos de fabricação utilizados na indústria atualmente. A microusinagem vem como um desenvolvimento destes processos, visando a produção de microcomponentes. Este trabalho objetiva apresentar uma revisão bibliográfica sobre os principais processos de microusinagem mecânica, bem como os conceitos de microferramentas e micro máquinas-ferramentas. Os estudos realizados demonstram que a usinagem em microescala representa um grande avanço tecnológico, trazendo benefícios que ainda não foram alcançados por outros processos. Porém a grande estabilidade alcançada pelas

técnicas convencionais ainda são um empecilho para a consolidação e difusão da microusinagem na indústria.

PALAVRAS-CHAVE: Microusinagem, microtorneamento, microfresamento, microfuração.

THE BASIC CONCEPTS OF MICRO MACHINING: A REVIEW

ABSTRACT: Machining is currently encompassing the main manufacturing processes used in the industry. Micro machining comes as a development of these processes, aiming at the production of micro components. This work presents a review of the main mechanical micro machining processes, as well as the concepts of micro tools and micromachine tools. Studies prove that micro-scale machining represents a technological advance, bringing benefits not yet achieved by other processes. However, the great stability achieved by conventional techniques is still an obstacle to the consolidation and diffusion of micro machining in the industry.

KEYWORDS: Micro machining, micro turning, micro milling, micro drilling.

1 | INTRODUÇÃO

Usinagem foi definida por Ferraresi (1990) como processos que conferem forma, dimensão ou acabamento à uma peça removendo material sob a forma de cavaco (porção de material que não possui geometria definida). A mecânica, termodinâmica e as propriedades dos materiais são a base para o estudo da usinagem.

Com o desenvolvimento humano surgiram necessidades de modernização e adequação dos bens de consumo às exigências da vida moderna. Para garantir essa evolução a indústria manufatureira precisou investir no aprimoramento das técnicas de usinagem até então existentes. Estima-se que 80% dos furos, 70% das engrenagens e 100% dos pinos médico-odontológicos advém desta operação (Krelling, 2013; Stoeterau, 2006).

Uma dessas necessidades está ligada às solicitações do mercado por produtos de tamanho cada vez mais reduzido e de alta complexidade, como nos casos dos aparelhos ortopédicos, ortodônticos, microcomputadores e celulares (Masuzawa, 2000). Os motivos que fomentam a busca pela miniaturização de componentes são: novas aplicações, melhores desempenhos, menores custos e alta qualidade (Dornfeld *et al.*, 2006).

Um dos processos utilizados na fabricação de microcomponentes é a microusinagem, definida como um processo que remove cavaco com espessura inferior a $999\ \mu\text{m}$, definição esta que não considera o tamanho da peça e da ferramenta. Segundo Masuzawa (2000) este conceito irá variar em função da época, método e material de fabricação.

É importante considerar a manutenção das propriedades mecânicas dos materiais, já que existe um aumento substancial na energia específica de corte quando se reduz a espessura do cavaco (Jackson, 2008, *apud* Oliveira, 2012). Este aumento de energia é a base para o conceito do efeito de escala, fenômeno comum e de extrema importância nas operações de microusinagem (Liu *et al.*, 2004). Portanto, o estudo contínuo dos materiais utilizados e dos parâmetros de usinagem é fundamental para o desenvolvimento e consolidação da técnica.

Devido a todas as peculiaridades envolvidas, os processos de microusinagem se enquadram nos processos não tradicionais de usinagem. Eles estão divididos em três grandes grupos: aditivos, *near net shape* e subtrativos (Rajurkar e Madou, 2005).

O grupo dos processos subtrativos engloba a fabricação de microcomponentes por meio de remoção de material e geração de cavaco, também intitulado como processos de microusinagem mecânica. No estudo comparativo realizado por Rajurkar *et al.* (2006), foram analisados todos os processos de microfabricação quanto a aspectos como qualidade superficial, acessibilidade, complexidade geométrica, dentre outros. Este estudo concluiu que os processos de microusinagem mecânica são os que trazem o melhor custo/benefício, quando comparados com as técnicas químicas e eletrofísicas. A microusinagem mecânica está subdividida em três processos principais, são eles: fresamento, torneamento e furação.

O presente trabalho visa a apresentar os principais conceitos dos processos de microusinagem, de micromáquinas-ferramentas e de microferramentas, abordando o efeito das variáveis e parâmetros de corte no resultado de trabalho.

2 I PROCESSOS DE MICROUSINAGEM

2.1 Microtorneamento

O torneamento é um processo de usinagem que se baseia no movimento rotativo de uma peça cilíndrica em torno do eixo principal de rotação da máquina, visando a obtenção de superfícies de revolução (Ferraresi, 1990). O microtorneamento consiste no processo de torneamento convencional miniaturizado. Assim, a partir deste processo é possível obter estruturas tridimensionais em microescala (Rahman *et al.*, 2005).

2.1.1 Efeito dos Parâmetros de Usinagem

No processo de microtorneamento as forças de usinagem têm grande influência na exatidão do processo, o que acaba limitando o tamanho usinável, sendo este o maior empecilho do processo. Assim, manter as forças atuantes abaixo daquelas que ocasionam deformação plástica no material usinado é de extrema importância (Rahman *et al.*, 2005).

Rahman *et al.* (2005) realizaram seu experimento com peças de latão, liga de alumínio e aço inoxidável AISI 316L em uma máquina ferramenta, de três eixos, produzida para microusinagem de precisão. Concluiu-se que o parâmetro que exerce maior influência é a profundidade de corte. Quando são empregados pequenos valores para este parâmetro, a força de impulso é o componente de força dominante. Agora, quando se determina um valor elevado para a profundidade de corte a parcela tangencial da força passa a ter um módulo maior.

O estudo de Prasad (2007) foi realizado em uma máquina-ferramenta similar à de Rahman *et al.* (2005), e teve como base para análise uma peça de latão. Obteve-se, como principal conclusão, que a força de impulso é influenciada principalmente pela profundidade de corte e pelo avanço, ao passo que a força de corte é fortemente impactada pela profundidade de corte e pela velocidade de rotação. Pequenas profundidades de corte resultaram em maior influência da força de impulso em comparação à força de corte. Os resultados obtidos neste estudo corroboram aqueles encontrados por Rahman *et al.* (2005). Maranhão *et al.* (2012) realizaram um estudo envolvendo simulação numérica e experimental de microtorneamento de peças de aço AISI 4140. Notou-se que o aumento do avanço implica em um aumento das forças de corte e de avanço.

Silva (2010) realizou experimentos de microtorneamento em um torno comandado numericamente (CNC) empregando peças de aço 1045 e alumínio EN AW-2011. As conclusões obtidas neste trabalho indicam que, assim como no macrotorneamento, a seleção de um conjunto ótimo de parâmetros de corte irá depender do material a ser usinado.

2.1.2 Ferramenta de Corte

No trabalho realizado por Silva (2010) percebeu-se que o afiamento da ferramenta de corte resulta em uma redução da qualidade da superfície usinada quando analisada a

precisão dimensional e o acabamento como parâmetros de qualidade. Para a usinagem de um micro eixo escalonado de alumínio, a melhor opção de ferramenta foi uma geometria destinada ao sangramento, utilizada em corte longitudinal. A Fig. 1 ilustra o perfil produzido através deste microtorneamento. Ainda segundo Silva (2010) esse processo possibilitou obter peças de até 0,75 mm de diâmetro e 5 mm de comprimento.

O flanco em uma ferramenta de cermet na usinagem de latão, de liga de alumínio e de aço inoxidável AISI 316L sofre um fino desgaste abrasivo. Já na ferramenta de PCD (diamante policristalino), atuando sobre as mesmas condições, nota-se a formação de sulcos (Rahman *et al.*,2005).

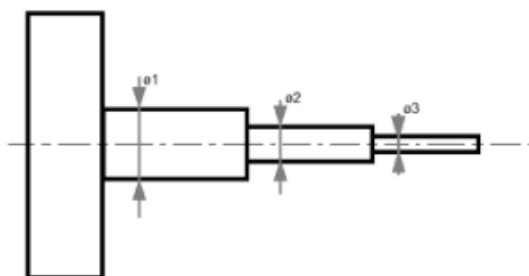


Figura 1 – Perfil produzido pelo microtorneamento (Adaptado de Silva, 2010).

2.1.3 Fluido de corte

Em seu experimento Silva (2010) aponta que a utilização de fluidos de corte não traz vantagens em processos de microtorneamento. De forma geral a rugosidade e precisão de forma foram melhores quando a usinagem foi realizada sem a presença de fluidos, apesar de uma certa adesão ser notada entre a ferramenta e o material da peça.

2.2 Microfresamento

O fresamento é um processo de usinagem caracterizado pelos movimentos realizados pela ferramenta, que gira, e pela peça, que se desloca seguindo uma trajetória qualquer (Ferraresi, 1990). O microfresamento possui muitas características que o aproximam do macrofresamento. Porém, a redução das dimensões envolvidas faz com que alguns fatores, principalmente em relação ao tamanho e escala das operações, que não são tão relevantes no processo tradicional passem a ter efeito significativo sobre os resultados obtidos (Picarelli, 2015).

2.2.1 Ferramenta de Corte

A concepção das microfresas tem base no princípio de que os processos envolvidos no microfresamento são análogos àqueles do processo convencional. Portanto,

tradicionalmente, têm sua geometria baseada nas fresas de tamanho convencional, apenas com tamanho reduzido (Fleischer *et al.*, 2008), como pode ser observado na Fig. 2. No entanto estes autores afirmam que as tolerâncias dimensionais tanto no diâmetro, como no raio de aresta da microfresa não permitem manter constantes as condições de corte para avanços na ordem de microns. Assim, não é possível estabelecer uma relação direta entre os parâmetros do fresamento convencional e aqueles utilizados no processo em microescala.

O valor da razão entre o avanço por dente e o raio de ponta da ferramenta é muito maior, quando comparado ao valor do fresamento em macroescala. Assim, a seleção dos parâmetros adequados adquire uma importância ainda maior na conservação da ferramenta já que a ocorrência de fraturas é facilitada (Kang *et al.*, 2007; Moreira, 2012).

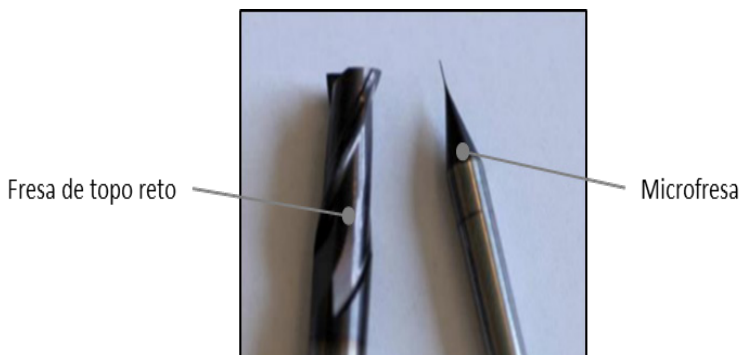


Figura 2 – Fresa de topo reto de 6 mm de diâmetro e microfresa de 200 μm (Li e Chous, 2010).

O estudo conduzido por Baldo (2013) mostra que o aumento no desgaste da ferramenta reduziu a rugosidade da superfície usinada. Por outro lado, o trabalho de Denkena *et al.* (2006) indicou que na microfresagem de alumínio o desgaste da ferramenta não refletia na rugosidade final.

2.2.2 Fluido de corte

Li e Chous (2010) analisaram o efeito que a lubrificação tinha sobre a ferramenta e a superfície usinada a partir do método de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL). Para as condições utilizadas foi possível concluir que, para a MQL, o desgaste de flanco foi menor. A redução é de cerca de 60% em relação ao corte seco. Assim, espera-se um aumento na vida da ferramenta.

A lubrificação também é benéfica quando se trata da rugosidade da superfície obtida. Os valores de rugosidade encontrados para superfícies lubrificadas são menores do que aqueles resultantes do corte a seco, mesmo com variações na velocidade de corte (Li e Chous, 2010).

2.2.3 Efeito dos Parâmetros de Usinagem

Kiswanto *et al.* (2014) estudam a relação que os parâmetros velocidade de rotação, avanço e tempo de corte exercem, quando usinando uma peça de alumínio liga 1100, sobre a rugosidade da superfície, a formação de rebarbas e o desgaste da ferramenta. Foi notada uma melhora na rugosidade quando o tempo de usinagem foi mantido e a velocidade de avanço foi aumentada. Essa configuração implicou em uma maior produtividade, com redução da rugosidade, sem prejuízo significativo na vida da ferramenta. Quanto à formação de rebarbas verificou-se que o parâmetro que mais tem influência é o tempo de corte.

O estudo realizado por Mian *et al.* (2011) em peças de liga de níquel conclui que a variável que mais tem impacto em diferentes mecanismos ligados à microusinagem é a velocidade de corte. Outro resultado encontrado é que, junto com a velocidade de corte, a razão entre espessura do cavaco e raio da aresta de corte influencia significativamente na rugosidade da superfície microfresada.

Baldo (2013) efetuou um estudo sobre a influência dos parâmetros de microfresagem para a liga de titânio Ti-6Al-4V. O primeiro fator analisado foi a influência do aumento da velocidade de avanço nas rugosidades Ra e Rz. Aumentar essa velocidade implicou em elevação nos valores encontrados para as rugosidades. Este efeito é atribuído ao fato de que maiores flexões ocorrem sobre a ferramenta, gerando maiores vibrações.

2.3 Microfuração

A furação está amplamente presente na indústria manufactureira e é um dos processos de usinagem mais importantes na indústria metal mecânica. De acordo com a norma alemã DIN 8589-2, a furação é definida como um processo de usinagem com movimento de corte circular, ou seja, com movimento rotativo principal, em que a ferramenta apresenta movimento de avanço apenas na direção do seu eixo de rotação, o qual mantém sua posição em relação à ferramenta e à peça.

Visando transpor os obstáculos do processo convencional em termos de dimensões de furo, criou-se a microfuração, em que a razão de aspecto para os furos que podem ser feitos é da ordem dos 10:1, para furos cujo diâmetro mínimo é de 0,1 mm (Hinds e Treanor, 2000).

2.3.1 Ferramenta de Corte

As microbrocas são as ferramentas mais utilizadas no processo de microfuração. A montagem é composta através da fixação da microbroca em uma pinça de precisão, com a necessária pré-vistoria do maquinário através de microscópio, evitando assim discordâncias (Selada *et al.*, 2010).

O ciclo de vida da ferramenta é contingente, segundo pesquisas de Kudla (2005) as microbrocas submetidas a parâmetros de corte relativamente diferentes dos pré-definidos e a cargas superiores resultam em quebra antes de apresentar o desgaste total esperado.

Através de seus estudos, Zhuang (2013) concluiu que o bloqueio de aparas e a adesão de cavacos são dois dos principais motivos para a quebra de microbrocas. A Fig. 3 mostra a geometria de uma microbroca.

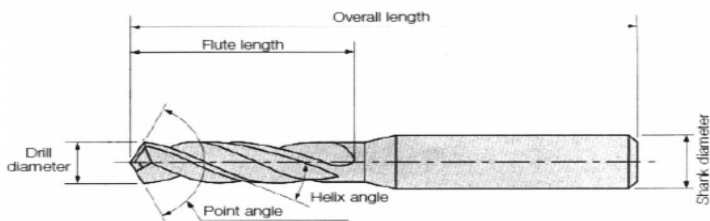


Figura 3 – Geometria da minibroca (Zhuang, 2013).

A relação entre comprimento e diâmetro da microbroca interfere diretamente em sua resistência mecânica, ajustando-a ao tipo de processo requerido (Selada *et al.*, 2010). Essa relação não deve ultrapassar muito o valor da razão preestabelecida para o processo, em virtude da fragilidade estrutural da ferramenta (Vasco e Correia, 2006). A forma e a geometria também influenciam substancialmente o modo com o qual a microbroca se comporta durante o processo de furação.

2.3.2 Efeito dos Parâmetros de Usinagem

Segundo Selada *et al.* (2010) na microfuração o aumento da velocidade de corte tem como efeito uma redução do binário e da componente tangencial da força de corte. O desgaste maior se dá na aresta de corte, não na face, e o atrito entre microbroca e a peça é superior por conta da dificuldade de remoção do cavaco gerado. Esses são os fatores que diferenciam a furação convencional da microfuração.

Hasan *et al.* (2017) estudaram a taxa de remoção de material, que pode ser calculada através da multiplicação entre a velocidade de rotação, a taxa de avanço e a área transversal da broca. A conclusão, através de suas análises, foi que uma maior taxa de remoção de material resulta em menor tempo de perfuração, por conseguinte, uma perfuração mais rápida acaba gerando carga extra na broca e risco de fratura da ferramenta. A Fig. 4 ilustra o padrão alcançado até o momento para a fabricação de microbrocas, de acordo com Hasan *et al.* (2017), as pesquisas no setor de manufatura dessas ferramentas miniaturizadas têm avaliado concomitantemente o aumento da performance e a redução do tamanho.

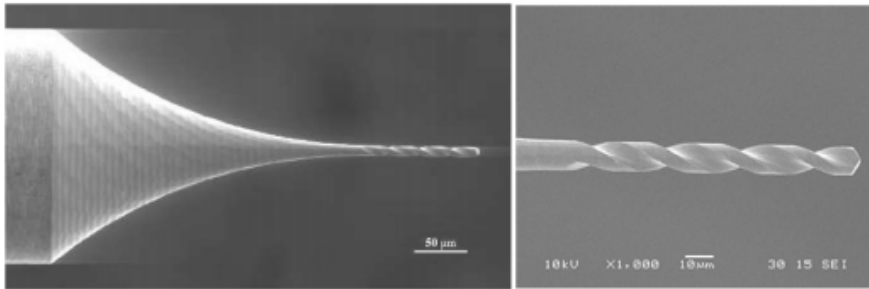


Figura 4 – Microbroca com diâmetro de 10 μm (Hasan *et al.*, 2017).

Segundo Zhuang (2013), a velocidade de rotação recomendada por manuais de vários fabricantes de ferramentas para o aço inoxidável 316 SST está entre 25.000 rpm e 35.000 rpm. Porém, em virtude das restrições de eficiência das máquinas, a velocidade de rotação máxima atingida é inferior aos valores de referência. As máquinas devem funcionar o mais próximo da velocidade de rotação máxima (24.000 rpm) com o intuito de obter melhor desempenho.

Também com relação às análises feitas por Zhuang (2013), outro parâmetro essencial é a taxa de avanço, que possui influência direta no acabamento superficial da peça e no tempo de vida da ferramenta. Uma menor taxa de avanço implica em uma superfície com menor rugosidade. Não obstante, diminuir a taxa de avanço resulta em uma produção mais lenta e reduz ainda mais o ciclo de vida da ferramenta.

2.3.3 Fluido de corte

O fluido de corte, ou fluido refrigerante tem papel importante no arrefecimento, lubrificação e remoção do cavaco gerado no processo. Porém, segundo estudos realizados por Zhuang (2013), o tamanho extremamente reduzido do orifício gerado dificulta o escoamento do fluido pelo microfuro.

Os fatores fundamentais para a melhor performance durante o processo de microfuração avaliaram o tipo de refrigerante, a taxa de fluxo e ângulo do bico. A conjuntura para um desempenho ideal requer um fluido refrigerante com menor viscosidade, alta difusividade térmica e boa lubricidade (Oberg *et al.*, 2004).

2.4 Efeito Escala

Câmara (2014) afirma que o efeito escala caracteriza-se por uma relação não linear entre o crescimento da energia específica de corte e a redução da espessura e do material não deformado. Em processos micrométricos a resistência ao cisalhamento do material se eleva, como indicado na Fig. 5. Esta elevação se deve ao fato de que, ao reduzir as dimensões, tem-se apenas defeitos pontuais para realizar a quebra da ligação atômica da estrutura (Taniguchi, 2003 *apud* Câmara, 2014).

Subbiah e Melkote (2013) explicam que existem diferentes explicações para este efeito, como indicado na Fig. 6. Estas podem ser divididas entre as que estão relacionadas às propriedades do material e às que independem das características dos materiais envolvidos.

Mian *et al.* (2011) estudaram os fatores que mais influenciam no efeito escala na microusinagem, a partir de um experimento baseado em peça microfresada de Inconel 718. Estes autores concluíram que pode-se usar a energia específica, a espessura da base da rebarba e a rugosidade da superfície como fatores relevantes no efeito. O estudo sugere ainda que a razão entre avanço por dente e raio de ponta da ferramenta, como também a velocidade de corte são fatores que podem influenciar de maneira significativa o efeito.

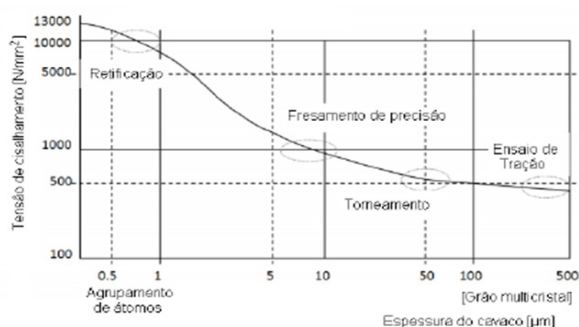


Figura 5 – Tensão de cisalhamento versus espessura do cavaco (Câmara, 2014).

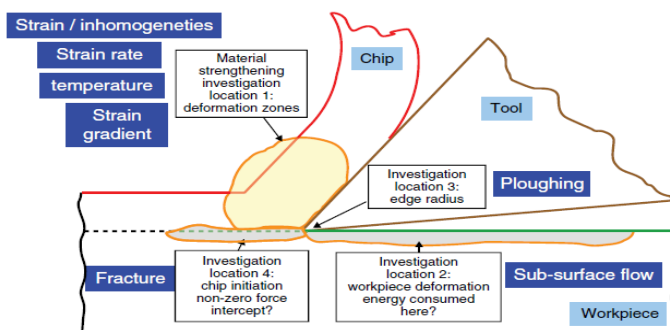


Figura 6 – Explicações diversas para o efeito escala (Subbiah e Melkote, 2013).

Klocke *et al.* (2009) estudaram o efeito escala em operações de micro furação de aço AISI 1045. Foi descoberto que, diferentemente da macrousinagem, altas velocidades favorecem a formação de gumes posições, causando um aumento da força de avanço. Outro interessante ponto abordado é a indicação de que a ferramenta de corte pode ser

da mesma dimensão do tamanho de grão. Porém, nestes casos, deve-se tomar o cuidado de não se analisar o material como isotrópico e homogêneo. Este efeito de escala deve ser considerado ao realizar análise numérica da microusinagem, a partir do método de elementos finitos.

2.5 Formação do cavaco

A formação do cavaco é um processo dinâmico não linear de extrema importância para se compreender e prever a ação das forças de corte atuantes. É relevante, também, a determinação da espessura mínima do cavaco, pois uma profundidade de corte menor que essa não resultará na remoção de material. Na usinagem em dimensões convencionais esse fator não costuma receber muita atenção visto que a profundidade de corte (torneamento) e o avanço por dente (fresamento) normalmente são maiores que o raio de ponta (Vinayagamoorthy e Xavier, 2011). Ainda, segundo estes autores, conhecer a espessura mínima é importante, porém obter este dado durante a execução do processo é uma tarefa difícil. Para contornar esta situação pesquisadores se dedicam a realizar simulações e experimentos para entender melhor o funcionamento do processo.

A redução do avanço por dente produz valores de rugosidade maiores, no microfresamento do aço ABNT 1045. Quando este valor de avanço é da mesma ordem da espessura mínima do cavaco nota-se redução da rugosidade da superfície, isto pode ser explicado pelo fato de a espessura do cavaco estar próximo daquela considerada crítica (Rodrigues, 2013).

Os mapas de simulação para deformação plástica (Maranhão, 2012) indicam que o cavaco, de um aço AISI 4140 microtorneado, aparenta sofrer mais impactos do que a peça produzida, como indicado na Fig. 7. Isso pode ser comprovado analisando o cavaco e notando que a região inferior tem um valor de deformação maior que a superfície superior. Já os mapas da velocidade de deformação plástica (Fig. 8) indicam que os maiores valores destas estão localizados no plano de cisalhamento primário.

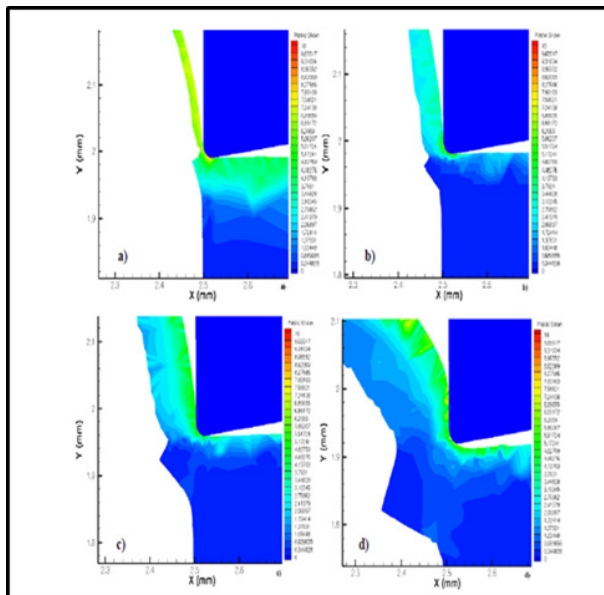


Figura 7 – Distribuição da deformação plástica no final do comprimento de corte para diferentes velocidades de avanço (a) Avanço de 10 $\mu\text{m}/\text{rot}$; (b) Avanço de 20 $\mu\text{m}/\text{rot}$; (c) Avanço de 40 $\mu\text{m}/\text{rot}$; (d) Avanço de 80 $\mu\text{m}/\text{rot}$ (Maranhão, 2012).

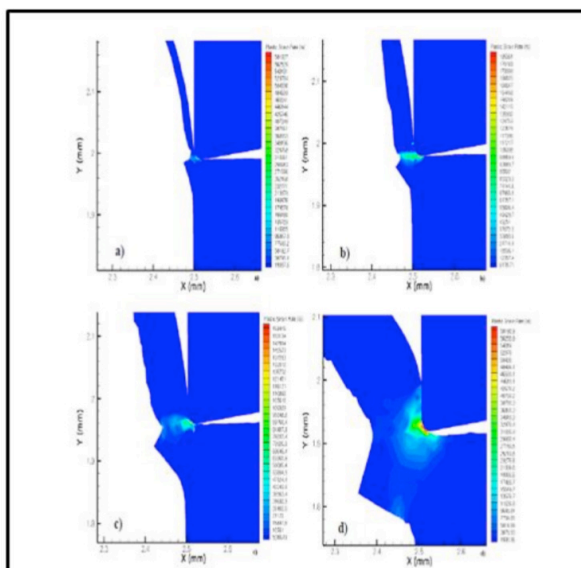


Figura 8 – Distribuição da velocidade de deformação no final do comprimento de corte para diferentes velocidades de avanço (a) Avanço de 10 $\mu\text{m}/\text{rot}$; (b) Avanço de 20 $\mu\text{m}/\text{rot}$; (c) Avanço de 40 $\mu\text{m}/\text{rot}$; (d) Avanço de 80 $\mu\text{m}/\text{rot}$ (Maranhão, 2012).

A remoção dos cavacos produzidos durante o processo de furação é um fator de grande importância, devendo ser levado em consideração no momento de definição dos parâmetros do processo. Quando se trata do processo de micro furação a remoção desta apra torna-se um fator ainda mais crítico, visto que o acúmulo destes nos furos gera aquecimento e tensão adicionais que, podem, culminar na quebra da microbroca (Hasan *et al.*, 2017).

2.6 Produtos da microusinagem

No passado os únicos microprodutos utilizados eram as peças que compunham o mecanismo de um relógio. Com a modernização novas necessidades surgiram e para isso os processos discutidos nos itens 2.1, 2.2 e 2.3 foram desenvolvidos (Masuzawa, 2000). A Fig. 9 mostra algumas aplicações de microusinados.

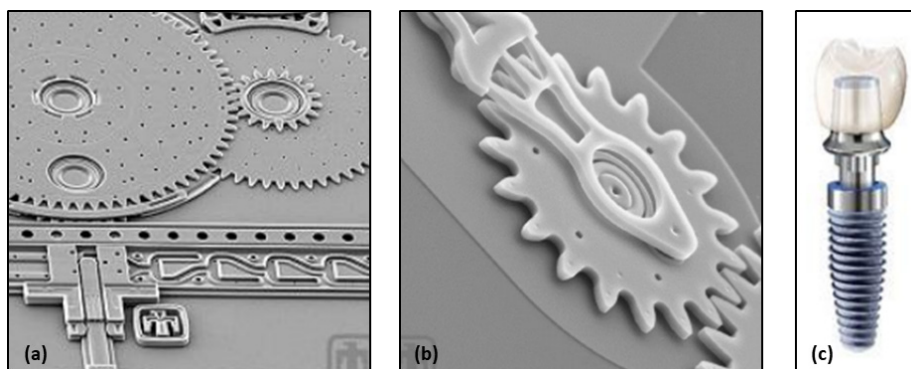


Figura 9 – Exemplos de produtos microusinados (a) microengrenagens (Sandia, 2018); (b) micromotores (Sandia, 2018); (c) Pino utilizado em implantes odontológicos (Adentis, 2018).

3 I MICROMÁQUINAS-FERRAMENTAS

A produção das micromáquinas-ferramentas é o grande desafio em que esbarra a microusinagem na atualidade. Segundo Rahman *et al.* (2010) é indispensável que as micromáquinas de usinagem sejam providas de um sistema CNC (Controle Numérico Computadorizado) que proporcione a elas o monitoramento adequado dos movimentos e parâmetros envolvidos no processo.

De acordo com estudos realizados por Baldo (2013) as micromáquinas-ferramentas demandam um inflexível processo de fabricação, já que as propriedades requeridas devem ser superiores às do processo convencional, que por sua vez, costumeiramente aponta falhas em seus comandos e controles. Esses desvios no âmbito da macroescala podem não causar consequências preocupantes, no entanto, em microusinagem, o mesmo desvio pode resultar em defeito na peça final.

Chae *et al.* (2005) discorrem sobre os inúmeros benefícios associados à utilização de micromáquinas nos processos de usinagem, que incluem a diminuição no gasto de energia e de matéria prima, redução do espaço e menor custo para a produção. Outro benefício é devido às micromáquinas-ferramentas apresentarem frequências naturais mais altas quando comparadas às máquinas convencionais, isso é explicado pela massa ser muito menor. O resultado positivo disso é a possibilidade de utilização de um grande intervalo de velocidades de rotação com reduzida instabilidade. A Fig. 10 traz alguns exemplos de máquinas de baixo custo para operações de microfresamento.

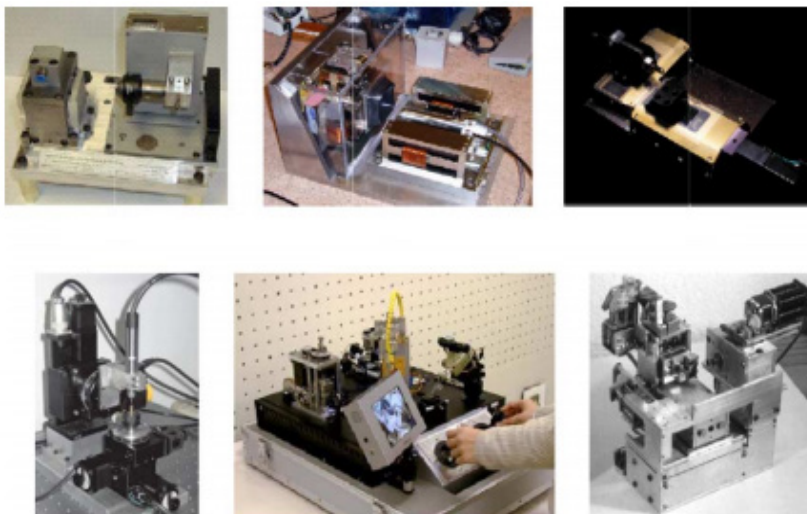


Figura 10 – Micromáquina-ferramentas para aplicações diversas (Adaptado de Zariatin, *et al.*, 2016).

3.1 Microferramentas de corte

Os componentes em miniatura são demanda de vários ramos da indústria e sua produção requer métodos de elevada precisão e garantia da repetitividade. As ferramentas convencionais não têm aplicabilidade na microusinagem (Chae *et al.*, 2005), e poucos estudos foram feitos em termos de experimentação e manipulação das microferramentas. Ainda é um desafio avaliar as reais interações possíveis entre a ferramenta e a peça trabalhada. De acordo com Rahman *et al.* (2010), as deformações mecânica e térmica, o ajuste da ferramenta, a precisão dimensional e o controle das vibrações são os principais fatores que podem afetar a manufatura de ferramentas em microescala.

Também de acordo com Chae *et al.* (2005), as microferramentas podem ser extremamente frágeis e de minuciosa manipulação, porém há um grande estímulo para seu

desenvolvimento derivado da busca pelo aumento da flexibilidade de criação de geometrias, redução do tamanho das peças de trabalho e minimização dos custos de produção.

Os parâmetros mais relevantes das microferramentas nas operações de microusinagem são a geometria e o tipo de material. São utilizadas ferramentas de tungstênio para uma gama grande de materiais Chae *et al.* (2005).

3.1.1 Fabricação de microferramentas por pulverização de feixe de íons focalizados- FIB

A evolução tecnológica e científica na área de materiais e processos de fabricação propiciou a produção de micro ferramentas, seguindo assim o padrão de desenvolvimento das máquinas de microusinagem, afinal, são interdependentes. Para tal, o método utilizado é denominado feixe de íons focalizados ou, em inglês, *Focused Ion Beam* (FIB) (Baldo, 2013).

De acordo com os estudos de Picard *et al.* (2002) o método utilizado para moldar as micro ferramentas consiste em um aparelho à vácuo que acelera íons de argônio e os direciona à peça que se deseja dar forma. Material é removido assim por pulverização. O padrão físico buscado para a ferramenta é gerado computacionalmente, proporcionando flexibilidade de forma e uma ferramenta com ângulos exatos e arestas de corte afiadas. Os materiais primários para a fabricação de microferramentas são fornecidos geralmente em formato de cilindro conectado a um mandril, com um comprimento total de aproximadamente 2,5 cm e com até 3,175 mm de diâmetro.

Segundo Chae *et al.* (2006), microferramentas comercialmente disponíveis atualmente podem alcançar até 50 μm de diâmetro e têm seu ângulo de hélice fabricado por esmerilhamento. A Fig. 11 mostra uma microfresa de 100 μm de diâmetro, é possível avaliar sua dimensão super reduzida observando o diâmetro da parte superior da própria microferramenta, que é 4 mm.

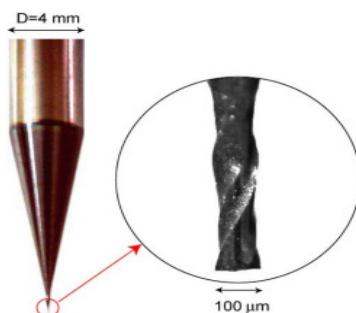


Figura 11 – Microfresa de carbeto de Tungstênio (Chae *et al.*, 2006).

4 | CONCLUSÕES

Este trabalho abordou os aspectos principais processos de microusinagem mecânica. Com esta revisão bibliográfica, conclui-se que:

- O processo de microusinagem é visto como um avanço tecnológico, uma promessa de fomento à economia, progressão nos equipamentos ligados a saúde e uma alavanca para inovações. Porém, a estabilidade já alcançada e conhecimentos já estabelecidos no processo em macroescala convencional tornam-se uma barreira a ser vencida para o seu desenvolvimento;
- A microestrutura da peça resultante dos processos de microusinagem é um fator que ainda requer estudos, pois sem esse conhecimento torna-se limitada a determinação das propriedades do material;
- Outro ponto importante é a adequação dos parâmetros, já consolidados em macroescala, aos processos de microusinagem que dependem da análise cuidadosa do efeito de escala;
- Por fim, acredita-se que o investimento em estudos para o entendimento e desenvolvimento dos processos de microusinagem é de grande importância para a contínua evolução técnico-científico. Vale ressaltar que este crescimento traz impactos, diretos e indiretos, para a sociedade como um todo.

Após o estudo de diversas fontes percebe-se que alguns temas ainda necessitam de um estudo mais detalhado. Dentre estes podem-se destacar: os efeitos do fluido de corte sobre a peça e a ferramenta ainda não foram bem documentados; a influência do material da ferramenta de corte sobre as forças de corte e qualidade da superfície usinada; a validação da precisão com a qual os estudos numéricos reproduzem a realidade e aplicação destas ferramentas e, por fim, a realização de estudos sobre a atuação da metrologia de ultra precisão na medição e avaliação dimensional de componentes.

REFERÊNCIAS

ADENTIS, **Korony na implantach**". Disponível em: <<https://adentis.pl/uslugi-i-ceny/ortodoncja-bez-ekstrakcji/protetyka/korony-na-implantach>> Acesso em 27 de agosto de 2018.

BALDO, D. **Estudo do microfresamento da liga de titânio TI-6Al-4V utilizando análise de sinais de força e emissão acústica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -Universidade Federal de São João Del-Rey, São João Del-Rey, MG, 2013. 163 f.

CÂMARA, M. A. **Influência do efeito escala sobre a operação de microfresamento**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2014. 177 f.

CHAE, J.; PARK, S. S.; FREIHEIT, T. "Investigation of micro-cutting operations". **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v.46, n.3-4, p.313-332, mar. 2006.

DIN 8589-2: "Fertigungsverfahren Spanen Teil 2: Bohren - Einordnung, Unterteilung, Begriffe". Berlin, Alemanha: BeuthVerlagGmbH, 12p, 2003

DORNFELD, D.; MIN, S.; TAKEUCHI, Y. Recent advances in mechanical micromachining. **Cirp Annals - Manufacturing Technology**. v.55, n.2, p.745-768. 2006.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blüncher Ltda, 1990.

FLEISCHER, J. *et al.* Design and manufacturing of micro milling tools. **Microsystem Technologies**. Besançon, França, v.14, n. 9-11, p.1771-1775, ago. 2008.

HASAN, M.; ZHAO, J.; JIANG, Z. A review of modern advancements in micro drilling techniques. **Journal of Manufacturing Processes**. v.29, p.343-375, oct. 2017.

KANG, I. S. *et al.* A mechanistic model of cutting force in the micro end milling process. **Journal of Materials Processing Technology**. v.187-188, p.250-255, jun. 2007.

KRELLING, A. **Usinagem**. [2013?]. 37 slides. Disponível em: <<http://joinville.ifsc.edu.br/~anael.krelling/Tecnologia%20em%20Mecatr%C3%B4nica/PFB64/10%20-%20Usinagem.pdf>>. Acesso em 27 de agosto de 2018.

KISWANTO, G.; ZARIATIN, D. K.; KO, T. J. The effect of spindle speed, feed-rate and machining time to the surface roughness and burr formation of Aluminum Alloy 1100 in micro-milling operation. **Journal of Manufacturing Processes**. v.16, n.4, p. 435-450, out. 2014.

KLOCKE, F.; GERSCHWILER, K.; ABOURIDOUANE, M. Size effects of micro drilling in steel. **Production Engineering: Research and Development**.v.3, n.1, p. 69-72, mar. 2009.

KUDLA, L.A. Deformations and strength of miniature drills. **Journal of Engineering Manufacture**. v.220, n.3, p. 389-396, 2005.

LI, K.M.; CHOU, S. Y. Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 210, n. 15, p.2163-2170, nov. 2010.

MARANHÃO, C.; SILVA, L. R.; DAVIM, J. P. **Comportamento termomecânico na microusinagem do aço aisi 4140: Simulação numérica com validação experimental**. Ciência & Engenharia, v.21, n.2, p.18-28, jul/dez.2012.

MASUZAWA, T. State of the art of micromachining. **Cirp Annals - Manufacturing Technology**. v. 49, n.2, p. 473-488. 2000.

MIAN, A. J.; DRIVER, N.; MATIVENGA, P. T. Identification of factors that dominate size effect in micro-machining. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 51, n. 5, p. 383-394, may. 2011.

MOREIRA, S. R. S. **Energia específica de corte e integridade superficial no microfresamento do aço ABNT 1045**. Dissertação (Mestrado de Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2012. 90 f.

OBERG, *et al.* **Machinery's Handbook**. 27. ed. Nova Iorque: Industrial Press Inc., 2004.

OLIVEIRA, F. B. **Estudos dos mecanismos governantes do efeito de escala na microusinagem**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2012. 92 f.

PICARD, Y. N. *et al.* Focused ion beam-shaped microtools for ultra-precision machining of cylindrical components. **Precision Engineering**. v.27, n.1, p. 59-69, jan. 2003.

PICARELLI, T. C. **Microfresamento: Estudo e aplicação do processo**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, SP, 2015.

PRASAD, J. H. **Experimental studies on microturning**.. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica)-National Institute of Technology Calicut, Calicut, Kerala, 2007. 62 f.

RAHMAN, M. A. *et al.* CNC microturning: an application to miniaturization. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v.45, n.6, p.631-639, nov. 2005.

RAHMAN, M. A. *et al.* A multiprocess machine tool for compound micromachining. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v.50, n.4, p.344-356, 2010.

RAJURKAR, K.; MADOU, M. International assessment of research and development in micromanufacturing. In: EHMANN, K.F. *et al.* **Processes**. Marylan: WTEC, 2005. cap. 4, p.39-64.

RAJURKAR, K. P. *et al.* Micro and Nano Machining by Electro-Physical and Chemical Processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**. v. 55, n.2, p. 643- 666. 2006.

RODRIGUES, A. R. *et al.* **Integridade superficial no microfresamento**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 7., 2013, Penedo.

SELADA, A.; FIDELIS, N.; SOARES, R. **Estudo sobre tecnologias nucleares do sector de engineering and tooling com potencial de aplicação noutros sectores**. Centro Tecnológico da Indústria de Moldes, Ferramentas Especiais e Plásticas, Marinha Grande, Portugal, 2010. 102 f.

SILVA, I. F. P. **Avaliação da qualidade de micropeças torneadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2010. 72 f.

STOETERAU, R. L. **Usinagem com ferramentas de geometria definida [2006?]**.99 slides. Disponível em:< <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULA%20RS2.pdf>>. Acesso em 27 de agosto de 2018.

SUBBIAH, S.; MELKOTE, S. N. Engineering materials for micro cutting. In: CHENG, K.; DEHONG, H. **Micro-Cutting: Fundamentals and applications**. Reino Unido: Wiley, 2013. cap. 5, p.87-114.

VINAYAGAMOORTHY, R.; XAVIOR, M. A. A Review on Micro Turning Process. **International Journal of Current Research**. v.3, n.11, p.174-179, out. 2011.

ZARIATIN, D.L.; KISWANTO, G.; KO, T.J. Prototype development of micro-milling machine for micro-product. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**. v.11, n.16, p.10004-10008, ago. 2016.

ZHUANG, Y. **Optimizing the Economic Efficiency by Micro-drill Life Improvement during Deep-hole Drilling in the 212-Valve Manufacturing Process**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Manufatura) - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 2013. 67 f.

ANÁLISE DE FALHA POR CORROSÃO EM REVESTIMENTO DE PRODUÇÃO DE UM CAMPO MADURO DO ESTADO DE SERGIPE

Data de aceite: 01/11/2020

Data de submissão: 24/07/2020

André Vieira da Silva

Centro Universitário Estácio de Sergipe
Aracaju – SE.
<http://lattes.cnpq.br/4279896471329742>

Wilson Linhares dos Santos

Centro Universitário Estácio de Sergipe
Aracaju – SE.
<http://lattes.cnpq.br/5081094478451532>

Cochiran Pereira dos Santos

Centro Universitário Estácio de Sergipe
Aracaju – SE.
<http://lattes.cnpq.br/1829158866506922>

Soraia Simões Sandes

Centro Universitário Estácio de Sergipe
Aracaju – SE.
<http://lattes.cnpq.br/2253350643060249>

RESUMO: A corrosão é uma das principais causas de falhas em equipamentos na indústria petrolífera, principalmente em campos maduros, sendo responsável pelo aumento dos custos de manutenção e produção. Com o objetivo geral de analisar a causa raiz da falha por corrosão em um revestimento de produção, foi analisada a característica do solo que provocou a falha do revestimento, os tipos de fluidos produzidos pelo poço e a morfologia da corrosão associada à falha. Foi proposta também ações para eliminar ou mitigar as falhas por corrosão não associadas

a esforços mecânicos. Na análise de resultados do solo foi possível observar que o quartzo foi o mineral predominante, o fluido produzido apresentou pH ligeiramente ácido e massa específica de 0,91 g/cm³, a amostra do resíduo sólido recuperado do poço apresentou carbonatos em sua totalidade. Para evitar ou mitigar a ação do processo corrosivo, o plano proposto partiu da premissa que o material do poço não pode ser alterado devido a questões técnicas e de viabilidade econômica. Pode-se concluir que o processo corrosivo do revestimento analisado ocorreu pelo mecanismo de aeração diferencial ou célula oclusa. Em relação às medidas preventivas, foi identificado que haviam diversas técnicas que permitiriam impedir esse tipo de fenômeno. Diante das premissas adotadas, todas as técnicas envolviam a necessidade de isolar a região do metal que ficava na interface entre a área não aerada e a aerada. Portanto, a proposta era deslocar essa região do metal para a zona de passivação no diagrama correspondente ao metal adotado na instalação.

PALAVRAS-CHAVE: Corrosão, Duto, Petróleo, Revestimento.

CORROSION FAILURE ANALYSIS IN PRODUCTION COATING OF A MATURE FIELD IN THE STATE OF SERGIPE

ABSTRACT: Corrosion is one of the main causes of equipment failures in the oil industry, mainly in mature fields, being responsible for the increase in maintenance and production costs. With the general objective of analyzing the root cause of corrosion failure in a production coating, the characteristics of the soil that caused the coating

failure, the types of fluids produced by the well and the corrosion morphology associated with the failure were analyzed. Actions were also proposed to eliminate or mitigate failures due to corrosion not associated with mechanical efforts. In the analysis of soil results, it was possible to observe that quartz was the predominant mineral, the fluid produced had a slightly acid pH and specific mass of 0.91 g/cm³, the sample of the solid residue recovered from the well showed carbonates in its entirety. To avoid or mitigate the action of the corrosive process, the proposed plan was based on the premise that the material in the well cannot be changed due to technical and economic viability issues. It can be concluded that the corrosive process of the analyzed coating occurred through the differential aeration mechanism or occluded cell. Regarding preventive measures, it was identified that there were several techniques that would prevent this type of phenomenon. In view of the premises adopted, all techniques involved the need to isolate the region of the metal that was at the interface between the non-aerated area and the aerated area. Therefore, the proposal was to move this region of the metal to the passivation zone in the diagram that corresponds to the metal adopted in the installation.

KEYWORDS: Corrosion, Duct, Oil, Coating.

1 | INTRODUÇÃO

A perfuração e colocação em produção de um poço de petróleo ou gás é complexa e requer tecnologias de ponta, equipamentos sofisticados e mão de obra qualificada, desde a fase de prospecção, até a chegada do combustível nos postos de gasolina. Ao longo do tempo, a necessidade tecnológica foi aumentando para a extração dos hidrocarbonetos, exigindo das empresas exploradoras altos investimentos e engenharia aplicada. No Brasil e no mundo, a Petrobras se tornou referência em águas profundas, tamanha sua excelência em tecnologia, equipamentos e padrões de segurança para a exploração do ouro negro e do gás natural.

Na indústria em geral, a falha de um determinado equipamento, ou mais especificamente do material que constitui um determinado equipamento, pode ter vários fatores como causa principal, desde falha no processo produtivo do material ou equipamento, falha no projeto, erro no cálculo de tensões atuantes, condições de operação não previstas no projeto, entre outras.

Na engenharia em geral, um dos grandes vilões dos projetos é a falha por corrosão, elas podem estar associadas a esforços mecânicos, como corrosão sob tensão em meios contendo cloretos, em meios cáusticos, em meios contendo amônias, por ácidos politiônicos, em pH próximos ao neutro e ainda corrosão-erosão e corrosão-fadiga. A corrosão também pode não estar associada a esforços mecânicos, como a corrosão eletroquímica, intergranular, seletiva, galvânica, por pites, célula oclusa e corrosão ácida.

Nas estruturas metálicas e nos equipamentos em geral, diversas são as técnicas de ensaios não destrutivos (END) utilizadas para a detecção de corrosão, as mais usuais são a inspeção visual, medição de espessura, líquido penetrante, radiografia e partículas

magnéticas. Dependendo do tipo de corrosão detectada e o estágio da corrosão, deverá ser aplicada a técnica de prevenção/mitigação, que vai desde a seleção adequada de materiais, até a aplicação de barreiras para a prevenção e/ou aumento da resistência à corrosão.

1.1 Objetivo Geral

Analisar a causa raiz da falha por corrosão no revestimento de produção de um poço de um campo maduro no estado de Sergipe-Brasil.

1.2 Objetivos Específicos

- Analisar o tipo de solo na superfície de contato com o revestimento e as características do fluido produzido pelo poço em estudo;
- Verificar o tipo de corrosão associada à falha do revestimento;
- Propor ações para eliminar ou mitigar as falhas por corrosão pelo mecanismo identificado.

2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Poços de Petróleo

Mesmo com o passar dos anos, o petróleo ainda continua sendo um dos bens de consumo transformáveis mais cobiçados do planeta. Sua exploração e, conseqüentemente a produção, requer o projeto e a perfuração de poços que alcancem seus reservatórios e os escoem até os oleodutos ou tanques. A perfuração de poços, realizadas por sondas de perfuração, pode ocorrer no mar (*offshore*) ou em terra (*onshore*) (VICTOR *et al.*, 2012, p. 01).

Independentemente da finalidade, tipo e direção, suas estruturas e equipamentos requerem manutenção periódica. De acordo com Accioly e Chiyoshi (1998, p. 02), quando se trata de poços *offshore*, as operações de manutenção são complexas e imprevisíveis, pois não há como prever eventuais falhas nos poços. Além de custos elevados relacionados com mão de obra, equipamentos e peças de reposição, as perdas geradas pelas paradas de produção também trazem conseqüências negativas.

Para Maia *et al.* (2002, p. 01), a manutenção realizada em poços terrestres (*onshores*) devem ser realizadas regularmente sob pena de parada de suas atividades, o que pode trazer perdas significativas. Observa-se muitas vezes que por fatores econômicos, as manutenções só são realizadas após a parada do poço, ou até mesmo por compromisso com o órgão regulador. Em todos os casos, os equipamentos do sistema de controle do poço desempenham um papel essencial para a segurança do poço, do meio ambiente e das pessoas.

2.2 Equipamentos do sistema de controle do poço (ESCP)

Para todos os tipos de poços, sejam de petróleo, gás ou até mesmo injetores, após a sua perfuração, é necessária a instalação dos equipamentos do sistema de controle do poço, mais conhecido no ramo como ESCP, estes equipamentos são responsáveis pelo controle e segurança do poço, vão desde a descida do revestimento de produção, até a instalação da cabeça de produção, da árvore de natal e de todos os acessórios necessários para a intervenção e operação.

Segundo Thomas (2001, p. 67), o sistema de segurança é constituído dos equipamentos de segurança de cabeça de poço e de equipamentos complementares que possibilitam o fechamento e controle do poço. Nessa ótica, estes equipamentos exercem um papel fundamental na vida produtiva do poço, principalmente na fase de intervenção dos mesmos.

Existe uma grande preocupação com todos os equipamentos do sistema e da segurança do poço, porém, a integridade do revestimento de produção deverá ser preservada para garantir a barreira primária e o controle do poço. Na sequência serão descritos de forma resumida os tipos de revestimentos e suas funções no poço. A Figura 1 ilustra um revestimento de produção que não resistiu a carga do conjunto do ESCP e veio a partir, sendo que a causa raiz da falha foi a corrosão. Nesse evento não houve derramamento de hidrocarboneto para a superfície pois o poço estava amortecido.



Figura 1: Revestimento partido por corrosão

Fonte: Próprio Autor (2019)

2.3 Gerenciamento da integridade estrutural do poço

Gerenciar a integridade estrutural do poço, mais especificamente dos equipamentos de superfície e do revestimento de produção, são responsabilidades das operadoras dos campos petrolíferos, este gerenciamento está previsto no regulamento técnico do sistema de gestão e integridade de poços (SGIP) resolução ANP nº 46. O revestimento de produção, objeto de estudo desta pesquisa, está inserido nesta resolução como de responsabilidade da concessionária.

De acordo com Viana (2014, p. 87), planos de manutenção são o conjunto de informações necessárias para a orientação perfeita da atividade de manutenção preventiva. Eles representam, na prática, o detalhamento da estratégia de manutenção assumida por uma empresa.

2.4 Fadiga Mecânica

Conforme Pelliccione *et al.* (2014), fadiga pode ser resumida como o fenômeno progressivo de ruptura de um determinado material que estão submetidos a ciclos contínuos de tensão e/ou deformação. Na engenharia mecânica existem vários métodos para cálculo do ciclo de fadiga antes de sua falha.

2.5 Erosão/corrosão-erosão

A corrosão é um mecanismo de falha que ataca os materiais metálicos e não metálicos, o que para evitar a falha muitas vezes é necessário o tratamento superficial ou até mesmo a mudança do material, vale ressaltar que a prevenção/mitigação é de acordo com o mecanismo. Para Pelliccione *et al.* (2014, p. 63), a erosão de uma superfície sólida pode ocorrer em um meio líquido, mesmo sem a presença de partículas sólidas abrasivas.

2.6 Corrosão por pites

Na indústria em geral, este é um tipo de corrosão muito comum que ataca praticamente todos os metais. Pelliccione *et al.* (2014, p. 98) diz que a corrosão por pites ou puntiforme (*pitting corrosion*) é uma forma de corrosão localizada que consiste na formação de cavidades na superfície metálica.

Gentil (2018, p. 45) define a corrosão puntiforme ou por pite: “Corrosão se processa em pontos ou pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente menor que seu diâmetro”.

2.7 Corrosão por célula oclusa

Também conhecida como corrosão por aeração diferencial, ela é subdividida dependendo da morfologia, pode ocorrer por depósito ou frestas, eletrodo de mesmo eletrólito e material, mas com diferentes teores de gases dissolvidos. Segundo Gentil (2018, p. 41), nos casos práticos pilhas de aeração diferencial não se formam com metais

inertes, mas com metais ativos, como ferro, zinco, alumínio, aços inoxidáveis etc. Nesses casos, a reação anódica no compartimento menos aerado é a oxidação do próprio metal.

2.8 Corrosão por bissulfeto de amônio

É um tipo de corrosão que afeta principalmente o aço carbono, também pode causar a corrosão-erosão, todos os equipamentos que operem com água e H_2S e NH_3 . Pellicione *et al.* (2014, p. 116) define como uma corrosão que ocorre em unidades que operem em meios contendo água, H_2S e NH_3 , por exemplo, água ácida.

3 | METODOLOGIA

Os dados qualitativos e amostras foram coletadas junto ao poço de petróleo no campo maduro no estado de Sergipe, município de Carmópolis, as amostras foram tratadas e analisadas em laboratório disponibilizados pela instituição. Os resultados foram analisados com auxílio de diversos softwares como Word, Excel, Power Point e Match!, entre outros. Com o objetivo de verificar o tipo do solo na superfície de contato com o revestimento e a área em torno do mesmo foi utilizada a técnica de difratometria de raios X (DRX) para a determinação das fases cristalinas de duas amostras, denominadas por 1 (Amostra 1), que foi coletada o mais próximo possível da peça estudada e 2 (Amostra 2), distante aproximadamente 1 m da peça estudada.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, será caracterizado o processo produtivo de um poço de petróleo ou gás, apresentado os resultados obtidos nas análises realizadas em laboratório e as características da corrosão associada à falha do revestimento de produção do poço em estudo.

4.1 Processo de exploração e produção do poço de petróleo ou gás

Para melhor visualização e entendimento, a Figura 2 descreve o fluxograma de forma resumida de todo o processo de exploração e produção do petróleo.

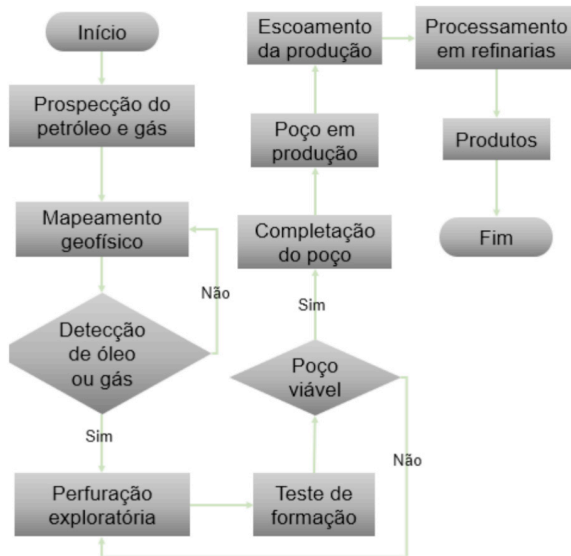


Figura 2: Processo de exploração e produção do petróleo

Fonte: Próprio Autor, 2019.

4.2 Identificação da falha

A Figura 3 apresenta um revestimento de um poço produtor que falhou por corrosão no ponto de contato com a superfície, não houve acesso de fluido entre o interior do poço e a superfície externa que poderia provocar derramamento de hidrocarboneto e a poluição do meio ambiente porque o poço estava amortecido, ou seja, a pressão hidrostática era superior à pressão da formação.



Figura 3: Revestimento de produção rasgado por corrosão

Fonte: Próprio Autor (2019)

Quando o poço está em produção, a pressão do gás no anular (no revestimento) no campo de Carmópolis pode chegar a 200 Psi (libras-força por polegada quadrada), para sabermos a força resultante desta pressão, basta aplicarmos a Equação 1:

$$P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

onde: P = pressão;

F = força;

A = área.

O diâmetro externo do poço estudado é de 7", peso 23,0 lb/pé. Aplicando a tabela de especificação de revestimento da Petrobras, temos o diâmetro interno do revestimento de estudo em 6,366", sendo assim, chegamos ao seguinte cálculo:

$$\text{Cálculo da área em pol}^2: A = \pi \times \frac{D^2}{4}$$

$$A = \pi \times \frac{6,366^2}{4}$$

$$A = 40,53 \text{ pol}^2$$

$$\text{Cálculo da força resultante em kgf: } P = \frac{F}{A}$$

$$200 \text{ Psi} = \frac{F}{40,53 \text{ pol}^2}$$

$$F = 8.106 \text{ lbf}$$

Convertendo para kgf: $8.106 \text{ lbf} \times 0,454 = 3.680 \text{ kgf}$.

Portanto, a força resultante é elevada, e poderia ocasionar sérias consequências para o ser humano. Vários fatores podem estar relacionados a esta corrosão no revestimento de produção, desde as características do fluido produzido, até os componentes presentes no solo que está em contato com o ponto de falha do revestimento de produção.

4.3 Análise do tipo de solo no ponto de contato com o revestimento

Os padrões de difração das matérias-primas são apresentados no Gráfico 1 e a porcentagem de cada fase cristalina presente nas amostras foi estimada a partir da intensidade relativa dos picos principais de cada fase.

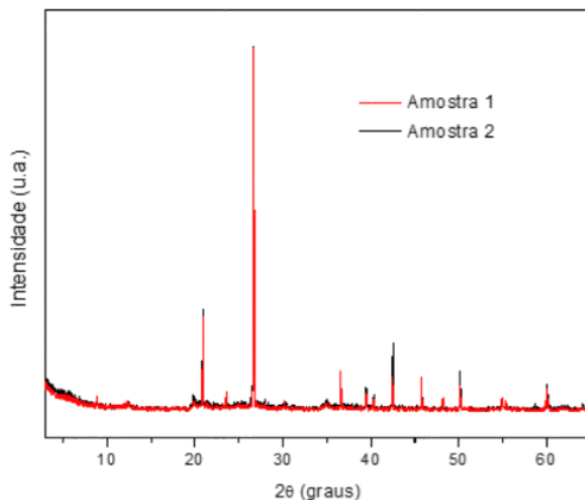


Gráfico 1: Padrões de difração de raios X das amostras

Fonte: Próprio Autor (2019).

As amostras foram analisadas através do programa Match! versão Demo, de acordo com o banco de dados da ICSD (Inorganic Crystal Structure Database) e são constituídas, predominantemente, por quartzo, caulinita, muscovita, feldspato e pequenas quantidades de carbonatos de cálcio e magnésio, comuns em grande parte da crosta terrestre, sendo os valores apresentados no Quadro 1.

Minerais (%)	Amostra 1	Amostra 2
Quartzo	57,9	57,1
Caulinita	6,2	6,4
Muscovita	11,9	11,8
Feldspato	6,2	6,2
Hematita	6,9	5,4
Carbonatos	2,8	2,9

Quadro 1: Composições mineralógicas das amostras

Fonte: Próprio Autor (2019)

A amostra é constituída principalmente do mineral quartzo, muito comum na região do campo maduro estudado. O mineral hematita apresenta-se em maior quantidade na Amostra 1.

4.4 Análise das características do fluido produzido pelo poço

O Quadro 2 ilustra os resultados das análises físico-químicas do petróleo produzido.

Componente	Resultado	Unidade	Método
Massa específica a 20° C	0,91	g/cm ³	NBR 14065
Salinidade da água	62647,00	mg/l	ASTM D512
BSW	48,00	%(V)	NBR 14647
pH	6,47	-	ASTM D1293

Quadro 2: Análises físico-químicas do fluido produzido

Fonte: Próprio Autor (2019)

Com o resultado foi possível observar que a massa específica do fluido estava dentro do previsto, por se tratar de um hidrocarboneto, o fluido é mais leve que a água doce, mas a sua densidade está diretamente ligada à presença de outros elementos, como impurezas e principalmente sais.

4.5 Verificação do tipo de corrosão associada a falha

Para a análise foi coletada uma pequena amostra da peça, realizado o polimento da superfície e em seguida submetida a análise, o resultado está expresso no Quadro 3.

Elemento	Quantidade (%)	Cu - Zn
Molibdênio	0,14	0,05
Níquel	0,78	0,20
Cobalto	0,87	0,27
Ferro	93,51	0,47
Manganês	4,20	0,22

Quadro 3: Resultado da análise de liga

Fonte: Próprio Autor (2019).

Através do resultado da análise do metal foi constatado que se tratava de um aço com um elevado percentual de manganês, seguido de cobalto, níquel e, por fim, o molibdênio. O nível de confiança do equipamento era de 95%, o resultado foi diferente

do referenciado pela norma internacional API 5 CT para grau de aço N80. Foi realizado também o ensaio dimensional da peça com o objetivo de identificar o nível de desgaste interno do revestimento, área não exposta ao oxigênio, sendo o resultado expresso no Quadro 4.

Medida (mm)	Padrão (mm)	Desgaste (mm)	Erro (mm)
159,90	161,70	1,80	0,05

Quadro 4: Ensaio dimensional do diâmetro interno

Fonte: Próprio Autor (2019).

Com o resultado foi possível constatar um pequeno desgaste de 1,11%, o que normativamente é aceitável e natural tratando de um poço que foi perfurado em 1983, sendo que entrou em produção no ano seguinte, ou seja, o poço estava em produção há 35 anos. No ensaio dimensional externo, no ponto de falha, foi registrada a medida de $(1,60 \pm 0,05)$ mm, desgaste de 80,12%, evidenciando uma corrosão severa, conforme Figura 4.



Figura 4: Amostra do ponto do revestimento que falhou

Fonte: Próprio Autor

4.6 Proposta de ações para eliminar ou mitigar as falhas por corrosão pelo mecanismo

Há diversas técnicas para evitar ou mitigar esse tipo de processo corrosivo, desde a utilização de materiais nobres (inerte a esse tipo de meio) até técnicas de revestimentos. Neste trabalho, foi limitado pela premissa que o material do poço não pode ser alterado devido a questões técnicas (solicitações mecânicas exigidas) e de viabilidade econômica (alterar projetos, materiais com custos elevados etc.). Gentil (2018) apresenta alternativas de proteção sem alteração do material-base, como:

- Revestimento com monel (liga de níquel) na faixa de mudança de potencial;
- Encamisamento com mantas de materiais poliméricos como, por exemplo, polietileno, ou com concreto, nas áreas mais críticas.

5 | CONCLUSÕES

Neste trabalho foi possível constatar que a avaliação do processo corrosivo do revestimento de produção do poço analisado ocorreu por meio do mecanismo aeração diferencial (corrosão por célula oclusa). E os dados coletados do meio em que o revestimento estava instalado favoreceu a propagação da corrosão na região de interface entre o meio não aerado (solo) e o meio aerado (atmosfera), o meio não aerado continha quartzo que favorecia a absorção de água, no qual criava um meio propício à dissolução de sais, além disso foi constatada a presença da espécie Cl^- (cloreto) que potencializava o processo corrosivo.

Verificou-se também que a morfologia da corrosão, durante a inspeção visual, era localizada, com ataque acentuado em determinadas regiões e com a presença de alvéolos e pites, característica desse tipo de mecanismo corrosivo.

REFERÊNCIAS

ACCIOLY, Ricardo de Melo e Silva; CHIYOSHI, Fernando Yassuo. **Simulando operações de manutenção em poços de petróleo**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA INDUSTRIAL, 5., 1998. Anais eletrônicos. Niterói: ENEGEP, 1998. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP1998_ART340.pdf>. Acesso em 11 maio 2019.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 6. ed. reimpressão, Rio de Janeiro: LTC, 2018.

MAIA, Rosiery da Silva. et al. **Otimização das intervenções em poços de petróleo por sondas de produção terrestre: BUSCA TABU**. In: SBPO - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 34., 2002. Anais eletrônicos. Rio de Janeiro: SBPO, 08-11 nov. 2002. Disponível em: <<http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2002/pdf/arq0033.pdf>>. Acesso em: 21 abril 2019.

PELLICCIONE, André da Silva. et al. **Análise de falhas em equipamentos de processo: mecanismos de danos e casos práticos**. 2. ed., Rio de Janeiro: Interciência, 2014.

THOMAS, J. E., **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2. ed., Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. **PCM, planejamento e controle da manutenção**. 6. ed., reimpressão. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2014.

VICTOR, Brayon et al. **Perfurações de poços de petróleo: métodos e equipamentos utilizados. Cadernos de graduação – ciências exatas e tecnológicas, Sergipe**. v. 1. n. 15. p. 103 – 108, out 2012. Disponível em:< <https://periodicos.set.edu.br/index.php/cadernoexatas/article/view/212/130>>. Acesso em 12 maio 2019.

MICRODUREZA NO PROCESSO DE SOLDAGEM POR FRICÇÃO LINEAR DA LIGA DE LATÃO BINÁRIO C260

Data de aceite: 01/11/2020

Data de submissão: 05/08/2020

Lucas Freitas de Medeiros Pimentel

Departamento de Ciências Exatas,
Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões
Santo Ângelo – RS

Monique Valentim da Silva Frees

Departamento de Ciências Exatas,
Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões
Santo Ângelo – RS

Ariane Rebelato Silva dos Santos

Departamento de Ciências Exatas,
Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões
Santo Ângelo – RS

RESUMO: O processo de soldagem por fricção linear, conhecido pelo termo em inglês Friction Stir Welding (FSW), foi desenvolvido no Instituto de Soldagem de Cambridge, na década de 1990. A solda por fricção classifica-se como um processo de soldagem por pressão e consiste na junção de materiais similares ou dissimilares sob baixa temperatura ainda no estado sólido dos metais. Esse processo consiste no deslocamento de uma ferramenta rotativa com perfil geométrico característico que gera calor a partir do atrito entre a ferramenta e a peça (metal base). Essa ação induz no metal base o aumento da ductilidade e escoamento no sentido do centro

da ferramenta formando a junta soldada. O objetivo deste estudo foi analisar a microdureza no processo de soldagem por fricção linear em latão binário C260 (70%Cu e 30%Zn) avaliando as propriedades relacionadas à dureza em diferentes regiões da solda formada após o processo. Além dos ensaios de dureza, realizou-se uma análise microestrutural dos corpos soldados. Os resultados obtidos permitem uma melhor percepção do comportamento do latão binário C260 quando submetido a esse tipo de soldagem e sua capacidade de deformação em campo, bem como, gera a possibilidade de aperfeiçoamento dos parâmetros de soldagem desse processo.

PALAVRAS-CHAVE: Soldagem, Fricção Linear, C260, FSW.

MICROHARDNESS IN THE LINEAR FRICTION WELDING PROCESS OF BINARY BRASS ALLOY C260

ABSTRACT: The linear friction welding process, known by the english term Friction Stir Welding (FSW), was developed at the Cambridge Welding Institute in the 1990s. Friction welding is classified as a pressure welding process and consists of joining similar or dissimilar materials under low temperature while still in the solid state of the metals. This process consists of displacing a rotating tool with a characteristic geometric profile that generates heat from the friction between the tool and the part (base metal). This action induces an increase in ductility and flow in the base metal towards the center of the tool forming the welded joint. The objective of this study was to analyze

the microhardness in the linear friction welding process in C260 binary brass (70% Cu and 30% Zn) by evaluating the properties related to the hardness in different regions of the weld formed after the process. In addition to the hardness tests, a microstructural analysis of the welded bodies was carried out. The results obtained allow a better perception of the behavior of C260 binary brass when subjected to this type of welding and its deformation capacity in the field, as well as generating the possibility of improving the welding parameters of this process.

KEYWORDS: Welding, Linear Friction, C260, FSW.

1 | INTRODUÇÃO

A técnica de soldagem por fricção linear (FSW) tem se destacado no campo da metalurgia, sendo utilizada nos mais diversos estudos em diversos laboratórios e universidades, motivados por necessidades de ordem ambiental e energética, e mesmo sendo um processo que esteja baseado em mistura mecânica, está sujeito a influencia de variáveis determinantes para a qualidade da solda obtida. Nesse processo uma ferramenta cilíndrica rotativa não consumível, constituída por um sistema de fixação, um pino com geometrias definidas e uma base, é introduzida entre duas peças a ser soldadas, deslocando-se ao longo da junta soldada, onde o calor gerado devido ao atrito entre as peças soldadas e a base da ferramenta conduz ao amaciamento do material, que torna possível o escoamento do material ao longo da linha de soldagem. O FSW é um processo de estado sólido que permite a obtenção de soldas de alta qualidade em materiais que, normalmente, apresentam dificuldade para a realização de processos convencionais de soldagem, como é o caso do latão binário C260. Buscou-se condições ideais para aplicação do processo, valendo-se da escolha adequada dos parâmetros de soldagem, de forma que o uso do FSW seja aprimorado para metais de soldabilidade limitada e de vital importância para a engenharia e a indústria. A Figura 1 ilustra o processo FSW.

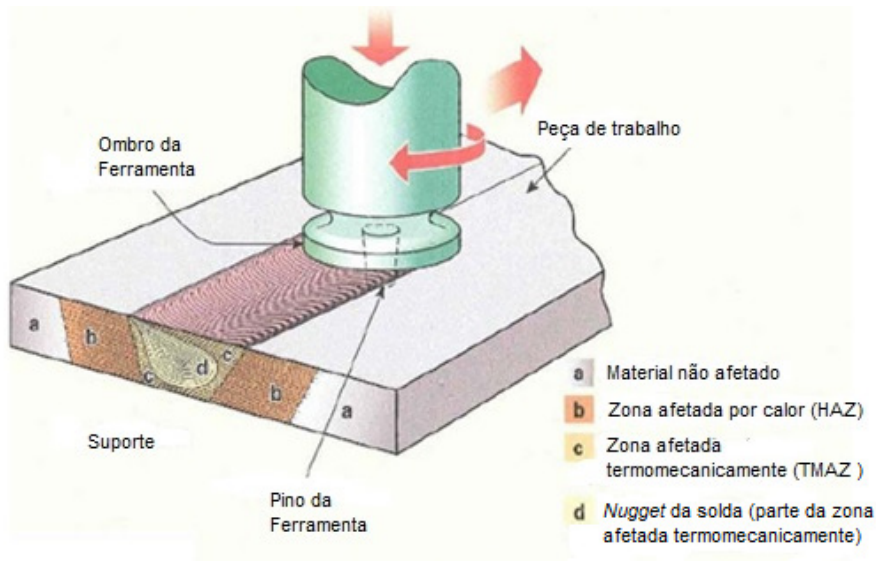


Figura 1 - O processo FSW.

Fonte: Adaptado de The WeldingInstitute(2018).

2 I METODOLOGIA

As propriedades mecânicas do latão binário C260 utilizado no experimento são mostradas na Tabela 1.

Propriedades	
Liga (ASTM)	C260
Composição Química(%)	70Cu-30Zn
Limite de resistência à tração (MPa)	330-850
Limite de escoamento (MPa)	120-540
Alongamento (%)	62-63
Dureza Brinell (HB)	65-160
Limite de resistência à fadiga (MPa)	75-200

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do latão binário C260.

A solda foi realizada na junta entre duas chapas de latão binário C260 (3x50x170 mm), com uma ferramenta de base cônica lisa fabricada em aço 1045 (Figura 2), com concavidade de 1° e 16,5 mm de diâmetro na base; pino cônico com 5,5 mm no maior diâmetro, 2 mm no menor diâmetro e 2,3 mm de comprimento, e o giro da ferramenta, no sentido horário.



Figura 2 – Ferramenta utilizada no processo

Fonte: Pimentel (2018)

A escolha do material deve-se ao fato de ser uma liga monofásica com excelente trabalhabilidade, pois apresenta uma favorável combinação de elevada resistência mecânica e ductilidade. Dentre os principais latões comercializados, o latão binário C260 possui vasta aplicabilidade em processos de conformação, particularmente na estampagem e no embutimento profundo.

Quanto a definição da geometria da ferramenta, considerou-se a espessura da chapa 3mm, visto que o pino deve ser ligeiramente inferior à espessura da chapa. Conhecendo a penetração do ombro igual a 0,3 mm, a altura da raiz da solda assume o valor de 0,4mm. O uso de uma ferramenta com base cônica dispensou o uso de ângulo de ataque da ferramenta, uma vez que a geometria da mesma não requer compensação de pressão no desenvolvimento da soldagem, o que facilita o escoamento do material.

O processo de soldagem FSW foi realizado no Laboratório de Usinagem da URI – Campus Santo Ângelo, utilizando o centro de usinagem CNC, modelo YCM-XV560A. Os parâmetros utilizados no processo são mostrados na Tabela 2.

Especificações	
Ângulo de inclinação (°)	0
Velocidade de rotação (rpm)	1600
Velocidade de avanço (mm/min)	45
Velocidade de penetração (mm/min)	8
Penetração do ombro (mm)	0,3
Tempo de aquecimento (s)	2
Altura do pino (mm)	2,3
Altura da raiz (mm)	0,4
Sentido de rotação	Horário

Tabela 2 – Parâmetros utilizados no processo.

Com o propósito de avaliar a dureza da solda, utilizou-se o microdurômetro MICROMET – 2003. Esta análise teve por objetivo determinar mudanças sensíveis nas propriedades mecânicas nas três diferentes zonas na região da solda: Material Base (MB), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e Zona Térmica e Mecanicamente Afetada (ZTMA). Os ensaios de avaliação de dureza foram executados ao longo da espessura da amostra e as indentações, realizadas na seção transversal perpendicular ao eixo da solda. Aplicou-se uma carga de teste de 300g durante 15 segundos.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

A junta obtida a partir do processo FSW é mostrada na Figura 2. A ferramenta utilizada não apresentava pino roscado e nem estrias na base, logo, o sentido de rotação não se torna um parâmetro crítico. Um fator determinante para a formação de rebarba é a profundidade de penetração do ombro, que propicia a expulsão do material proporcionalmente ao volume relativo da chapa. Nesse caso, observou-se uma maior tendência de formação de rebarba do lado do retrocesso da junta. Ambos os lados da chapa apresentaram uniformidade na solda. Desprezou-se os pontos de entrada e saída da ferramenta, correspondentes ao raio da ferramenta no início e no final da chapa, para a fabricação dos corpos de prova.

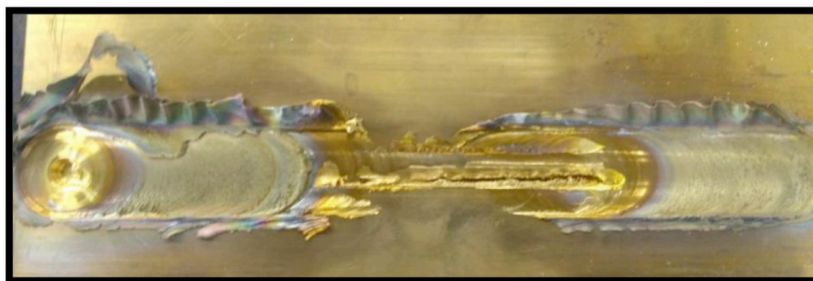


Figura 2 – Junta obtida.

Fonte: Pimentel (2018)

A determinação da microdureza permitiu identificar as diferentes zonas formadas nas amostras. Neste tipo de teste busca-se uma dureza diferente do material base, denotando as transformações de fase ocorridas no material durante o processo.

A partir dos valores obtidos foi possível observar a existência de zonas distintas na junta. A Tabela 3 mostra as durezas medidas em cada ponto ilustrado na Figura 3.

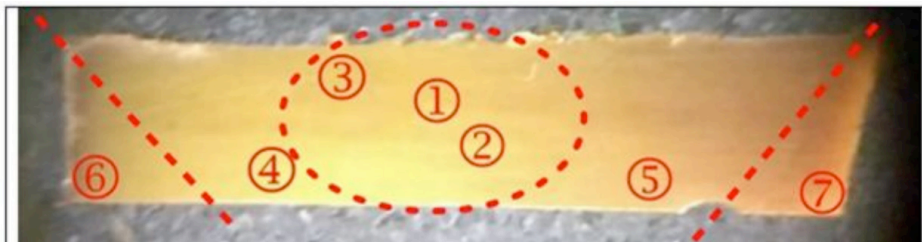


Figura 3 – Pontos de medições das durezas.

Fonte: Pimentel (2018)

Ponto	1	2	3	4	5	6	7
Microdureza (HV)	102	121	100,7	60,1	59	85,8	87
Microdureza (HV) Material Base	82,5						

Tabela 3 – Comparativo entre as microdurezas medidas com a do material base.

Os pontos 1, 2 e 3 apresentaram as maiores durezas, caracterizando a região do *nugget*; os pontos 4 e 5 alcançaram medidas menores, situadas na Zona Térmica e Mecanicamente Afetada (ZTMA), enquanto que os pontos 6 e 7 apresentaram dureza próxima do material base, situados na Zona Termicamente Afetada (ZTA). A junta obtida pode ser caracterizada de acordo com as zonas distintas identificadas a partir das medições da microdureza.

A fim de mapear os perfis de dureza, mediu-se a dureza nos pontos 8 e 9, que foram identificadas como ZTMA e ZAT, respectivamente. A Figura 4 ilustra esses pontos.

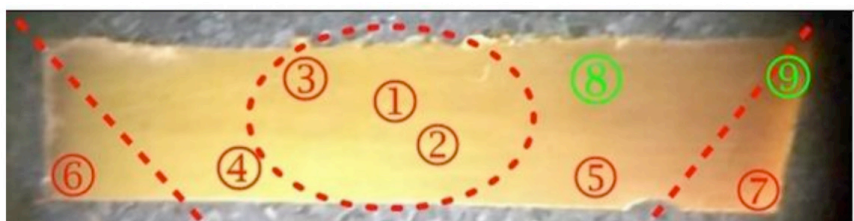


Figura 4 – Pontos adicionais 8 e 9.

Fonte: Pimentel (2018)

A média das microdurezas dentro das zonas ZTMA e ZAT são apresentadas na Tabela 4.

	ZTMA	Ponto	ZTA	Ponto	Material Base
Avanço	60,1	4	85,8	6	82,5
Retrocesso	59	5	87	7	
Média (HV)	59,55		86,4		
Lado Superior	58	8	85	9	
Lado Inferior	59	5	87	7	
Média (HV)	58,5		86		

Tabela 4 – Microdurezas nas zonas ZTMA e ZAT

A proximidade do ombro da ferramenta na região superior da solda promoveu superaquecimento da superfície da junta, o que levou a alterações morfológicas nos grãos e gerou baixos valores de dureza obtidos na ZTMA (NANDAN *et. al.*, 2008).

Uma hipótese para os baixos valores de dureza obtidos na ZTMA, é que a proximidade com o ombro da ferramenta na região superior da solda, que promoveu superaquecimento da superfície da junta, levou a alterações morfológicas nos grãos, culminando na queda nos valores da microdureza (NANDAN, 2008).

O rompimento dos corpos de prova deu-se nas áreas entre a ZTMA e ZTA, alcançando grande valor de deformação, que pode ser explicado pela baixa dureza nessa zona de transição, a exemplo da ZTMA com dureza média de 58,5 HV na região de avanço, valor ligeiramente menor que os 60,1 HV medidos no retrocesso da mesma zona. A interface de contato entre a ZTMA e ZTA na zona atingida pela deformação e alta temperatura conferiu mudanças significativas, como a baixa tensão de escoamento verificada para uma resistência à tração elevada quando comparado aos outros corpos de prova. Outra hipótese para o alto valor de deformação obtido é a diminuição da ductilidade do material da junta no decorrer do processo de soldagem, tendo em vista que o CP4 foi retirado da parte inicial da chapa, onde a temperatura de soldagem é menor e aliada às propriedades do latão C260, que apresenta alta ductilidade. Enquanto que os valores para menores deformações foram alcançados nos CPs retirados no final da chapa, em temperaturas de soldagem maiores, devido ao tempo de curso da ferramenta sobre a chapa.

Tendo em vista o sentido de rotação da ferramenta (horário), houve maior tendência de formação de rebarba do lado do retrocesso da junta, já que a base da ferramenta não é estriada. Como a ferramenta não apresenta pino roscado, nem estrias na base, o sentido de rotação não é um parâmetro crítico. O fator determinante para a formação da rebarba é a profundidade de penetração do ombro, que propicia a expulsão do material proporcionalmente ao volume relativo deste na chapa.

4 | CONCLUSÃO

A partir do ensaio de microdureza realizado neste trabalho, constatou-se um comportamento satisfatório do pino cônico, que promoveu a mistura mecânica com qualidade razoável. Observou-se ainda que a dureza medida na região do *nugget*, entre 100 e 120 HV, foi maior do que do material base (latão binário C260) igual a 82,5 HV. Esse fato indica que ocorreu recristalização e refino dos grãos nessa região, com provável aumento da ductilidade, o que vem a favorecer esse tipo de solda em serviço.

Os resultados discutidos nessa pesquisa, ainda não podem ser considerados conclusivos, uma vez que busca-se aumentar a confiabilidade dos dados realizando o processo em chapas com maiores dimensões, melhorando o controle dos parâmetros do processo e aumentando a repetibilidade dos ensaios. Sendo assim, os resultados obtidos nesse experimento, servem como evidências da eficácia do processo, além de contribuir com informações relevantes para estudos futuros. Com a intenção de estabelecer uma tecnologia viável e prática ao alcance da indústria, busca-se o aprimoramento da técnica, sugerindo melhorias constantes para bem satisfazer as necessidades de fixação de juntas dos mais variados metais.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos.

REFERÊNCIAS

NANDAN, R.; DEBROY, T.; BHADESHIA, H. K. D. H. Recent advances in friction-stir welding—process, weldment structure and properties. **Progress in material science**, v. 53, n. 6, p. 980-1023, 2008.

PIMENTEL, L. F. M. Análise e Caracterização do Processo de Soldagem por Fricção Linear (Fsw) na Liga de Latão Binário C260. **Monografia**. URI, Santo Ângelo, junho de 2018.

TWI ltd – The Welding Institute. Friction Stir Welding at TWI. Disponível em: <<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/friction-stir-welding-147>>. Acesso em 10 de junho de 2018.

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ALÍVIO DE TENSÃO EM COMPONENTES DE AÇO AAR M201 GRAU E RECUPERADOS POR SOLDAGEM

Data de aceite: 01/11/2020

Data de submissão: 04/09/2020

Natanael Pinho da Silva Alves

UEMA – Universidade Estadual do Maranhão.
Departamento de Engenharia Mecânica
São Luís – MA.
<http://lattes.cnpq.br/1396412198516033>

Ronan Geraldo Moreira

IFMA – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Maranhão. Departamento de Engenharia de Materiais.
São Luís – MA.
<http://lattes.cnpq.br/4654253345929441>

RESUMO: O processo de recuperação de componentes metálicos através da soldagem gera tensões residuais que podem influenciar diretamente na vida útil do componente. Definir o tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) ideal para o componente evita uma redução na vida útil da peça. Nesse trabalho foi avaliado o efeito do tratamento térmico de alívio de tensões após a recuperação por soldagem de componentes ferroviários. Foram utilizados componentes ferroviários fabricados em aço AAR M201 grau E para o estudo e realizado a análise de tensões residuais através do método de difração de raio-X. Foram realizados processos de pré-aquecimentos e um tratamento térmico de alívio de tensão, e verificado a influência desses no alívio de tensão. Avaliou-se o efeito de cada tratamento térmico sobre as

propriedades mecânicas por meio de ensaio de dureza, tração, impacto Charpy. Verificado um aumento característico da dureza na região da ZTA devido a não homogeneidade das regiões. As observações experimentais mostraram que quando a peça apresenta as tensões residuais aliviadas, a mesma apresenta uma redução da dureza nas regiões da solda (ZTA e metal de solda). Os resultados de dureza e de difração de raio-X convergiram para um mesmo resultado.

PALAVRAS-CHAVE: Soldagem, tratamento térmico, aquecimento, propriedades.

EVALUATION OF THE VOLTAGE RELIEF PROCESS IN AAR M201 DEGREE STEEL COMPONENTS AND WELDED RECOVERY.

ABSTRACT: The process of recovering metal components through welding generates residual stresses that can directly influence component life. Setting the optimum stress relieving heat treatment (TTAT) for the component avoids a reduction in part life. In this work we evaluated the effect of stress relief heat treatment after welding recovery of rail components. Rail components made from AAR M201 grade E steel were used for the study and the analysis of residual stresses by the X-ray diffraction method. Preheating processes and a stress relief heat treatment were performed, and their influence on stress relief was verified. The effect of each heat treatment on mechanical properties was evaluated by hardness, tensile, Charpy impact test. There was a characteristic hardness increase in the ZTA region due to the inhomogeneity of the regions. Experimental observations showed that when the

workpiece has the relieved residual stresses, it exhibits a reduction in hardness in the weld regions (ZTA and weld metal). The hardness and X-ray diffraction results converged to the same result.

KEYWORDS: Welding, treatment thermal, heating, properties.

1 | INTRODUÇÃO

Durante a soldagem as juntas soldadas sofrem mudanças estruturais e metalúrgicas, devido a distribuição de temperatura não ocorrer de forma uniforme durante o ciclo térmico da soldagem. As mudanças causadas por essa distribuição não-uniforme podem comprometer a integridade dos componentes soldados, através das tensões residuais e distorções acarretando uma falha prematura no componente (OLIVEIRA, 2009).

Regiões que possuem tensões residuais estão suscetíveis a nucleação de trincas prematuras, podendo ser propagadas por baixas tensões aplicadas ao componente soldado durante o trabalho. As tensões residuais contribuem também para a falha por fadiga e por corrosão, conseqüentemente uma redução da vida útil das estruturas soldadas quando submetidas a esse fenômeno (OLIVEIRA, 2009).

Na oficina de manutenção e recuperação, é utilizado o processo de soldagem para recuperação de componentes fundidos em aço AAR M-201 grau E (AAR, 2010). Desse modo, visando sempre a qualidade da recuperação das peças, é necessário avaliar o processo de alívio de tensão utilizado na oficina.

O presente trabalho pretende avaliar o processo de alívio de tensão utilizado atualmente pela oficina, assim comparando com o processo indicado pela AAR, e com a influência do pré-aquecimento para o alívio das tensões residuais. Dessa forma foi realizado todos os testes conforme o padrão utilizado na oficina. Para avaliar o efeito do tratamento térmico sobre as propriedades mecânicas foram realizados ensaios de dureza, tração e impacto Charpy-V. A caracterização microestrutural foi por microscopia óptica.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Para esse trabalho foram utilizados engates/ braçadeiras e partes desses componentes ferroviários, que utilizam o aço AAR M201 grau E. O aço grau E possui teores de carbono na faixa de 0,32%, e os teores de manganês mais elevados, com a possibilidade de chegar até 1,85%, mas respeitando a equação do carbono equivalente supracitada. As propriedades químicas e mecânicas do material devem estar conforme a AAR. Testes foram realizados para caracterização mecânica e química do metal de base, conforme os resultados discutidos nesse trabalho.

Inicialmente foram utilizados três engates e três braçadeiras para o trabalho (dispositivos novos), e simuladas as recuperações em regiões onde se tem a maior probabilidade de aparecimento de trincas. No segundo momento foram criados quatro

corpos de prova do mesmo componente para simular diferentes condições para a mesma peça e para ter uma superfície plana para uma maior assertividade no ensaio de difração por raio-X.

Para essa simulação foram feitos quatro corpos de prova de 150 x 200 mm para realização de um cordão de solda no mesmo. A Figura 1 mostra a região dos 4 corpos de prova. O corte foi realizado a frio por um dispositivo mecânico, do tipo serra fita para não ocorrer um aquecimento no material.

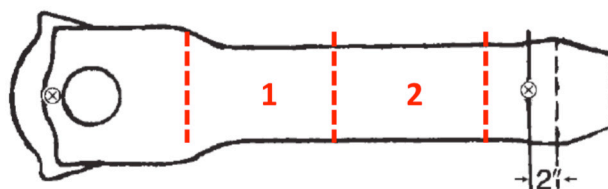


Figura 1 - Região dos corpos de prova na peça (Autor).

Os equipamentos utilizados para goivagem e soldagem foram os mesmos para todos os testes, seguindo o mesmo padrão e velocidade de soldagem que foi de aproximadamente 4,55 mm/seg. (milímetros por segundos). A máquina utilizada para realizar a goivagem foi o plasma da AIR JET 162 do fabricante Eutectic Castolin com os parâmetros conforme a Figura 2 (a). A máquina de solda utilizada foi a ArcWeld 400S fabricante Eutectic Castolin com os parâmetros de 120 amperes, conforme a Figura 4.3 (b). Os valores de tensão e corrente foram medidos como forma de redundância por um multímetro tipo alicate da fabricante Fluke modelo 376 FC, com os valores 25 V e 208 amperes, conforme a Figura 4.3 (c). Cada par de peça (engate e braçadeira) passou por um tratamento diferenciado para se ter parâmetro para comparação.

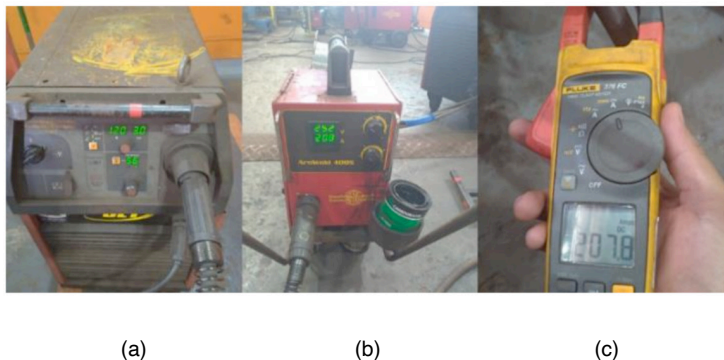


Figura 2 – Parâmetros de soldagem e goivagem utilizados (Autor).

Os componentes utilizados são engates e braçadeiras do sistema de choque e tração de vagões ferroviários. Para o trabalho foram utilizados três engates e três braçadeiras para se obter a condição real dos componentes e de recuperação. Para uma avaliação da condição inicial foi realizado a verificação de presença de trinca através de inspeção pelo método de partícula magnética.

Após a verificação de ausência de trincas, foi realizada preparação da superfície para medição da dureza nas regiões indicadas pela AAR, assim obtendo os valores reais para comparar com os padrões. Para a medição da dureza foi utilizado um durômetro portátil Hardmatic HH-411 810-298-10 - Leeb 1HL - 999HL.

Após todas as informações iniciais dos componentes levantadas, iniciou-se a goivagem nas regiões de maior probabilidade do aparecimento de trincas conforme o histórico, denominadas de regiões 19 e 22 para braçadeiras e no engate a região do furo (figura 3), para em seguida ser realizada a recuperação. A temperatura da peça antes e após a soldagem foi medida com um termômetro digital (pirômetro).

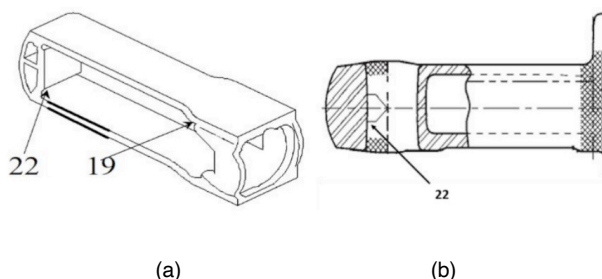


Figura 3 – Região com maior probabilidade de trincas (Autor).

O primeiro par dos componentes ferroviários não foi realizado um pré-aquecimento, mas foi utilizado o processo de alívio de tensão conforme utilizado na oficina de recuperação (oficina de manutenção), assim tem-se o real cenário dos componentes. Foram utilizados fornos elétricos presente na oficina de manutenção de truque e tração na Vale em São Luís. Como são dois fornos diferentes as temperaturas do tratamento de alívio de tensão foram diferentes para cada componente, conforme a tabela abaixo, seguindo o procedimento utilizado atualmente pela oficina.

	Temperatura inicial	Temperatura final
Engate	166°C	295°C
Braçadeira	164°C	350°C

Tabela 1 - Temperatura do alívio de tensão (Autor)

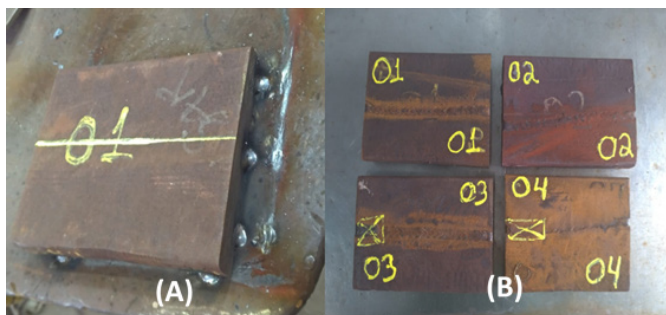
O segundo par não foi realizado pré-aquecimento, e não foi realizado o processo de alívio de tensão – em forno, para se obter um parâmetro de comparação (componente sem alívio de tensão).

No terceiro par foi realizado o pré-aquecimento com um maçarico na região a ser soldada, chegando a uma temperatura média de 276 para braçadeira e de 273 para o engate. Não foi realizado pós-aquecimento nas peças. Para avaliar o desempenho fez se apenas um pré-aquecimento antes da recuperação.

Após isso foi utilizado 4 corpos de prova, conforma a tabela/imagem abaixo.

CP	Tratamento térmico
CP01	Nenhum
CP02	560°C por duas horas (conforme AAR)
CP03	300°C
CP04	Pré aquecimento 273°C

Tabela 2 - Tratamentos térmicos nos corpos de provas (Autor)



(a)

(b)

Figura 4 – Corpos de prova (Autor).

O teste da composição química foi realizado seguindo a técnica de espectrometria ótica por centelhamento. Esta técnica permitiu caracterizar o metal de base e a solda quanto à sua composição química utilizando emissão de fótons sobre o material.

O ensaio de microdureza foi realizado nos CPs previamente preparados para o exame macrográfico. O método usado foi o Método Vickers, com carga de 50 N (HV5). O ensaio foi conduzido conforme ASTM E384-17. Foi avaliada a dureza do metal de base (MB), da zona termicamente afetada (ZTA) e do metal de solda (MS), sendo todas as medidas realizadas em triplicata.

Em cada amostra do material foi realizado o ensaio de tração seguindo os procedimentos prescritos pela norma ASTM E8/E8M-16a. Foram utilizados três corpos de

prova da região próxima a solda, para estabelecer uma média das propriedades mecânicas presentes no aço.

Para a medição das tensões residuais, foi utilizado um difratômetro de raio X modelo X'Pert³ MRD. Foi utilizado o método $\text{sen}^2\Psi$ (0.0 a 0.9), a fonte de radiação de Mo-K alpha. O intervalo utilizado foi o de 64.9° a 69.9° - 0.05° por passo 30 seg/passos e a varredura foi em modo $\Theta/2 \Theta$.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pelas Tabelas 3 e 4 pode-se fazer uma comparação entre a composição química do metal de base e da região da solda. Os valores de composição química do metal de base estão de acordo com AAR.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Cu	Al	CE	Fe
Braçadeira 01	0,11	0,46	1,5	0,006	0,015	0,34	1	0,25	0,051	0,002	0,02	0,01	0,63	Bal
Braçadeira 02	0,2	0,43	1,51	0,009	0,022	0,36	0,92	0,28	0,047	0,003	0,02	0,01	0,72	Bal
Braçadeira 03	0,1	0,41	1,37	0,015	0,013	0,34	1,09	0,26	0,054	0,002	0,01	ND	0,60	Bal
Engate 01	0,09	0,35	1,29	0,007	0,012	0,31	0,99	0,23	0,047	0,003	0,01	ND	0,55	Bal
Engate 02	0,09	0,3	1,18	0,01	0,014	0,31	1,07	0,25	0,048	0,002	0,03	ND	0,53	Bal
Engate 03	0,11	0,29	1,2	0,016	0,014	0,34	0,86	0,25	0,039	0,003	0,04	0,01	0,54	Bal

Tabela 3 - Composição química da região da solda (Autor)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Cu	AAI	CCE	FFe
Braçadeira 01	0,23	0,4	1,72	0,018	0,026	0,24	0,05	0,24	0,006	0,011	0,03	0,02	0,69	Bal
Braçadeira 02	0,26	0,43	1,82	0,017	0,016	0,42	0,04	0,25	0,006	0,012	0,04	0,05	0,78	Bal
Braçadeira 03	0,24	0,44	1,55	0,016	0,019	0,39	0,06	0,26	0,007	0,008	0,03	0,04	0,71	Bal
Engate 01	0,24	0,53	1,48	0,011	0,018	0,37	0,02	0,22	0,008	0,018	0,02	0,05	0,70	Bal
Engate 02	0,21	0,5	1,58	0,019	0,028	0,36	0,07	0,27	0,006	0,016	0,09	0,06	0,69	Bal
Engate 03	0,22	0,5	1,48	0,018	0,022	0,35	0,07	0,26	0,005	0,016	0,1	0,06	0,68	Bal
Corpo de prova 01	0,25	0,57	1,51	0,017	0,021	0,38	0,03	0,27	0,006	0,024	0,02	0,04	0,73	Bal
Corpo de prova 02	0,23	0,58	1,51	0,018	0,021	0,38	0,02	0,27	0,006	0,023	0,02	0,04	0,71	Bal
Corpo de prova 03	0,25	0,59	1,55	0,02	0,024	0,35	0,02	0,28	0,007	0,026	0,02	0,03	0,74	Bal

Corpo de prova 04	0,26	0,57	1,52	0,019	0,02	0,38	0,02	0,27	0,006	0,024	0,02	0,04	0,74	Bal
Especificado AAR M201 - E	0,32 max	1,50 max	1,85 max	0,04 max	0,04 max	E	E	E	E	E	E	E	0,88 max	Bal

Tabela 4 - Composição química do material de base (Autor)

Os valores de composição química obtidos neste ensaio estão de acordo com a norma AAR M-201 Grau E. Observou-se que a microestrutura é constituída por martensita e bainita revenidas. A região da solda possui microestrutura constituída por ferrita acicular, bainita granular e martensita. Na região da ZTA (na região de grãos grosseiros) a microestrutura característica é martensita.

O material de base das braçadeiras 01 e 03 está com os valores de alongamento, redução de área, resistência a tração e limite de escoamento conforme a norma. A braçadeira 02 não apresenta as propriedades mecânicas conforme a norma, isso ocorreu devido a peça ter um maior percentual de manganês, consequentemente aumentando o carbono equivalente da peça, assim tendo uma tendência de ser um material mais duro, menores valores de alongamento, redução de área, resistência a tração e limite de escoamento.

Na região soldada apenas a braçadeira ficou conforme a norma, isso ocorreu devido a quantidade de defeitos na região de solda podendo verificar a presença de vazios, possíveis sulfetos ou inclusões não metálicas. Com um elevado índice de defeitos na solda, o material sofreu uma redução em suas propriedades mecânicas em geral.

Para a região soldada é valido ressaltar que no ensaio de tração é tensionado simultaneamente no mínimo três regiões propriedades diferentes (metal de base, ZTA e metal de solda) (MATHERS, 2004). Os valores obtidos no ensaio não representam, particularmente e especificamente, as propriedades de nenhuma das regiões, mas sim da junta como um todo.

Os resultados de dureza da segunda análise foram apresentados em forma gráfica para facilitar a visualização de cada região. As imagens 5, 6, 7, 8 representam a durezas do corpo de prova 01, 02 ,03 e 04, respectivamente.

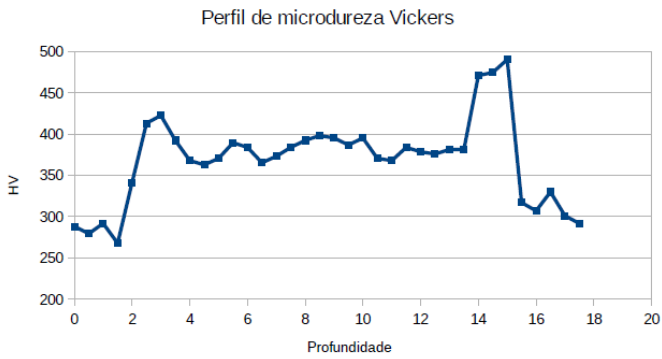


Figura 5 - Perfil de microdureza no CP01 – Sem tratamento térmico (Autor)

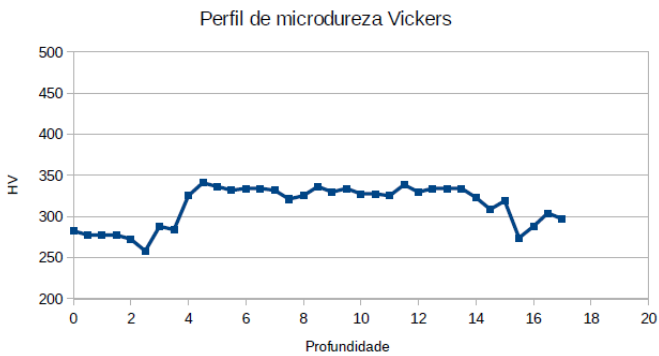


Figura 6 - Perfil de microdureza no CP02 – Tratamento de 560°C por 2 h (Autor)

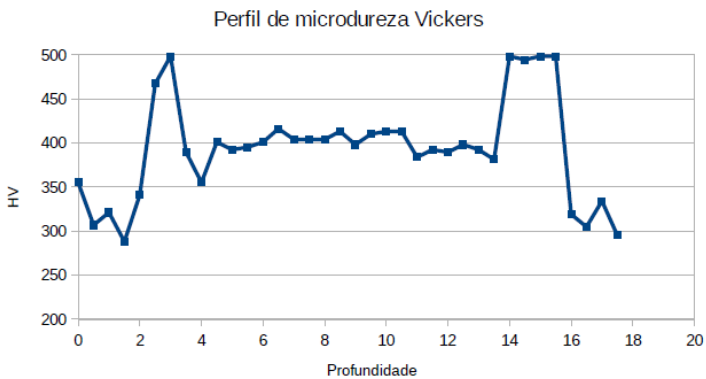


Figura 7 - Perfil de microdureza no CP03 – Tratamento utilizado na oficina 300°C (Autor)

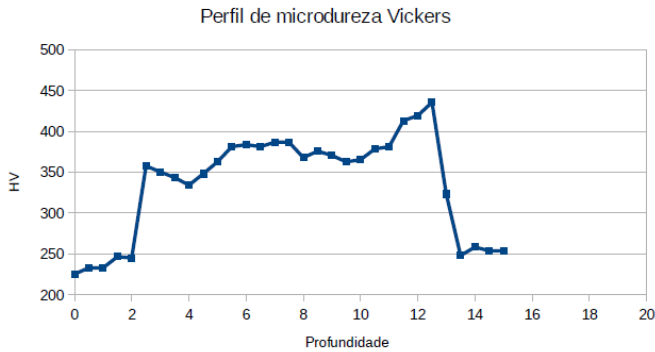


Figura 8 - Perfil de microdureza no CP04 – Com pré-aquecimento de 273°C (Autor)

Todos os componentes estão com a dureza conforme especificado pela norma (AAR), ficando na faixa de 241 a 311 HB. A partir dos resultados acima é possível observar que a dureza do corpo de prova que não passou por nenhum tratamento está na mesma faixa do CP que passou pelo tratamento térmico realizado atualmente na oficina de manutenção, chegando a uma dureza de 500 HB na região da ZTA, e em média 370 a 400 HB na região do metal de solda, caracterizando a formação de microestruturas frágeis devido a possível elevação da taxa de resfriamento durante a soldagem da peça. A maioria das normas de soldagem, como por exemplo a AWS D1.1, recomendam, em média, uma dureza máxima de 350 HB (A.W.S., 2000).

No CP 02, submetido ao alívio de tensão conforme a norma, foi perceptível a queda na dureza do material, em ambas regiões, ZTA e metal de solda. Entretanto os valores das durezas ficaram conforme os padrões que normalizam a soldagem desse tipo de componente. Essa queda da dureza está coerente com o observado por diversos autores, como (COSTA, 1993) e (EVANS, 1993).

No CP 04 é possível perceber uma queda na dureza na região da ZTA e uma leve queda na dureza da região de solda podendo ser relacionada com a redução da taxa de resfriamento causado pelo pré-aquecimento. Com a redução da taxa de resfriamento há uma redução na formação de microestruturas frágeis (ZEEMANN, 2003).

Quando comparado CP 04 com o CP02, percebe-se uma ineficiência no pré-aquecimento, o que, devido a diferentes inércias térmicas, tende a provocar temperaturas e taxas de resfriamento distintas em tais regiões de espessuras não similares, consequentemente transformando microestruturas variadas e frágeis.

Segundo (SOUSA, 2012), a tensão residual presente na peça está relacionada com a maior ou menor dureza da junta soldada se comparado com a dureza do material de base. Conforme apresentado, todos os materiais de base estão com a dureza conforme a norma, ou seja, entre 241 – 311 HB e os materiais que não sofreram alívio de tensão

apresentam uma dureza na faixa de 500 HB na ZTA, caracterizando a presença de tensão residual na peça inserida pelo processo de recuperação da mesma por soldagem.

Os resultados dos testes de tensão residual com difração de raio-x nos componentes estão representados na Figura 9 e dos corpos de prova estão na Figura 10.

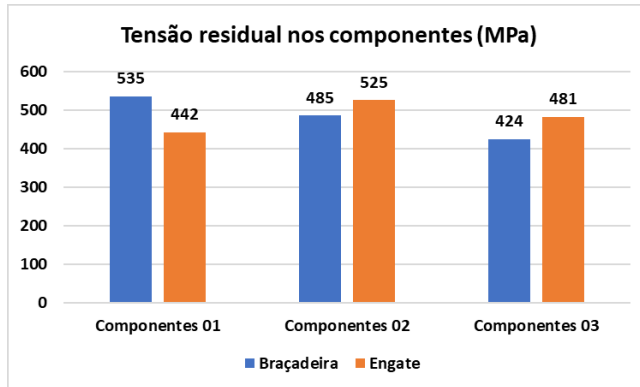


Figura 9 - Tensão residual nos componentes (MPa)

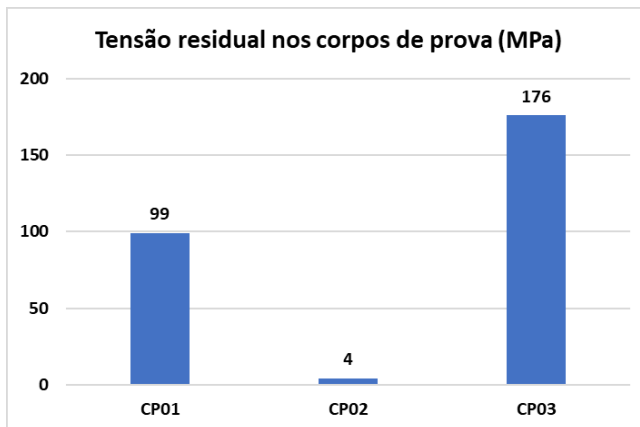


Figura 10 - Tensão residual nos corpos de prova (MPa)

Em uma análise geral, os resultados da difração de raio-X convergem com os resultados obtidos pelo resultado da dureza do material (metal de base, metal de solda e ZTA). É possível identificar uma relação direta entre a dureza da peça e a tensão residual. Os componentes 01, 02, 03 apresentaram uma tensão residual muito próxima, tendo apenas uma pequena queda devido ao tipo de tratamento. Os componentes 01 (braçadeira e engate) onde não foram realizados tratamentos, apresentaram as maiores tensões residuais, seguidos pelos componentes 02 (engate e braçadeira) onde foi realizado o processo de alívio de tensão utilizado pela oficina. Já nos componentes 03 (engate e

braçadeira) onde foi realizado um pré-aquecimento antes da soldagem, houve queda na tensão residual quando comparado com os demais avaliados.

Nos corpos de prova é possível notar uma queda brusca da tensão residual quando comparado com o componente completo (físico – peça inteira). Este fato tende a estar relacionado com a restrição criada na hora da recuperação, algo inerente à própria geometria da peça (a peça inteira tem espessuras variadas e heterogêneas, provocando maior formação de tensões residuais devido a diferença de espessuras e a baixa homogeneidade nos tratamentos, seja TTAT ou Pré-aquecimento). No CP 02 é identificado um alívio de tensão expressivo, confirmando a relação com a dureza encontrada nas peças.

4 | CONCLUSÃO

Com o presente trabalho, foi possível uma análise química, mecânica e metalúrgica dos componentes ferroviários recuperados em uma oficina de recuperação. O tratamento térmico de alívio de tensão utilizado na oficina após recuperação por soldagem se mostrou ineficiente. Assim, quando comparadas as tensões residuais dos componentes que não passaram por tratamento térmico e dos componentes que passaram pelo TTAT utilizado atualmente na oficina.

A utilização do pré-aquecimento com o intuito de reduzir as tensões residuais geradas nas peças, não apresentou um resultado satisfatório. Houve pequena redução das tensões residuais. Esse fato ocorreu devido não haver uma homogeneidade da peça, correspondente às espessuras da mesma.

A região da ZTA teve um aumento considerável da microdureza, mas com o tratamento térmico conforme indicado pela AAR, a peça sofre uma homogeneização das microdurezas ficando com os valores próximos aos recomendados pela AWS.

Quando utilizado o tratamento térmico conforme os padrões da AAR (condição ideal), as peças sofreram o alívio de tensão esperado, e as propriedades mecânicas melhoradas.

REFERÊNCIAS

AAR. "Castings, Steels", AAR MSRP Casting Details, M-201. **Association of American Railroads**, 2010.

A.W.S. **Certification Manual for Welding Inspectors**. 4ª. ed. Miami: American Welding Society, 2000.

COSTA, H. R. M. Avaliação do Efeito de Múltiplos Tratamentos Térmicos de Alívio de Tensão (TTAT) sobre as Propriedades Mecânicas e Microestruturas de um Metal de Solda Ferrítico, Rio de Janeiro, 1993.

EVANS, G. M. The Effect of Vanadium on the Manganese Containing MMA Weld Deposits. **Welding International**, v. 7, n. 6, p. 438 - 448, 1993.

MATHERS, G. Mechanical testing. **Tensile testing Part II: Welding procedure approval for**, 2004. Disponível em: <http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/jk70.html>. Acesso em: 10 outubro 2019.

OLIVEIRA, G. L. G. D. Avaliação de tensões residuais de soldagem em chapas planas de aço estrutural ASTM A516 G70. **Avaliação de tensões residuais de soldagem em chapas planas de aço estrutural ASTM A516 G70**, Fortaleza, 1 Janeiro 2009. 140.

SOUSA, D. A. D. Determinação de Tensões Residuais em Materiais Metálicos por meio de Ensaio de Dureza, São Joao Del-Rei, 13 abril 2012.

ZEEMANN, A. Info solda. **Infosolda**, 2003. Disponível em: <<https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/metal/diluio.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2019.

ESTUDO DA GERAÇÃO DE NOVOS MATERIAIS COMPÓSITOS A PARTIR DO GESSO E DO RESÍDUO DE GESSO COM ADITIVOS DESINCORPORADORES DE AR E SUPERPLASTIFICANTES

Data de aceite: 01/11/2020

Tássila Saionara Gomes Galdino

Universidade Federal do Vale do São Francisco
Juazeiro-BA
<http://lattes.cnpq.br/5646512225791324>

Pâmela Bento Cipriano

Universidade Federal do Vale do São Francisco
Juazeiro-BA
<http://lattes.cnpq.br/061826833847216>

Andréa de Vasconcelos Ferraz

Universidade Federal do Vale do São Francisco
Juazeiro-BA
<http://lattes.cnpq.br/2491927323486064>

RESUMO: Quando se fala das perdas de gesso em demolições e restos de obras, o aspecto mais preocupante é o descarte inadequado, pois, é sabido que ele é frequentemente descartado ao ar livre, podendo contaminar o solo, o lençol freático e o ar. Uma maneira de reduzir o volume de resíduo descartado inadequadamente é introduzi-lo novamente no mercado produtivo. Desta forma, neste trabalho foram produzidos blocos feitos a partir de resíduo de gesso, aditivando-os com superplastificante (dodecilbenzenossulfonato de sódio) e desincorporador de ar (dibutilftalato), com o objetivo de reduzir a porosidade do material e conseqüentemente aumentar resistência mecânica do bloco para aplicações industriais visando o desenvolvimento e a consolidação de arranjos produtivos locais na área de gesso no estado da Bahia. Assim foram

realizados ensaios de resistência mecânica à compressão, avaliação e determinação dos tempos de início, fim de pega e trabalhabilidade, além da Análise termogravimétrica (DTA/TG), do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) da Fluorescência de raios X (FRX), e estudos por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados mostraram que a melhor razão de água/resíduo foi de 0,8; e que essa gera uma resistência mecânica de 7,53 MPa e uma dureza de 16,99 N.mm⁻². Os aditivos não tiveram o comportamento esperado, o dibutilftalato (DBP) reduziu a resistência e o dodecilbenzenossulfonato de sódio (SDBS) não afetou a trabalhabilidade significativamente. As melhores condições para a produção dos blocos foram com resíduo puro e com 5% de gesso, sem a incorporação do DBP e de SDBS; os blocos de resíduo puro foram classificados, segundo a NBR 16494, como blocos de alta densidade e media dureza e os de resíduo com 5% de gesso como blocos de alta densidade e baixa dureza.

PALAVRAS-CHAVE: Compósitos, resíduo de gesso, superplastificante, desincorporador de ar, blocos de gesso.

STUDY OF THE GENERATION OF NEW COMPOSITE MATERIALS FROM GYPSUM AND GYPSUM WASTE WITH AIR-DISINCORPORATING ADDITIVES AND SUPERPLASTICIZERS

ABSTRACT: When dealing with plaster losses in demolitions and building work remains, the most worrying aspect is the inadequate disposal, because it is known that the wastes are often discarded outdoors and can contaminate soil,

groundwater, and air. One way to reduce the volume of improperly discarded waste is to introduce it back into the productive market. Thus, in this work blocks made from gypsum residue were produced, adding to them superplasticizer (sodium dodecylbenzenesulfonate) and air disincorporator (dibutylphthalate), with the objective of reducing the material porosity and consequently increasing the mechanical resistance of the block for industrial applications. That aims at development and consolidation of local productive arrangements in the gypsum area in the state of Bahia. For this, tests of mechanical resistance to compression, evaluation and determination of start, end of grip and workability times were performed, in addition to Thermogravimetric Analysis (DTA/TG), Fourier Transform Infrared (FTIR) of X-ray Fluorescence (FRX), and studies by scanning electron microscopy (SEM). The results showed that the best water/residue ratio was 0.8 that generated a mechanical resistance of 7.53 MPa and a hardness of 16.99 N.mm². The additives did not perform as expected, with the dibutylphthalate (DBP) reducing the strength and sodium dodecylbenzenesulfonate (SDBS) not significantly affecting workability. The best conditions for block production were found with pure residue and 5% of gypsum, without the incorporation of DBP and SDBS. Pure residue blocks were classified according to NBR 16494 as high density and medium hardness blocks and the residue blocks with 5% of gypsum as high density and low hardness blocks.

KEYWORDS: Composites, plaster residue, superplasticizer, disembodied air, plaster blocks.

1 | INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento urbano cresce a geração de resíduos, destes cerca de 50 a 70% é composto por Resíduos da construção civil (RCC), que mesmo sendo classificados como sendo de baixa periculosidade, causam impactos significativos devido ao seu grande volume e descarte inadequado (BREMBATTI, 2018). Quando se fala especificamente das perdas de gesso em demolições e restos de obras, o aspecto mais preocupante é o descarte inadequado, pois, é sabido que ele é frequentemente descartado ao ar livre, podendo contaminar o solo, o lençol freático e o ar (MUNHOZ et al., 2006).

Dentro do contexto de reaproveitar o resíduo de gesso, desenvolver tecnologias de reciclagem/reaproveitamento e diminuir o volume descartado de forma errada, desenvolveu-se blocos do resíduo de gesso com adição de superplastificante e desincorporadores de ar. Os superplastificante são redutores de água de amassamento da matriz e os desincorporadores de ar têm a função de reduzir a porosidade de um material (SONG et al., 2010).

Dessa forma, o objetivo geral do projeto foi agregar valor ao resíduo de gesso obtido de uma empresa de produção de pré-moldados, através da produção de blocos de vedação vertical com resíduo de gesso aditivados com o superplastificante, dodecilbenzenossulfonato de sódio (SDBS), e o desincorporador de ar, dibutilftalato (DBP).

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

1º Etapa: coleta e moagem do resíduo

O resíduo que foi usado neste trabalho é proveniente da quebra de peças de pré-moldados durante suas confecções. Ele foi triturado em moinho de bolas da marca Pavitest, por 8 horas, no Laboratório de materiais de construção da UNIVASF.

2º Etapa: Caracterização do resíduo

Caracterização do pó

A Granulometria e a massa unitária foram obtidas pelos métodos descritos na NBR 12127 (2017).

A análise química foi realizada por fluorescência de Raios X (FRX). O equipamento utilizado é da marca Shimadzu, modelo EDX 720, do Laboratório de Caracterização da UAEMa/UFCG.

A identificação dos grupos funcionais característicos dos resíduos de gesso foi possível por meio da técnica de FTIR. Para a realização das análises, 3 mg da amostra foi misturada mecanicamente com 30 mg de KBr, as pastilhas foram analisadas pela técnica de transmitância na região de 4000 a 400 cm^{-1} . O aparelho utilizado foi o Spectrum Two do laboratório de instrumental do IFSertão, Petrolina-PE.

As amostras passadas em peneira ABNT N° 200 (0,074 mm) foram submetidas à análise térmica através de um equipamento de análise simultânea DTA-TG da marca Shimadzu, Laboratório de caracterização do UAEMa/UFCG. A análise foi realizada em cadinho de alumina de aproximadamente 10 mg sob atmosfera de nitrogênio. Essas foram aquecidas de 25 até 1000 °C, com razão de aquecimento 10 °C \cdot min⁻¹.

Antes da caracterização da pasta, e a partir do resultado obtido nas análises térmicas, foi realizada a calcinação da matéria prima, a temperatura de 136 °C e por 17 horas.

Caracterização da pasta

As pastas usadas nessa etapa foram confeccionadas apenas com a massa de resíduo passante pela peneira de número 50 (0,29 mm), para as razões água/resíduo de 0,7; 0,8 e 0,9. Conforme o método estabelecido pela NBR 12128 (2017). Para a Obtenção e avaliação dos tempos de início e fim de pega, e trabalhabilidade foi usada a norma DIN 1168 (ANTUNES, 1999).

Com os resultados obtidos na caracterização da pasta e observação visual da consistência das amostras, foi determinada a razão água/resíduo que possibilite a melhor moldagem dos corpos de prova para a caracterização do estado endurecido e posteriores testes com os aditivos.

Caracterização do estado endurecido

A caracterização do material quanto à resistência mecânica à compressão foi realizada conforme a NBR 12129 (2017), com algumas adaptações. Os ensaios foram

realizados em uma máquina universal de ensaios mecânicos, Emic-DL 10000, no laboratório de ensaios mecânicos da UNIVASF, Campus Juazeiro-BA.

Os ensaios de dureza foram realizados em um equipamento desenvolvido por Lêla (2017), seguindo a NBR 12129, no laboratório de ensaios mecânicos da UNIVASF, Campus Juazeiro-BA.

Para analisar a morfologia e tamanho das partículas, foram obtidas imagens por meio do equipamento MEV, marca HITACHI, modelo TM-1000; Tabletop Microscope, localizado no Instituto de Pesquisa em Ciência dos Materiais da UNIVASF. Além das imagens, foram obtidos espectros na microanálise por energia dispersiva, por meio do equipamento de EDS, da marca Oxford (X-act), acoplado ao MEV, para observação composição química qualitativa das amostras em uma determinada região.

3º Etapa: Determinação das proporções ideais dos aditivos

Os aditivos usados nesse trabalho foram o gesso de fundição, nas proporções de 5 e 10%, superplastificante (SDBS) de 0,0 a 1,5% e desincorporador de ar (DBP) de 0,0 a 1,0%. O fluxograma da Figura 1 mostra o esquema resumido de como foi realizada essa etapa da metodologia.

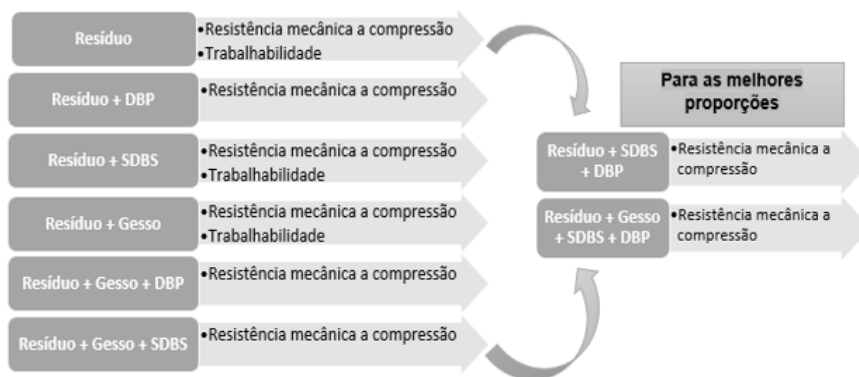


Figura 1 – Fluxograma dos testes com os aditivos.

4º Etapa: Caracterização dos blocos

Os blocos foram confeccionados em escala intermediária, com o auxílio de um molde desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Novos Materiais - GPEN, e foram caracterizados segundo a NBR 16495 (2016), que trata dos métodos de ensaio para os blocos de vedação vertical.

3 I RESULTADOS

Caracterização do pó

O pó do resíduo não atende a exigência da norma, ao que se refere a granulometria, uma vez que o percentual passante pela peneira de 0,29 mm foi de apenas 75,69% e não os 90% requeridos por norma. O resultado obtido para a massa unitária foi de 619,19 kg/m³.

A composição química do resíduo de gesso estudado, apresenta os elementos cálcio, enxofre, fósforo, silício e estrôncio, sendo os dois primeiros responsáveis por um total de 98,492% da massa do resíduo, os demais são impurezas, Tabela 1.

Elemento	% em massa
Cálcio (Ca)	65,184
Enxofre (S)	33,308
Fósforo (P)	0,849
Silício (Si)	0,462
Estrôncio (Sr)	0,196
Carbono (C)	0,000

Tabela 1: Análise quantitativa do resíduo de gesso por FRX.

Na Figura 2 são apresentados os grupos funcionais característicos do resíduo obtidos por FTIR, foi possível observar em 1623,56; 3546,89 e 3401,96 cm⁻¹ bandas de O-H, referentes as moléculas de água, uma vez que esse é um dihidrato. Bandas do grupo sulfato (SO₄⁻²) em 666,91 e 1143,31 cm⁻¹ foram identificadas para esse resíduo.

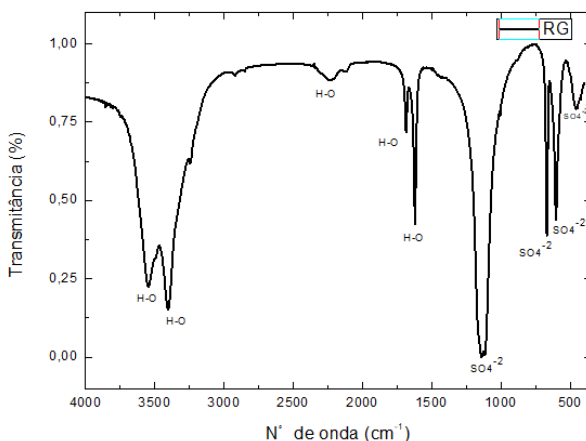


Figura 2- Espectro de infravermelho do resíduo de gesso.

A Tabela 2 mostra uma comparação entre a posição das bandas identificadas nesse trabalho e as obtidas por Prasad et. al. (2005), o que mostra que os valores obtidos na análise estão de acordo com os da literatura.

Tipos de vibração	Identificação (Resíduo)	Literatura
U2 H ₂ O	1623,56 cm ⁻¹	1621; 1685 cm ⁻¹
U3 H ₂ O	3546,89 cm ⁻¹	3547 cm ⁻¹
U1 H ₂ O	3401,96 cm ⁻¹	3405 cm ⁻¹
U4 SO ₄	666,91 cm ⁻¹	669; 602 cm ⁻¹
U3 SO ₄	1143,31 cm ⁻¹	1026 cm ⁻¹

Tabela 2: Comparação das posições de bandas observados no espectro de absorção na região do infravermelho para o resíduo de gesso conforme Prasad et. al. (2005)

Com os resultados da análise térmica se observou, um pico endotérmico a temperatura de 136,69°C, que representa uma perda em massa de 15,18%, referente a liberação da água de cristalização. Outro pico é observado a 30,72°C, que corresponde a perda de 3,91% em massa (Figura 3), que representa a reação de liberação da água livre. A perda total em massa do resíduo foi de 19,09%. Os picos observados no resíduo de gesso estudado, corroboram com os dados obtidos por Pinheiro (2011).

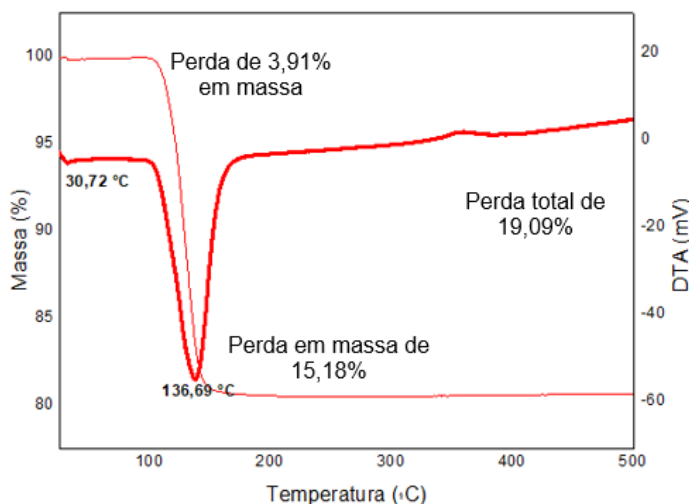


Figura 3 - Análise térmica do resíduo de gesso

Caracterização da pasta

Com o aumento da razão água/resíduo observou-se um aumento no tempo de início e fim de pega, porém a trabalhabilidade não foi afetada significativamente, como mostra a Tabela 3. Pinheiro (2011) obteve como resultados, 23 minutos para o início de pega, para o fim de 48 minutos e uma trabalhabilidade de 15 minutos, o resíduo estudado pela mesma, foi calcinado a temperatura de 150°C e pelo período de 8 horas sendo a razão água/resíduo de 0,7; neste trabalho usou-se a 0,7, 0,8 e a 0,9; porém para a razão 0,7 não foi possível determinar a trabalhabilidade, nem o início e fim da pega, pois essa se deu instantaneamente, indicando que essa não proporciona água suficiente para a formação da pasta. O que mostra uma discrepância nos resultados obtidos neste trabalho e os obtidos por Pinheiro (2011).

Razão água / resíduo	Início de pega (min)	Fim de pega (min)	Trabalhabilidade (min)
0,8	6,64 ± 0,11	11,41 ± 0,43	4,77 ± 0,53
0,9	8,53 ± 0,27	13,17 ± 0,12	4,64 ± 0,39

Tabela 3: Resultados de início, fim de pega e trabalhabilidade; razões 0,8 e 0,9.

Caracterização do estado endurecido

Foi possível observar que o resíduo possui uma resistência de 7,53 MPa e uma dureza de 16,99 N.mm⁻², a NBR 13207 (2017) determina uma dureza mínima de 20 N.mm⁻², essa não estabelece valor mínimo para a resistência mecânica a compressão.

A Figura 4 mostra a morfologia do resíduo de gesso, é possível observar que ele é formado por um aglomerado de microcristais que possuem forma alongada, com dimensões variadas, que apresentam também falhas e fraturas, além de encontrarem-se desordenados na microestrutura.

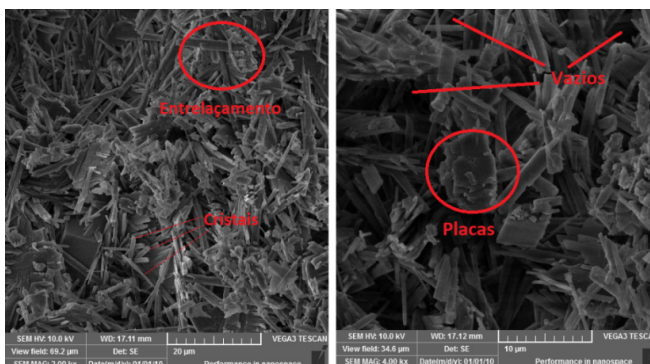


Figura 4 – Micrografias dos corpos de prova de Resíduo de gesso, razão 0,8.

Determinação das proporções ideais dos aditivos

Avaliação do comportamento do Dibutilftalato (DBP)

Nota-se que com o acréscimo de DBP há uma diminuição da resistência mecânica, o que indica que esse não afeta o resíduo da maneira satisfatória (Tabela 4), em seus estudos Silva (2007) diz que o DBP é um plastificante que eventualmente se comporta como desincorporador de ar, em argamassas de cimento o DBP atua expulsando o ar e isso aumenta sua resistência mecânica. Não foi possível constatar a mesma atuação, nas proporções estudadas, quando a matéria prima é o resíduo de gesso.

Percentual de gesso			
Percentual de DBP	0%	5%	10%
	Tensão (MPa)	Tensão (MPa)	Tensão (MPa)
0%	7,53 ± 0,9	7,82 ± 0,86	6,07 ± 0,37
0,10%	6,21 ± 0,41	6,55 ± 0,82	5,06 ± 0,90
0,30%	6,55 ± 0,53	6,92 ± 0,27	5,06 ± 0,65
0,50%	6,92 ± 0,62	5,80 ± 0,68	4,26 ± 0,63
0,70%	6,46 ± 0,71	6,17 ± 0,41	5,21 ± 0,56
0,90%	6,33 ± 0,50	6,45 ± 0,60	4,36 ± 0,65
1,00%	5,90 ± 0,93	6,05 ± 0,60	4,94 ± 0,39

Tabela 4: Resultados para a resistência a compressão para o resíduo aditivado com o desincorporado de ar e o gesso.

Ao que se refere apenas a adição de gesso ao resíduo é possível observar que a adição de 5% traz um aumento da resistência mecânica enquanto a de 10% acarreta uma diminuição dessa (Tabela 4). Com isso, concluiu-se que 0,10% de DBP foi o ideal e para o gesso esse percentual é de 5%.

Avaliação do comportamento do dodecilbenzenossulfonato de sódio (SDBS)

Para avaliar o comportamento do superplastificante, foram feitos ensaios de tempo de pega segundo a DIN 1168. Nesses testes, o resíduo foi aditivado com os percentuais de SDBS e com 5% de gesso.

Para o resíduo de gesso puro e com 5% de gesso a adição do SDBS traz um aumento no tempo de pega, porém esse aumento não é proporcional ao aumento do percentual adicionado, o que se observou é que o aditivo não afeta significativamente esses tempos, uma explicação para isso seria o baixo percentual que é adicionado a matéria prima. Os melhores resultados, para o resíduo puro e com 5% de gesso, foi o percentual de 0,5% (Tabela 5). Sobre a adição de superplastificantes ao gesso β , Pundir et. al. (2015), afirma que esses aditivos, quando utilizados em pequenas concentrações, trazem uma redução no tempo de pega da pasta, esse comportamento pode ser atribuído

a maior velocidade de cristalização/crescimento dos cristais, responsável pelo tempo de pega. Esse comportamento não foi observado quando a matriz é o resíduo de gesso, pois houve um sutil aumento no tempo de pega.

Percentual de aditivo	Percentual de Gesso					
	0%			5%		
	Início (min)	Fim (min)	Trabalhabilidade (min)	Início (min)	Fim (min)	Trabalhabilidade (min)
0%	6,64 ± 0,11	11,41 ± 0,43	4,77 ± 0,53	6,02 ± 0,21	10,88 ± 0,21	4,85 ± 0,00
0,50%	7,01 ± 0,04	15,38 ± 0,83	8,37 ± 0,79	5,99 ± 0,32	12,18 ± 0,61	6,19 ± 0,93
0,75%	6,21 ± 0,08	14,58 ± 0,14	8,37 ± 0,22	6,30 ± 0,19	14,03 ± 0,33	7,73 ± 0,52
1,00%	6,39 ± 0,27	14,51 ± 0,08	8,12 ± 0,35	6,27 ± 0,25	12,30 ± 0,49	6,02 ± 0,25
1,25%	6,92 ± 0,29	15,44 ± 0,86	8,52 ± 0,57	6,65 ± 0,45	13,06 ± 0,81	6,41 ± 0,55
1,50%	6,80 ± 0,33	14,21 ± 0,02	7,41 ± 0,35	6,97 ± 0,13	13,86 ± 0,81	6,88 ± 0,97

Tabela 5: Resultados de início, fim de pega e trabalhabilidade, para o resíduo aditivado com gesso e SDBS.

Com os percentuais do DBP e SDBS definidos, esses foram adicionados simultaneamente ao resíduo puro, ao resíduo com 5% de gesso e ao gesso de fundição, com o intuito de observar como esses influenciaram nas propriedades do resíduo e do gesso.

Incorporação simultânea dos aditivos

É possível observar que o resíduo aditivado com 5% de gesso possui a maior resistência mecânica, quando comparado aos demais, e que o com 100% de gesso possui a menor, uma justificativa para esse valor tão pequeno, é a razão água/gesso que está sendo usada nesse trabalho, ela é de 0,8; essa é adequada para o resíduo, ou seja, permite a moldagem dos blocos, porém para o gesso de fundição ela é superior a necessária (Tabela 6).

Percentual dos aditivos	Percentual de gesso		
	0% de Gesso Tensão (MPa)	5% de Gesso Tensão (MPa)	100% de Gesso Tensão (MPa)
0,00%	7,53 ± 0,9	7,82 ± 0,86	4,14 ± 0,23

Tabela 6: Resultados para a resistência a compressão para o resíduo puro, com 5% de gesso e para 100% de gesso.

A morfologia do resíduo puro e com 5% de gesso apresentam cristais entrelaçados

e vazios entre eles, esses cristais são de dimensões variadas e estão desordenados na estrutura (Figura 5.a e 5.b), quanto a morfologia do gesso de fundição é possível observar cristais alongados e bem organizado em uma direção, esses cristais possuem dimensões mais uniformes e entrelaçamento entre os cristais (Figura 5.c).

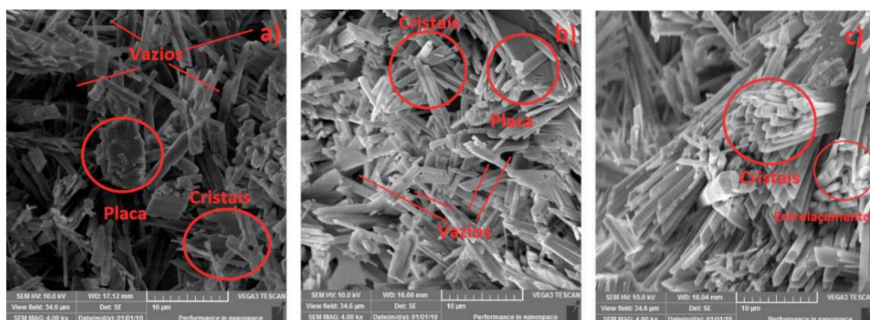


Figura 5 – Micrografias. a) Resíduo de gesso, razão 0,8. b) Resíduo de gesso + 5% de gesso, razão 0,8. c) Gesso de fundição, razão 0,8.

A resistência mecânica a compressão para as proporções ideais dos aditivos, que são, 0,10% para o DBP e 0,50% para o SDBS, separadamente e em conjunto, adicionados esses ao resíduo puro, ao resíduo com 5% de gesso e ao gesso de fundição, todos na razão 0,8. Mostraram que com a junção dos aditivos há uma redução da resistência mecânica, porém essa diminuição não foi tão significativa (Tabela 7).

Percentual dos aditivos	Percentual de gesso		
	0% de Gesso Tensão (MPa)	5% de Gesso Tensão (MPa)	100% de Gesso Tensão (MPa)
0,00%	7,53 ± 0,9	7,82 ± 0,86	4,14 ± 0,23
0,1% DBP	6,21 ± 0,41	6,55 ± 0,82	4,17 ± 0,85
0,5% SDBS	6,56 ± 0,44	6,37 ± 0,55	2,21 ± 0,83
0,1% DBP + 0,5% SDBS	6,67 ± 0,34	5,97 ± 0,71	3,51 ± 0,64

Tabela 7: Resultados para a resistência a compressão para as condições ideais dos aditivos.

A micrografia da Figura 6.a, mostra a morfologia do resíduo com 0,1% de DBP, essa é formada por cristais pequenos e desordenadamente distribuídos, não é observada a presença de entrelaçamentos. A Figura 6.b mostra a estrutura cristalina do resíduo com 0,5% de SDBS nela os cristais têm uma morfologia mais bem definida, com aparência de agulhas, de tamanhos relativamente uniformes e entrelaçados. Na Figura 6.c, temos as micrografias para a incorporação conjunta dos aditivos, nela é possível ver cristais

de tamanhos diferentes, relativamente organizados, pode-se ver os cristais pequenos e robustos que foi atribuído a adição do DBP e cristais entrelaçados observados na adição do SDBS.

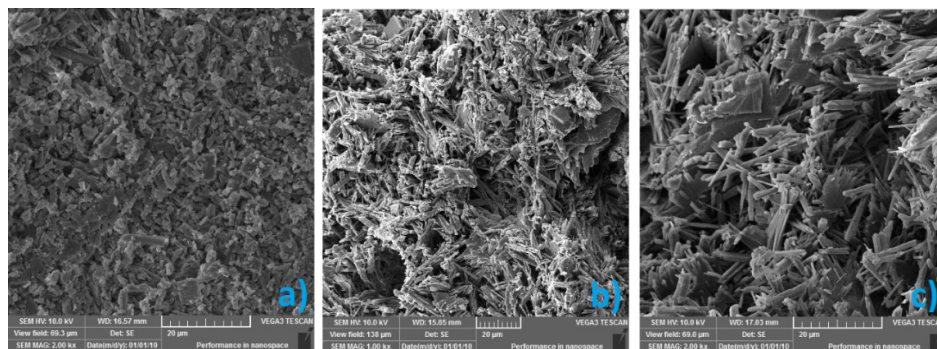


Figura 6 – Micrografias do resíduo de gesso puro, razão 0,8 a) + 0,1% de DBS. b) + 0,5% SDBS. c) + 0,1% de DBS + 0,5% SDBS

A morfologia do resíduo com 5% de gesso e incorporação de 0,1% de DBP apresenta cristais em formato de agulhas bem alinhadas, é possível ver também uma frequência maior de entrelaçamentos (Figura 7.a). Para a adição de 0,5% de SDBS a morfologia é composta por cristais de tamanhos variados e dispostos desorganizadamente, ainda assim é possível observar alguns entrelaçamentos entre cristais (Figura 7.b). Quando os aditivos são inseridos em conjunto a morfologia passa a ser composta por um arranjo mais heterogêneo com cristais curtos e longos crescendo em várias direções (Figura 7.c).

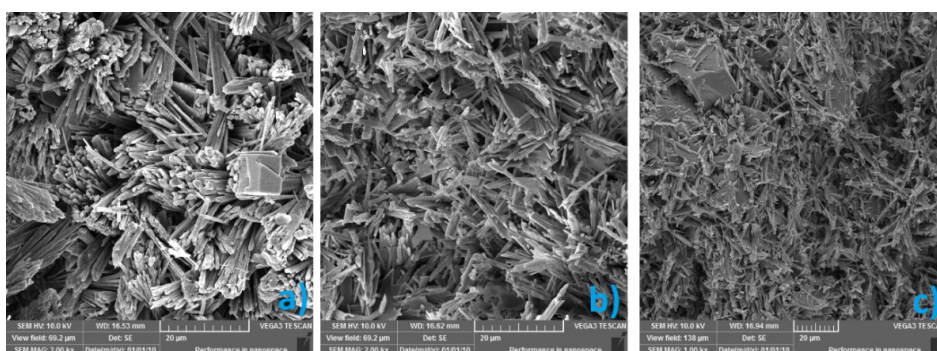


Figura 7 – Micrografias do resíduo de gesso + 5% de gesso, razão 0,8 a) + 0,1% de DBS. b) + 0,5% SDBS. c) + 0,1% de DBS + 0,5% SDBS

Produção e caracterização dos blocos de vedação vertical

Como os aditivos não trouxeram as melhorias esperadas, os blocos de vedação

vertical foram produzidos com resíduo puro (Figura 8.a) e com ele aditivado com 5% de gesso (Figura 8.b).

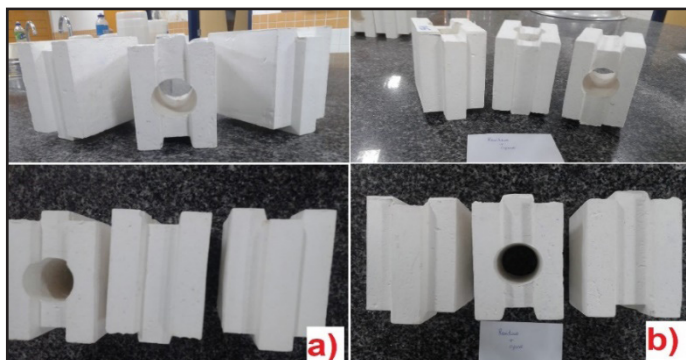


Figura 8 – Blocos de a) resíduo puro b) resíduo com 5% de gesso.

Os blocos de 100% de resíduo possuem uma dureza maior que os aditivados com 5% de gesso, a NBR 16494 (2016) trata dos requisitos para os blocos de gesso de vedação vertical, e com ela pode classificar os blocos de resíduo puro como blocos de média dureza, enquanto os aditivados com gesso são classificados como blocos de baixa dureza, sendo que os blocos de resíduo puro possuem dureza 51,62% maior que os aditivados com 5% de gesso (Tabela 8).

Percentual de gesso	Dureza (N/mm ²)	Classificação (NBR 16494)
0%	13,54 ± 2,27	Blocos de Média Dureza
5%	8,93 ± 0,85	Blocos de Baixa Dureza

Tabela 8: Resultados para a dureza dos blocos confeccionados com resíduo puro e com 5% de gesso.

A Tabela 9 mostra os resultados para a densidade dos blocos, tanto para o resíduo puro quanto para o com 5% de gesso eles são classificados como blocos de alta densidade.

Percentual de gesso	Densidade (Kg/m ³)	Classificação (NBR 16494)
0%	1187,88 ± 0,57	Blocos de Alta Densidade
5%	1121,43 ± 0,48	Blocos de Alta Densidade

Tabela 9: Resultados para a densidade dos blocos confeccionados com resíduo puro e com 5% de gesso.

Assim foi possível constatar a possibilidade da produção de blocos com 100% de resíduo e desses com um pequeno percentual de gesso, no caso 5%, o que evidenciou a possibilidade da reciclagem e reuso do resíduo de gesso.

4 | CONCLUSÕES

- Para os percentuais estudados o acréscimo de DBP gera uma diminuição da resistência mecânica;
- Com a adição do superplastificante (dodecilbenzenossulfonato de sódio) há um aumento no tempo de pega, tanto para o resíduo puro quanto para o resíduo com 5% de gesso, porém esse aumento não é proporcional ao aumento do percentual adicionado, para os percentuais estudados;
- Para a incorporação simultânea dos aditivos foi possível constatar uma redução da resistência mecânica;
- Os blocos de resíduo puro são classificados, segundo a NBR 16494, como blocos de alta densidade e média dureza, enquanto os com 5% de gesso são classificados como blocos de alta densidade e baixa dureza.

REFERÊNCIAS

ANTUNES, R. P. N.; OLIVEIRA, C. T. A.; JOHN, V. M.; **Trabalhabilidade em obra, consistência e calor de hidratação das pastas de gesso**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, III. Vitória, 1999. Anais, Antac, Vitória, v. 1, 95 – 106, 1999^a

_____. **NBR 12127: gesso para construção – determinação das propriedades físicas do pó**. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 12128: gesso para construção – determinação das propriedades físicas da pasta**. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 12129: gesso para construção – determinação das propriedades mecânicas**. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16494: blocos de gesso para vedação vertical – requisitos**. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 16495: blocos de gesso para vedação vertical – método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2016.

BREMBATTI, K. **Reciclagem obrigatória do gesso muda hábitos da construção civil**. Disponível em: <http://www.gazetadopovo.com.br/vida-e-cidadania/meio-ambiente/reciclagem-obrigatoria-do-gesso-muda-habitos-da-construcao-civil>. Acesso em: 05.04.2018

LÊLA, L. A. **Desenvolvimento de dispositivo para determinar dureza mecânica em gesso segundo NBR 12129**. Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2017.

MUNHOZ, F. C.; RENOFIO, A. **Uso da gipsita na construção civil e adequação para a p+i. XXVII encontro nacional de engenharia de produção.** Foz do Iguaçu, PR, Brasil, outubro de 2007.

PINHEIRO, S. M. de M. **Gesso Reciclado: avaliação de propriedades para uso em componentes.** 2011. 303 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2011.

PUNDIR, A., GARG, M., SINGH, R. **Evaluation of properties of gypsum plaster-superplasticizer blends of improved performance.** Journal of Building Engineering, 4, 223-230, 2015.

PRASAD, P. S. R., CHAITANYA, V. K., PRASAD, K. S., RAO, D. N. **Direct formation of the -CaSO₄ phase in dehydration process of gypsum: In situ FTIR study.** American Mineralogist, v. 90, n. 4, p. 672–678, 1 abr. 2005.

SILVA, N. S. D. **Efeito da adição de dodecilbenzenossulfonato de sódio e dibutilftalato nas propriedades de argamassa de cimento composto;** Dissertação de Mestrado em Físico-química. Universidade Estadual de Campinas - SP, 2007.

SINGH, N. B.; MIDDENDORF, B. **Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization.** Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, n. 53, p. 57 e 77, 2007.

SONG, K. M.; MITCHELL, J.; GLADDEN, L. F. **Magnetic resonance studies of hydration kinetics and microstructural evolution in plaster.** J Mater Sci., v. 44, p. 5004-5012, 2009.

Data de aceite: 01/11/2020

Data de submissão: 05/08/2020

Karla Hikari Akutagawa

Universidade Estadual do Paraná
Campo Mourão – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/9594581524483670>

Caroline da Silva Neves

Universidade Estadual do Paraná
Campo Mourão – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/7020088870841681>

Celia Kimie Matsuda

Universidade Estadual do Paraná
Campo Mourão – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/1508107647309580>

Nabi Assad Filho

Universidade Estadual do Paraná
Campo Mourão – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/7781463927058597>

RESUMO: Esta pesquisa tem como objetivo desenvolver placas de Celeron. Que são chapas de laminado duro e denso, confeccionado com tecido de algodão em camadas intercaladas com resina fenólica e moldados em alta pressão e temperatura. O mesmo é utilizado para fins estruturais, pela sua resistência ao desgaste, cisalhamento e ao choque. Para tal, espera-se obter placas de qualidade semelhante ou idêntico as chapas de Celeron industriais, com baixo custo de produção, excelentes propriedades mecânicas, baixo coeficiente de atrito, baixo

ruído, baixo peso específico e um material fácil de ser usinado. Também espera-se apresentar um estudo comparativo de realidade com uma boa aceitação comercial, passível de utilização no desenvolvimento de produtos manufaturados inovadores e tecnologia nacional.

PALAVRAS-CHAVE: Chapas de Celeron, Resina Fenólica, Termofixo, Resistência.

CELERON PLATE DEVELOPMENT

ABSTRACT: This research aims to develop Celeron plates. Which are hard and dense laminate plates, made of cotton fabric in layers interspersed with phenolic resin and molded in high pressure and temperature. It is used for structural purposes, due to its wear resistance, shear and shock. To this end, it is expected to obtain plates of similar or identical quality the plates of Celeron industrial, with low production cost, excellent mechanical properties, low coefficient friction, low noise, specific low weight and an easy-to-machine material. It is also expected to present a comparative study of reality with a good commercial acceptance, may be used in the development of innovative manufactured products and national technology.

KEYWORDS: Celeron plates, Phenolic Resin, Thermosetting, Resistance.

1 | INTRODUÇÃO

De acordo com Plastecno ([2019?]), a chapa de Celeron é um laminado duro e denso, fabricado com tecido de algodão que são colocados em camadas, que os mesmos são

impregnados com resina fenólica e moldados em alta pressão a uma alta temperatura, resultando em um material bastante rígido e resistente.

De acordo com Santos, Veronica e Peçanha (2007), as resinas fenólicas são polímeros termorrígidos e totalmente sintéticos, que são utilizadas em diversas aplicações como adesivos para compensados, recobrimento de superfícies, matrizes na fabricação de compostos, para a indústria aeroespacial, automobilística, naval, espuma para isolamento térmico e acústico.

De acordo com Hiltz, Kuzak e Watkus (2001), a degradação da resina fenólica produz um material carbonizado que resulta em taxas muito baixas de espalhamento de chamas visto em comparação com resinas poliésteres.

O calor e a pressão quando aplicados simultaneamente às camadas gera uma reação química, ou seja, polimerização, que ocorre um aglomerando as camadas em uma massa sólida e compacta (VICK, 2017).

De acordo com a Vick (2017), por ser um produto termofixo é importante saber a sua definição do termo termofixo que é um material que após aplicado calor e pressão, tornase permanentemente rígido e não podendo posteriormente ser termo formado.

A placas de Celeron é utilizada para fins estruturais, por causa da sua alta resistência ao desgaste, ao cisalhamento e ao choque (IMPAKTTO, [2019?]).

As vantagens das placas de Celeron é o baixo peso específico, apresenta uma elevada resistência mecânica, usinagem fácil e ágil, um material elástico, consequentemente silencioso e livre de vibração, indeformável e resistente às formas dadas, não é higroscópico, resistente a água do mar, resistente ao óleo e ao álcool, resistente a ácidos e alcalinos de baixa concentração, resistente à corrosão, elevada tolerância térmica até 120°C, resistente a mudanças bruscas de temperatura, não é inflamável, e é eletro-isolante para baixa tensão (INCOMPLAST, [2019?]).

A chapa de Celeron se diferencia de acordo com a malha de tecido utilizado, que varia de grosso, média, fino e extrafino. As placas de malha grossa são muito utilizadas na indústria, no entanto quanto mais fina for a malha, melhor será o seu acabamento na peça (VICK, 2017).

De acordo com Vick (2017), o laminado de Celeron se difere de acordo com a malha do tecido que é utilizado, que varia de extrafino, fino, médio e grosso. Cada malha tem a sua estrutura definida de acordo com o quadro 1:

Tipos de Celeron	Fios/cm ²	Camadas/mm de espessura
Extrafino	60	5,6
Fino	45	3,1
Médio	34	2,4
Grosso	22	1,8

Quadro 1: Tipos de Celeron
Fonte: Vick, 2017, (adaptado).

Há uma linha especial de laminado industrial que é fabricada com reforço de tecido de fibras naturais inorgânicas, e resina fenólicas, em que tem uma grande importância industrial devido às propriedades físicas que não estão presentes em laminados de fibras orgânicas, como em mínima variação dimensional a temperaturas mais altas e durabilidade aliada a baixo coeficiente de atrito. Esses reforços são impregnados sobre pressão e calor em laminados com características desejáveis, as mais utilizadas são fenólicas, melamínicas e de epóxi, todas em forma líquida (VICK, 2017).

Os laminados industriais apresentam as seguintes propriedades (VICK, 2017):

- Mecânicas, que são laminados de tecidos selecionados para resistir a choque de cargas elevadas e ao desgaste, são utilizados tecidos mais finos que resultam numa chapa com maior precisão e melhor acabamento;
- Químicas, são laminados fenólicos que normalmente não são atacados com solventes como álcool, éter e derivados de refino de petróleo, apresentam resistência a baixa concentração de ácidos inorgânicos e ácidos orgânicos como cítricos, maleico, acético e láctico, no entanto são atacados por ácidos oxidantes, como os álcalis fortes;
- Térmicas: são laminados em papéis ou tecidos de algodão que podem ser usados intermitentemente a 90 °C a 130 °C. Os laminados com calor acima de 100 °C podem sofrer a sua ação;
- Físicas: é um material que apresenta alta elasticidade, sendo possível trabalhar com tolerâncias maiores, seu coeficiente térmico de expansão é de 3 a 5 vezes mais alto do que o aço;
- Elétricas: a sua resistência elétrica varia devido a configuração dos eletrodos, visto em que o isolante é ensaiado;
- Armazenamento: por ser um material significativamente sensível a umidade, recomenda-se o armazenamento em lugares secos.

Dependendo da resina, o reforço empregado e o processo de laminação utilizada podem variar as propriedades dos laminados, visto que os valores de suas características são típicos. Já a escolha do laminado adequado para um uso específico é um problema de engenharia (VICK, 2017).

A aplicação da placa de Celeron varia conforme o aditivo utilizado, que pode variar em mecânica, grafitado ou elétrico. O mecânico pode ser aplicado para engrenagens anéis, polias, palhetas de bombas a vácuo e raspadores. O grafitado pode ser aplicado para buchas, mancais, espaçadores, guias de colunas ou até para peças que trabalham em ambientes onde exista dificuldade de acesso ou restrição a uso de lubrificantes. E o elétrico que pode ser aplicado para painéis e quadros elétricos, tirantes e porcas para transformadores elétricos (CELPAN, [2019?]).

Segundo Borges (2004), no Brasil são poucas as empresas que utilizam resinas fenólicas, que é um processo extremamente limitado, pois ainda não há tecnologia no país para o desenvolvimento destas resinas o que necessita de sua importação, o que torna o processo muito caro e em alguns casos inviável financeiramente.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos do projeto, ou seja, desenvolver placas de Celeron, serão realizadas as seguintes etapas:

- Revisão bibliográfica, que tem como objetivo coletar informações sobre os tipos de placas e chapas de Celeron fabricadas, as suas características e propriedades, as técnicas utilizadas na sua fabricação e materiais que são utilizados.
- Planejar metodologias, tipos de materiais e quantidade de materiais que serão necessários para a confecção das placas de Celeron.
- Para a confecção das placas de Celeron será desenvolvido uma prensa hidráulica com chapa aquecedora no Laboratório de Química Aplicada (LQA) e no Laboratório de Física Aplicada (LFA) na Universidade Estadual do Paraná – Campus de Campo Mourão.

Assim auxiliando na sua montagem, serão realizados testes confeccionando placas de Celeron, analisando o comportamento da máquina de prensa hidráulica com chapa aquecedora e o resultado das primeiras amostras se atendem as características e os tipos das placas de Celeron que são comercializadas no mercado, com esses resultados será possível ajustar e evitar possíveis defeitos e problemas.

- Para a confecção das placas de Celeron será necessário utilizar e comprar tecidos de algodão, resinas fenólicas e desmoldante.
- Para os testes será confeccionado a placa de Celeron de malha média.
- Para esse tipo de placa de Celeron será utilizado malha média, de 25 a 35 fios/cm².
- Processo de confecção da placa de Celeron:
 - Serão confeccionadas em uma forma de ferro de tamanho de 30 cm x 30 cm.
 - Será usado um desmoldante na forma para que a placa não grude e facilitando a sua retirada da forma.
 - O tecido de algodão e a resina fenólica serão colocadas em camadas na forma, que impregnará laminada a alta temperatura (120 °C a 130 °C) e pressão por meio da prensa hidráulica com chapa aquecedora, por um intervalo de tempo que será definido conforme a confecção das amostras.
 - A pressão irá variar com o tipo de placa que será confeccionada, sendo elas, malha

média, fina e extrafina.

- Depois de dado o intervalo de prensa, a forma será deixada em descanso para ser desinformada.

- Após desinformada a placa será analisada quanto ao seu desempenho, de acordo com este ensaio:

- Ensaio mecânico de resistência à flexão ou resistência à tração na flexão, em placas que serão realizados em conformidade com a NBR 12775:1992.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o desenvolvimento deste projeto de pesquisa, espera-se a confecção de placas de Celeron de malha média a fim de obter placas de qualidade semelhante ou idêntica as placas e chapas de Celeron industriais com excelentes propriedades mecânicas, baixo coeficiente de atrito, baixo ruído, baixo peso específico e um material fácil de ser usinado. Espera-se que esta pesquisa traga benefícios expressivos, tornando o processo de produção com baixo custo de produção e resultando em boa aceitação comercial, ou seja, passíveis de utilização no desenvolvimento de produtos manufaturados inovadores e tecnologia nacional.

4 | RESULTADOS ESPERADOS

A pesquisa está em andamento, por isso não foram alcançados os resultados desejados, no entanto, é importante salientar que os próximos passos será a confecção das placas de Celeron de malha média, e a realização de testes, a fim de analisar a sua resistência, visto que já foi realizado um levantamento bibliográficos acerca da teoria necessária para o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR – Norma Brasileira Registrada 10. 004. Resíduos Sólidos: Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12775:1992.** Rio de Janeiro.

BORGES, Sandro Gasparetto. **Síntese e caracterização de resinas fenólicas líquidas do tipo novolaca aplicáveis no processo de pultrusão.** 2004. Trabalho para obtenção do título de Mestre em Engenharia (Mestre em engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/29362/000456883.pdf?sequence=1>. Acesso em: 21 mar. 2019.

CELPAN. **Chapa de Celeron.** [S. I.], [2019?]. Disponível em: <https://www.celpan.com.br/borracha/celeron/chapa>. Acesso em: 15 mar. 2019.

IMPAKTTO. **Chapa de Celeron**. São Paulo - SP, [2019?]. Disponível em: <http://www.impactto.com.br/chapa-celeron.php>. Acesso em: 15 mar. 2019.

INCOMPLAST. **CELERON**. . [S. l.], [2019?]. Disponível em: <https://incomplast.com.br/celeron/> Acesso em: 25 ago. 2019.

Hiltz J.A.; Kuzak S.G., Waitkus P.A.. **Appl. Polym. Sci.** 2001.

PLASTECNO. **Chapas de Celeron**. [S. l.], [2019?]. Disponível em: https://plastecno.com.br/produto/chapa_de_celeron.php. Acesso em: 16 mar. 2019.

SANTOS , Alessandra M. dos; CALADO, Verônica M. A.; PEÇANHA, Ricardo P. ESTUDO DO CICLO DE CURA DE RESINAS FENÓLICAS TIPO RESOL. **Anais do 9o Congresso Brasileiro de Polímeros**, [S. l.], 2007. 9o Congresso Brasileiro de Polímeros.

VICK. **Revisão 2.3**. [S. l.], 27 out. 2017. Disponível em: <https://www.vick.com.br/datasheets/datasheet-celeron.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2019.

CAPÍTULO 10

PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CATALISADORES METÁLICOS SUPOSTADOS EM ALUMINA PARA OBTENÇÃO DE BIODIESEL

Data de aceite: 01/11/2020

Data de submissão: 12/08/2020

Normanda Lino de Freitas

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Programa de Pós- Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEMat),
Campina Grande – PB
<http://lattes.cnpq.br/0644427640208395>

Talita Kênya Oliveira Costa

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Química (PPGEQ), Natal – RN
<https://lattes.cnpq.br/5027398357342150>

Joelda Dantas

Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER), João Pessoa – PB
<http://lattes.cnpq.br/0835933416564294>

Elvia Leal

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEMat),
Campina Grande – PB
<http://lattes.cnpq.br/3139929105219822>

Julyanne Rodrigues de Medeiros Pontes

Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEMat),
Campina Grande – PB
<http://lattes.cnpq.br/9130580952795399>

Pollyana Caetano Ribeiro Fernandes

Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER), João Pessoa – PB
<http://lattes.cnpq.br/8579267075943767>

RESUMO: No processo de síntese de biodiesel, catalisadores heterogêneos apresentam resultados muito satisfatórios, menor poluição e maior facilidade de separação do catalisador se comparado ao respectivo processo que utiliza os catalisadores homogêneos. O estudo apresentado neste Capítulo foi no sentido de mostrar a influência de catalisadores compostos por uma fase ativa contendo níquel (Ni) e cobalto (Co) suportados em alumina (Al_2O_3), pelo método de impregnação por via úmida, na transesterificação do óleo de soja por rota metílica para obtenção de biodiesel. Após as respectivas impregnações, os materiais foram caracterizados por DRX, distribuição granulométrica, análise textural, EDX e submetidos a testes catalíticos de bancada. Os resultados apresentaram a presença da fase cristalina estável Al_2O_3 , e após a impregnação por via úmida, observou-se a formação das fases secundárias de NiO e NiAl_2O_4 para a alumina impregnada com Ni, e Co_3O_4 e CoAl_2O_4 para a alumina impregnada com Co. Houve uma diminuição dos aglomerados com a incorporação dos metais. A cromatografia apresentou conversões eficientes para a alumina com metais impregnados e que o aumento do tempo reacional estudado não interferiu.

PALAVRAS-CHAVE: Alumina, Impregnação de metal, Catálise heterogênea, Transesterificação, Biodiesel.

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF METAL CATALYSTS SUPPORTED ON ALUMINA TO OBTAIN BIODIESEL

ABSTRACT: In the process of biodiesel synthesis, heterogeneous catalysts present very satisfactory results, less pollution and easier separation of the catalyst when compared to the respective process that uses homogeneous catalysts. The study presented in this Chapter was to show the influence of catalysts composed of an active phase containing nickel (Ni) and cobalt (Co) supported on alumina (Al_2O_3), by the wet impregnation method, in the transesterification of soybean oil by methyl route to obtain biodiesel. After the respective impregnations, the materials were characterized by XRD, particle size distribution, textural analysis, XRF and catalytic test bench. The results showed the presence of the stable crystalline phase Al_2O_3 , and after wet method impregnation, the formation of secondary phases of NiO and NiAl_2O_4 was observed for alumina impregnated with Ni, and Co_3O_4 and CoAl_2O_4 for alumina impregnated with Co. There was a decrease in agglomerates with the addition of metals. Chromatography showed efficient conversions for the alumina with impregnated metals, and that the studied reaction time increase did not interfere.

KEYWORDS: Alumina, Metal impregnation, Heterogeneous catalysis, Transesterification, Biodiesel.

1 | INTRODUÇÃO

Vivemos em um mundo no qual a questão energética ganha atenção e importância crescente. O amplo consumo de combustíveis fósseis, sobretudo o petróleo, caminha para um impasse tanto econômico quanto político, pois suas reservas estão se esgotando, bem como ambiental, uma vez que seu uso reflete no aquecimento global (Mezalira, 2011; Ogunkunle e Ahmed, 2019).

A maioria dos especialistas, além das próprias empresas petrolíferas estão convencidos de que, mantidos os atuais padrões de consumo, as reservas disponíveis de petróleo não suprirão a demanda em médio prazo (Mezalira, 2011). A realidade é que hoje só se descobre um barril de petróleo novo para cada quatro que são extraídos e consumidos (Correia, 2007).

O outro impasse para o amplo consumo de combustíveis fósseis derivados do petróleo é o impacto na qualidade ambiental. A poluição do ar, as mudanças climáticas, os derramamentos de óleo e a geração de resíduos tóxicos são resultados do uso e da produção desses combustíveis (Ogunkunle e Ahmed, 2019).

Assim como o álcool, o biodiesel vem sendo bastante estudado devido a sua enorme contribuição ambiental, com a redução qualitativa e quantitativa dos níveis de poluição ao ambiente. O biodiesel pode ser feito a partir de qualquer óleo vegetal, a exemplo dos óleos de soja, pinhão, palma, girassol, milho, amendoim, colza e caroço de algodão. Além de óleos vegetais, podem ser utilizadas também outras fontes como gordura animal, resíduos de óleo de frituras, graxas e algas. Devido a isso, o biodiesel, considerado um combustível renovável, passou também a ser conhecido como diesel verde. Os principais

processos usados para converter óleos vegetais são: diluição, pirólise, microemulsificação, esterificação e transesterificação. Dos vários métodos disponíveis para produção do biodiesel, a transesterificação de óleos e gorduras é o método mais comum (Ranganathan et al., 2008; Dantas et al., 2019; Karthikeyan et al., 2020).

Com base nessas considerações, o foco desse trabalho foi investigar o comportamento de diferentes catalisadores heterogêneos, preparados pelo método de impregnação úmida por reação de transesterificação para produção de biodiesel. A escolha do catalisador de níquel e cobalto suportado em alumina ($\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3$) como principal material de estudo, foi devido a sua ampla utilização industrial.

2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biodiesel

No fim do século XIX, Rudolph Diesel, inventor do motor diesel, utilizou em seus ensaios petróleo cru e óleo de amendoim. Ele acreditava que esse motor poderia ser alimentado com óleos ou gorduras e contribuir para o desenvolvimento da agricultura nos países que os utilizassem. No entanto, devido ao baixo custo e à alta disponibilidade do petróleo na época, este passou a ser o combustível preferencial nesses motores (Suarez e Meneghetti, 2007).

Entretanto, no século XXI diante da possível escassez de fontes fósseis de energia, do aumento do preço do petróleo e dos problemas ambientais ocasionados pela emissão de gases poluentes observou-se uma busca por novas fontes energéticas menos poluentes e renováveis, os biocombustíveis (Hoang et al., 2021).

O biodiesel é um combustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição compressão ou, conforme regulamentado, para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil (Brasil, 2005). A inserção do biodiesel na matriz energética brasileira ocorreu em 2005 através da lei 11.097, que autorizou a mistura de 2% de biodiesel ao óleo vegetal (B2), que passou a ser obrigatória no ano de 2008. Em 2020 a mistura chegou a 12% de biodiesel no diesel (B12).

O biodiesel é geralmente produzido a partir de metanol e óleos vegetais, como o de soja, utilizando ácidos (H_2SO_4) ou bases (NaOH) como catalisadores (Leal *et al.*, 2019). Os catalisadores básicos, devido à formação de sabões, são associados à presença de emulsões no final da reação, tornando difíceis as etapas de purificação do biodiesel formado. Essa dificuldade é eliminada com o uso dos catalisadores ácidos que evitam a formação de sabões. No entanto tais sistemas catalíticos são relacionados à corrosão e apresentam atividades catalíticas muito inferiores àquelas verificadas nos sistemas básicos. Assim, um dos desafios tecnológicos para o desenvolvimento da indústria de biodiesel é a procura por

sistemas catalíticos alternativos que evitem a formação de emulsões e apresentem alta atividade (Barbosa, 2009; Gupta et al., 2020).

Embora catalisadores homogêneos apresentem maior desempenho na transesterificação e esterificação para a obtenção de biodiesel. Os problemas associados com os catalisadores homogêneos estão no elevado consumo de energia, formação de subprodutos indesejados como sabão pela reação de ácidos graxos livres, alto custo no processo de separação do catalisador homogêneo da mistura reacional e grande quantidade de geração de efluentes durante a separação e limpeza do catalisador e os produtos. Tais problemas são minimizados com o uso de catalisadores sólidos, que facilitam a separação dos produtos, e em muitos casos, podem ser regenerados e reutilizados, sendo assim, o emprego de catalisadores sólidos com intuito de aprimoramento do processo de produção de biodiesel é considerado a alternativa mais promissora, e por isso, tem sido amplamente estudada, o que representa importante impacto nos custos de produção (Dantas et al., 2017).

2.2 Efeito do metal

A primeira etapa no desenvolvimento de um catalisador corresponde à escolha da fase ativa a ser empregada. Catalisadores metálicos são comumente utilizados em reações envolvendo hidrogênio e hidrocarbonetos, sendo o metal o principal componente do catalisador responsável pela ocorrência da reação química. Tal deve-se ao fato deste tipo de substâncias adsorverem facilmente em superfícies metálicas (Jeon et al., 2019).

Os metais do grupo VIII são os mais comumente empregados, devido à capacidade que possuem de quebra das ligações interatômicas na molécula do álcool. Além disso, a utilização de catalisadores a base de metais não nobres, como Ni e Co, se torna atraente em função da disponibilidade e custo acessível desses metais. O níquel é essencialmente um catalisador de metanação, enquanto que, cobalto produz principalmente hidrocarbonetos de cadeia linear (Vasić et al., 2020).

2.3 Efeito do suporte

Catalisadores têm como principal função a manutenção da área específica do componente ativo, enquanto o suporte desempenha papel de suma importância ao assegurar maior estabilidade térmica, manter os cristais do material distantes um dos outros, ajudando assim na remoção do coque. A escolha do suporte deve levar em conta a possível atividade catalítica do suporte, área superficial, porosidade, estrutura, modificação eletrônica e interação metal-suporte. O suporte precisa ainda apresentar uma morfologia que facilite o contato entre os reagentes e a fase ativa, bem como uma fácil remoção dos produtos formados (Freitas et al., 2019; Simões et al., 2020; Dantas et al., 2019).

Alumina (Al_2O_3) constitui um material de extrema importância à inúmeras reações catalíticas, podendo atuar como catalisador ou como suporte catalítico para outros metais.

Ela é muito utilizada na catálise, pois possui alta área superficial, preferindo boa dispersão do metal impregnado, além de ser um suporte relativamente barato e estável a temperaturas elevadas. É um suporte amorfo e apresentando-se sob diferentes graus de hidratação, as aluminas podem ser obtidas com diferentes propriedades morfológicas e texturais. Os materiais mais utilizados na catálise são a α e γ - Al_2O_3 (Kurahde e Dalai, 2018; Freitas et al., 2019; Simões et al., 2020; Yu et al., 2020).

3 | MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Obtenção da Alumina

A alumina foi sintetizada por meio da reação de combustão, tendo como reagentes o nitrato de alumínio nonahidratado ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) e a ureia ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$), de acordo com a metodologia adotada por Freitas et al. (2006), Silva et al. (2015) e Arimatéia et al. (2019).

3.2 Obtenção das aluminas impregnadas

O processo de impregnação confere um maior poder catalítico aos catalisadores heterogêneos. Este fato é evidenciado quando observamos os elevados resultados de conversão obtidos nos sistemas catalíticos impregnados utilizados no processo de transesterificação (Boz et al., 2009).

O processo de impregnação utilizado foi por dispersão física via úmida (Xie et al., 2006) no preparo dos catalisadores $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3$. Para tanto a fonte precursora será o nitrato de níquel hexa-hidratado e o nitrato de cobalto hexa-hidratado. O Ni e o Co foram introduzidos na alumina na concentração de 30%. Posteriormente os catalisadores foram calcinados a 500°C por 5 horas sob ar atmosférico, seguindo a sequência de aquecimento de $100^\circ\text{C}/0,5\text{h}$; $200^\circ\text{C}/1\text{h}$; $350^\circ\text{C}/3\text{h}$ e $500^\circ\text{C}/5\text{h}$ (Silva, 2011). Na Figura 1 encontra-se o fluxograma do método de impregnação úmida.

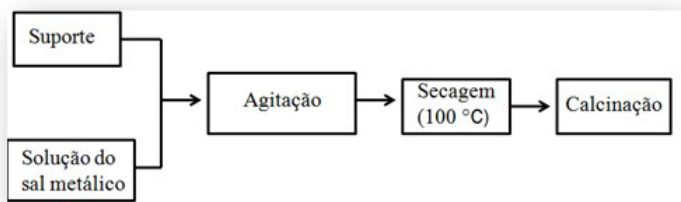


Figura 1 - Fluxograma do método de impregnação úmida.

3.3 Caracterização da alumina sintetizada e impregnada

3.3.1 Difração de raios X (DRX)

A determinação das fases presentes, cristalinidade, parâmetro de rede e o tamanho de cristalito dos pós preparados por reação de combustão foram determinados a partir dos dados de difração utilizando um difratômetro de raio X Shimadzu (modelo XRD 6000, radiação CuK α). A cristalinidade foi determinada a partir da razão entre a área integrada do pico referente à fase cristalina e a área referente à fração amorfa. O tamanho médio de cristalito foi calculado a partir da linha de alargamento de raios X (d311) por meio da deconvolução da linha de difração secundária do silício policristalino (utilizado como padrão) utilizando-se a equação de Scherrer.

3.3.2 Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica exerce papel fundamental no processamento e nas propriedades dos diversos tipos de produtos cerâmicos. As amostras foram caracterizadas em um equipamento da marca Malvern modelo Mastersize 2000.

3.3.3 Análise textural - Adsorção de nitrogênio

A determinação da área superficial das amostras foi realizada pelo método de adsorção de nitrogênio/hélio desenvolvido por Brunauer, Emmett e Teller (BET). Foi utilizado um equipamento modelo Nova 3200e, marca Quantachrome. Esta técnica também foi usada para determinar o tamanho médio de aglomerados de partículas (diâmetro esférico equivalente) por meio da Equação 1 (REED, 1996):

$$D_{\text{BET}} = \frac{6}{S_{\text{BET}} \cdot \rho} \quad (1)$$

Onde:

D_{BET} = diâmetro esférico equivalente (nm)

ρ = densidade verdadeira (g/cm³)

S_{BET} = área superficial (m²/g).

O volume de poro e o diâmetro de poro foram determinados pela teoria desenvolvida por Brunauer, Joyner e Halenda (BJH).

3.3.4 Análise química por fluorescência de raios x por energia dispersiva (EDX)

O espectrômetro de fluorescência de raios X é um instrumento que determina semi-quantitativamente os elementos presentes em uma determinada amostra. As amostras foram caracterizadas por espectroscopia de fluorescência de raios X por energia dispersiva, modelo EDX-720, da marca Shimadzu.

3.4 Testes catalíticos de bancada

3.4.1 Testes catalíticos

Os catalisadores foram testados nas reações de transesterificação metílica do óleo de soja refinado. Foi conduzida em reator de aço inox, o qual encamisa um copo de borosilicato de volume útil de 80 mL, pressurizado, com agitação constante de 1000 rpm a temperatura de 160°C, durante os tempos reacionais de 1h e 4h. Nestas reações típicas foram utilizadas as razões molares de óleo de soja/metanol 1:20 e 3% de catalisador.

3.4.2 Caracterização dos produtos reacionais

Os produtos resultantes da reação de transesterificação foram analisados quanto ao percentual de conversão em ésteres metílicos. Estas análises foram conduzidas em cromatográfico a gás Varian 450c com detector de ionização de chamas, coluna capilar de fase estacionária Varian Ultimetal "Select Biodiesel Glycerides + RG" (15m x 0,32mm x 0,45µm).

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Difração de raios X

Na Figura 2 encontram-se os difratogramas de raios X dos catalisadores de Al_2O_3 , $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3$.

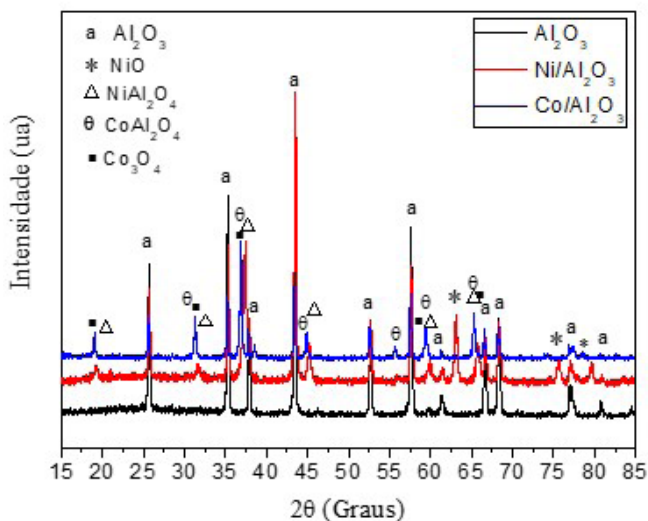


Figura 2 – Difratogramas de raios X dos catalisadores de Al_2O_3 , $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Observa-se a presença da fase cristalina estável Al_2O_3 (ficha padrão JCPDS 89–7717). Nas amostras impregnadas com Ni, se utilizou, o nitrato de níquel, assim, ocorreu o coaparecimento de duas novas fases interpretada como sendo NiO (óxido de níquel) (ficha padrão JCPDS 47-1049) e NiAl_2O_4 (aluminato de níquel) (ficha padrão JCPDS 10-0339). Hu et al. (2014) ao estudarem a impregnação de Ni em Al_2O_3 por via úmida, reportaram a presença dessas mesmas fases relacionadas.

No processo de impregnação utilizando o nitrato de cobalto observa-se uma diminuição da intensidade dos picos quando comparados aos difratogramas dos catalisadores $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$, isso é justificado devido a alteração da estrutura da alumina. Quando se utilizou o nitrato de cobalto ($\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3$) também coapareceu duas novas fases interpretada como sendo CoAl_2O_4 (aluminato de cobalto) (ficha padrão JCPDS 44-0160) e o Co_3O_4 (ficha padrão JCPDS 42-1467). Resultado similar foi reportado por Cheng et al. (2010) quando estudaram o uso do catalisador $\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3$ para a produção de gás de síntese.

4.2 Distribuição granulométrica

Na Figura 3 estão apresentados os resultados dos diâmetros esféricos equivalentes em função do volume para os catalisadores de Al_2O_3 , $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3$.

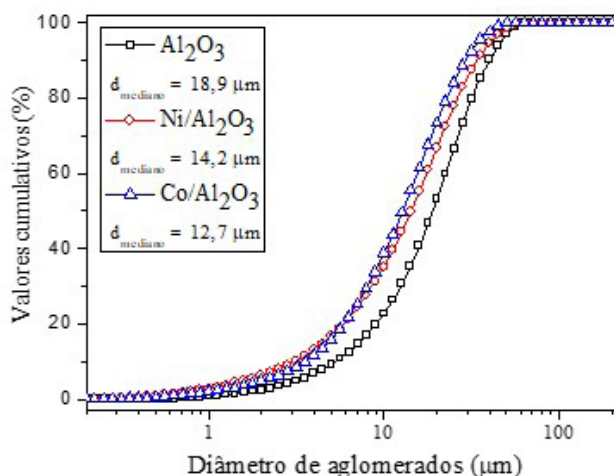


Figura 3 – Distribuição granulométrica dos catalisadores Al_2O_3 , $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Quando comparados o tamanho mediano dos aglomerados dos catalisadores impregnados com o suporte Al_2O_3 , observa-se uma diminuição de 24,86% no diâmetro mediano do aglomerado do catalisador de Ni suportado em alumina ($\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$) e de 32,80% no diâmetro mediano do aglomerado do catalisador de Co suportado em alumina ($\text{Co}/\text{Al}_2\text{O}_3$) em relação ao da alumina pura (Al_2O_3). Resultado similar foi reportado por Freitas et al. (2019) na síntese de catalisadores de níquel suportado em alumina por via úmida.

Pode-se inferir então, que a aplicação desses materiais como catalisadores nas reações químicas de produção de biocombustível, sinaliza promissora viabilidade, isto devido as características de nanoestruturas, que favorecem boa atividade catalítica.

4.3 Análise textural – Adsorção de nitrogênio

Na Figura 4 encontram-se apresentadas as isotermas de adsorção/dessorção de N_2 como resultado da caracterização textural das amostras pura (Al_2O_3) e impregnadas Ni/ Al_2O_3 e Co/ Al_2O_3 .

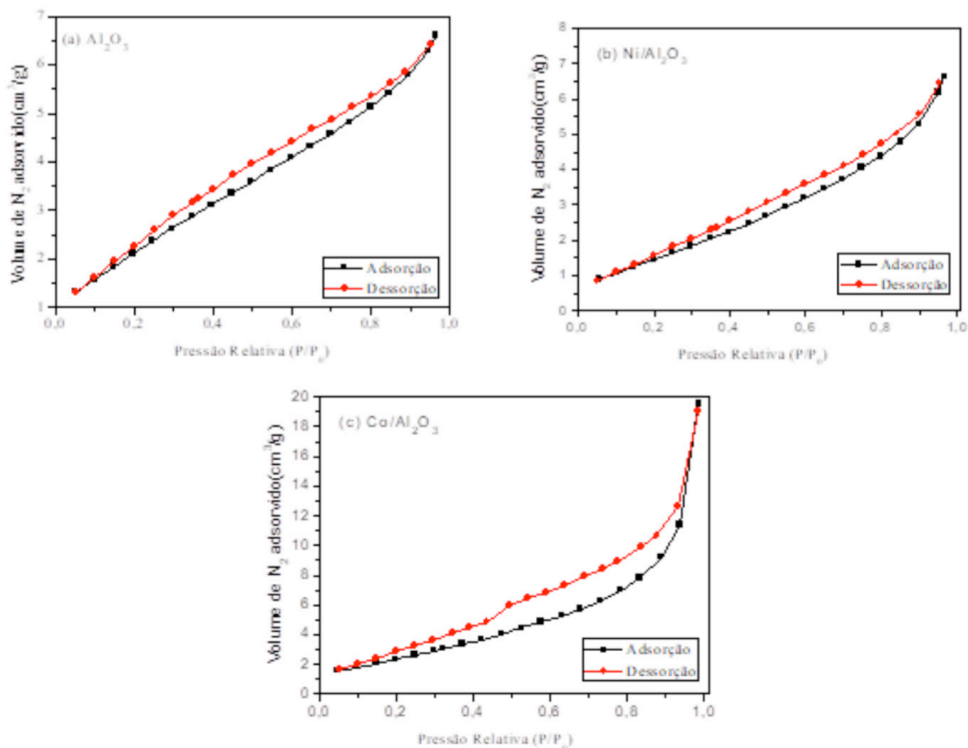


Figura 4 – Isotermas de adsorção/dessorção de nitrogênio (a) Al_2O_3 (b) Ni/ Al_2O_3 e (c) Co/ Al_2O_3 .

As análises das isotermas para as amostras estudadas sugerem que tais amostras são do tipo V, de acordo com a nova classificação proposta por Aranovich e Donohue (1998). Este tipo de histerese apresenta mesoporos que com tamanho na faixa de 2 a 50 nm, os quais possuem boa uniformidade quanto a sua distribuição granulométrica. Os catalisadores estudados apresentam histereses do tipo H3 onde os poros apresentam formatos de cunhas, cones e/ou placas paralelas. Na Tabela 1 estão apresentados os valores de área superficial específica (S_{BET}), tamanho de partícula (D_{BET}), volume de poro (V_p) e diâmetro de poro (D_p) das amostras de Al_2O_3 pura e impregnadas (Ni/ Al_2O_3 e com Co/ Al_2O_3).

Amostras	S _{BET} (m ² /g)	*D _{BET} (nm)	V _p (cm ³ /g)	D _p (nm)
Al ₂ O ₃	8,69	173,38	0,007	3,10
Ni/Al ₂ O ₃	5,56	270,94	0,016	3,44
Co/Al ₂ O ₃	9,46	159,36	0,028	3,73

*D_{BET} calculados a partir dos dados da área superficial; Densidade teórica = 3,98 g/cm³ (Lide, 1995).

Tabela 1 – Valores de área superficial específica (S_{BET}), tamanho de partícula (D_{BET}), volume de poro (V_p) e diâmetro de poro (D_p) das amostras de Al₂O₃ pura e impregnadas (Ni/Al₂O₃ e com Co/Al₂O₃).

Esses valores evidenciam que a maior área superficial específica foi obtida pela amostra impregnada com Co, que apresentou aumento de 8,8% em relação a amostra não impregnada (Al₂O₃).

4.4 Espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDX)

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da composição química para a alumina e os catalisadores impregnados.

Amostras	Al ₂ O ₃ (%)	Co ₂ O ₃ (%)	NiO	Impurezas (%)
Al ₂ O ₃	99,6	-	-	0,4
Ni/Al ₂ O ₃	65,5	-	34,1	0,4
Co/Al ₂ O ₃	62,7	36,5	-	0,8

Tabela 2 – Composição química do suporte e dos catalisadores.

Analisando os dados, verificou-se uma redução na composição da Al₂O₃, que inicialmente era 99,6% pura, à medida que o metal foi introduzido, observou-se ainda que a Al₂O₃ está presente em maior quantidade, o que já era esperado por ser os suportes que originam os catalisadores metálicos Ni/Al₂O₃ e Co/Al₂O₃.

Em função da análise química, confirma-se a eficácia da reação de combustão para obtenção desses catalisadores dentro da estequiometria estabelecida.

4.5 Caracterização dos biodieseis produzidos

4.5.1 Cromatografia gasosa

Na Figura 5 estão apresentados os resultados obtidos pela análise cromatográfica das amostras de biodieseis produzidos, ou seja, a porcentagem de éster de cada amostra, com tempo de reação de 1 hora e 4 horas.

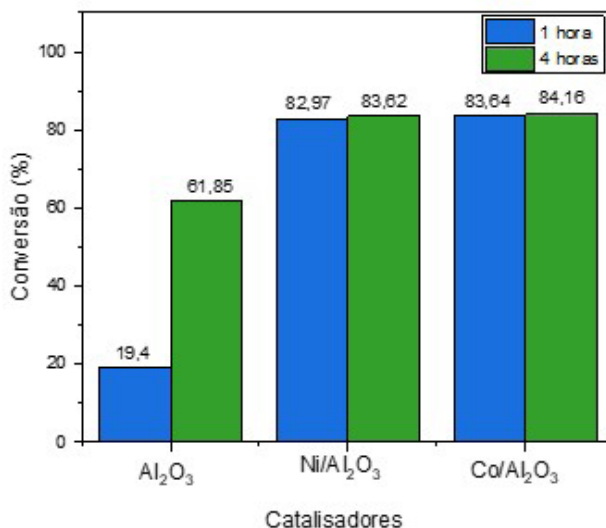


Figura 5 – Taxa de conversão do biodiesel obtidos em 1 e 4 horas de reação com os catalisadores Al₂O₃, Ni/Al₂O₃, Co/Al₂O₃.

Observa-se que houve um aumento da taxa de conversão após a impregnação dos metais Ni e Co com relação a Al₂O₃ pura. Nota-se também que o aumento do tempo reacional dos catalisadores impregnados não alterou nas taxas de conversão, pois não ocorreram variações consideradas.

Sendo assim, pode-se observar que suportar a Al₂O₃ nos metais Ni e Co é uma alternativa promissora para melhorar a atividade catalítica da alumina e aumentar o rendimento em éster das reações de transesterificação. O mesmo foi observado por Freitas et al. (2019) e Barbosa, Dantas e Freitas (2019).

5 | CONCLUSÃO

Os resultados apresentaram a presença da fase cristalina estável Al₂O₃ e após a impregnação por via úmida utilizando os dois metais formaram a segunda fase de NiO e NiAl₂O₄ para o Ni e Co₃O₄ e CoAl₂O₄ para o Co. Houve uma diminuição dos aglomerados com a incorporação dos metais. A cromatografia apresentou conversões eficientes para os metais impregnados e que o aumento do tempo reacional estudado não interferiu.

REFERÊNCIAS

ARANOVIIH, G.; DONOHUE, M. **Analysis of Adsorption Isotherms: Lattice Theory Predictions, Classification of Isotherms for gas-solid equilibria and Similarities in gas and liquid adsorption behavior.** Journal of Colloid and Interface Science, v. 200, p. 273-290, 1998.

ARIMATÉIA, R. R.; HANKEN, R. B. L.; OLIVEIRA, A. D. B.; AGRAWAL, P.; FREITAS, N. L.; SILVA, E. S.; ITO, E. N.; MÉLO, T. J. A. **Effect of alumina on the properties of poly(methylmethacrylate)/alumina composites obtained by melt blending.** Journal of Thermoplastic Composite Materials, p. 1 – 21, 2019.

BARBOSA, D. C. **Metanólise e etanolise a partir de misturas de óleos vegetais.** 2009. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Química e Biotecnologia. Universidade Federal de Alagoas, Maceió – AL.

BARBOSA, I. M. B.; DANTAS, J.; FREITAS, N. L. **Preparação de Catalisadores de Cobalto Suportado em Alumina Visando Futura Destinação na Produção de Biodiesel.** In: IV Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências, 2019, Campina Grande/PB. IV CONAPESC. Campina Grande/PB: Realize, 2019. v. 1.

BOZ, N.; DEGIRMENBASI, N.; KALYON, D. M. **Conversion of biomass to fuel: Transesterification of vegetable oil to biodiesel using KF loaded nano-g-Al₂O₃ as catalyst.** Applied Catalysis B: Environmental, v.89, p.590–596, 2009.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCT). **Portaria MCT nº 702, de 30.10.2002.** Disponível em:< <http://www.mct.gov.br /index.php/content/view/14600.html>>. Acesso em: 12 de Agosto de 2018.

CHENG, C. K.; FOO, S. Y.; ADESINA, A. A. **H₂-rich synthesis gas production over Co/Al₂O₃ catalyst via glycerol steam reforming.** Catalysis Communications, v. 12 p. 292–298, 2010.

CORREIA, A. D. **O Futuro sem Petróleo,** In: Revista da armada. 2007: Lisboa. DANTAS, J.; LEAL, E.; ARAÚJO, N. O.; PEREIRA, K. R. O.; FERNANDES, P. C. R.; COSTA, A. C. F. M. **Síntese de ferrita do tipo Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe₂O₄ e utilização como catalisador em reação de esterificação do óleo de soja para obtenção de biodiesel.** In: ANDRADE, D.E. (Ed.). Petróleo e Outros Combustíveis. 1ª ed. Belo Horizonte-MG: Poisson, 2019. cap. 25, p. 202-218.

DANTAS, J.; LEAL, E.; CORNEJO, D. R.; KIMINAMI, R. H. G. A.; COSTA A. C. F. M. **Biodiesel production evaluating the use and reuse of magnetic nanocatalysts Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe₂O₄ synthesized in pilot-scale.** Arabian Journal of Chemistry, v. 13, p. 3026-3042, 2020.

DANTAS, J.; LEAL, E.; MAPOSSA, A. B.; CORNEJO, D. R.; COSTA, A. C. F. M. **Magnetic nanocatalysts of Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe₂O₄ doped with Cu and performance evaluation in transesterification reaction for biodiesel production.** Fuel, v. 191, p. 463-471, 2017.

FREITAS, N. L.; DANTAS, J.; COSTA A. C. F. M.; COSTA, O. K. T.; FERREIRA, A. C. F.; MORAIS, J. R. F. **Síntese de catalisadores de níquel suportado em alumina por via úmida.** In: Editora Poisson. Engenharia no Século XXI – Volume 7 – Belo Horizonte - MG: Poisson, 2019, cap.21, p. 120-128

FREITAS, N. L.; FAGURY-NETO, E.; LIRA, H. L.; GAMA, L.; KIMINAMI, R. H. G. A.; COSTA, A. C. F. M. **Combustion synthesis of a-Al₂O₃ powders.** Materials Science Forum, v. 530-531, p. 631-636, 2006.

GUPTA, J.; AGARWAL, M.; DALAI, A.K. **An overview on the recent advancements of sustainable heterogeneous catalysts and prominent continuous reactor for biodiesel production.** Journal of Industrial and Engineering Chemistry, v. 88, p. 58-77, 2020.

HOANG, A.T.; TABATABAEI, M.; AGHBASHLO, M.; CARLUCCI, A.P.; ÖLÇER, A. I.; LE, A. T.; GHASSEMI, A. **Rice bran oil-based biodiesel as a promising renewable fuel alternative to petrodiesel: A review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 135, p. 110204, 2021.

JEON, Y.; CHI, W. S., HWANG, J., KIM, J. H., & SHUL, Y. G. **Core-shell nanostructured heteropoly acid-functionalized metal-organic frameworks: Bifunctional heterogeneous catalyst for efficient biodiesel production.** *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 242, p. 51-59, 2019.

KARTHIKEYAN, S.; PERIYASAMY, M.; PRATHIMA, A. **Biodiesel from microalgae: Environmental aspects.** *Materials Today: Proceedings*, 2020. *In Press*.

KURHADE, A.; DALAI, A. K. **Physiochemical characterization and support interaction of alumina-supported heteropolyacid catalyst for biodiesel production.** *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, v. 13, n. 6, p. e2249, 2018.

LEAL, E., DANTAS, J., MARÇAL, S. V., PONTES, R. M. P., FERNANDES, P. C. R., COSTA A. C. F. M. **Esterificação homogênea de óleo de fritura visando a produção de biodiesel e bioquerosene de aviação.** *In: Editora Poisson. Engenharia no Século XXI – Volume 13 – Belo Horizonte - MG: Poisson*, 2019, cap. 21, p. 217-223.

LIDE, D. R. **Handbook of Chemistry and Physics**, New York – NY: CRC Press, Edition 85 th, 1995.

MEZALIRA, D. Z. **Preparação e caracterização de materiais com propriedades catalíticas para a obtenção de hidrogênio e carbono nanoestruturado a partir da decomposição do etanol e do glicerol.** Florianópolis, SC: UFSC, 2011. Tese de Doutorado em Química.

OGUNKUNLE, O.; AHMED, N. A. **A review of global current scenario of biodiesel adoption combustion in vehicular diesel engines.** *Energy Reports*, v. 5, p. 1560-1579, 2019.

RANGANATHAN, S. V.; NARASIMHAN, S. L.; MUTHUKUMAR, K. **An overview of enzymatic production of biodiesel.** *Bioresource Technology*, v. 99, p. 3975-3981, 2008.

SILVA, A. S. **Avaliação de catalisadores aplicação de NiO e MoO₃, suportados em MMC-41, na obtenção de biodiesel de óleo de algodão.** Campina Grande, PB: UFCG, 2011. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos.

SILVA, M. C.; COSTA, N. C. O.; LIRA, D. S.; DANTAS, J.; COSTA, A. C. F. M.; FREITAS, N. L. **High energy milling of alumina synthesized by combustion reaction using a vertical shaft attritor mill: influence of the milling time length.** *Materials Science Forum*, n. 820, p. 155-160, 2015.

SIMÕES, L.W., FREITAS, N. L., DANTAS, J., LEAL, E. PONTES, J. R. M. P., FERNANDES, P. C. R. **Obtenção de biodiesel por meio da transesterificação do óleo de soja utilizando catalisador de KOH/Al₂O₃ em diferentes composições.** *In: Tullio, F. B. M e Machado, L. M. B. (Ed). Ampliação e aprofundamento de conhecimentos nas áreas das engenharias. 1ª edição.* Ponta Grossa, PR: Atena, 2020 cap. 9, p. 97-112.

SUAREZ, P.A.Z.; e MENEGHETTI, S.M.P. **70 aniversários do biodiesel em 2007: Evolução histórica e situação atual no Brasil.** *Química Nova*, v. 30, p. 2068-2071, 2007.

VASIĆ, K.; HOJNIK PODREPŠEK, G.; KNEZ, Ž.; LEITGEB, M. **Biodiesel production using solid acid catalysts based on metal oxides.** Catalysts, v. 10, n. 2, p. 237, 2020.

XIE, W.; PENG, H.; CHEN, L. **Transesterification of soybean oil catalyzed potassium loaded on alumina as a solid-base catalyst.** Applied Catalysis A: General, v. 300, p.67-74, 2006.

YU, Q.; YU, T.; CHEN, H.; FANG, G.; PAN, X.; BAO, X. **The effect of Al³⁺ coordination structure on the propane dehydrogenation activity of Pt/Ga/Al₂O₃ catalysts.** Journal of Energy Chemistry, v. 41, p. 93-99, 2020.

SIMULAÇÃO DE ESPECTROMETRIA DE MASSA DE ÍONS SECUNDÁRIOS

Data de aceite: 01/11/2020

Gabriel dos Santos Onzi

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), CP 15051
Porto Alegre–RS, Brazil
lattes.cnpq.br/6034931179830053

Igor Alencar Vellame

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), CP 15051
Porto Alegre–RS, Brazil
<http://lattes.cnpq.br/4980343694090946>

RESUMO: Espectrometria de massa de íons secundários (SIMS) é uma técnica de análise da composição da superfície de um material. A partir de um feixe de íons primário, íons secundários são ejetados do material através de um fenômeno conhecido como Sputtering. Pulsos de alta voltagem periódicos extraem esses íons para o espectrometro de massa. Para auxiliar a investigação dos resultados experimentais, desenvolvemos um software para simular a técnica de SIMS do Laboratório de Implantação Iônica do Instituto de Física da UFRGS. Modelamos cada etapa do experimento computacionalmente em C/Python utilizando métodos numéricos e simulamos as trajetórias dos Íons Secundários obtendo resultados coerentes com observações experimentais.

PALAVRAS-CHAVE: Espectrometria, Sputtering, Python.

ABSTRACT: Secondary Ion Mass Spectrometry is a technique to analyse surface composition of a material. Starting with a primary ion source, secondary ions are ejected from the material through phenomenon known as sputtering. High energy periodic voltage pulses extract the ions to the mass spectrometer. To help experiment results investigations, we developed a software to simulate the SIMS technique from UFRGS Ion Implantation Laboratory in Physics Institute. Each experiment step was computationally modeled in C/Python using numeric methods and every ion trajectory was simulated obtaining coherent results with experimental observations.

KEYWORDS: Spectrometry, Sputtering, Python.

Espectrometria de massa de íons secundários (SIMS) é uma poderosa técnica para se analisar a composição de superfícies sólidas dos materiais [1]. Nessa técnica, íons secundários são desbastados do material alvo por um feixe de íons primário com massa e energia bem definidos num processo conhecido como *sputtering*. O uso de feixes primários com alta energia (MeV) em comparação com baixas energia (keV) diminui a fragmentação de moléculas e aumenta a quantidade de material ejetado [2]. Para a detecção dos íons secundários, pulsos de alta voltagem extraem tais íons para um tubo aterrado (livre de campo elétrico) onde uma lente eletrostática os direciona para o detector após passarem por um espelho eletrostático. O tempo percorrido

desde o pulso de extração até a detecção é medido com resolução abaixo de nano-segundo. Uma nova linha para MeV-SIMS foi recentemente implementada no Laboratório de Implantação Iônica [3]. Com o intuito de compreender os fenômenos observados com o uso de feixes primários contínuos, criamos uma ferramenta para realização de simulações computacionais da técnica de SIMS. Nessa ferramenta, utilizamos conceitos de básicos de física (mecânica e eletromagnetismo) com integrações simples de velocidade e distância para calcularmos o tempo de voo das partículas ejetadas. Dividimos o experimento em cinco principais etapas: 1. extração; 2. livre-deslocamento, 3/4. espelho eletrostático de duplo estágio; e 5. livre-deslocamento. Em cada uma dessas etapas, o tempo de voo de cada partícula é calculado. Os valores obtidos na primeira região coincidem com a previsão. Pelo fato de a primeira etapa possuir cálculos mais laboriosos, esperamos bons resultados para a total implementação do algoritmo. O produto final seria um software capaz de simular o experimento para diferentes materiais e obter o ângulo sólido de coleção do instrumento. Por não haver atualmente softwares para simulação de SIMS abertamente disponíveis, seria interessante, também, prover essa ferramenta online para a comunidade acadêmica.

1 | INTRODUÇÃO

Espectrometria de massa de íons secundários (SIMS) é uma técnica de análise da composição da superfície de um material [1]. A partir de um feixe de íons primário de alta energia, íons secundários são ejetados do material por Sputtering. Pulsos de alta voltagem extraem esses íons secundários para um tubo aterrado onde após serem direcionados e refletidos por uma lente e um espelho eletrostáticos, respectivamente, é medido seu tempo de voo com resolução abaixo de nano- segundo. O uso de um feixe altamente energético diminui a fragmentação das moléculas e aumenta a quantidade de material ejetado [2]. Esta ferramenta foirecentemente implementada no Laboratório de Implantação Iônica da UFRGS e está sendo estudada detalhadamente [3]. Por isso, tornou-se relevante uma ferramenta de simulação dessa técnica.

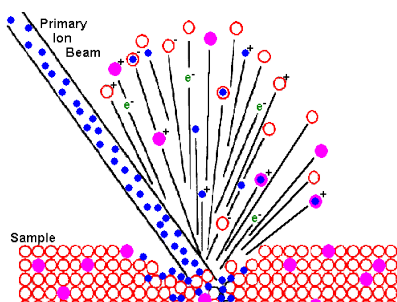


Figura 1: Esquemático da técnica de SIMS

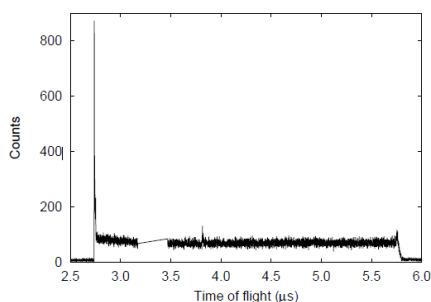


Figura 2: Espectro experimental de MeV-SIMS.

2 | MÉTODO

Na simulação a ideia é abstrair o que acontece no experimento calculando nosso parâmetro de medida experimental. Desse modo, abstraímos que é gerado um gás de partículas Sputteradas do material em sua superfície que são extraídas por um potencial elétrico de 2 kV para um tubo aterrado onde são refletidas e medido o seu tempo de voo. Um dos desafios da simulação é o fato do pulso de extração possuir uma fase transitente entre seu máximo e mínimo que torna os cálculos mais laboriosos.

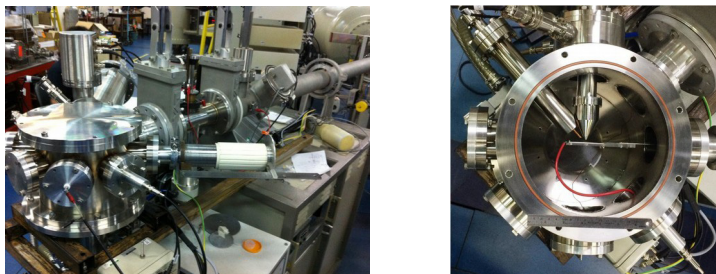


Figura 3 e 4: MeV-SIMS instalado atualmente no Laboratório de Implantação Iônica.

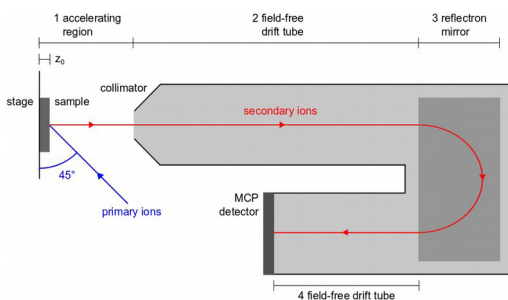


Figura 5: Abstração do experimento para a simulação.

$$\nabla V = -E$$

$$E = \frac{F}{q}$$

$$F = ma$$

$$qV = \frac{mv^2}{2}$$

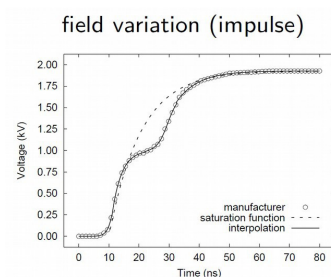


Figura 7: Região transitente do potencial de extração.

3 | CONCLUSÃO E RESULTADOS

É seguro dizer que em qualquer medição de uma grandeza física, descrever essa medição a partir de uma abstração da realidade nos informa nosso entendimento dos fenômenos ocorridos. No caso do MeV-SIMS não é diferente. Conseguimos abstrair o experimento de forma a modelar seus fenômenos e medições experimentais. A perspectiva agora é aperfeiçoar essa ferramenta de análise com a motivação de provê-la abertamente para a comunidade acadêmica.

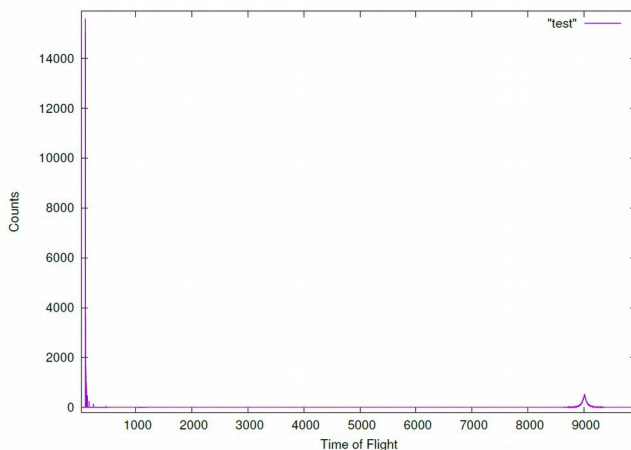


Figura 8: Resultados iniciais da simulação.

REFERÊNCIAS

1. Vickerman, Analyst (2011) 2199
2. Nakata et al., *Appl. Surf. Sci.* **255** (2008) 1591.
3. Alencar et al., *in prep.*

CAPÍTULO 12

ANÁLISE DE UM MOTOR 3 CILINDROS SOBREALIMENTADO

Data de aceite: 01/11/2020

Data de submissão: 05/08/2020

Bruno Barreto Irmão

Universidade Estácio de Sá
Rio de Janeiro - RJ

<http://lattes.cnpq.br/8552052387629699>

Alexsander Velasco Cardoso

Universidade Estácio de Sá
Rio de Janeiro - RJ

<http://lattes.cnpq.br/3678162104645344>

Gustavo Simão Rodrigues

Universidade Estácio de Sá
Rio de Janeiro - RJ

<http://lattes.cnpq.br/0076357223461709>

RESUMO: A criação de máquinas capazes de transformar calor em trabalho mecânico revolucionou a indústria. Os motores à combustão interna (MCI) tiveram papel fundamental nesse processo de inovação tecnológica. Sua introdução no mercado permitiu novos meios de transporte, além de mobilidade urbana e geração de empregos. Todavia, a exploração de recursos naturais não renováveis para seu consumo aumentou exponencialmente, além de sua contribuição na emissão de gases poluentes. Diante deste cenário, diversas medidas foram tomadas para mitigar os impactos ao meio ambiente, como a criação de leis que regulam as emissões de poluentes, que forçou a indústria a estudar o desenvolvimento de novos motores, cujo consumo e tamanho são menores, sem

a perda da eficiência. Um motor 3 cilindros busca reunir todas essas características: baixo consumo, tamanho reduzido e entrega de potência similar ao motor de 4 cilindros. Entretanto, a redução de um cilindro acarretou efeitos indesejáveis sobre sua vibração e a sobrealimentação em algumas versões, como por exemplo o turbocompressor, que gera um aumento de pressão e, conseqüentemente, maior calor gerado no interior do motor, podendo causar desvantagens, como a autoignição. Neste tipo de aplicação, o compressor é acionado por uma turbina que é acionada pelos gases de escape do motor. Desta forma, a utilização dos gases oriundos da queima altera o balanço energético do motor, possibilitando um aumento se sua eficiência térmica. Dessa forma, o presente trabalho visa analisar os efeitos nos principais componentes do motor, a médio e longo prazo, em condições normais de trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Motor de combustão interna, turbocompressor, vibração, método dos elementos finitos, fluidodinâmica computacional.

ANALYSIS OF AN OVERFUELED THREE CYLINDER ENGINE

ABSTRACT: The creation of machines capable of transforming heat into mechanical work has revolutionized the industry. Internal combustion engines (MCI) played a fundamental role in this process of technological innovation. Its introduction in the market allowed new means of transport, in addition to urban mobility and job creation. However, the exploitation of non-renewable natural resources for consumption has increased exponentially, in addition to its

contribution to the emission of polluting gases. In view of this scenario, several measures were taken to mitigate the impacts on the environment, such as the creation of laws that regulate pollutant emissions, which forced the industry to study the development of new engines, whose consumption and size are smaller, without loss efficiency. A 3-cylinder engine seeks to bring together all these characteristics: low consumption, reduced size and power delivery similar to the 4-cylinder engine. However, the reduction of a cylinder caused undesirable effects on its vibration and supercharging in some versions, such as the turbocharger, which generates an increase in pressure and, consequently, greater heat generated inside the engine, which can cause undesirable effects, such as self-ignition. In this type of application, the compressor is driven by a turbine that is driven by the engine's exhaust gases. In this way, the use of gases from the burning changes the energy balance of the engine, allowing an increase in its thermal efficiency. Thus, the present work aims to analyze the effects on the main engine components, in the medium and long term, under normal working conditions.

KEYWORDS: Internal combustion engine, turbocharger, vibration, finite element method, computer fluid dynamic.

1 | INTRODUÇÃO

Com a tendência de investimentos em inovação tecnológica nos motores, por parte das montadoras, cria-se a necessidade do investimento em pesquisas para aprofundar o conhecimento sobre as novas tendências e solucionar os problemas intrínsecos, dos quais já citamos alguns.

Os motores 3 cilindros são novos no mercado brasileiro. Mesmo com seu excesso de vibrações e um desbalanceamento dinâmico, eles atendem à proposta de economia. Mas deve-se levar em consideração que os componentes podem ser afetados por um desgaste prematuro, visto que seu funcionamento não se dá em um ciclo de trabalho ideal. Sua rotação é afetada por não possuírem pistões se deslocando de forma conjunta e seu intervalo de combustão é irregular. Uma alta taxa de compressão e a presença do turbocompressor em algumas versões agrava ainda mais esse quadro.

Dessa forma, uma análise mais detalhada é necessária, visto que não se trata apenas de uma relação de economia com peças e manutenção. Além disso, há a segurança de quem utiliza esses automóveis, item fundamental a ser considerado em qualquer projeto.

2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo Brunetti (2012), máquinas térmicas são dispositivos que permitem transformar calor em trabalho. O calor pode ser obtido de diferentes fontes: combustão, energia elétrica, energia atômica, etc. Um dos tipos de máquina térmicas mais utilizado é o motor de combustão interna (MCI), que funciona obtendo energia através da queima de combustível, isto é, energia química em trabalho mecânico e recebe essa classificação pois o fluido ativo (formado pela mistura ar combustível na entrada do volume de controle e produtos da combustão de saída) participa diretamente da combustão.

Os motores de combustão interna (MCI) ainda podem ser classificados de acordo com a forma de se obter trabalho mecânico (alternativos, rotativos e impulso) e quanto à ignição (ignição por faísca ou Otto e ignição espontânea ou diesel). O presente trabalho focará somente nos motores alternativos ciclo Otto que realizam trabalho obtido pelo movimento de vaivém de um pistão, transformando em rotação contínua por um sistema biela-manivela. Nesses motores, a mistura combustível-ar é admitida, previamente dosada ou formada no interior dos cilindros quando a injeção direta de combustível, e inflamada por uma faísca que ocorre entre eletrodos de uma vela.

2.1 Vibrações em motores

Os problemas de ruídos e vibrações em motores de combustão interna são comuns, devido à grande diversidade de peças e componentes que compõem um motor. O eixo virabrequim sofre vibrações transversais, laterais e torcionais, devido à dinâmica dos esforços sofridos principalmente no tempo de combustão do motor. Mancais hidrodinâmicos podem induzir vibrações orbitais de grande amplitude em rotores neles apoiados. Cita-se também os efeitos de discos acoplados em eixos, a combustão e o efeito giroscópio de eixos massivos. Esses efeitos produzem desgastes prematuros nos componentes internos do motor, reduzindo o tempo de vida do próprio motor, além de prejudicar a saúde das pessoas (SANTANA, 2010).

Segundo Rao (2009), qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo é denominado vibração ou oscilação. A teoria de vibração trata do estudo de movimento oscilatório de corpos e as forças associadas a eles. Sendo que a resposta vibroacústica de um sistema é um resultado das forças (forças desbalanceadas, transientes e atrito) que atuam no sistema interagindo com parâmetros estruturais (massa, rigidez e amortecimento).

A grande dificuldade é entender se a resposta do sistema é ressonante, forçada ou uma combinação de ambas. Se a resposta do sistema for ressonante, ou seja, o sistema é excitado em uma condição em que esteja em ressonância, a maneira de se controlar o ruído e vibrações é inteiramente diferente da atenuação necessária quando as vibrações do sistema são divididas apenas às forças que atuam no sistema.

Segundo Brunetti (2012), no caso do motor, as excitações são predominantemente harmônicas, mas com rotação não estacionária. Para aplicar os conceitos de que o sistema é resultado das forças aplicadas e do comportamento modal da estrutura, alguns princípios devem ser bem compreendidos.

Outro importante conceito que influencia diretamente nos cálculos analíticos de vibração são as forças de inércia das massas rotativas e das massas alternativas. Segundo Selim (2017), atuam quando a pressão da câmara de combustão aumenta devido à queima da mistura ar combustível e todo o sistema biela-manivela começa a receber sua atuação.

Tomando como exemplo, as propriedades de um motor monocilíndrico podem ser determinadas: a massa do pistão m_k (massa oscilante), a massa da árvore de manivelas

(massa rotativa) e os componentes da massa da biela (compostos de massas rotativas e oscilantes, que constituem 1/3 e 2/3 da massa, respectivamente) (BOSCH, 2005, p.457):

2.2 Sobrealimentação

Segundo Brunetti (2012), em motores sobrealimentados, sabe-se que o torque de um motor está diretamente relacionado à massa de ar que o mesmo consegue aspirar por ciclo de admissão. Quanto maior a massa de ar admitida pelos cilindros, maior é o aproveitamento da mistura. O papel do turbocompressor se resume a comprimir o ar antes dele ser admitido pelo motor. Assim, dado um mesmo volume de ar, têm-se muito mais massa de ar devido à compressão do mesmo.

Fisicamente, um turbocompressor pode ser dividido em duas partes: a turbina (caixa quente) e o compressor (parte fria ou caixa fria), cujos nomes se dão devido à diferença de temperatura das duas partes que pode exceder centenas de graus durante o trabalho. A caixa quente é a responsável por receber os gases oriundos da queima da mistura ar - combustível que, em alta temperatura, aquecem o componente. A caixa fria, por sua vez, é responsável por admitir ar ambiente e enviar em direção ao coletor de admissão, já sob alta pressão.

3 | RESULTADOS OBTIDOS

3.1 Análise fluidodinâmica do turbocompressor

Para selecionar um turbocompressor deve-se primeiro atribuir a potência que se espera no motor onde está instalado o turbocompressor, calcular a quantidade de ar necessário e a pressão absoluta nesse motor. Com efeito nessa pesquisa utilizou-se os dados técnicos de um motor de 1000 cilindradas de uma grande montadora do mercado brasileiro.

Na tabela 1 encontram-se os principais dados característicos do motor.

Cilindrada	990 cm ³
Diâmetro dos cilindros x curso dos pistões	74,5 x 76,4 mm
N° de cilindros	3 em linha
Válvulas por cilindros	4
Posição	Transversal à frente do eixo
Taxa de compressão	10,5:1
Formação da mistura	Injeção direta de combustível, dispensa partida a frio

Potência líquida máxima	116 cv (G) / 128 (E) a 5500 rpm
Torque líquido máximo	20,4 kgfm (G/E) entre 2000 e 3500 rpm

Tabela 1 – Ficha técnica do motor

Segundo Garrett (2017), as equações de 1 a 5 são utilizadas para selecionar um turbocompressor para um motor qualquer, nesta pesquisa utilizou-se os dados do motor da tabela 1. Com efeito, a equação 1 serve para determinar o fluxo de ar necessário para alcançar a potência de 116 cv, a equação 2 determina a pressão absoluta, a equação 3 e 4 servem para determinar a diferença de pressão na saída e na entrada do turbocompressor e pôr fim a equação 5 determina a diferença de pressão no turbocompressor.

$$W_a = HP \cdot \frac{A}{F} \cdot \frac{BFSC}{60} \quad (1)$$

$$MAP_{req} = \frac{W_a \cdot R \cdot (460 + T_m)}{V_E \cdot \frac{N}{2} \cdot V_d} \quad (2)$$

$$P_{2c} = MAP_{req} + \Delta P_{loss} \quad (3)$$

$$P_{1c} = P_{amb} - \Delta P_{loss} \quad (4)$$

$$r_c = \frac{P_{2c}}{P_{1c}} \quad (5)$$

Na tabela 2 observa-se o resultado a partir do cálculo do fluxo para a potência do motor de 116 CV. Já na tabela 3 pode-se observar os cálculos para a pressão absoluta.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade	Valor (SI)	Unidade
Fluxo de ar	W _a	11,01	lb/min	0,083	kg/s
Potência	HP	116	cv	85317,9	W
Relação Ar/ Combustível	A/F	10,5	-	10,5	-
Consumo específico de combustível do eixo	BSFC	0,55	lb/HPh	355	g/Wh

Tabela 2 – Parâmetros para cálculo do fluxo de ar

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade	Valor (SI)	Unidade
Pressão absoluta	MAP req	25,26	Psi	17,4616,6	Pa
Fluxo de ar	W _a	11,01	lb/min	0,083	kg/s
Constante dos gases	T	639,6	lbf.in/lb. °F	287	J/kgk

Temperatura do coletor de admissão	Tm	130	°F	328,15	K
Eficiência volumétrica	VE	0,98	-	98%	-
Velocidade de rotação do motor	N	5500	RPM	91,67	Hz
Cilindrada total	Vd	61,02	in3	1	L

Tabela 3 – Parâmetros para cálculo da pressão absoluta

Nas equações 6 e 7 observa-se o cálculo de pressão de entrada e saída do compressor a partir do resultado da pressão absoluta de 25,26 Psi, nota-se um incremento de 2 Psi no cálculo de saída e uma redução de 1 Psi no cálculo da entrada, isso se dá devido à perda de pressão entre o compressor e o coletor de admissão e devido à perda de pressão do filtro de ar respectivamente. Já na equação 8 pode-se observar o cálculo para a razão de pressão do sistema.

$$P_{2c} = 25,26 + 2 \quad (6)$$

$$P_{2c} = 27,26 \text{ Psi}$$

$$P_{1c} = 14,7 - 1 \quad (7)$$

$$P_{1c} = 13,7 \text{ Psi}$$

$$r_c = \frac{27,26}{13,7} \quad (8)$$

$$r_c = 1,99$$

A metodologia para simulação em CFD, consiste nas etapas de pré-processamento, resolução e pós-processamento, o mesmo que, definir os objetivos, identificar o domínio, criar a geometria, criar a malha, configurar o solver, obter a solução, examinar os resultados, considerar revisões. Os resultados calculados foram utilizados como dados de entrada na análise de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) (ESSS, 2019).

Observa-se na figura 1 o primeiro resultado de velocidade da simulação a qual tira-se as seguintes conclusões: primeiramente a velocidade máxima entre as paletas do rotor é extremamente alta, chegando a 1162,686 m/s. Isso caracteriza uma inconsistência da simulação, ocasionando recirculação do fluido entre as paletas. Além disso existe uma área que a velocidade do fluxo é mínima o que indica que o fluido está entrando para a voluta antes de acelerar no rotor.

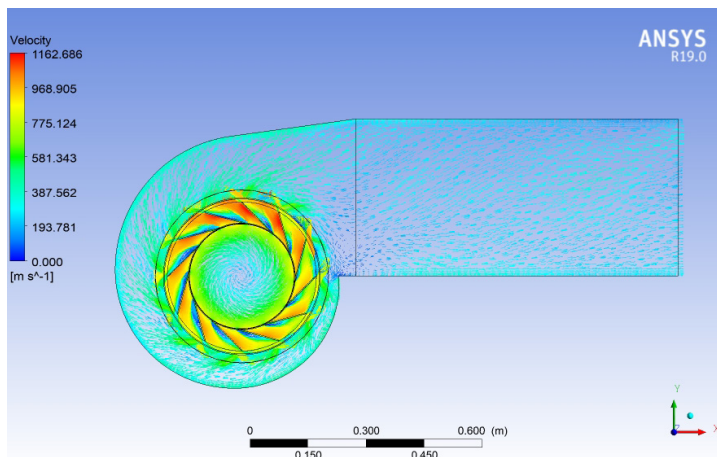


Figura 1 - Gráfico do vetor de velocidade

Na figura 2, observa-se o gráfico de velocidade (no plano que intercepta o meio da voluta e o meio do rotor). Os vetores de velocidade se comportando de maneira ordeira após sair do rotor e entrar na voluta e normalizando-se com uma velocidade de aproximadamente 290 m/s, que ainda é considerada alta para um rotor de um veículo de 3 cilindros.

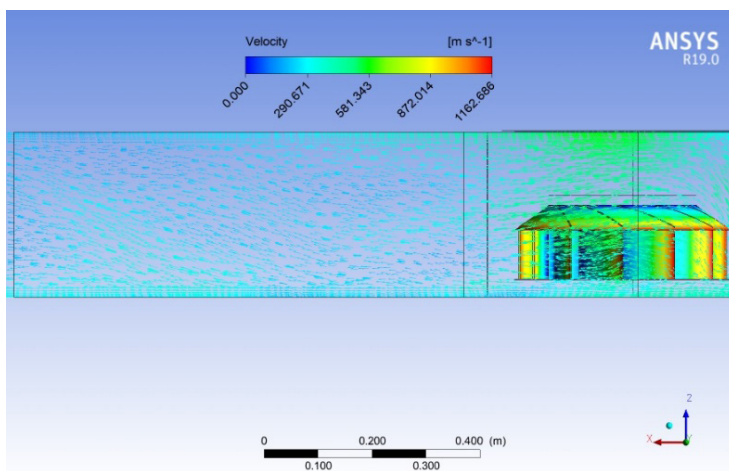


Figura 2 - Gráfico de velocidade no plano vertical

Na figura 3, é apresentado o campo de velocidades visto somente no rotor, e pode-se observar que as regiões azuis de recirculação de fluido em cima das palhetas são regiões de descolamento de fluido que resultam em uma ineficiência do rotor por estar energizando um fluido que deveria estar colado nas palhetas.

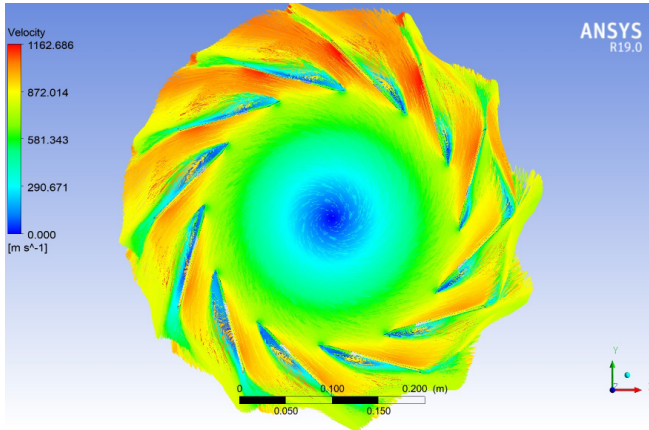


Figura 3 - Gráfico de velocidade no rotor

Além disso, tem-se na figura 4, um gráfico do mesmo campo de velocidade, porém com a variável *mach*, onde percebe-se um *mach* supersônico de 3.023. Esse valor também reflete as condições do “ângulo de ataque” da paleta que não está bem projetada e com isso forma-se muitas ondas de choques entre as palhetas do rotor. Depois o fluido se normaliza na voluta com *mach* transônico, com um valor entre 0.756 e 1.511.

- Subsônica: $Mach < 1$
- Transônica: $0.8 < Mach < 1.2$
- Sônica: $Mach = 1$
- Supersônica: Entre 1.2 e 5 *Mach*
- Hipersônica: $Mach > 5$

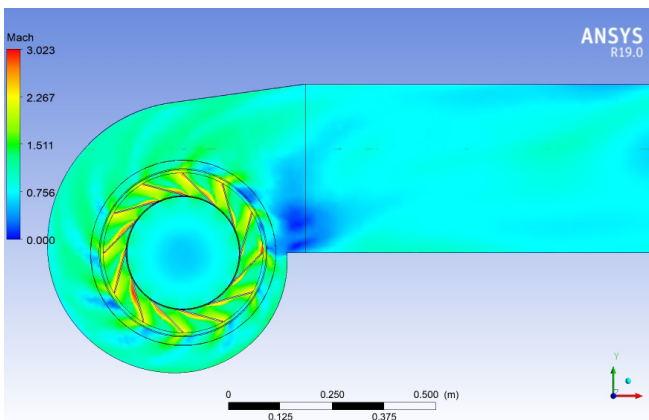


Figura 4 - Gráfico de velocidade *Mach*

As áreas onde o *mach* é máximo (tom vermelho e amarelado) são áreas de descolamento de fluido que faz com que o fluido circule entre as palhetas e as áreas onde o *mach* é mínimo (tom azulado) são áreas que a velocidade do fluido é consideravelmente lenta, que reflete perda de eficiência do compressor. Nas áreas verdes, onde o valor de *mach* é de aproximadamente 1.511, que reflete uma velocidade alta para o compressor e uma área onde a velocidade *mach* é supersônica, justamente no rotor, que por sua vez, mostra que, as palhetas deveriam ter sido projetadas com uma angulação adequada e possivelmente isso reduziria as recirculações entre as palhetas e conseqüentemente as velocidades de *mach*, atingindo um valor aceitável para o compressor que é a velocidade de *mach* subsônico. Pode-se observar isso na figura 5.

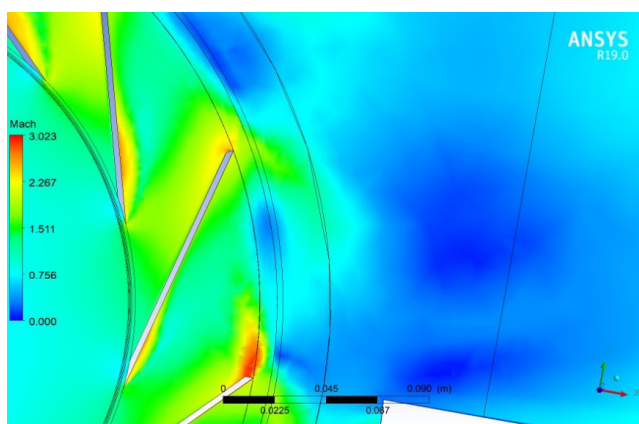


Figura 5 - Gráfico de velocidade Mach em detalhe

Na figura 6, observa-se um gráfico de pressão do compressor e o mesmo apresenta valores razoáveis e condizentes com a pressão calculada analiticamente. Tem-se um aumento de pressão nas paredes da entrada da voluta, logo após o fluido entrar no rotor do compressor. Tal aumento faz sentido tendo em vista que o rotor está girando a 50.000 rpm. Com isso, o fluxo tende a comprimir o ar, o que resulta em um aumento de pressão e depois normaliza-se, ficando praticamente constante com 171.681 Pa, equivalente a 24.90 Psi. O valor calculado analiticamente foi de 27,26 Psi na saída da voluta.

As áreas azuis sobre as palhetas são áreas de sucção e aceleração do fluido, por isso do valor negativo nessas regiões.

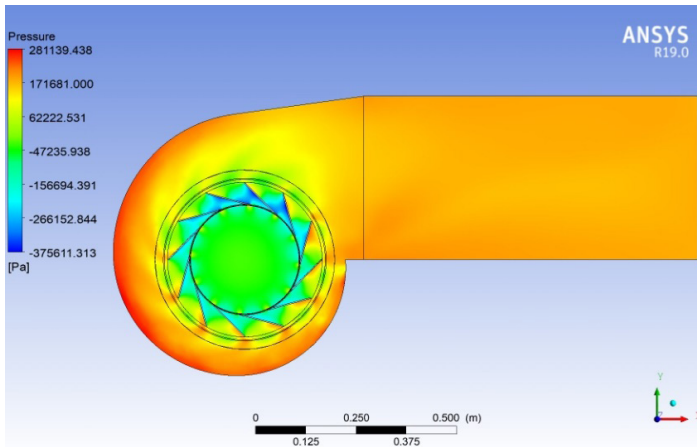


Figura 6 - Gráfico de pressão do compressor

3.2 Análise Modal do Motor

Com o objetivo de analisar o comportamento da estrutura, foi escolhida a análise modal feita pelo método de elementos finitos. Essa análise é feita através de um programa, ou seja, é uma simulação computacional. Os resultados foram obtidos após as seguintes etapas:

- 1^a – Delimitações dos sistemas físicos;
- 2^a – Elaboração do modelo CAD;
- 3^a – Definição dos materiais de cada componente;
- 4^a – Escolha da análise de perturbação linear;
- 5^a – Seleção das condições de contorno da simulação;
- 6^a – Definição dos elementos (tipo e tamanho) e aplicação da malha;
- 7^a – Determinação dos modos de vibração.

A primeira análise, foi de um conjunto composto do virabrequim, pistões, bielas, volante de inércia, polia anti-vibração e engrenagem. Esse conjunto foi escolhido por representar de maneira simplificada o foco do desbalanceamento do motor. Posteriormente foram feitas duas análises dos virabrequins, de três e quatro cilindros. Como resultado de todo processo, foram obtidos os dez primeiros modos de vibrar das três análises. Através da análise do conjunto do virabrequim, foi possível verificar o comportamento dos componentes que estão diretamente em contato com a maior fonte de vibração. Os virabrequins isolados serviram para se fazer um comparativo e verificar em quanto o virabrequim de três cilindros vibrava a mais.

Todos os resultados foram expostos de maneira qualitativa, pois durante a pesquisa foi cometido um equívoco na exportação do modelo 3D em CAD para o programa de elementos finitos e devido ao pouco tempo as análises não puderam ser refeitas. O

modelo foi feito com as unidades em milímetros e deveria ser exportado em metros, como resultados eram para se obter os deslocamentos em metros e as frequências em *hertz*. Todas as interpretações foram feitas substituindo as unidades reais por grandezas abstratas, ou seja, magnitude(deslocamento) e ciclo(frequência).

3.2.1 Análise do conjunto do virabrequim

A análise do conjunto possibilitou a compreensão do comportamento de uma série de componentes, como biela, pistão, volante de inércia, engrenagem e polia anti-vibração, submetidos às forças desbalanceadas das massas rotativas do virabrequim. A magnitude e o ciclo de atuação foram os parâmetros obtidos. Por meio deles foi possível mensurar os danos causados a estrutura.

Os modos 1, 2, 3, 9 e 10 influenciaram o volante de inércia. Essa vibração no volante aparecendo em cinco modos ocorre porque ele é responsável por atenuar as variações na velocidade do virabrequim causadas pela mudança de torque.

A polia anti-vibração sofre com a vibração nos modos 7, 5 e 4. O excesso de vibrações na polia afeta uma série de componentes secundários, como o compressor e alternador.

Os modos 6 e 8 são os mais preocupantes, pois afetam diretamente o virabrequim, bielas e pistões. A avaria nesses componentes pode ocasionar a perda do motor prematuramente. A tabela 4 mostra os dados de cada modo, assim como, a figura 7 apresenta das deformações com um gradiente de cor, sendo o vermelho as magnitudes mais severas e o azul as mais brandas:

Modo:	Magnitude(máx):	Ciclo:
1°	1,004	0,46504
2°	1,004	0,4659
3°	1,001	0,76362
4°	1,377	0,83862
5°	1,377	0,83886
6°	1,114	1,1418
7°	1	1,1981
8°	1,27	1,5021
9°	1,005	1,5303
10°	1,005	1,5305

Tabela 4 – Resultados obtidos na análise do conjunto para um estudo qualitativo da magnitude e ciclos adimensionais.

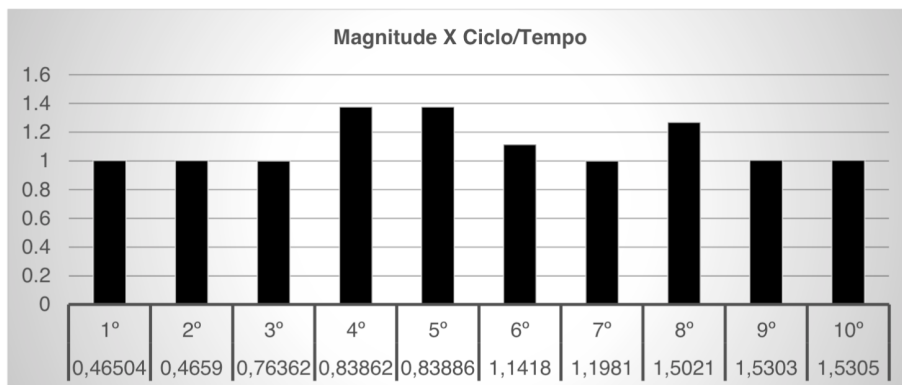


Figura 7 – Resultados obtidos na análise do conjunto para um estudo qualitativo da magnitude e ciclos adimensionais.

3.2.2 Análise comparativa do virabrequim de três cilindros e quatro cilindros

Com esse comparativo foi possível confirmar em todos os modos que o virabrequim de quatro cilindros sofre menos vibração que o de três cilindros. A magnitude do deslocamento e o ciclo, assim como os gráficos das peças deformadas demonstram que o virabrequim de três cilindros está mais propenso a quebras, falhas por fadiga (esforços cíclicos). Um ponto importante a salientar é que nas duas peças, as partes que mais sofreram com as vibrações foram as massas rotativas, pelo fato delas serem responsáveis por balancear os esforços dinâmicos a atenuando o desequilíbrio do eixo. Para uma correta comparação foram feitas as tabelas (5 e 6) e as figuras 8a e 8b.

Para uma breve análise, tomando como base os resultados do virabrequim de três cilindros, as maiores frequências foram obtidas nos 9° (5,0605) e 10° (5,2554) modos, sendo ciclos maiores que 5. Comparando com o de quatro cilindro que também obteve suas máximas frequências no 9° (3,1524) e 10° (3,6727), ou seja, uma diferença de 1,9081 e 1,5827 respectivamente. De uma forma bem superficial, esses números absolutos indicam que o virabrequim de três cilindros falhará antes do de quatro, sendo necessário um maior cuidado com manutenções periódicas.

Tratando da maior magnitude ou deslocamento, no de três cilindros o modo mais problemático foi o 5° (1,221), e no de quatro cilindros o 6° (1,203). A análise dos números da magnitude indica uma tendência de pouca variação em contrapartida dos ciclos que apresentam valores significativos.

VIRABREQUIM 3 CILINDROS		
Modo:	Magnitude(máx):	Ciclo:
1°	1,142	1,1885
2°	1,12	1,5241
3°	1,07	1,7992
4°	1,143	2,7819
5°	1,221	2,9048
6°	1,156	3,0879
7°	1,03	3,5201
8°	1,09	4,7024
9°	1,149	5,0605
10°	1,135	5,2554

VIRABREQUIM 4 CILINDROS		
Modo:	Magnitude(máx):	Ciclo:
1°	1	0,75607
2°	1,059	1,0644
3°	1,05	1,2616
4°	1	1,3543
5°	1	1,8484
6°	1,203	2,2975
7°	1	2,719
8°	1,184	3,0646
9°	1	3,1524
10°	1,029	3,6727

Tabelas 5 e 6 – Resultados obtidos na análise do virabrequim de três e de quatro cilindros para um estudo qualitativo da magnitude e ciclos adimensionais.

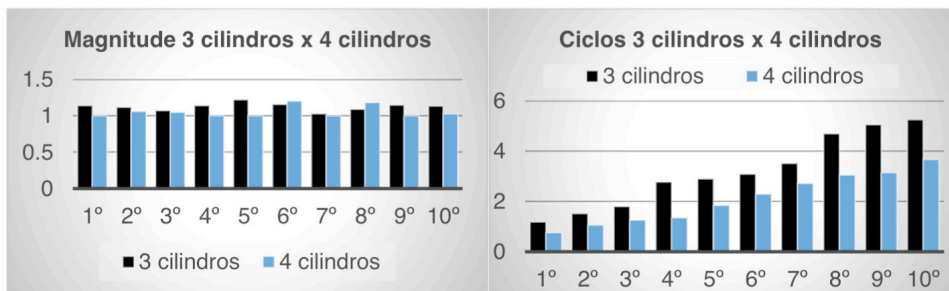


Figura 8a e 8b – Comparativos das magnitudes obtidas nas análises dos virabrequins para um estudo qualitativo (direita) e comparativos dos ciclos obtidos nas análises dos virabrequins para um estudo qualitativo(esquerda).

4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

É imprescindível dizer, portanto que, a análise CFD por volumes finitos, é uma excelente ferramenta para estudos de diversos tipos de análise, auxiliando os profissionais de engenharia em seus projetos, analisando todas as variáveis da simulação, seja velocidade, pressão, dentre outros. Com efeito, pode-se identificar possíveis inconsistências do projeto inicial e aplicar possíveis soluções com intuito de minimizar o tempo e o custo na produção do equipamento.

O desenvolvimento do presente trabalho possibilitou uma visão mais detalhada dos componentes de um turbocompressor e seus respectivos funcionamentos, bem como, calcular analiticamente um turbocompressor para um motor de 3 cilindros.

Vale ressaltar que, a análise foi feita com um compressor genérico o qual os resultados embora pareça razoáveis salvo a velocidade que está ligeiramente elevada devido a modelagem inadequada das palhetas, ainda sim, para um projeto de fabricação que foge ao escopo deste trabalho, seria necessário a modelagem e simulação completa do turbocompressor, sendo assim necessária também a modelagem da turbina, no caso deste trabalho, foi estipulado uma rotação de 50.000 rpm para o rotor do compressor, sendo que, o rotor do compressor e da turbina são ligados por um mesmo eixo, o qual conclui-se que, essa rotação foi tirada de uma faixa de trabalho de rotação da turbina.

Dada à importância da análise por CFD, bem como sua complexidade na construção do mesmo, faz-se necessário, a realização de trabalho futuros, com intuito de disseminar esse assunto, a qual hoje, restringe-se ao um nicho muito pequeno do ramo da engenharia.

REFERÊNCIAS

BOSCH, ROBERT GMBH. **Manual de tecnologia automotiva**. São Paulo: E. Blücher, 2005. 1232 p.

BRUNETTI, FRANCO. **Motores de Combustão Interna: volume 1**. São Paulo: Blucher, pag. 553, 2012.

BRUNETTI, FRANCO. **Motores de Combustão Interna: volume 2**. São Paulo: Blucher, pag. 485, 2012.

ESSS (2019). Curso de Introdução à Simulação Fluidodinâmica. Disponível em: <https://www.esss.co/biblioteca-tecnica>, acesso em: 15/03/2019.

GARRETT, HONEYWELL (2017). Apostila Tech 101. Disponível em: www.turbogarrett.com.br, acesso em: 25/03/2019.

GARRETT, HONEYWELL (2017). Apostila Tech 102. Disponível em: www.turbogarrett.com.br, acesso em: 02/04/2019.

GARRETT, HONEYWELL (2017). Apostila Tech 103. Disponível em: www.turbogarrett.com.br, acesso em: 15/04/2019.

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas**. Tradução de Arlete Simille. Revisor técnico: José Juliano de Lima Júnior. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SANTANA, C.M. **Análise de vibrações em um motor de combustão interna**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

SELIM, ANDRÈ BARONI. **Influência das forças de inércia e do balanceador de massas na dinâmica do motor de combustão interna**. 2010. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/264881/1/Selim_AndreBaroni_M.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2019

PROTÓTIPO DE UMA ESTEIRA AUTOMATIZADA PARA ÂMBITO INDUSTRIAL

Data de aceite: 01/11/2020

Mateus dos Santos Correia

<http://lattes.cnpq.br/5262758762043942>

Déborah da Costa Sousa Carvalho

<http://lattes.cnpq.br/4144094918443418>

Luiz Eduardo Borges de Lima

<http://lattes.cnpq.br/1593604254544116>

Elton Santos Dias Sales

<http://lattes.cnpq.br/0606271929638058>

RESUMO: A automação industrial baseia-se principalmente na ideia de maximizar a produção quantitativa da mercadoria o que conseqüentemente diminui o consumo de energia elétrica, resíduos e poluentes, favorecendo as condições de segurança através da aplicação de softwares e/ou equipamentos para maior aperfeiçoamento. Esse estudo tem como objetivo desenvolver um protótipo aplicado no âmbito industrial que realiza tarefas de forma automatizada em uma linha de produção. Na realização desse protótipo, foi construída uma esteira de madeira com 45 cm (quarenta e cinco centímetros) de comprimento, cuja correia da esteira foi feita com E.V.A (espuma sintética), e utilizou-se um motor de corrente contínua 6V interligado a um sistema de engrenagens obtidos de uma impressora sem uso; esse sistema de engrenagens permite diminuir a velocidade da esteira e aumentar o torque. Para garantir que

a esteira tenha o máximo de desempenho na realização da sua função, construiu-se um braço robótico com dois servos motores, um Servo TowerPro MG995 e um Micro Servo 9g SG90 TowerPro, com torques de 9,4 kgf.m e 1,2 kgf. cm, respectivamente, que executam a função de içamento do braço robótico e o travamento da peça que será posicionada na esteira. Para detecção da ausência das mesmas, empregou-se um sensor de distância denominado ultrassônico (referência HC-SR04) que envia uma onda de som na faixa de 40kHz (quarenta quilohertz), a distância pode ser mensurada pelo tempo que esse sinal demora para realizar seu percurso de ida e volta. Todos esses dispositivos foram integrados na plataforma arduino modelo UNO R3 que permite o controle de entradas e saídas. O sensor ultrassônico foi conectado a um pino analógico do arduino para realizar a leitura das distâncias entre 0 e 15 cm, responsável por todo o controle do sistema, atuando sob as seguintes condições, caso a distância informada pelo sensor seja menor que 15 cm indica presença de peça na esteira mantendo a mesma ligada, se não, ou seja distância maior que 15 cm esteira cessa o seu movimento e o braço robótico é acionado repondo a peça em falta. Com base no apresentado, observou que o sensor utilizado não oferece uma leitura precisa, acarretando algumas falhas no funcionamento do sistema. Outro entrave encontrado foi a inconstância da velocidade do motor devido a sua fonte de alimentação, retardando em sua resposta. A automação industrial tem sido inovada a cada dia forçando as empresas obter maquinários com elevado desempenho a fim de garantir

a qualidade dos produtos com tempo reduzido, aumentando a produtividade, e dessa forma impulsionando a concorrência das empresas, um fator indispensável para manter-se no mercado. Portanto, este projeto demonstrou por meio de um protótipo a eficiência da automação na indústria.

PALAVRAS - CHAVE: Automação, robótica, esteira.

ABSTRACT: Industrial automation is mainly based on the idea of maximizing the quantitative production of the goods, which consequently reduces the consumption of electricity, waste and pollutants, favoring safety conditions through the application of software and / or equipment for further improvement. This study aims to develop a prototype applied in the industrial scope that performs tasks in an automated way on a production line. In making this prototype, a 45 cm (forty-five cm) long wooden mat was built, whose belt was made with EVA (synthetic foam), and a 6V DC motor connected to a system was used. gears obtained from an unused printer; this system of gears allows to decrease the speed of the belt and to increase the torque. To ensure that the conveyor has maximum performance in carrying out its function, a robotic arm was built with two servo motors, a Servo TowerPro MG995 and a Micro Servo 9g SG90 TowerPro, with torques of 9.4 kgf.cm, 1, 2 kgf.cm, respectively, that perform the function of lifting the robotic arm and locking the part that will be positioned on the belt. To detect their absence, a distance sensor called ultrasonic (reference HC-SR04) was used that sends a sound wave in the 40 kHz (forty kilohertz) range, the distance can be measured by the time that this signal takes to perform your round trip. All of these devices have been integrated into the UNO R3 model Arduino platform that allows input and output control. The ultrasonic sensor was connected to an analogue pin of the arduino to read the distances between 0 and 15 cm, responsible for the entire control of the system, acting under the following conditions, if the distance informed by the sensor is less than 15 cm indicates presence of part on the belt keeping it on, if not, that is, distance greater than 15 cm, the belt stops its movement and the robotic arm is activated by replacing the missing part. Based on the presented, he observed that the sensor used does not offer an accurate reading, causing some failures in the system's operation. Another obstacle found was the inconsistency of the engine speed due to its power supply, slowing down its response. Industrial automation has been innovated every day, forcing companies to obtain machinery with high performance in order to guarantee the quality of products with reduced time, increasing productivity, and thus boosting the competition of companies, an indispensable factor to remain in the market. market. Therefore, this project demonstrated through a prototype the efficiency of automation in the industry.

KEYWORDS: Automation, robotics, treadmill.

A automação industrial baseia-se principalmente na ideia de maximizar a produção quantitativa da mercadoria, o que conseqüentemente diminui o consumo de energia elétrica, resíduos, poluentes e aumenta a qualidade de vida da sociedade, promovendo um maior conforto e integração, valorização do ser humano ao se libertar de tarefas repetitivas e entediantes e um maior enriquecimento pelo menor custo do produto, levando em consideração a baixa manutenção, rapidez e precisão na execução de tarefas (SILVERA, 1968). Esse estudo tem como objetivo desenvolver um protótipo aplicado no

âmbito industrial que realiza tarefas de forma automatizada em uma linha de produção. Na realização desse protótipo, foi construída uma esteira de madeira com 45 cm (quarenta e cinco centímetros) de comprimento, cuja correia da esteira foi feita com E.V.A (espuma sintética), e utilizou-se um motor de corrente contínua 6V interligado a um sistema de engrenagens obtidos de uma impressora sem uso; esse sistema de engrenagens permite diminuir a velocidade da esteira e aumentar o torque. Para garantir que a esteira tenha o máximo de desempenho na realização da sua função, construiu-se um braço robótico com dois servos motores, um Servo TowerPro MG995 e um Micro Servo 9g SG90 TowerPro, com torques de 9,4 kgf.m e 1,2 kgf.cm, respectivamente, que executam a função de içamento do braço robótico e o travamento da peça que será posicionada na esteira. Para detecção da ausência das mesmas, empregou-se um sensor de distância denominado ultrassônico (referência HC-SR04) que envia uma onda de som na faixa de 40kHz (quarenta quilohertz), a distância pode ser mensurada pelo tempo que esse sinal demora para realizar seu percurso de ida e volta. Todos esses dispositivos foram integrados na plataforma arduino modelo UNO R3 que permite o controle de entradas e saídas. O sensor ultrassônico foi conectado a um pino analógico do arduino para realizar a leitura das distâncias entre 0 e 15 cm, responsável por todo o controle do sistema, atuando sob as seguintes condições, caso a distância informada pelo sensor seja menor que 15 cm indica presença de peça na esteira mantendo a mesma ligada, se não, ou seja distância maior que 15 cm esteira cessa o seu movimento e o braço robótico é acionado repondo a peça em falta. Com base no apresentado, observou que o sensor utilizado não oferece uma leitura precisa, acarretando algumas falhas no funcionamento do sistema. Outro entrave encontrado foi a inconstância da velocidade do motor devido a sua fonte de alimentação, retardando em sua resposta. A automação industrial tem sido inovada a cada dia forçando as empresas obter maquinários com elevado desempenho a fim de garantir a qualidade dos produtos com tempo reduzido, aumentando a produtividade, e dessa forma impulsionando a concorrência das empresas, um fator indispensável para manter-se no mercado. Portanto, este projeto demonstrou por meio de um protótipo a eficiência da automação na indústria.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal do Piauí – Campus Floriano.

REFERÊNCIAS

SILVERA, I. F. and G. BIRNBAUM. J. Opt. Sot. Am. 58, 718 (1968).

DETERMINAÇÃO DE RITMO CARDÍACO A PARTIR DE SINAIS DE FOTOPLETISMOGRAFIA

Data de aceite: 01/11/2020

Data de submissão: 03/08/2020

Lucas Fernandes Alves dos Anjos

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Ponta Grossa - Paraná
<http://lattes.cnpq.br/9477661617423890>

Sergio Okida

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Ponta Grossa – Paraná
<http://lattes.cnpq.br/0034802427042185>

RESUMO: A fotopletismografia (PPG) é uma técnica não invasiva que, a partir de seu sinal característico, possibilita a determinação da frequência cardíaca e do nível de saturação de oxigênio na hemoglobina. Consiste em medir a variação temporal do volume sanguíneo, que passa por uma determinada extremidade do corpo humano (dedo, lóbulo da orelha ou outros), utilizando métodos ópticos. Este trabalho tem por objetivo mostrar a aplicação de um método de processamento no sinal de PPG a fim de obter o ritmo cardíaco instantâneo. Para tanto, foi utilizado a placa de desenvolvimento **AFE4490SPO2EVM** da Texas Instruments para a aquisição do sinal e o software MATLAB para o desenvolvimento do algoritmo de determinação do ritmo cardíaco. O método utilizado obteve resultados consistentes com fácil implementação.

PALAVRAS-CHAVE: Fotopletismografia, Processamento de sinais, Ritmo cardíaco.

HEARTH RATE DETERMINATION FROM PHOTOPLETHYSMOGRAPHY SIGNALS

ABSTRACT: Photoplethysmography (PPG) is a non-invasive technique that enables to gather heart rate data and oxygen saturation in hemoglobin from its characteristic signal. This technique consists of measuring the variation of the blood volume that passes through a body border (finger, lug or other) using optical methods. This paper aimed to apply a method of PPG signal processing to acquire heart rate. Therefore, it was utilized the development board AFE4490SPO2EVM from Texas Instruments to acquire the signal and MATLAB software for develop the algorithm to determinate heart rate. The utilized method had solid results with an easy implementation.

KEYWORDS: Photoplethysmography, Signal processing, Heart rate.

1 | INTRODUÇÃO

Com o avanço da medicina em paralelo com as novas tecnologias surge a possibilidade de se obter sinais fisiológicos de modo não invasivo, evitando assim infecções e possibilitando aquisições longas com menor desconforto ao paciente. Dentro deste contexto é possível obter sinais de variação do volume sanguíneo, ao longo do tempo, em extremidades do corpo humano (dedo, lóbulo de orelha ou outros) com o uso de métodos ópticos (LAULKAR et al., 2012). Basicamente, o princípio de funcionamento consiste em de

medir a quantidade de luz infravermelha absorvida ou refletida pelos capilares, em função da concentração de oxigênio no sangue. Este método é chamado de fotopletismografia (PPG, do inglês *photoplethysmography*), que consiste dos termos foto, que se refere à presença de luz, e pletismografia, que faz referência ao ato de medir a variação de volume sanguíneo em uma dada parte do corpo humano.

O sinal de PPG (Figura 1) pode ser utilizado para, entre outros, obter o ritmo cardíaco (RC) de pacientes através da medição dos intervalos de tempo entre picos de cada ciclo cardíaco. Para tanto, é necessário que o segundo pico, após a incisura dicrótica, presente no sinal não seja detectado de modo a comprometer a medição do RC (HLIMONENKO et al., 2003). Este tratamento pode ser aplicado por controle do método de detecção de picos, por comparações entre amplitudes baseadas na literatura médica, ou aplicando filtros e transformadas ao sinal a fim de detectar corretamente os picos do sinal de PPG e atenuar ou suprimir os picos secundários

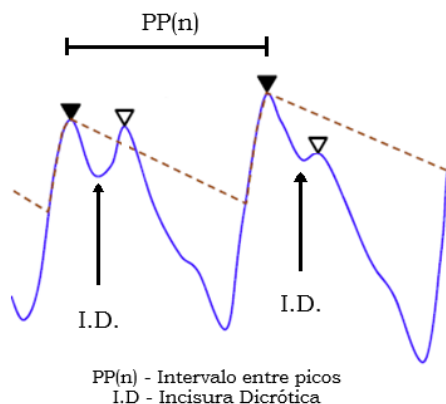


Figura 1 – Exemplo de sinal de fotopletismografia

Fonte: Modificado de SHIN et al. (2009)

Este trabalho tem por objetivo mostrar a aplicação de técnicas de processamento de sinais de PPG encontradas na literatura, a fim de fornecer os valores instantâneos do RC.

Para a aquisição do sinal de PPG foi utilizado a placa de desenvolvimento AFE4490SPO2EVM (TEXAS INSTRUMENTS, 2013), que possibilita a aplicação de filtros para remoção de ruído e flutuações da linha de base, além de regular alguns aspectos como taxa de amostragem, correntes e tensões dos sensores e LEDs. Os métodos *Slope Sum Function* (SSF) (JANG et al., 2014a) e *findpeaks* para a localização e demarcação dos picos do sinal são explorados.

Os resultados obtidos mostram que a utilização da técnica SSF permitiu a obtenção dos intervalos entre os batimentos cardíacos de maneira apropriada.

2 | DESENVOLVIMENTO

2.1 Aquisição e condicionamento do sinal de ppg

A placa AFE4490SPO2EVM (Figura 2) que permite amplo controle dos parâmetros de aquisição, foi utilizada para obter os sinais de PPG dos autores. Possui canal de recepção com filtro antirruído digital passa-banda de 0,1 a 5 Hertz, além de sistema analógico de cancelamento de ruído ambiente e filtro *notch* de 60 Hz para reduzir a interferência da rede de energia (TEXAS INSTRUMENTS, 2013). Os sinais foram obtidos com uma taxa de amostragem de 500 amostras por segundo, gravadas em arquivo Excel.



Figura 2 – AFE4490SPO2EVM

Fonte: Texas Instruments (2014).

2.2 Função para soma das inclinações

Após a aquisição de um sinal de PPG, devidamente filtrado para remoção de ruídos, o MATLAB foi utilizado para a implementação do algoritmo de detecção dos picos do sinal de PPG e obter o ritmo cardíaco. Como o sinal de PPG possui uma segunda onda característica logo após a primeira, como mostra a Figura 1, para se evitar sua detecção incorreta foi aplicada a função de soma de inclinações (SSF). A fim de se obter o sinal SSF (Figura 3) onde o segundo pico é atenuado ou suprimido, possibilitando a localização correta dos picos de cada ciclo cardíaco através da aplicação de um limiar adaptativo.

A SSF funciona como uma janela, que no caso teve 64 amostras para uma frequência de amostragem de 500 Hz, que percorre o sinal de PPG comparando valores e mantendo as inclinações positivas e zerando as demais. É definida pela Eq. (1). (JANG et al., 2014b),

$$SSF_i = \sum_{k=i-w}^i \Delta u_k, \quad \Delta u_k = \begin{cases} \Delta x_k & \text{se } \Delta x_k > 0 \\ 0 & \text{se } \Delta x_k < 0 \end{cases} \quad \therefore 1 + w \leq i \leq N \quad (1)$$

onde w é o tamanho da janela, N o número total de amostras do sinal PPG e SSF é o sinal resultante do filtro.

É possível ver na Figura 3 o sinal PPG e o SSF possuem picos coincidentes, o que torna a medição dos intervalos entre picos válida, uma vez que a frequência não foi alterada.

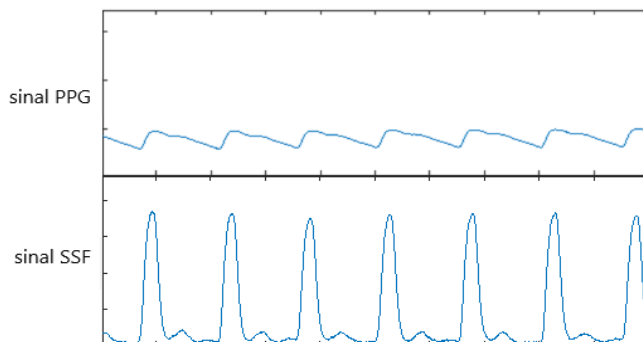


Figura 3 – Sinal PPG e Sinal SSF

Fonte: Autoria própria (2018).

2.3 Função para localizar picos

Para a localizar e medir os picos do sinal de SSF foi utilizada a função *findpeaks* do MATLAB. Esta função basicamente faz o comparativo ponto a ponto do sinal, comparando-o sempre com o ponto anterior e o próximo. Com auxílio deste comando a localização exata dos picos com base na amplitude máxima encontrada no sinal de SSF e um período refratário determinado para evitar a localização de mais de um ponto em um mesmo pico. No caso foi utilizado um limiar para localizar picos com amplitude de no mínimo 70% da amplitude máxima encontrada (JANG et al., 2014b) e intervalo mínimo de 0,1 segundos.

2.4 Geração do sinal de ritmo cardíaco instantâneo

Com os valores de pico e dos intervalos entre picos, obtemos o gráfico de ritmo cardíaco instantâneo através da Eq. (2). A partir do RC instantâneo é possível extrair valores médios, desvios, obter o espectro do sinal para a análise do sistema autônomo de controle do coração e outros.

$$RC(n) = \frac{60}{PP(n)} \quad (2)$$

onde $RC(n)$ é o ritmo cardíaco instantâneo em BPM (batimentos por minuto) e $PP(n)$ é o intervalo entre picos do sinal SSF em segundos.

3 | RESULTADOS

A partir dos sinais de SSF resultante e do filtro adaptativo foi possível localizar todos os picos do sinal corretamente como mostra a Figura 4. E a partir dos valores de intervalos encontrados e os RCs obter o gráfico de ritmo cardíaco como mostra a Figura 5.

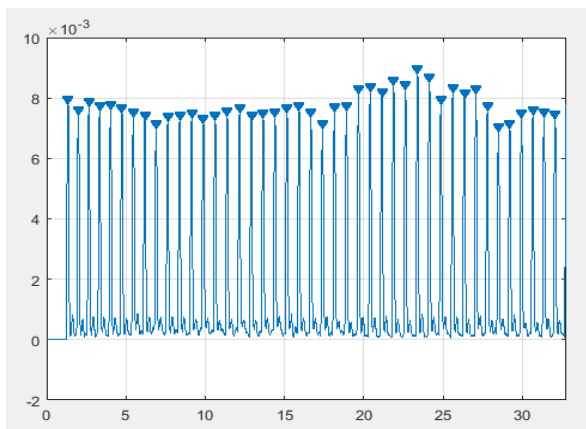


Figura 4 – Gráfico dos picos localizados

Fonte: Autoria própria (2018).

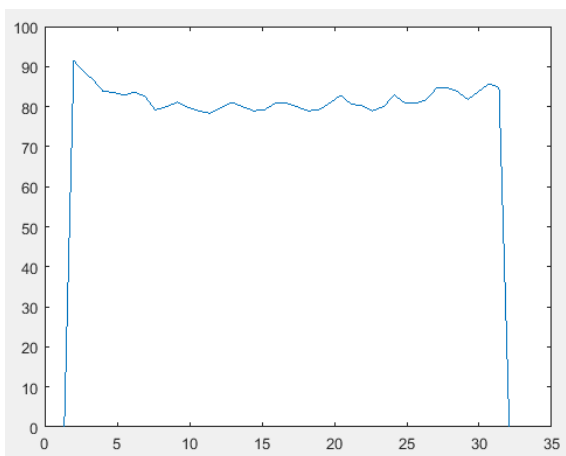


Figura 5 – Gráfico do ritmo cardíaco instantâneo

Fonte: Autoria própria (2018).

4 | CONCLUSÃO

É claro que os testes realizados ainda não são suficientes visto que foram coletados sinais de PPG apenas dos autores. Entretanto os resultados obtidos com o método SSF juntamente com o limiar adaptativo são consistentes e que possibilitam um estudo mais aprofundado sobre a aplicabilidade dos mesmos em outros sinais e sob mais condições.

REFERÊNCIAS

HLIMONENKO, Irina; MEIGAS, Kalju; VAHISALU, Rein. **Waveform Analysis of Peripheral Pulse Wave Detection in Fingertip with Photoplethysmograph**. Measurement Science Review, Estonia, v. 3, n. 2, p.49-52, 2003.

JANG, Dae-geun et al. **A Robust Method for Pulse Peak Determination in a Digital Volume Pulse Waveform With a Wandering Baseline**. IEEE Transactions On Biomedical Circuits And Systems, [s.l.], v. 8, n. 5, p.729-737, out. 2014b. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tbcas.2013.2295102>.

JANG, Dae-geun et al. **A Real-Time Pulse Peak Detection Algorithm for the Photoplethysmogram**. International Journal Of Electronics And Electrical Engineering, [s.l.], p.45-49, 2014a. EJournal Publishing. <http://dx.doi.org/10.12720/ijeee.2.1.45-49>.

LAULKAR, Rutuja; DAIMIWAL, Nivedita. **Applications of Finger Photoplethysmography**. International Journal Of Engineering Research And Applications (IJERA), Pune, v. 2, n. 1, p.877-880, fev. 2012.

SHIN, Hang Sik; LEE, Chungkeun; LEE, Myounggho. **Adaptive threshold method for the peak detection of photoplethysmographic waveform**. Computers In Biology And Medicine, [s.l.], v. 39, n. 12, p.1145-1152, dez. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.combiomed.2009.10.006>.

TEXAS INSTRUMENTS (Estados Unidos). **Datasheet: Integrated Analog Front-End for Pulse Oximeters AFE4490**. Estados Unidos: Texas Instruments, 2003.

MODELAGEM E SIMULAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DE LTNLG (COAXIAL E DE FITA) PARA GERAÇÃO DE RF UTILIZANDO O CST STUDIO

Data de aceite: 01/11/2020

Data de submissão: 26/08/2020

André Ferreira Teixeira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
São José dos Campos – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/4117184145281894>

Ana Flávia Guedes Greco

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
São José dos Campos – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/7131855554096423>

José Osvaldo Rossi

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
São José dos Campos – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/6776235915192672>

Joaquim José Barroso

Instituto Tecnológico de Aeronáutica
São José dos Campos – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/5240243263075069>

Fernanda Sayuri Yamasaki

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
São José dos Campos – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/0096441655292018>

Elizete Gonçalves Lopes Rangel

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
São José dos Campos – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/2061452556577317>

RESUMO: Linhas de Transmissão Não Lineares Giromagnéticas (LTNLG) representam atualmente uma nova forma de gerar radiofrequência (RF), em que se utiliza o fenômeno da precessão dos momentos magnéticos da ferrita, por meio da interação entre o campo magnético axial externo e o azimutal. Por ser um dispositivo complexo, é necessário a utilização de artifícios computacionais para a modelagem e simulação desta tecnologia ainda em fase de projeto, como por exemplo, simulações numéricas e simulações eletromagnéticas. Este trabalho apresenta a modelagem e simulação de dois tipos de LTNLG, coaxial e de fita, a fim de evidenciar oscilações no sinal de saída das linhas. Para isso, é utilizado o programa de simulação eletromagnética CST Studio, inserindo os materiais necessários e ajustando os parâmetros de cada linha. Oscilações RF foram observadas em ambos os sinais de saída das linhas, sendo interpretados nos domínios do tempo e da frequência e análise dos modos de propagação.

PALAVRAS-CHAVE: Linha de transmissão não linear giromagnética (LTNLG), geração de radiofrequência (RF), simulações eletromagnéticas.

ELECTROMAGNETIC MODELING AND SIMULATION OF GNLTL (COAXIAL AND STRIPLINE) FOR RF GENERATION USING CST STUDIO

ABSTRACT: Gyromagnetic Nonlinear Transmission Lines (GNLTL) currently represents a new way of generating radiofrequency (RF), in which the phenomenon of the precession of the ferrite magnetic moments is used, through the

interaction between the external axial magnetic field and the azimuth. As it is a complex device, it is necessary to use computational devices for the modeling and simulation of this technology still in the design phase, such as, for example, numerical simulations and electromagnetic simulations. This work presents the modeling and simulation of two types of GNLT, coaxial, and stripline, to show oscillations in the signal output of the lines. For this, the electromagnetic simulation program CST Studio is used, inserting the necessary materials and adjusting the parameters of each line. RF oscillations were observed in both lines' output signals, being interpreted in the time and frequency domains and analysis of propagation modes.

KEYWORDS: Gyromagnetic Nonlinear Transmission Line (GLTNL), generation of radio frequency (RF), electromagnetic simulations.

1 | INTRODUÇÃO

Por se tratar de uma nova alternativa para gerar RF, as LTNLs giromagnéticas despertam grande interesse por parte da comunidade científica, devido a possibilidade de sua aplicação em sistemas de transmissão de RF que exigem alta potência e operação em frequências elevadas (banda S e C) [Yamasaki, et al. 2016]. Esta tecnologia por si só já apresenta uma configuração mais compacta quando comparada à dos geradores de RF convencionais como dispositivos TWT (*Travelling Waves Tube*) [Rossi, et al. 2017a], pois não necessitam de circuitos amplificadores, oscilador local e tubo eletrônico a vácuo. Entretanto, ainda é um dispositivo relativamente grande e pesado para aplicações espaciais, tendo em vista que o peso de um artefato espacial está diretamente relacionado ao seu custo de lançamento. Com isto, a aplicação das LTNLs giromagnéticas em satélites exige neste momento, mais um esforço de compactação deste dispositivo, como por exemplo, eliminar uma fonte de corrente contínua com a substituição do solenoide por ímãs permanentes, diminuindo seu custo e volume total, o que possibilita a aplicação em sistemas pulsados de satélites radares (SAR) e em subsistemas de telecomunicações de satélites em geral. As vantagens de estudar estes dispositivos utilizando simulações eletromagnéticas é refletida na otimização de seus desempenhos, pois permitem o uso de prototipagem virtual [CST STUDIO®], o que possibilita identificar e mitigar problemas de conformação ainda no início do projeto.

Como uma tecnologia promissora para gerar RF, as linha giromagnéticas possuem seu meio magnético de propagação formado por núcleos magnéticos de ferrita imersos em um campo magnético axial externo constante. A Figura 1 ilustra o processo de geração de RF em uma LTNL giromagnética coaxial a partir da aplicação de um pulso de corrente, em que as oscilações de RF são geradas a partir da precessão dos momentos magnéticos da ferrita, quando excitados pelo campo azimutal gerado pela corrente do pulso de entrada, o qual interage com o campo magnético axial externo, gerado pelo solenoide.

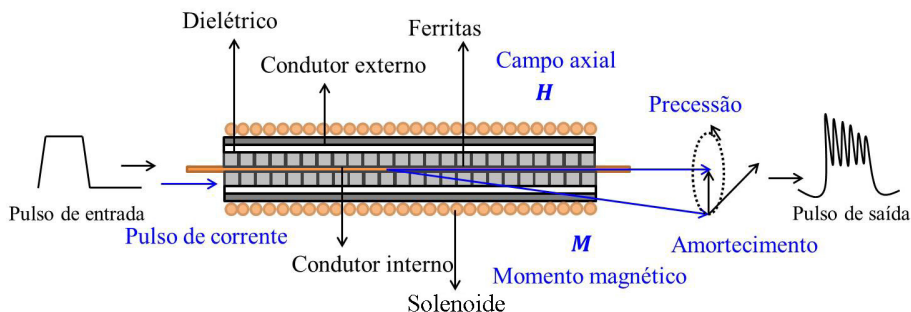


Figura 1 – Linha exibindo o efeito de precessão magnética, gerando oscilações a partir de um pulso retangular de entrada. [Rossi, et al. 2017b]

O efeito de precessão giromagnética amortecida é descrito pela equação de Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG) [Gilbert 2004]:

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial t} = \gamma \mu_0 \vec{M} \times \vec{H} - \frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \times \frac{\partial \vec{M}}{\partial t} \quad (1)$$

Esta equação descreve a dinâmica de magnetização que ocorre na ferrita [Bragg, et al. 2013a], onde \vec{M} é o vetor de magnetização, \vec{H} é o vetor do campo magnético axial, M_s é a magnetização na saturação, γ é a relação giromagnética dos elétrons ($1,760 \times 10^{11}$ rad/s/T), α é a constante de amortecimento da precessão, que depende do material e possui valores típicos de 0,001–0,1 e μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo. A polarização externa (\vec{H}) tradicionalmente é provida por solenoide posicionado na região externa da LTNL [Bragg, et al. 2010], como pode ser visto no arranjo experimental de uma linha de aproximadamente 60 cm de comprimento na Figura 2.



Figura 2 – Arranjo para teste de uma linha giromagnética coaxial usando solenoide como fonte do campo axial externo. [Yamasaki, et al. 2019]

Existem diferentes abordagens ao se investigar a geração de RF a partir de linhas giromagnéticas, onde umas delas é utilizando as chamadas simulações numéricas, que por meio de rotinas e códigos auxiliam a resolução das principais equações que regem

o fenômeno de precessão giromagnética no interior da linha, assim como os processos não lineares dos materiais. Algumas contribuições neste sentido são encontradas em [Karelin, et al. 2019], [Ahn, et al. 2015] e [Karelin, et al. 2016]. Outra abordagem utilizada é através de simulações eletromagnéticas (utilizadas neste trabalho), por meio de programas próprios para análise de campos eletromagnéticos e dispositivos de RF, como em [Reale, et al. 2016]. Uma vez que o estudo de linhas giromagnéticas envolvem diferentes tipos de problemas e inúmeros fatores, como por exemplo o campo magnético axial externo [Bragg, et al. 2013b], se faz necessário a utilização de vários métodos de resolução, por englobarem diferentes espécies de problemas, como altas frequências e campos eletrostáticos, o que é mais facilmente resolvido com programas específicos de simulações eletromagnéticas que solucionam vários tipos de problemas com seus diferentes métodos de resolução.

Programas de simulações eletromagnéticas têm sido usados com grande sucesso no projeto e simulação de sistemas de RF que empregam dispositivos como guia de ondas, linhas de fita, linhas coaxiais, estruturas de fios, estruturas de filtros, antenas, metamateriais etc. Representando uma poderosa ferramenta para projetos em eletromagnetismo, o programa de simulação *CST Studio Suite* oferece ao usuário um ambiente de simulação completo e amigável em um cenário totalmente 3D, facilitando ciclos de desenvolvimento mais curtos e custos reduzidos. O programa possui vários pacotes para a análise de uma vasta gama de problemas complexos, desde altas e baixas frequências, até motores, transformadores e sensores. A ferramenta utiliza algoritmos precisos para a resolução das equações de Maxwell de diferentes maneiras, realizando simulações tanto no domínio do tempo, utilizando o método de resolução Técnica de Integração Finita (FIT) e Matriz de Linha de Transmissão (TLM) quanto no domínio da frequência, por meio da técnica de resolução do Método de Elementos Finitos (FEM) [CST STUDIO®]. De maneira geral, o CST simplifica a estrutura dos projetos através da geração de malhas (pontos de resolução das equações de Maxwell), de acordo com a frequência utilizada, proporcionando de maneira automática, uma modelagem completa da estrutura simulada.

Comparando os métodos de simulação, vale ressaltar que no caso das simulações numéricas (Matlab, Mathematica, Maple, Octave etc), a equação de Landau-Lifshitz [Gilbert 2004] e [Vaselaar 2011], que descreve o fenômeno de precessão magnética na linha giromagnética, deve ser acoplada as equações de Maxwell, sendo escritas na forma de códigos numéricos para a modelagem do problema [Ahn, et al. 2015], o que pode aumentar sua complexidade e demandar mais tempo. Nas simulações eletromagnéticas (CST, HFSS, COMSOL etc) [Reale 2013], estas equações já são levadas em conta automaticamente na simulação do fenômeno, cabendo ao usuário entender, definir e ajustar corretamente os parâmetros do dispositivo, o que facilita bastante o projeto de uma LTNL.

Por meio das simulações eletromagnéticas, o objetivo deste trabalho é modelar e simular dois protótipos de LTNL giromagnética (coaxial e linha de fita) como um arranjo completo, a fim de verificar a geração de oscilações RF em seu sinal de saída. Sabe-se

que a amplitude do pulso de entrada [Rossi, et al. 2017a], o campo magnético axial, os tipos de materiais utilizados e a geometria da linha [Bragg, et al. 2012] podem influenciar nas oscilações e conseqüentemente na geração de RF. Espera-se com este trabalho obter um *setup* de simulação, auxiliando trabalhos futuros com o programa *CST Studio*, onde podem ser realizadas análises modificando os vários parâmetros citados anteriormente, a fim de entender o comportamento da linha e o impacto de tais parâmetros na formação das oscilações no sinal de saída.

2 | METODOLOGIA

Utilizando-se a ferramenta computacional (*CST Studio Suite*), foram montados dois arranjos com dois tipos de LTNL giromagnéticas: (a) o primeiro tipo, uma linha coaxial de 60cm de comprimento e diâmetro de 0.5cm utilizando o Kapton como dielétrico, apresentada na Figura 3; e (b) uma linha de fita, de 30cm de comprimento, 3,94cm de largura e 2,84cm de altura, como mostra a Figura 4. Ambos os arranjos utilizaram a ferrita FB-43-201 (AMIDON, com $\varnothing_{int}=1,09$ mm, $\varnothing_{ext}=1,93$ mm e espessura= 3,80 mm) e o cobre como condutor central e condutor externo, além disso, foram injetados pulsos retangulares de 25 kV na entrada das linhas e um campo externo aplicado para polarização axial de 30 kA/m.

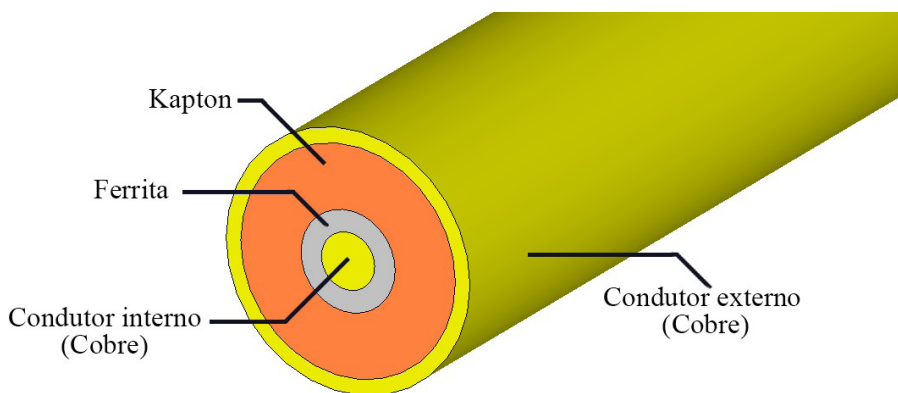


Figura 3 – Linha coaxial modelada no programa CST, exibindo suas diferentes camadas.

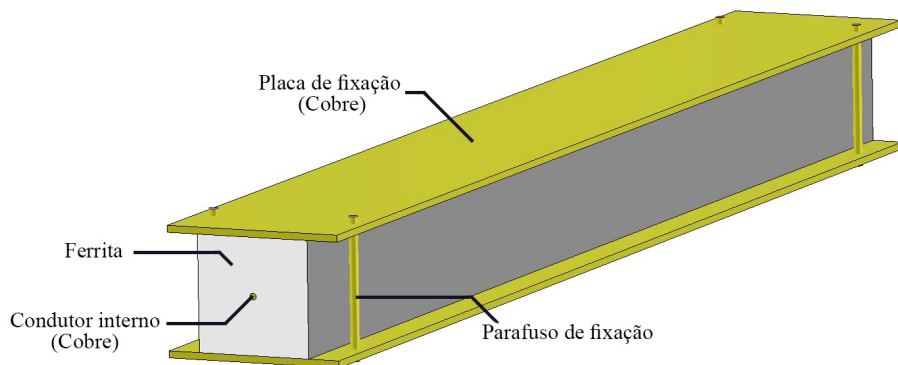


Figura 4 – Linha de fita modelada no programa CST, exibindo parafusos e placas de fixação.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

É possível observar oscilações no sinal de saída gerado em ambas as linhas, como mostram as Figuras 5 e 6.

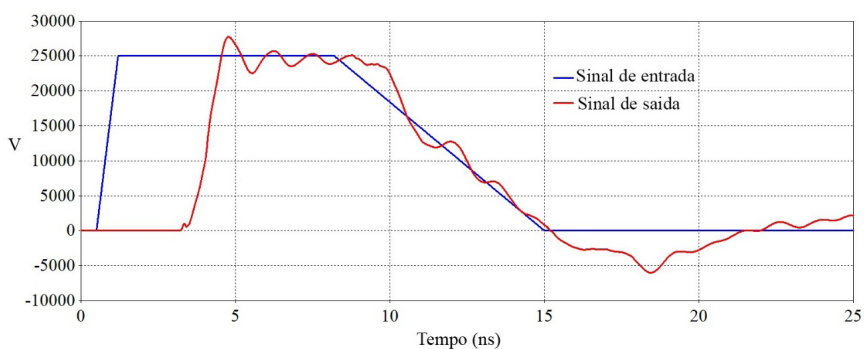


Figura 5 – Oscilações no sinal de saída da linha da linha coaxial.

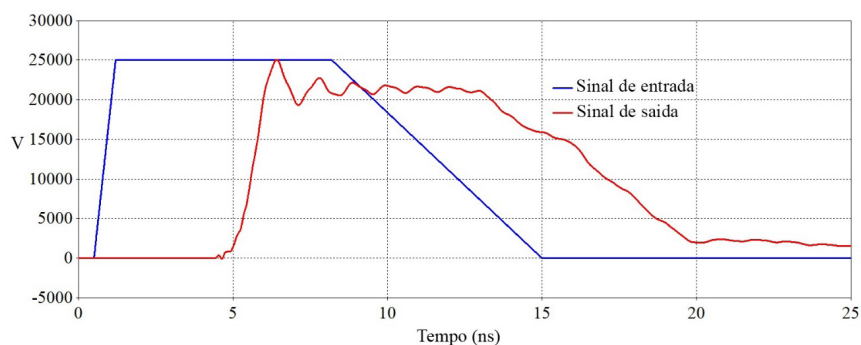


Figura 6 – Oscilações no sinal de saída da linha de fita.

Os sinais obtidos no domínio do tempo (Figuras 5 e 6) são importantes para compreender como o sinal se comporta ao se propagar pela linha. Pode ser observado uma diferença na amplitude no sinal de saída entre as linhas, ou seja, a linha de fita obteve uma maior atenuação das oscilações. A geometria, o material, o campo magnético axial externo e a amplitude do sinal influenciam nas oscilações na saída da linha, o que pode ser observado nas duas configurações distintas de linhas simuladas neste trabalho.

As Figuras 7 e 8 apresentam os espectros de frequência dos sinais de saída, onde é possível ver os picos em algumas frequências (basicamente na faixa de 200 a 400MHz), consequência das oscilações geradas, que permitem concentrar parte da energia do sinal em determinadas frequências, a fim de obter um sistema de transmissão de RF. Os gráficos no domínio da frequência são importantes para caracterizar uma região do espectro de frequência onde a linha pode ser operacional, ou seja, uma região de frequência de transmissão.

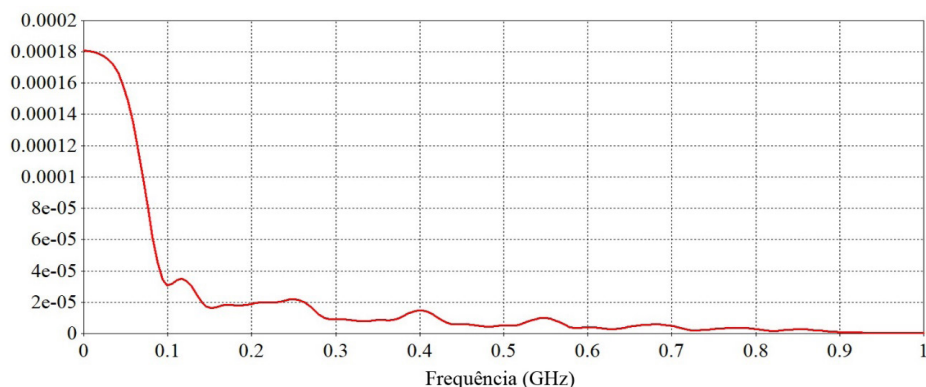


Figura 7 – Espectro de frequências do sinal de saída da linha coaxial.

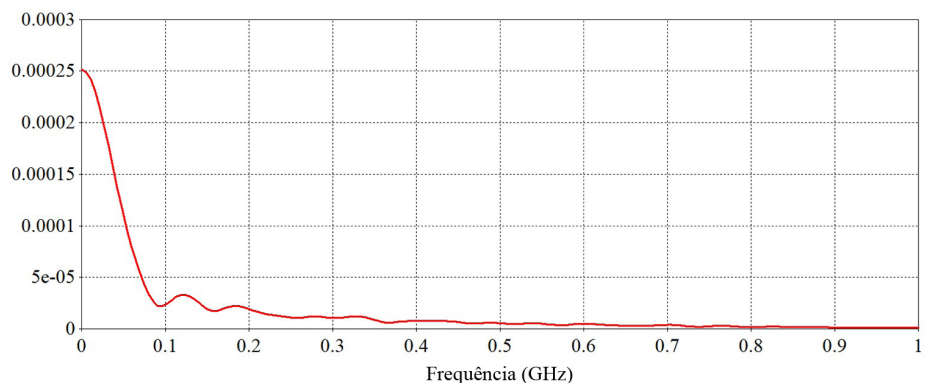


Figura 8 – Espectro de frequências do sinal de saída da linha de fita.

A seguir, nas Figuras 9 e 10 são apresentadas as linhas de campo dos modos de propagação em ambas as linhas. Sendo um aspecto importante em guias de ondas, os modos de propagação definem o tamanho físico do dispositivo, dada uma frequência de operação, e possibilitam o entendimento de como se comportam estes campos no interior da linha, facilitando a otimização do projeto da linha. Nota-se na Figura 10, que os vetores de campo para a linha de fita mostram-se consistentes com as simulações realizadas por [Reale, et al. 2016], evidenciando o modo de propagação TEM do campo elétrico e magnético no interior da linha de fita.

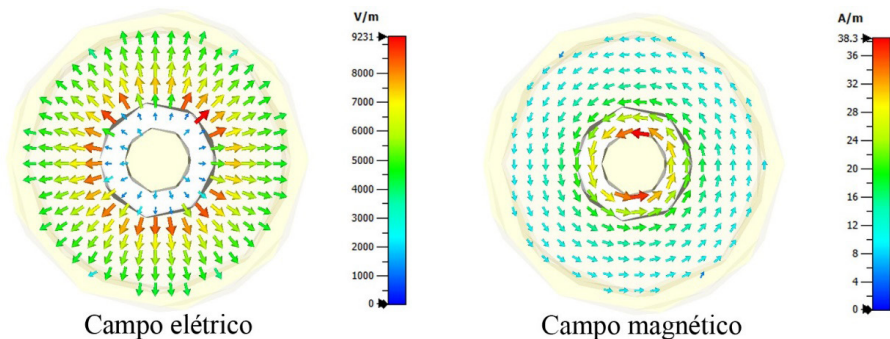


Figura 9 – Modo de propagação TEM observado na secção transversal no interior da linha coaxial.

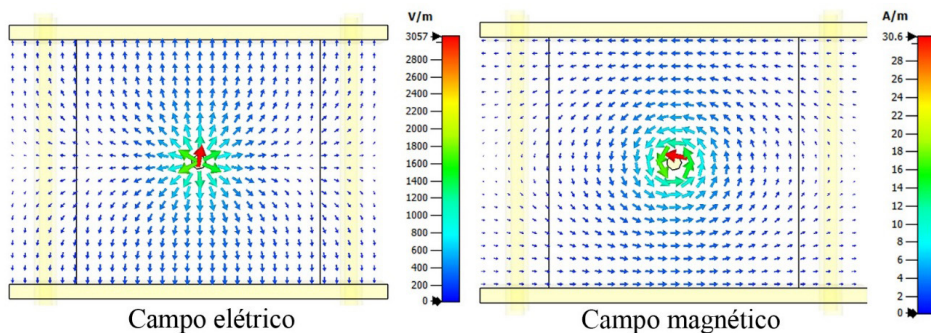


Figura 10 – Modo de propagação TEM observado na secção transversal no interior da linha de fita.

4 | CONCLUSÃO

São apresentados neste trabalho a modelagem e a simulação eletromagnética de dois tipos principais de linhas giromagnéticas, a linha coaxial e a de fita. Ficaram evidenciados suas potencialidades em gerar oscilações no pulso de saída. A simulação utilizando o *CST Studio* possibilitou o estudo destes dispositivos com mais detalhes, permitindo modificar

parâmetros, tipo de materiais e dimensões. Como resposta, o programa exibe inúmeras maneiras de visualizar os resultados, seja pela análise dos espectros de frequências dos pulsos ou das linhas de campo dos modos de propagação, facilitando o entendimento de seus fenômenos e contribuindo para a otimização do projeto das LTNLS.

O estudo da influência de parâmetros como campo magnético axial, amplitude do pulso de entrada, tipo de materiais, e a compactação destas linhas, serão investigados em trabalhos futuros.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE e ao Laboratório Associado de Plasma – LABAP pelos recursos utilizados. Este trabalho foi financiado em parte pela CAPES (88887.492309/2020-00), CNPq (305338/2016-1), FAPESP (2018/260862) e pelo escritório de pesquisa da Força Aérea Americana SOARD – USAF (FA9550-18-1-0111).

REFERÊNCIAS

- Ahn, J.-W.; Karelin, S. Y.; Kwon, H.-O.; Magda, I. I. and Sinitsin, V. G. (2015). “**Exciting high frequency oscillations in a coaxial transmission line with a magnetized ferrite: 2D approach**”. In *Journal of Magnetism*, v.100, n. 6, p. 68-72.
- Bragg, J.-W. B.; Dickens, J. C. and Neuber, A. A. (2013a). “**Material selection considerations for coaxial, ferrimagnetic-based nonlinear transmission lines**,” In *J. Appl. Phys.* 113, 064904.
- Bragg, J.; Dickens, J. C. and Neuber, A. A. (2010). “**Magnetic biasing of ferrite filled nonlinear transmission lines**”, In *IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference*.
- Bragg, J.; Dickens, J. C. and Neuber, A. A. (2012). “**Investigation into the temperature dependence of ferrimagnetic nonlinear transmission lines**”, In *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 40, no. 10.
- Bragg, J.; Dickens, J. C. and Neuber, A. A. (2013b). “**Ferrimagnetic nonlinear transmission lines as high-power microwave sources**”, In *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 41, No. 1.
- CST STUDIO SUITE®, CST – Computer Simulation Technology AG, www.cst.com.
- Gilbert, T. L. (2004). “**A phenomenological theory of damping in ferromagnetic materials**,” *IEEE Transaction on Magnetism*, Vol. 40, No. 6, p. 3443-3449.
- Karelin, S. Y.; Krasovitsky, V. B.; Magda, I. I.; Mukhin, V. S. and Sinitsin, V. G. (2019). “**Radio frequency oscillations in gyrotropic nonlinear transmission lines**”, In *Plasma*, 2, 258-271.
- Karelin, S. Y.; Krasovitsky, V. B.; Magda, I. I.; Mukhin, V. S. and Sinitsin, V. G. (2016). “**RF Oscillations in a coaxial transmission line with a saturated ferrite: 2-D simulation and experiment**”, In *8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals*, 5-11 September, Odessa, Ukraine.

Reale, D. V. (2013). "**Coaxial ferrimagnetic based gyromagnetic nonlinear transmission lines as compact high-power microwave sources**", Ph.D. dissertation, Texas Tech University, TX, USA.

Reale, D. V.; Parson, J. M.; Neuber, A. A.; Dickens, J. C. and Mankowski, J. J. (2016). "**Investigation of a stripline transmission line structure for gyromagnetic nonlinear transmission line high power microwave sources**", In *Review of Scientific Instruments* 87, 034706.

Rossi, J. O.; Yamasaki, F. S.; Schamiloglu, E. and Barroso, J. J. (2017a). "**Analysis of nonlinear gyromagnetic line operation using LLG equation**", In *IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC)*, Brighton, pp. 1-3.

Rossi, J. O.; Yamasaki, F. S.; Barroso, J. J.; Schamiloglu, E and Hasar, U. C. (2017b). "**Operation analysis of a novel concept of RF source known as gyromagnetic line**". In *Proc. SBMO/IEEE MTT-S Int. Microw. Optoelectron. Conf. (IMOC)*, Águas de Lindoia, SP, Brasil, pp. 1-4.

Vaselaar, A. (2011). "**Experimentation and modeling of pulse sharpening and gyromagnetic precession with a nonlinear transmission line**," M.S. thesis, Electrical Eng. Dept., Texas Tech Univ., Lubbock, TX.

Yamasaki, F. S.; Schamiloglu, E.; Rossi, J. O. and Barroso, J. J. (2016). "**Simulation studies of distributed nonlinear gyromagnetic lines based on LC lumped model**". In *IEEE Trans. Plasma Sci.* 44 (10), pp. 2232-2239.

Yamasaki, F. S.; Rossi, J. O.; Silva, L. C.; Rangel E. G. L. and Schamiloglu, E. (2019) "**Operation of a gyromagnetic line with magnetic axial Bias**," In *IEEE Pulsed Power & Plasma Science (PPPS)*, Orlando, FL, USA, pp. 1-4.

SIMULAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO NÃO LINEARES GIROMAGNÉTICAS UTILIZANDO MODELAGEM NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL

Data de aceite: 01/11/2020

Data de submissão: 26/08/2020

Ana Flávia Guedes Greco

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
São José dos Campos – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/7131855554096423>

André Ferreira Teixeira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
São José dos Campos – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/4117184145281894>

José Osvaldo Rossi

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
São José dos Campos – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/6776235915192672>

Joaquim José Barroso

Instituto Tecnológico de Aeronáutica
São José dos Campos – São Paulo
<http://lattes.cnpq.br/5240243263075069>

RESUMO: Pesquisas recentes têm demonstrado que linhas de transmissão não lineares (LTNLs) giromagnéticas podem ser utilizadas para a geração de rádio frequência de alta potência para diversas aplicações, como por exemplo, em sistemas embarcados no espaço usando dispositivos compactos sem empregar tubos eletrônicos a vácuo. Com base em trabalhos desenvolvidos no Brasil e no exterior, o presente artigo apresenta dois modelos numéricos unidimensionais (1D) para analisar os processos não lineares gerados por essas linhas baseado

na solução combinada das equações de Maxwell, para tensão e corrente, com a equação giromagnética Landau–Lifshitz–Gilbert (LLG).

PALAVRAS-CHAVE: Linhas de transmissão não lineares giromagnéticas, modelagem unidimensional, simulação numérica.

SIMULATION OF GYROMAGNETIC NON-LINEAR TRANSMISSION LINES USING UNIDIMENSIONAL NUMERICAL MODELING

ABSTRACT: Recent research has shown that non-linear gyromagnetic transmission lines (NLTLs) can be used for the generation of high-power radio frequencies for various applications, such as in space-based systems using compact devices without employing vacuum electronic tubes. Based on the works developed in Brazil and abroad, this article presents two one-dimensional numerical models (1D) to analyze the non-linear processes generated by these lines based on a combined solution of Maxwell's equations, for voltage and current, with the Landau–Lifshitz–Gilbert (LLG) gyromagnetic equation.

KEYWORDS: Gyromagnetic non-linear transmission lines, one-dimensional modeling, numerical simulation.

1 | INTRODUÇÃO

Linhas de transmissão não lineares (LTNLs) contínuas, também conhecidas como linhas giromagnéticas, são formadas por núcleos magnéticos à base de ferrita imersos num campo magnético axial externo constante, conforme ilustra a Figura 1.

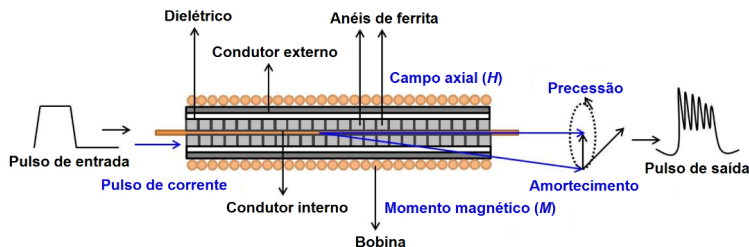


Figura 1 – Esquema básico de uma linha giromagnética. [Rossi, et al. 2017]

Nas últimas décadas, muitos estudos feitos no Brasil e exterior, através de simulações numéricas computacionais e de experimentos práticos têm demonstrado sua aplicabilidade em satélites radar SAR (*Synthetic Aperture Radar*) para sensoriamento remoto, plataforma móvel de defesa, na interrupção da comunicação em campos de batalhas e veículos espaciais, utilizando um sistema compacto com tamanho e peso reduzido [Moreira 2013] e [Noujeim, et al. 2014].

Contudo, apresentamos neste artigo dois modelos numéricos unidimensionais (1D) para analisar os efeitos produzidos pelas linhas giromagnéticas, cujos estudos vem demonstrando novas possibilidades para a realização de conversão direta de pulsos em oscilações de rádio frequência (RF) nas bandas L (1–2 GHz) e S (2–4 GHz) [Darling e Smith 2008] e [Rangel, et al. 2019].

2 | MODELAGEM NUMÉRICA

2.1 Conceitos gerais

Vários modelos que descrevem o comportamento de LTNLs giromagnéticas foram publicados nas últimas décadas por outros pesquisadores [Belyantsev e Klimin 1993] e [Ahn, et al. 2015].

Porém, todos estes trabalhos procedem do conjunto de duas equações de Maxwell (leis de Faraday e de Ampère) para a tensão e corrente, que representam uma aproximação unidimensional de um modelo físico.

Logo, tomando o caso particular para a propagação de ondas eletromagnéticas em uma linha contínua, no modo TEM (*Transverse Eletromagnetic*), onde os campos magnéticos e elétricos gerados não possuem componentes longitudinais, as variações espaço-temporais da tensão e corrente podem ser escritas como [Dolan 1999a]

$$\begin{aligned}\frac{dV}{dz} &= L_0 \frac{dI}{dt} = \frac{d\phi}{dt} \\ \frac{dI}{dz} &= C_0 \frac{dV}{dt}\end{aligned}\quad (1)$$

Da equação 1, temos que L_0 e C_0 , representam a indutância e capacitância por unidade de comprimento, respectivamente e Φ o fluxo magnético total, que pode ser expresso na linha [Dolan 1999a] pela equação abaixo quando se consideram também os efeitos da magnetização da ferrita:

$$\phi = L_0 I + \frac{\mu_0}{2} (d_m - d_i) \cdot \frac{dM}{dt} \quad (2)$$

onde I representa a corrente, μ_0 a permeabilidade do vácuo ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m), d_m e d_i os diâmetros externo e interno do cilindro coaxial de ferrita e $\frac{dM}{dt}$ a taxa de variação da magnetização, obtida diretamente da equação giromagnética unidimensional de Landau–Lifshitz–Gilbert (LLG), que descreve o movimento de precessão amortecido dos momentos de dipolo magnético da ferrita ao longo da linha, conforme o pulso de corrente se propaga, induzindo oscilações de alta frequência [Dolan 1993b]

$$\frac{dM}{dt} = \alpha \cdot \frac{\gamma}{1 + \alpha^2} \cdot \mu_0 \cdot M_s \cdot H \cdot \left(1 - \frac{M^2}{M_s^2} \right) \quad (3)$$

onde α representa a constante de amortecimento da precessão (0,1 – 1,0), γ a razão giromagnética do elétron ($1,76 \times 10^{11}$ rad/s/T), M_s a magnetização na saturação e H o campo magnético definido em termos do diâmetro efetivo do anel de ferrita e corrente I como [Dolan 1993b]

$$H = \frac{I}{\pi \cdot d_{ef}} \rightarrow d_{ef} = \frac{d_m - d_i}{\ln(d_m / d_i)} \quad (4)$$

2.2 Descrições dos modelos propostos

2.2.1 Primeiro Modelo

Este modelo foi baseado em dois trabalhos propostos por [Dolan 1999a] e [Dolan 1993b], onde a linha contínua é modelada como uma linha discreta LC (Indutor–Capacitor) em série com fontes de tensão, determinadas pela mudança no fluxo de magnetização da ferrita, cada um dos quais é acoplado em uma seção da LTNL, conforme ilustra a Figura 2.

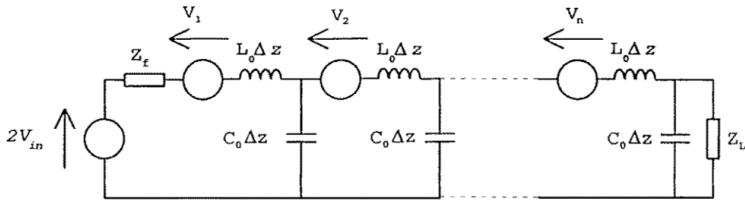


Figura 2 – Circuito equivalente de uma LTNL. [Dolan 1999a]

Logo, considerando que as fontes de tensão (elementos não lineares) em série com o indutor linear foram representadas pela equação do fluxo, chegamos a um modelo unidimensional (1D), acoplado o conjunto de equações de Maxwell (Equação 1) à equação giromagnética LLG (Equação 3).

Esse conjunto de equações foi espacialmente discretizado em elementos (células LC) de comprimento Δx , através o método de diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD), sendo representado pela Figura 3 (onde V_s representa a tensão do gerador, R_s a resistência do gerador e R_L a resistência da carga), bem como pela equação 5.

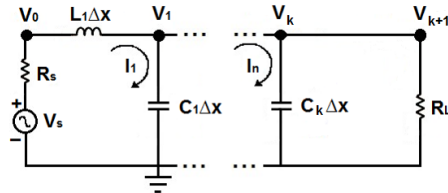


Figura 3 – Circuito equivalente de uma LTNL discretizada.

$$V_k^n = V_k^{n-1} - \frac{\Delta t}{C_0 \Delta x} [I_k^n - I_{k-1}^n]$$

$$I_k^n = I_k^{n-1} - \frac{\Delta t}{L_0 \Delta x} [V_{k+1}^n - V_k^n] - \mu_0 \cdot \left(\frac{d_m - d_i}{2} \right) \cdot \frac{\Delta t}{L_0} \cdot \frac{dM_k^n}{dt} \quad (5)$$

onde n representa o índice temporal, k representa as seções, Δt o incremento temporal e Δx o incremento espacial.

Da equação 5, o valor de $\frac{dM_k^n}{dt}$ será obtido diretamente pela componente circunferencial de $\frac{dM}{dt}$, que será avaliado para cada seção, usando-se o modelo giromagnético LLG, descrito na seção 2.1.

2.2.2 Segundo Modelo

Este modelo foi baseado em um trabalho proposto por [Coleman, et al. 2014], onde a linha contínua é modelada como uma linha discreta LC, onde os indutores são carregados com ferrita, conforme ilustra a Figura 4.

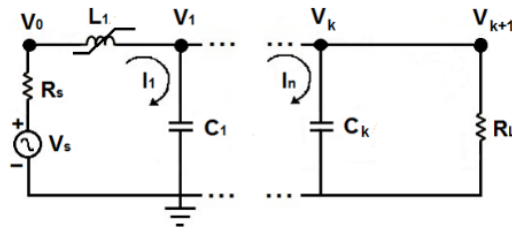


Figura 4 – Circuito equivalente de uma linha LC com indutores carregados com ferrita.

Logo, considerando que os indutores carregados com ferrita (elemento não linear) foram representados pela equação do fluxo, chegamos a um modelo unidimensional (1D) com três equações e três incógnitas, para as seções inicial, intermediária e final, acoplando o conjunto de equações de Maxwell (Equação 1) à equação giromagnética LLG (Equação 3).

Seção inicial:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV_k}{dt} = \frac{I_k}{C_0'} - \frac{I_{k+1}}{C_0'} \\ \frac{dI_k}{dt} = \frac{V_s}{L_0'} - \frac{V_k}{L_0'} - R_s \cdot \frac{I_k}{L_0'} - \frac{1}{L_0'} \cdot \frac{\mu_0}{2} \cdot (d_m - d_i) \cdot \frac{dM_k}{dt} \\ \frac{dM_k}{dt} = \alpha \cdot \frac{\gamma}{1 + \alpha^2} \cdot \mu_0 \cdot M_s \cdot \frac{I_k}{\pi \cdot d_{ef}} \cdot \left(1 - \frac{M_k^2}{M_s^2} \right) \\ k = 1 \end{array} \right. \quad (6)$$

Seção intermediária:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV_k}{dt} = \frac{I_k}{C_0'} - \frac{I_{k+1}}{C_0'} \\ \frac{dI_k}{dt} = \frac{V_{k-1}}{L_0'} - \frac{V_k}{L_0'} - \frac{1}{L_0'} \cdot \frac{\mu_0}{2} \cdot (d_m - d_i) \cdot \frac{dM_k}{dt} \\ \frac{dM_k}{dt} = \alpha \cdot \frac{\gamma}{1 + \alpha^2} \cdot \mu_0 \cdot M_s \cdot \frac{I_k}{\pi \cdot d_{ef}} \cdot \left(1 - \frac{M_k^2}{M_s^2} \right) \\ k = 2, 3, \dots, N-1 \end{array} \right. \quad (7)$$

Seção final:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV_k}{dt} = \frac{I_k}{C'_0} \\ \frac{dI_k}{dt} = \frac{V_{k-1}}{L'_0} - \frac{V_k}{L'_0} - R_l \cdot \frac{I_k}{L'_0} - \frac{1}{L_0} \cdot \frac{\mu_0}{2} \cdot (d_m - d_i) \cdot \frac{dM_k}{dt} \\ \frac{dM_k}{dt} = \alpha \cdot \frac{\gamma}{1 + \alpha^2} \cdot \mu_0 \cdot M_s \cdot \frac{I_k}{\pi \cdot d_{ef}} \cdot \left(1 - \frac{M_k^2}{M_s^2} \right) \\ k = N \end{array} \right. \quad (8)$$

onde, N representa o número de seções da linha, k uma seção genérica, V_k a tensão no k -ésimo nó, V_s a tensão da fonte podendo ser um sinal senoidal, ou uma forma arbitrária de pulso (trapezoidal, triangular, etc.), I_k a corrente no k -ésimo ramo série, M_k a magnetização do k -ésimo elemento, R_s e R_l a resistência no gerador e na carga, respectivamente, L_0 a indutância por unidade de comprimento, L'_0 a indutância por seção, expressa por: $L'_0 = L_0 \cdot \frac{l}{N}$ e C'_0 a capacitância por seção, expressa por: $C'_0 = C_0 \cdot \frac{l}{N}$, onde l representa o comprimento da linha.

3 I RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

3.1 Configurações Iniciais

Para validar o desempenho dos modelos propostos, utilizamos como referência uma linha contínua formada por núcleos magnéticos à base de ferrita, com os seguintes parâmetros:

Parâmetro	Símbolo	Valor
Comprimento	l	90 cm
Diâmetro interno da ferrita	d_i	0,003 m
Diâmetro externo da ferrita	d_m	0,006 m
Diâmetro externo do isolante dielétrico	d_o	0,009 m
Permeabilidade da ferrita	μ_f	25
Permissividade da ferrita	ϵ_f	16
Permeabilidade do isolante dielétrico	μ_d	1
Permissividade do isolante dielétrico	ϵ_d	2,1
Magnetização de saturação	$B_{sat} = \mu_0 M_s$	0,25 T

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para a simulação numérica.

Além disso, a linha foi ajustada para 250 seções, polarizada com uma tensão de 5 kV e conectada na saída à uma carga ($\sim 123 \Omega$), casada com a impedância característica da linha, definida por [Dolan 1993b]:

$$Z_0 = \sqrt{L_0 / C_0} \quad (9)$$

onde $L_0 = 3545,03 \text{ nH/m}$ e $C_0 = 235,22 \text{ pF/m}$.

Esses valores são calculados por uma formulação que depende dos parâmetros da linha e do cilindro de ferrita [Reale 2013]:

$$L_0 = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\mu_f \cdot \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \mu_d \cdot \ln\left(\frac{c}{b}\right) \right)$$

$$C_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\left(\frac{1}{\epsilon_f} \cdot \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{1}{\epsilon_d} \cdot \ln\left(\frac{c}{a}\right) \right)} \quad (10)$$

onde a e b representam o raio interno e externo do cilindro coaxial de ferrita, respectivamente e c o diâmetro externo do condutor coaxial.

Para o primeiro modelo, o conjunto de equações foi resolvido numericamente no software livre Octave [Eaton 2020] e para o segundo modelo no software Mathematica [Wolfram Research, 2020], ambos com as seguintes condições iniciais:

$$I_k(t=0) = 0, V_k(t=0) \text{ e } M_k(t=0) = M_s$$

3.2 Resultados e Discussões

Conforme mencionado na seção 2, em uma linha giromagnética, as oscilações de RF são geradas pela precessão dos momentos de dipolos magnéticos da ferrita quando excitados pelo campo azimutal criado pelo pulso de corrente, cujo campo interage com campo axial magnético externo e são reforçadas pela não linearidade do material magnético.

Esta precessão induz uma oscilação de alta frequência no pulso à medida que ele se propaga através da linha e como resultado o pulso resultante na saída da linha tem um formato semelhante a uma onda de choque com oscilações de RF sobrepostas, conforme é possível observar na Figuras 5.

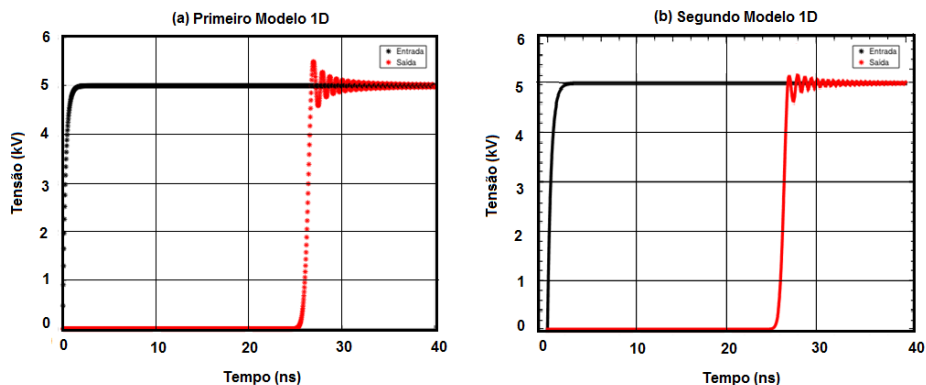


Figura 5 – Resultados para simulação numérica de uma linha giromagnética com 250 seções, utilizando: (a) Primeiro modelo 1D e (b) Segundo modelo 1D.

Essas oscilações de RF, na saída do pulso, podem ser expressas através da análise do domínio da frequência (FFT), conforme é possível observar na Figura 6.

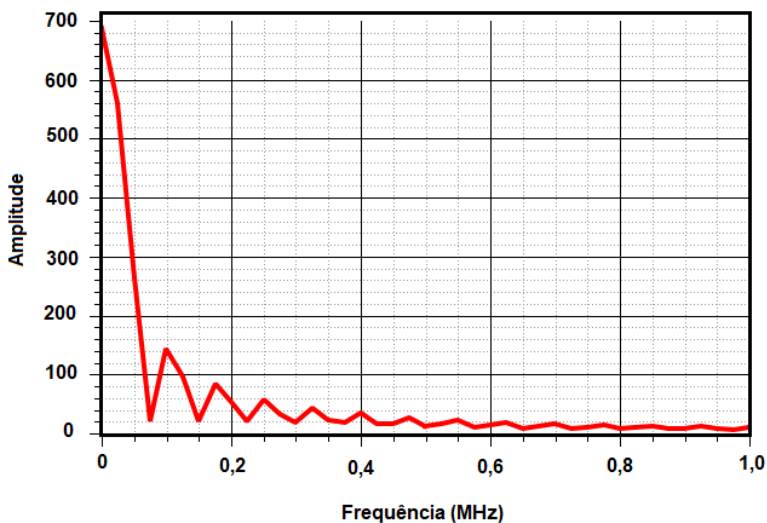


Figura 6 – FFT para o pulso de saída, de uma linha giromagnética com 250 seções.

Observa-se que para os modelos propostos é possível alcançar frequências de oscilações em torno de 200 MHz à 300 MHz, mostrando-se um resultado bastante promissor para aplicações relacionadas à conversão direta de pulsos em oscilações de RF.

Além disso, como esperado, o pulso de saída (curva vermelha) apresenta um tempo de subida reduzido quando comparado ao do pulso de entrada (curva preta), por causa

da queda da permeabilidade da ferrita. Desta forma, considerando que o pulso de entrada (curva preta) tem um tempo de subida em torno de 2,2 ns, é possível observar que em ambos os modelos, o pulso de saída (curva vermelha) tem um tempo de subida menor, ficando em torno de 1,5 ns e com um atraso de aproximadamente 25 ns causado pelo tempo de propagação do pulso através da linha e determinado por [Dolan 1993b]:

$$t = N \cdot \sqrt{L_0 \cdot C_0} \quad (11)$$

4 | CONCLUSÃO

Neste artigo, apresentamos dois métodos numéricos unidimensionais para análise dos processos não lineares produzidos por linhas giromagnéticas, baseando-se na solução combinada das equações de Maxwell, para tensão e corrente com a equação giromagnética LLG, que descreve a dinâmica de precessão dos momentos magnéticos do material que preenche a estrutura coaxial da linha.

Baseado nos resultados apresentados é possível constatar que ambos os métodos apresentam resultados muito próximos, corroborando com os resultados obtidos por [Laity, et al. 2015] e atestando a validade de ambos os métodos para a análise do desempenho de tais dispositivos.

Além disso, os códigos para a simulação numérica sendo escrito a partir do modelamento físico do fenômeno propicia uma melhor análise e entendimento dos fenômenos envolvidos e auxilia bastante o estudo e o projeto de linhas giromagnéticas para operação em alta frequência (banda S).

AGRADECIMENTOS

Autora Ana Flávia Guedes Greco agradece à CAPES e ao Escritório de Pesquisa da Força Aérea Americana (SOARD/AFOSR- contrato no. FA 9550-18-1-0111) pelo financiamento e apoio a este trabalho. Coautor José Osvaldo Rossi também agradece o suporte do CNPq através da Bolsa PQ-2 sob contrato 305.338/2016-1 e da FAPESP sob o contrato 2018-26086-2.

REFERÊNCIAS

Ahn, J.W.; Karelin, S.Y.; Kwon, H.O.; Magda, I. I. and Sinitsin, V. G. (2015). **“Exciting high frequency oscillations in a coaxial transmission line with a magnetized ferrite”**. *Journal of Magnetism*, v. 20, n. 4, p. 460-465.

Belyantsev, A. M and Klirmin, S. L. (1993). **“High-frequency generation by electromagnetic shock wave in transmission line with nonlinear capacitance”**. *Radiophys. Quantum Electron.*, vol. 36, no. 11, pp. 769-778.

Coleman, P.D.; Dudley, M. and Primm, P. (2014). **“Ferrite Solutions for Electromagnetic Shock Lines”**. No. SAND2014-18182R, Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States).

Darling, J.D.C. and Smith, P.W. (2008). **“High-power pulsed RF extraction from nonlinear lumped element transmission lines”**. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, v. 36, n. 5, p. 2598–2603.

Dolan, J. E. (1999a). **“Shock front development in ferrite-loaded coaxial lines with axial bias”**. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 32, no 15, pp. 1826-1831.

Dolan, J.E. (1993b). **“Simulation of ferrite-loaded coaxial lines”**. *Electron. Lett.*, v. 29, p. 762–763.

J. W. Eaton. (2020). GNU Octave, v. 5.2.0, USA.

Laity, G.; Coleman, D. and Struve, K. (2015). **“Characteristics of a 1D FDTD simulation of shockwave formation in ferrite loaded non-linear transmission lines”**. Sandia National Lab. (SNL-NM), ABQ, NM (USA).

Moreira, A. (2013). **“Synthetic aperture radar (SAR): Principles and applications”**. The *4th Advance Training Course in Land Remote Sensing*, p. 1-5.

Noujeim, K.; Malysa, G.; Babveyh, A. and Arbabian, A. (2014). **“A compact nonlinear-transmission-line-based mm-wave SFCW imaging radar”**. In *Proc. 44th Eur. Microw. Conf.*, Rome, Italy. Proceedings..., p. 1766–1769.

Rangel, E.G.L.; Rossi, J.O.; Barroso, J.J.; Yamasaki, F.S. and Schamiloglu, E. (2019). **“Practical constraints on nonlinear transmission lines for RF generation”**. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, v. 47, n. 1, p. 1000-1016.

Reale, D. V. (2013). **“Coaxial ferrimagnetic based gyromagnetic nonlinear transmission lines as compact highpower microwave sources”**. Ph.D. dissertation, Texas Tech University, TX, USA

Rossi, J.O.; Yamasaki, F.S.; Barroso, J.J.; Schamiloglu, E. and Hasar, U.C. (2017). **“Operation analysis of a novel concept of RF source as gyromagnetic line”**. *Proc. SBMO/IEEE MTT-S Int. Microw. Optoelectron. Conf. (IMOC)*, p. 1-4.

Wolfram Research Inc. (2020). Mathematica, v. 12.1, Champaign, IL.

CAPÍTULO 17

DESENVOLVIMENTO DE OBJETOS EDUCACIONAIS: ATIVIDADE PRÁTICA DE VAZÕES EM ORIFÍCIOS

Data de aceite: 01/11/2020

Data de submissão: 04/08/2020

Thais Esmério Pimentel

Centro Universitário Estácio de Juiz de Fora,
Faculdade de Engenharia
Santos Dumont, Minas Gerais
<http://lattes.cnpq.br/5133946430923460>

Henrique da Silva Pizzo

Centro Universitário Estácio de Juiz de Fora,
Faculdade de Engenharia
Juiz de Fora, Minas Gerais
<http://lattes.cnpq.br/4796271865292406>

RESUMO: Vazões em orifícios é um tema abordado na disciplina de hidráulica comumente ministrada no curso de graduação em engenharia civil. Em recorrência descreve as equações de Torricelli e Bernoulli onde tratam do escoamento de líquidos em reservatórios, tanques ou canais através de orifícios ou vertedouros. Defronte este panorama de ensino à hidráulica desenvolveu-se uma atividade prática com o objetivo de verificar as equações sobreditas e contribuir com a associação do conhecimento teórico ao conhecimento prático dos discentes, em forma de uma metodologia ativa de ensino. Onde utilizou-se um reservatório de acrílico com um orifício de 0,9 centímetros de diâmetro e uma régua medidora em sua parede. Inicialmente o orifício esteve sobreposto para que o reservatório pudesse preenchido com água até a altura de 22 centímetros do medidor, empregou-se

o uso de um cronômetro para medir o tempo de escoamento do líquido de acordo com os volumes demarcados, ao final preencheu-se uma tabela com os dados calculados através das equações e os dados obtidos no experimento, as informações contidas nesta tabela gerou um gráfico que relacionou as vazões em função do tempo de escoamento calculada e medida a fim de compará-las e verificar possíveis desvios, desta forma propôs-se uma situação real que valida os formulários vistos de forma teórica contribuindo para melhor absorção do conteúdo ministrado.

PALAVRAS-CHAVE: Vazão, Orifício, Reservatório, Atividade prática.

DEVELOPMENT OF EDUCATIONAL OBJECTS: PRACTICAL FLOW ACTIVITY IN HOLES

ABSTRACT: Flow in orifices is a topic addressed in the hydraulics discipline commonly taught in the undergraduate course in civil engineering. Recurrently describes the Torricelli and Bernoulli equations where they deal with the flow of liquids in reservoirs, tanks or channels through holes or spillways. Facing this panorama of teaching hydraulics, a practical activity was developed with the objective of verifying the above equations and contributing with the association of theoretical knowledge with the practical knowledge of students, in the form of an active teaching methodology. Where an acrylic reservoir with a hole of 0.9 cm in diameter and a measuring ruler was used in its wall. Initially the orifice was superimposed so that the reservoir could be filled with water up to a height of 22 centimeters from

the meter, the use of a stopwatch was used to measure the time of flow of the liquid according to the marked volumes, at the end it was filled a table with the data calculated through the equations and the data obtained in the experiment, the information contained in this table generated a graph that related the flows according to the calculated and measured flow time in order to compare them and check possible deviations, in this way a real situation was proposed that validates the forms seen in a theoretical way, contributing to a better absorption of the content taught.

KEYWORDS: Flow rate, Hole, Reservoir, Practical activity.

1 | INTRODUÇÃO

A hidráulica é o ramo da ciência que se dedica a estudar o comportamento de fluidos, tanto em movimento quanto em repouso, dando destaque aos seguintes temas: Conduitos Forçados; Instalações de Recalque; Conduitos Livres; Orifícios; e Vertedores; Golpe de Ariete, e demais outros (LENCASTRE, 1984), e abrange a grade curricular do curso de graduação em engenharia civil variando de acordo com a disponibilidade das instituições de ensino.

Em um cenário onde a disciplina é apresentada de forma teórica, desenvolveu-se uma experiência onde apresentou-se o conteúdo pragmático da disciplina em sala de aula, preparando o discente com os princípios do Teorema de Torricelli e Equação de Bernoulli (PORTO, 2004), e sequencialmente realizou-se a atividade prática com observação participante do aluno que analisou as variáveis, viabilizando a associação dos formulários constantes na ementa, com a visibilidade prática da disciplina.

As experiências práticas realizadas em disciplinas que abrangem uma teoria extensa auxiliam a ampliação de conhecimento científico, e permite o aprendizado de desenvolvimento de soluções de problemas complexos, onde pode-se fazer comparações entre o conteúdo teórico visto com o conteúdo prático realizado (LEITE; SILVA; VAZ, 2005).

O principal objetivo do experimento desenvolvido foi proporcionar aos alunos o entendimento prático da relação entre a área dos orifícios e a velocidade do escoamento, por meio da equação da continuidade, com a finalidade de obter a variável da velocidade teórica que ocorre na atmosfera.

Delimitou-se a composição deste trabalho em subdividir-se no conteúdo teórico onde apresenta-se os conceitos e equações para cálculo das variáveis no orifício e na superfície, e posteriormente no desenvolvimento da atividade prática para que se possa obter a aplicação dos dados calculados, por conseguinte a contraposição dos dados para aproveitamento do conhecimento aprendido.

2 | DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

Orifícios são aberturas com perímetro fechado e forma geométrica definida dispostas abaixo da superfície livre do líquido, localizadas na parede dos reservatórios, tanques e

canais utilizados para armazenamento e escoamento de líquidos e podem ser classificadas de acordo com o seu tamanho, os orifícios pequenos apresentam a medida vertical menor ou igual a um terço da profundidade, e classifica-se em grandes os orifícios que possuem a medida vertical maior que um terço da profundidade (LUDWIG; SILVA; DAMÉ; TEIXEIRA, 2014).

O princípio da continuidade afirma que a multiplicação da área A_1 pela velocidade V_1 é igual a multiplicação da área A_2 pela velocidade V_2 , sendo assim, em orifícios pequenos de área inferior a 1/10 (um décimo) da superfície do recipiente, pode-se desprezar a velocidade v_1 do líquido mostrado na Figura 1, pois este assume um valor próximo de zero (SAMPAIO; CALÇADA, 2005).

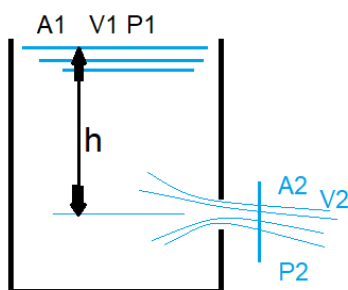


Figura 1: Reservatório hidráulico
 Fonte: Adaptado de Azevedo Netto (1998).

Ao aplicar a equação de Bernoulli, extraída do Manual de hidráulica de Azevedo Netto, (1998), no ponto superior do reservatório e no orifício de sua parede delgada, e denominando a velocidade do orifício como velocidade teórica (V_t), obtém-se a Equação I:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + Z_2 \quad (I)$$

Como a velocidade v_1 no ponto superior do reservatório é menor do que a velocidade teórica, e a pressão e altura se comportam como a Equação II:

$$\frac{p_1}{\gamma} = p_{atm} = 0; Z_2 = 0 \text{ e } Z_1 = h \quad (II)$$

Então obtém-se a Equação III:

$$v_t^2 = \left(Z_1 - \frac{p_2}{\gamma} \right) * 2g \quad (III)$$

De modo geral a veia líquida escoa na atmosfera conforme Equação IV do Teorema de Torricelli:

$$\frac{p_2}{\gamma} = 0 \therefore V_t = \sqrt{2 * g * h} \text{ (IV)}$$

A velocidade teórica (V_t) no orifício não leva em consideração as perdas existentes, sendo maior que a velocidade real em 2 ($V_t = 2 * V_{real}$).

2.1 Aplicação dos coeficientes

2.1.1 Coeficiente de redução de velocidade

A aplicação do coeficiente de redução de velocidade (C_v), ocorre como na Equação V:

$$C_v = \frac{V_{real}}{V_t} \therefore C_v = \frac{V_{real}}{V_t} \text{ (V)}$$

O valor médio de C_v em orifícios de paredes delgadas é 0,985, então obtém-se a velocidade real na Equação VI:

$$V_{real} = C_v * \sqrt{2 * g * h} \text{ (VI)}$$

2.1.2 Coeficiente de contração (C_c)

Aplicando o coeficiente de contração (C_c), na Equação VII, a área da seção transversal do jato é reduzida em relação à área do orifício ($A_2 < A_{real}$, sendo A_2 – Área da seção contraída), o valor médio prático de C_c em orifícios de paredes delgadas é 0,62.

$$C_c = \frac{A_2}{A} \text{ (VII)}$$

Pode-se escrever, então, que a vazão teórica no orifício é a mostrada na Equação VIII:

$$Q_t = A_{orifício} * V_{real} \text{ (VIII)}$$

2.1.3 Coeficiente de descarga (C_d)

Aplicando-se na Equação IX, o coeficiente de redução de velocidade e o coeficiente de contração supracitados, onde obtém-se o coeficiente de descarga (C_d):

$$Q_{real} = (C_c * A_{orifício}) * (C_v * \sqrt{2 * g * h}) \text{ (IX)}$$

$$C_c * C_v = C_d \therefore 0,62 * 0,985 = C_d \text{ (IX)}$$

O valor médio de Cd em orifícios de paredes delgadas é 0,61. Então obtém-se a vazão calculada na Equação X:

$$Q_{real} = 0,61 * A_{orifício} * \sqrt{2 * g * h} \quad (X)$$

A partir da vazão obtém-se o Gráfico 1 a seguir que relaciona a vazão em função do tempo de escoamento e altura da lâmina de água.

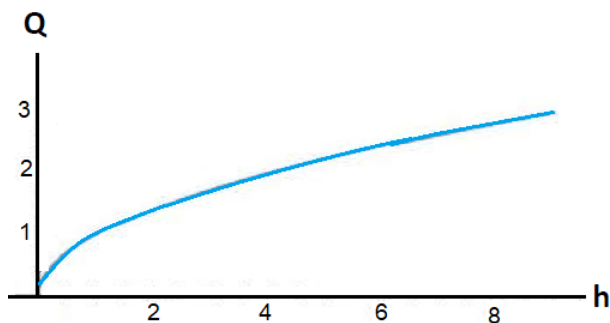


Gráfico 1 – Vazão x altura

Fonte: Os autores (2020).

1. EXPERIMENTO PRÁTICO

Para realização da atividade prática foi utilizado um reservatório de acrílico como mostrado na Figura 2, que possui as seguintes características físicas:

- A área da base foi calculada a partir da multiplicação entre si de suas arestas ;
- O volume da porção foi calculado a partir multiplicação da área da base pela demarcação da altura do nível de água definido a partir do orifício: $V = A_{base} * h_{porção} : 0,4 \text{ m}^2 * 0,02 \text{ m} = 0,0008 \text{ m}^3$;
- O orifício possui diâmetro de 0,09 m, e área de 0,0000636 m²;
- Medidor de altura do nível da água com altura mínima de 22 centímetros com início a partir do centro do orifício.

Posicionou-se o medidor de altura do nível de água de acordo com o tempo de escoamento para observação da velocidade, e por consequência a determinação das vazões, conforme mostrado na Figura 2A.

O orifício indicado na Figura 2B foi posicionado na parede delgada do reservatório com a finalidade de realizar a medição e controlar a vazão.

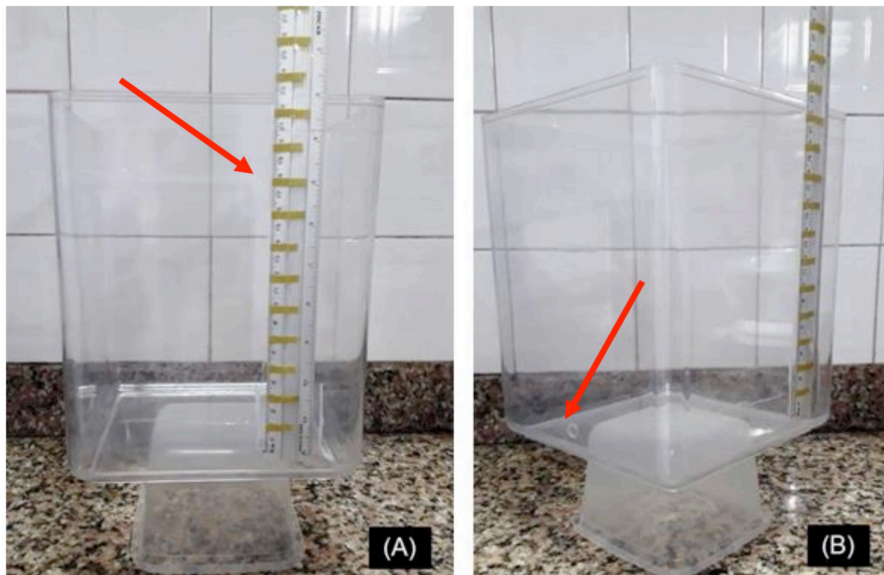


Figura 2 – Reservatório utilizado na atividade prática

Fonte: Os autores (2020).

A parede do reservatório é denominada delgada pois o jato de água toca a perfuração do orifício apenas em uma linha de seu perímetro, possui espessura fina, deste modo não existe aderência entre a parede e o jato (PIMENTA, 1997).

A primeira parte da atividade consistiu em sobrepor o orifício com a mão para que o reservatório possa ser preenchido com água até a altura de 22 centímetros marcada no medidor instalado na parede do reservatório, como mostrado na Figura 3.



Figura 3 – Reservatório ocupado com água

Fonte: Os autores (2020).

A segunda parte da atividade consistiu na utilização de um cronômetro para medir a quantidade de tempo decorrido no escoamento do volume de água mostrado na Figura 4 diante das seguintes marcações:

- 22 – 20 cm ($h_{ref} = 21$ cm);
- 20 – 18 cm ($h_{ref} = 19$ cm);
- 18 – 16 cm ($h_{ref} = 17$ cm);
- 16 – 14 cm ($h_{ref} = 15$ cm);
- 14 – 12 cm ($h_{ref} = 13$ cm);
- 12 – 10 cm ($h_{ref} = 11$ cm);
- 10 – 8 cm ($h_{ref} = 9$ cm);
- 8 – 6 cm ($h_{ref} = 7$ cm);
- 6 – 4 cm ($h_{ref} = 5$ cm);
- 4 – 2 cm ($h_{ref} = 3$ cm);
- 2 – 0 cm ($h_{ref} = 1$ cm) *Adesão às paredes do orifício.



Figura 4: Escoamento do volume de água

Fonte: Os autores (2020).

A régua medidora possui marcações como na Figura 5, onde posicionou-se a altura de referência e a medida.

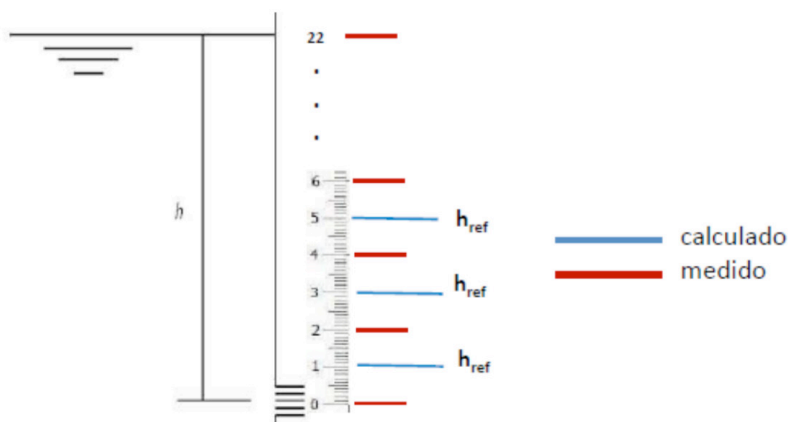


Figura 5 – Marcações da régua medidora

Fonte: Os autores (2020).

A terceira parte do experimento compreendeu o preenchimento do Quadro 1 que relaciona a altura média do líquido em centímetros, a vazão real em litros por segundo calculada através das fórmulas, o tempo de escoamento em segundos, a vazão medida em litros por segundo e o coeficiente de descarga medido:

$h_{\text{médio}}$ (cm)	$Q_{\text{calculada}}$ (L/s)	$t_{\text{escoamento}}$ (s)	Q_{medida} (L/s)	$C_{d \text{ medido}}$
1	0,018	***	***	***
3	0,032	25,14	0,032	0,65
5	0,041	19,04	0,042	0,67
7	0,048	15,98	0,050	0,67
9	0,055	13,98	0,057	0,68
11	0,061	13,22	0,061	0,65
13	0,066	12,04	0,066	0,65
15	0,071	11,65	0,069	0,63
17	0,075	10,49	0,076	0,66
19	0,080	10,16	0,079	0,64
21	0,084	9,66	0,083	0,64

Quadro 1 – Relação entre vazão calculada e vazão medida

Fonte: Os autores (2020).

A primeira coluna foi preenchida com o nível de água medido através da régua instalada na parede do reservatório. A segunda coluna foi preenchida com a vazão calculada através da Equação X. A terceira coluna foi preenchida com o tempo de escoamento do volume indicado na régua medido com cronômetro. A quarta coluna foi preenchida com o resultado da divisão do volume escoado pelo tempo medido que foi preenchido na terceira coluna. E a quinta coluna foi preenchida com o coeficiente de descarga medido ($C_{d \text{ medido}}$) que para ser calculado deve-se utilizar a Equação XI:

$$C_{d \text{ medido}} = \frac{Q_{\text{medida}}}{A_{\text{orifício}} * \sqrt{2 * g * h}} \quad (XI)$$

Portanto, foi determinada, através de manipulações algébricas que a vazão teórica no orifício é o produto da área do orifício pela velocidade real e a vazão real no orifício é o produto do coeficiente de descarga no orifício pela área e sua velocidade real.

A quinta parte do experimento baseou-se em traçar o Gráfico 2 que relaciona a vazão em função da altura da lâmina de água com o tempo de escoamento, interpolando os valores calculados e os valores medidos durante o escoamento.

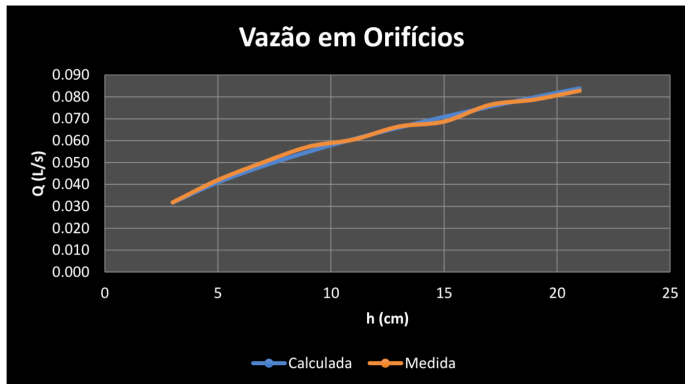


Gráfico 2 – Vazões calculadas e medidas

Fonte: Os autores (2020).

Durante a realização do experimento observou-se que quanto maior o nível da coluna de água, maior o alcance do jato de água escoado no orifício, isto acontece devido a intensidade do seu alcance ser proporcional a velocidade de escoamento pelo orifício, que por sua vez é proporcional à vazão.

A variação da redução da área do escoamento com o diâmetro do orifício impacta diretamente na vazão, o coeficiente de contração aumenta de acordo com a diminuição da coluna de água. Como o experimento possui um orifício de 0,9 centímetros de diâmetro a variação do coeficiente de contração pode atingir valores próximos de 1, assim sendo, quase não existe e a vazão reduz de forma lenta.

Quando a coluna de água diminuiu, assim como na Figura 6, o alcance do jato diminuiu e proporcionalmente a vazão também diminuiu.



Figura 6 – Alcance do jato de água diminuindo simultaneamente à coluna de água

Fonte: Os autores (2020).

3 | CONCLUSÃO

A realização qualificada da atividade prática sobre vazões em orifícios permitiu compreender que este tipo de atividade atrai a atenção dos discentes ao conteúdo ministrado.

A limitação desta atividade esteve no tema que abrangeu, que possibilitou a apresentação dos conteúdos abordados no Teorema de Torricelli, Equação de Bernoulli e Equação da Continuidade, serve de subsídio e estímulo para realização de experimentos práticos relacionados aos demais tópicos da disciplina.

Evidencia-se que o propósito deste trabalho foi proporcionar um entendimento prático do tema vazões em orifícios aos discentes da disciplina de Hidráulica do curso de engenharia civil, e espera-se que possam fazer uma reflexão de que os conhecimentos teóricos adquiridos em sala de aula serão solicitados em algum momento da vida profissional, possibilitando uma qualidade e eficiência na prestação de serviços.

Desse modo, os resultados do experimento reafirmam as equações vistas no âmbito teórico e conseqüentemente geram relevância no desempenho acadêmico dos alunos e revelam o fomento de novas metodologias de ensino e proposição de novas técnicas para assimilação de conteúdo para aprendizagem em hidráulica.

REFERÊNCIAS

1. LEITE, Adriana Cristina Souza; SILVA, Pollyana Alves Borges; VAZ, Ana Cristina Ribeiro. A importância das aulas práticas para alunos jovens e adultos: uma abordagem investigativa sobre a percepção dos alunos do proef ii. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências (Belo Horizonte)**, [S.L.], v. 7, n. 3, p. 166-181, dez. 2005. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21172005070302>.
2. LENCASTRE, A. Manual de hidráulica geral. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.
3. LUDWIG, Rafael; SILVA, Diego de Mello; DAMÉ, Rita de C.F.; TEIXEIRA, Claudia F.A.. COMPARAÇÃO ENTRE METODOLOGIAS PARA ESTIMATIVA DE VAZÃO EM CANAL DE IRRIGAÇÃO NO ARROIO CHASQUEIRO/RS. **Irriga**, [S.L.], v. 19, n. 1, p. 94, 30 abr. 2014. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2014v19n1p94>.
4. AZEVEDO NETTO, José Martiniano de; FERNANDEZ, Miguel Fernandez y; ARAUJO, Roberto de; ITO, Acácio Eiji. **Manual de Hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1998. 669 p.
5. PIMENTA, Carlito Flávio. **Curso de hidráulica geral**, vol. 1 e 2. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1997.
6. PORTO, R. M. **Hidráulica básica**, 3ª ed. São Carlos, EESC-USP, 2004.
7. SAMPAIO, José Luiz; CALÇADA, Caio Sérgio. **Universo da física 2: Hidrostática, termologia, óptica**. 2. ed. São Paulo: Atual, 2005b.

APLICAÇÃO TÉCNICAS E FERRAMENTAS DE PLANEJAMENTO, GESTÃO E CONTROLE, BASEADOS NO CONCEITO DA CONSTRUÇÃO ENXUTA

Data de aceite: 01/11/2020

Data de submissão: 27/07/2020

Elaine Garrido Vazquez

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Escola Politécnica
Rio de Janeiro – Rio de Janeiro
<http://lattes.cnpq.br/2873246607669444>

Renata Gonçalves Faisca

Universidade Federal Fluminense (UFF),
Escola de Engenharia
Niterói – Rio de Janeiro
<http://lattes.cnpq.br/3477740011608862>

Joyce Dias da Costa

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Escola Politécnica
Rio de Janeiro – Rio de Janeiro
<http://lattes.cnpq.br/9232579019248487>

RESUMO: As empresas do setor da Construção Civil têm investido cada vez mais no planejamento, gestão e controle dos processos construtivos durante a fase de execução dos seus empreendimentos. As ferramentas de gestão têm como objetivo promover uma construção com menos desperdícios e que, ao final, possa se obter um produto com a melhor relação *custo x benefício*. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é apresentar técnicas e ferramentas de planejamento de produção, gestão e controle de custos, com base no conceito da construção enxuta (*lean construction*). Este conceito, aplicado na construção civil, pode agregar

valor ao produto final, garantindo menor prazo de execução, menor custo e maximização da qualidade de execução da obra. Por meio da aplicação prática das ferramentas propostas no ciclo PDCA, apresentam-se os resultados positivos que corroboram com a melhoria contínua nos processos de uma construtora.

PALAVRAS-CHAVE: Planejamento, Gestão, Controle, Construção Enxuta, Ciclo PDCA.

TECHNICAL APPLICATION AND TOOLS FOR PLANNING, MANAGEMENT AND CONTROL, BASED ON THE CONCEPT OF LEAN CONSTRUCTION

ABSTRACT: With the current economic situation of the country companies have invested more and more in the planning, management and control of the construction processes during the phase of execution of their enterprises. These tools aim to promote a construction with less waste and that in the end, a product with the best cost x benefit ratio can be obtained. Therefore, the objective of this work is to present techniques and tools of production planning, management and cost control, based on the concept of the construction of the plant. This concept, applied in civil construction can add value to the final product, guaranteeing a shorter execution time, lower cost and maximizing the quality of execution of the work. Through the practical application of the proposed tools in the PDCA cycle, positive results are presented that corroborate the continuous improvement in the processes of a construction company.

KEYWORDS: Planning, Management, Control, Lean Construction, PDCA Cycle.

1 | INTRODUÇÃO

A partir da década de 1970, as transformações dos sistemas de produção, que se verificavam no Japão e a globalização da economia provocaram o aumento na competição mundial e a produção passou a ser vista como área estratégica. As construtoras buscaram melhorar a eficiência dos seus processos produtivos, por meio da criação de um ambiente de transparência em seus canteiros de obras com a utilização de ferramentas, práticas de gerenciamento e controle de produção. Desta forma, a apresentação dos conceitos da Construção Enxuta contribuíram com a formulação de estratégias de melhoria e apoio gerencial para estas empresas (SHINGO, 1996).

Essa mentalidade sobre construção enxuta busca tornar o processo produtivo mais preciso, minimizando desperdícios e retrabalhos, ou seja, produzir somente o necessário, com qualidade e que agregue valor para os clientes.

Segundo Aguiar (2006), o setor da indústria da construção civil vem experimentando mudanças a partir da modificação do perfil dos seus clientes. Os clientes têm exigido produtos de qualidade, preço competitivo e com prazos menores de entrega. A indústria da construção civil tem tentado se adaptar às novas exigências de mercado, adotando técnicas de gerenciamento e de produção com o objetivo de otimizar seus processos e produzir produtos cada vez melhores e mais baratos.

A aplicação da padronização de processos, redução de desperdícios e aumento da qualidade, mudando a cultura do modelo de construção e aplicando ferramentas no processo do planejamento, controle da produção e alteração de técnicas construtivas encaixa-se na construção enxuta, pois permite o uso de inovações ou métodos existentes de sistemas aplicados neste conceito (SANTOS 2002).

2 | OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é apresentar técnicas e ferramentas de planejamento de produção e controle de custos, aplicadas a uma empresa, baseadas no conceito da construção enxuta, que utilizadas na construção de edifícios, podem agregar valor ao produto final. Estas técnicas ainda não estão totalmente consolidadas em todas as construtoras do Brasil, portanto a análise da implantação em uma empresa, poderá contribuir para a introdução de uma melhoria contínua, visando a redução de custos e prazos dos empreendimentos.

3 | METODOLOGIA

Este trabalho apresenta as características da construção enxuta, também conhecida no Brasil por sua tradução *lean construction*, as principais ferramentas e filosofias da área de planejamento e controle presentes no setor da produção civil. Foi feita a aplicação

do método PDCA, das ferramentas de planejamento e controle em uma construtora. Em seguida, foi possível analisar as etapas e mostrar como os indicadores da empresa melhoraram após o investimento nestas áreas.

4 | CONSTRUÇÃO ENXUTA

O conceito de construção enxuta surgiu em 1992, com vistas a desenvolver técnicas e ferramentas que viabilizasse o modelo de gestão da produção em obras do setor da construção civil (SOUZA, 1997).

A construção enxuta é resultado da aplicação dos conceitos do Sistema Toyota de Produção, também conhecido como produção enxuta. O Sistema Toyota de Produção foi desenvolvido na Toyota Motor Company pelos engenheiros Taichi Ohno e Shigeo Shingo, os quais propuseram novos conceitos básicos da produção aplicados ao contexto da indústria automobilística japonesa, obtendo grande sucesso nos resultados. Esse sucesso chamou a atenção de indústrias ocidentais que estimuladas com os resultados passaram a utilizar os princípios do Sistema Toyota de Produção (FORMOSO, 2000).

O Sistema Toyota possui como princípio básico o estabelecimento de objetivos específicos para o processo de entrega do bem ou serviço, almejando agregar máxima qualidade durante a execução para satisfazer os requisitos dos clientes, ao mesmo tempo, em que busca a redução dos desperdícios relacionados à produção e do seu tempo de entrega. Outro princípio, é a aplicação do controle da produção durante todo o desenvolvimento do produto, desde o projeto à sua entrega (OHNO, 1997).

A construção enxuta, de acordo com KOSKELA (2004), destaca a máxima efetividade de um processo de produção, ao mesmo tempo em que procura a máxima eficiência do processo. Para atingir este patamar de eficácia e eficiência, deve-se fazer uso de ferramentas adequadas para o gerenciamento da construção. Uma ferramenta adequada deve satisfazer às necessidades do planejamento, ou seja, deve ser adequada ao tipo de projeto que pretende programar, deve maximizar a utilização dos recursos e deve ser capaz de detectar as incertezas e apontar as causas dos problemas.

A implementação dos princípios do Sistema Toyota de Produção na indústria da construção é considerada mais complexa, Segundo Anselmo e Moraes (2010), devido as diferenças existentes entre a indústria da manufatura e da construção civil.

Ainda existe muita dificuldade em se alcançar melhoria na eficiência do processo de construção, embora tenha havido grande avanço no desenvolvimento de métodos de planejamento (BALLARD e HOWELL, 1997). Para Souza *et al.* (2018), a indústria da construção civil de Fortaleza (CE) é reconhecida por ser um polo de aplicação da Construção Enxuta no Brasil, como uma filosofia de produção que aplica os princípios do Sistema Toyota de Produção. Já Riffel e Trentini (2020) afirmam que um dos grandes entraves para implantação e disseminação da construção enxuta é a resistência cultural, como por

exemplo, o fator humano. Em vista disso, os pesquisadores começaram a focar seus esforços de pesquisa no processo de planejamento de construções, em vez de somente trabalhar em técnicas para melhorar a efetividade da execução. Estas pesquisas foram direcionadas principalmente para identificar meios de melhorar a eficiência do processo de planejamento da construção, facilitando, dessa forma, o alcance dos objetivos do cliente.

4.1 Planejamento e Controle

Com o intuito de desenvolver um sistema de produção que atenda às necessidades dos clientes com o menor custo e o menor prazo faz-se necessária a implantação de um sistema de planejamento e controle da produção capaz de estabilizar a produção.

O Sistema Toyota de Produção e o Planejamento e Controle da Produção (PCP) na construção civil utilizam técnicas e conceitos para alcançar um objetivo unânime, a eliminação dos desperdícios e a geração de valor para o cliente final. A partir do uso do PCP como ferramenta e através do envolvimento dos colaboradores são desenvolvidas diversas medidas na Toyota para eliminar os fatores que ocasionam perdas na produção.

Planejamento é um processo que se utiliza de técnicas científicas, visando aumentar a eficiência, a racionalidade e a segurança através de previsões, programação, execução, coordenação e controle dos resultados, para atingir o que é desejado. (BERNARDES, 2001).

Segundo Daychoum (2007), o planejamento é dividido em diferentes níveis hierárquicos, tais como: longo, médio e curto prazo.

O planejamento de longo prazo se refere a datas globais da obra, tendo como produto principal nessa fase um plano mestre e enfocando somente datas chaves, (por exemplo: datas de entrega, conclusão de determinadas tarefas críticas) e que podem envolver as etapas de coleta de informações, onde são necessárias para criar o plano mestre no início da obra, e são oriundas em sua maioria da etapa de preparação do processo do planejamento; e a de preparação do plano, onde são disponíveis várias técnicas tais como o Diagrama de *Gantt*. O planejamento de médio prazo, o chamado planejamento tático, tem como função ligar o planejamento de longo e de curto prazo. O planejamento de curto prazo está relacionado à definição detalhada das atividades a serem realizadas, seus recursos e o momento certo para sua execução, no dia a dia da obra.

Existem vários métodos que servem como ferramentas de planejamento das atividades de gerenciamento para a construção civil, dentre os quais pode-se citar: o método PDCA, o Diagrama de Barras ou Gráfico de *Gantt*, o Cronograma curva “S” e o *Brainstorming*.

O controle de obras constitui-se de uma forma de se evitar perdas. As construtoras têm buscado melhorar o controle de seus processos, devido ao aumento da competitividade no setor. Dessa forma, diminui-se os retrabalhos e custos extras, além de melhorar a qualidade de suas construções e formar um banco de dados que auxilie a execução de novas obras (ROCHA, 2007).

Os métodos de combate ao desperdício de uma empresa envolvem a utilização de ferramentas que visam reduzir ao desperdício, que se empregam no processo produtivo, tornando-o mais eficiente e eficaz. Como exemplo tem-se: Indicadores de Perdas e Consumo, Diagrama de Pareto e a Curva “ABC”.

5 | EXEMPLO DE APLICAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE PLANEJAMENTO E CONTROLE EM UMA CONSTRUTORA

5.1 Implantação do Ciclo PDCA na Empresa

A construtora ao longo deste último ano, identificou que para se manter entre as maiores construtoras do país, precisava melhorar os prazos e custos de suas obras, para que não fosse afetada pela crise e mantivesse o número de unidades em construção. Foi constatado que os estoques dos empreendimentos não possuíam uma logística e que com uma quantidade maior que o necessário, a forma de produção não estava padronizada e que existia bastante desperdício (controle pouco efetivo). A construtora então quis implantar a ideia da construção enxuta, focando em itens que agregassem valor. Sendo assim, a empresa buscou uma forma de melhorar seu próprio sistema, e utilizou o método PDCA.

Após rodar o método PDCA, contratou uma empresa de consultoria com foco em planejamento, e assim reestruturou a equipe, investiu em treinamentos e em novas ferramentas que visam o cumprimento dos prazos e diminuição dos custos. Neste momento, na empresa, foi criado o PDE (programa de desenvolvimento de engenheiros).

Foi adotada a estratégia de se implantar um método para se alcançar uma meta. A partir do momento que ficou definido que seria aplicado o método PDCA foi necessário introduzir a definição de meta, que é o resultado a ser alcançado. Para a determinação da meta foi necessário entender o problema a se resolver. Com base na definição de problema, a construtora passou a identificar as falhas que ocorriam para poder verificar como corrigir e melhorar. Após chegar nas causas, foi possível montar um plano de ações a serem tomadas, estabelecimento dos responsáveis e os respectivos prazos.

A figura a seguir demonstra o ciclo do PDCA e que foi implantado na construtora.

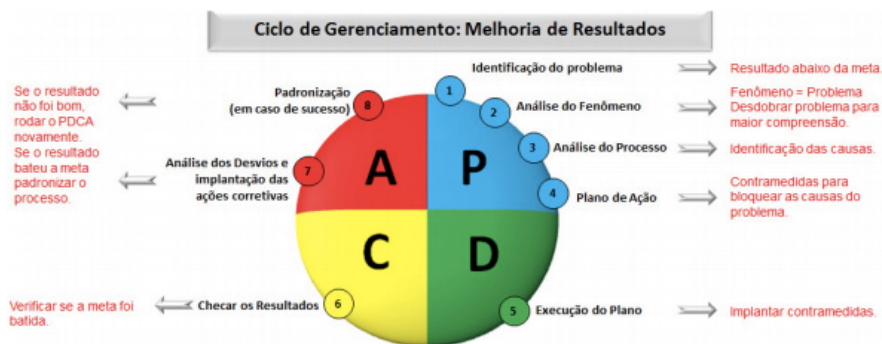


Figura 1: Ciclo PDCA implantado na construtora.

O primeiro passo dado pela construtora, após a consultoria sobre planejamento, foi a implantação do método PDCA em suas atividades e a primeira delas foi a gestão de canteiro.

O uso do método PDCA possibilitou inúmeros benefícios para a empresa: avaliação do desempenho (real x planejado), identificação das características dos problemas, identificação das causas dos problemas, elaboração de ações corretivas robustas, acompanhamento da eficiência das ações implantadas, desenvolvimento de conhecimento para melhoria dos resultados das obras no futuro. Com a aplicação do método PDCA foi possível analisar itens que antes não tinham controle.

Após a construtora ter inserido o método para resolução dos problemas para atingir metas, foi realizada a reestruturação do setor de planejamento e controle, no que diz respeito a equipe e ferramentas de trabalho. A principal mudança foi o pensamento de que o planejamento de um empreendimento inicia aproximadamente um ano antes do mesmo ser lançado para vendas e assim ficou dividido entre pré-obra, durante a obra e pós obra.

Desta forma, ficou definido que um ano antes do lançamento do empreendimento, começam as reuniões de pré-obra, onde são verificados os itens relacionados às licenças, registros de pessoas jurídicas (PJ), viabilidade de ligações provisórias e início da contratação dos projetos.

Também foi incluído uma etapa prévia para a compatibilização dos projetos e a análise logística do canteiro. Por fim, foi prevista uma reunião com a equipe de engenharia da obra, para a programação de execução dos serviços e construção do Planejamento Geral de Obra (PGO), que é a ferramenta da empresa que mostram os gráficos *Gantt* dos serviços, curva S, curva de produção mensal e o histograma de mão de obra.

Esta nova ideia de planejamento foi difundida e implantada pela empresa, o que caracterizou o cumprimento do planejamento macro (longo prazo). Para o cumprimento do planejamento de médio e curto, foi criada uma parceria entre o setor de planejamento que

antes ficava no escritório. Assim, criou-se um micro planejamento, com desdobramentos das metas globais em mensais e até semanais, com a ferramenta chamada de Acompanhamento Mensal de Produção (AMP). Assim, com este acompanhamento, foram realizadas reuniões semanais, onde era possível verificar a necessidade de aumento de mão de obra, análise da produtividade dos funcionários, análise da necessidade de reprogramação dos serviços ou montar um plano de ação para resolver problemas. Após as reuniões semanais, com o planejamento da próxima semana, são criadas as OS (ordem de serviço) no sistema “mobile” com os serviços que serão executados e os recursos necessários (material, mão de obra e equipamentos).

O controle faz parte do ciclo de gerenciamento do PDCA e representa justamente a etapa de acompanhamento, onde é medido se o serviço está sendo executado de acordo com o planejado. E assim, para checar se o real está de acordo, foi implantada uma reunião em todos os empreendimentos, chamada de “reunião de discrepância” para se fazer uma análise dos resultados, comparando-os com o planejado com intuito de determinar o avanço, detectar as discrepâncias ocorridas e estabelecer as condições para sua correção, através de uma análise contínua do sistema de planejamento e controle.

Para a empresa, a análise das discrepâncias talvez seja o documento mais importante do Departamento de Controle, pois através desse documento é possível ter todo o histórico da obra até a data em questão, dividido por atividade. O documento é gerado entre a primeira e a segunda quinzena de cada mês, sempre contemplando todas as informações da obra até o final do mês anterior. Em síntese, neste documento é possível ver todos os materiais e serviços que já foram realizados até a data base. Podem-se visualizar os materiais e serviços desejados tanto separadamente, quanto por grupo.

O mais interessante deste documento, em forma de planilha é que ela faz projeções físicas e financeiras dos grupos de materiais e serviços utilizados na obra, fazendo uma previsão se tal insumo trará economia ou prejuízo ao final da obra, levando-se em consideração o saldo físico.

E agregando, existe também o relatório gerado através do acompanhamento das OS (ordens de serviço), onde diariamente os encarregados e estagiários apontam onde a mão de obra está atuando, e a qualquer momento pode-se gerar um relatório de produtividade de mão de obra, separando o resultado por mão de obra própria e terceirizada, mostrando os funcionários com maiores e os com menores desempenho, a média da cidade, regional e nacional. Com isso pode-se traçar ações para melhoria de produtividade, o que faz com que após aumento da média, possamos ter cada vez menos pessoas na obra, reduzindo custo direto e indireto e facilitando a padronização na execução e conferência dos serviços.

Um outro item que a construtora focou, baseado na construção enxuta, foi a implantação de um estoque mínimo (ter apenas o necessário para que a produção não pare e que atenda ao ciclo de produção, de acordo com a previsão de entrega), visto que foi verificado que as obras possuíam estoques altos o que demandava mais espaço

para armazenamento, maior equipe para controle e possibilitava grandes perdas em movimentações, causando desperdícios de materiais. Então chegou-se no estoque ideal de acordo com o número de unidades a produzir no próximo mês, dado pela equação = (44% do orçamento (valor correspondente ao material estocável) x o % de avanço físico previsto para o próximo mês) / (unidades previstas para o próximo mês). A ferramenta que auxilia para que os empreendimentos tenham o estoque mínimo, é o cronograma de compras criado no planejamento e que é atualizado de acordo com o real mais projetado do Project, então compra-se sempre de acordo com a realidade da obra e evita-se estoque desnecessário, facilitando a logística.

CONSTRUTORA XPTO			ESTOQUE IDEAL POR FAIXA (R\$ / UND A PRODUIR)					
EMPREENDIMENTOS	Und.	Início Projetado / Real	jul-20	ago-20	set-20	out-20	nov-20	dez-20
OBRA A	500	dez-18	R\$ 12.852	R\$ 11.883	R\$ 11.655	R\$ -	R\$ 11.076	R\$ -
OBRA B	460	jan-19	R\$ 13.528	R\$ 11.692	R\$ 10.728	R\$ -	R\$ -	R\$ 10.194
OBRA C	464	jan-19	R\$ -	R\$ 39.557	R\$ 39.221	R\$ 38.853	R\$ 38.561	R\$ 38.437
OBRA D	528	jan-19	R\$ 24.949	R\$ 21.421	R\$ 17.721	R\$ 15.360	R\$ 13.134	R\$ 11.963
OBRA E	420	mar-19	R\$ 22.248	R\$ 19.041	R\$ 15.910	R\$ 13.975	R\$ 12.625	R\$ 12.128
OBRA F	468	jun-19	R\$ 33.233	R\$ 31.240	R\$ 29.831	R\$ -	R\$ -	R\$ -
OBRA G	288	jun-19	R\$ -	R\$ 41.708	R\$ 41.123	R\$ 40.525	R\$ 39.857	R\$ 39.385
OBRA H	500	ago-19	R\$ 34.522	R\$ 30.235	R\$ 25.273	R\$ 20.125	R\$ 15.345	R\$ 12.706
OBRA I	400	ago-19	R\$ 30.356	R\$ 25.817	R\$ 20.996	R\$ 16.676	R\$ 13.588	R\$ 11.985
OBRA J	492	dez-19	R\$ 51.218	R\$ 50.331	R\$ 47.829	R\$ 44.187	R\$ 40.007	R\$ 36.259
OBRA K	351	abr-20	R\$ 28.687	R\$ 32.674	R\$ 35.777	R\$ 37.383	R\$ 37.874	R\$ 37.712
OBRA L	180	mai-20	R\$ 39.387	R\$ 44.122	R\$ 47.138	R\$ 48.228	R\$ 48.198	R\$ 47.420
OBRA M	444	mai-20	R\$ 31.510	R\$ 37.744	R\$ 43.333	R\$ 47.409	R\$ 49.774	R\$ 50.761
OBRA N	500	jun-20	R\$ 21.905	R\$ 26.060	R\$ 29.618	R\$ 32.835	R\$ 35.026	R\$ 36.163
OBRA O	504	ago-20	R\$ -	R\$ 11.900	R\$ 21.455	R\$ 26.823	R\$ 32.214	R\$ 36.679
OBRA P	260	set-20	R\$ -	R\$ -	R\$ 6.655	R\$ 9.380	R\$ 13.163	R\$ 17.595

Figura 1: Valores de estoque por unidade a produzir.

Foi constatado através de uma análise dos valores orçado x real do custo com materiais por apartamento valores discrepantes e maiores em relação ao orçamento realizado previamente. Utilizando parte do aprendizado do método PDCA, foram realizados brainstorming para se chegar as possíveis causas do aumento do orçamento. Assim, para minimizar os desvios entre os valores *real x orçado*, foram propostas algumas medidas: apuração dos índices de consumo, divulgação mensal dos índices apurados para possam ser traçadas ações para correção do desvio, conferência in loco das áreas a serem aplicados os materiais, realizar consultoria dos fornecedores e melhorar o armazenamento e transportes do materiais, baseados na logística do canteiro.

Após estas medidas entrarem em prática, foram acompanhados alguns índices dos principais materiais, sempre sendo comparado ao valor orçado ou de referência. As figuras 2 e 3 apresentam, como exemplo de controle, os índices de consumo que foram apurados nos empreendimentos da construtora para pisos cerâmicos e argamassa.

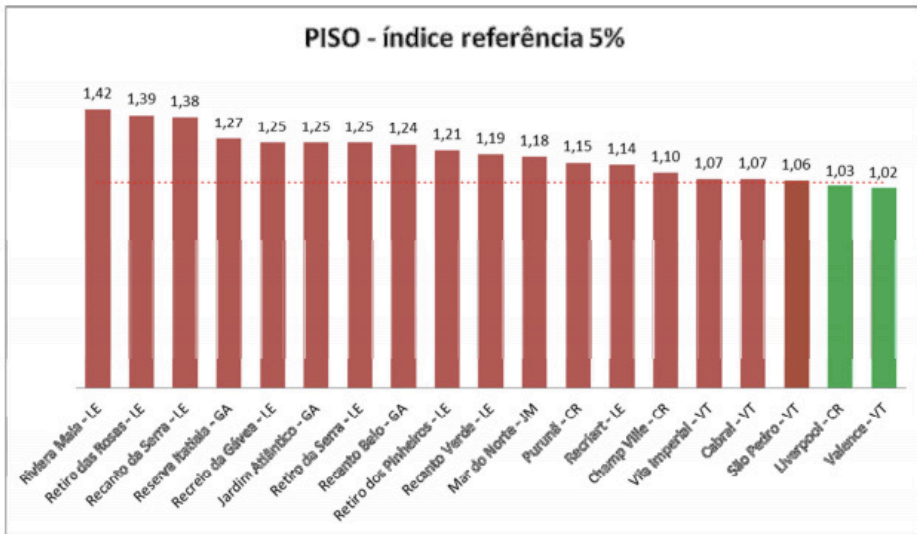


Figura 2: Índices de Piso Cerâmico.

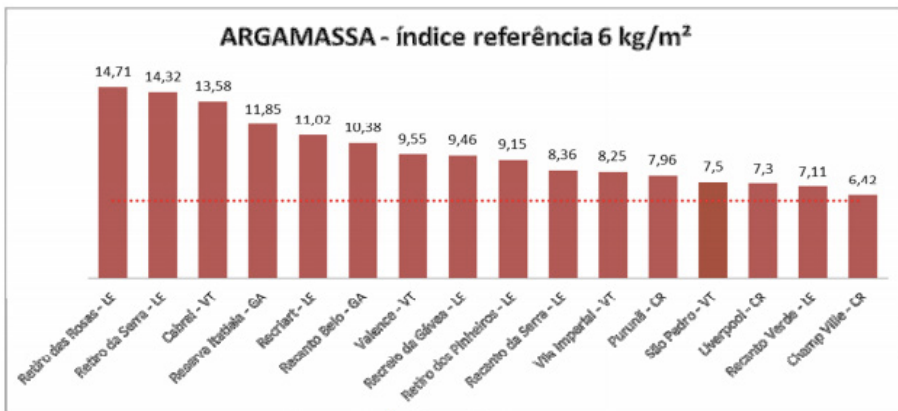


Figura 3: Índices de Argamassa.

As figuras anteriores (2 e 3) mostram dois índices que eram praticados nas obras, dentre os que são acompanhados. Após rodar o ciclo PDCA, a maior ação implementada foi de que os principais materiais só podem sair do almoxarifado através da validação de kit e de acordo com as ordens de serviço planejadas para a semana.

Assim, por exemplo, o consumo de cerâmica passou para uma média de 3,5% de perda e o consumo de argamassa passou para 8 kg/m² e pode-se também ajustar as referências, uma vez que estas são essenciais para a definição de meta de redução.

6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através deste estudo pode-se perceber que a empresa analisada, introduziu a nova filosofia de produção enxuta caracterizada pela capacidade de reduzir os desperdícios em cada etapa do processo e as oportunidades de melhoria contínua, agregando valor ao produto final. A partir de mudanças, não somente técnicas, mas a aplicação de novas ferramentas e principalmente a forma de enxergar o processo de planejamento e controle, com relação a desperdícios e melhorias no sistema de produção. Foi possível analisar o processo de produção como um todo, onde cada etapa contribui para a diminuição de prazos e custos.

O método PDCA e as ferramentas de planejamento e controle foram os fundamentos usados como base conceitual para a construtora. Dessa forma, verificou-se que é possível minimizar perdas e desperdícios, reduzir custos e otimizar processos na execução das atividades de um empreendimento.

Após estas mudanças em torno do planejamento, a construtora considerou que os resultados melhoraram. Como não era feito um planejamento a longo prazo de maneira apropriada, eram definidas metas de acordo com experiências anteriores, e para piorar, no canteiro estas metas não eram seguidas e assim, juntando os dois problemas, as produções reais ficavam bem diferentes das “previstas” e quando o prazo de um empreendimento estava tendendo a não ser cumprido, contratava-se mais operários, o que no fim não resolvia o problema e ainda comprometia ainda mais o custo. Com a difusão na empresa do método PDCA, voltado a implantação da construção enxuta, foi possível identificar problemas, levantar as causas (nas reuniões de Brainstorming) e montar planos de ações. Com isso, foi possível fazer com que o ciclo do planejamento passasse a ser seguido (o que não existia anteriormente).

Sendo assim, um grande alimentador desse sistema contínuo é o planejamento macro e antecipado de tudo que se pretende fazer, com visão crítica e analítica de cada atividade a fim de entender como a mesma pode contribuir para a melhoria de todo o processo. E como os empreendimentos passaram a ter melhorias significativas (redução de prazo e de custo), a construtora melhorou seu planejamento de portfólio e pode implantar o controle de recursos.

O trabalho demonstrou como as construtoras podem pensar e agir sob a ótica dessa nova filosofia, obtendo uma visão integrada, mostrando as ferramentas e métodos que contribuem para o bom planejamento e controle, otimização dos processos, fundamentados pela construção enxuta.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, L. L. **Diagnósticos e caminhos para a responsabilidade social empresarial na indústria da construção civil do Estado da Bahia**. 192p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2006.

ANSELMO, A. R. B., MORAES, S. S., **As Ferramentas do Planejamento em Obras Civis Como Mecanismo de Redução de Custos e Aumento da Produtividade**. Monografia de Graduação. Universidade da Amazônia, Belém, Pará, Brasil, 2010.

BALLARD, G.; HOWELL, G. **Implementing lean construction: stabilizing work flow**. In: 2º Workshop on Lean Construction, Santiago, 1994. Collectanea. Edited by Luis Alarcón, A. A. Balkema/Rotterdam/Brookfield, 1997.

BERNARDES, M. M. S. **Desenvolvimento de um Modelo de Planejamento e Controle da Produção para Micro e Pequenas Empresas de Construção**. 282p. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2001.

DAYCHOUM, Merhi. **40 Ferramentas e Técnicas de Gerenciamento**. Rio de Janeiro: Brasport, 2007.

FORMOSO, C. T. - **Lean Construction: Princípios Básicos e Exemplos**. NORIE/UFRGS, 2000.

KOSKELA, L. **Moving on beyond Lean Thinking**. Construção enxuta Journal, Louisville, CO, 2004.

MATTOS, A. D. Planejamento e Controle de Obras. E-Book. 2ª Ed., Editora Oficina de Textos, São Paulo, 2019.

OHNO, T. - **O Sistema Toyota de Produção: Além da Produção em Larga Escala**. Bookman Companhia Editora, Porto Alegre, 1997.

RIFFEL, E.; TRENTINI, C. Metodologias para aprendizagem de conhecimento profissional em práticas e ferramentas da produção enxuta na construção civil: parâmetros para melhoria dos processos de trabalho. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 6, n.4, p.22082-22100, 2020.

ROCHA, M. Q. B., **Elaboração de Indicadores e Uso de Ferramentas de Controle da Qualidade na Execução de Obras Prediais**. Dissertação de M. Sc., Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

SANTOS, Paulo A. **Implementação de modelo de sistema da qualidade em uma empresa de reboque avaliação e resultados**. Taubaté. Dissertação (Mestrado em Administração de Empresas), Universidade de Taubaté, Taubaté, 2002.

SHINGO, S. - **O Sistema Toyota de Produção do ponto de vista da engenharia de produção; 2º edição** - Porto Alegre: Bookman, 1996.

SOUZA, R. **Metodologia para desenvolvimento e implantação de sistemas de gestão da qualidade em empresas construtoras de pequeno e médio porte**. São Paulo. Tese(Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1997.

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E VOLUME DE ÁCIDOS NA LIXIVIAÇÃO DE CU E PB PRESENTES EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Data de aceite: 01/11/2020

Data de submissão: 26/10/2020

Alexandre Candido Soares

Universidade Federal do Espírito Santo
Alegre – Espírito Santo
<http://lattes.cnpq.br/5768088781427355>

Yara Daniel Ribeiro

Universidade Federal do Espírito Santo
Alegre – Espírito Santo
<http://lattes.cnpq.br/6619922564101297>

Sara Daniel Ribeiro

Universidade Federal do Espírito Santo
Alegre – Espírito Santo
<http://lattes.cnpq.br/9069893392409430>

RESUMO: Com o rápido desenvolvimento da tecnologia, os aparelhos eletroeletrônicos têm sido constantemente substituídos, reduzindo sua vida útil e tornando-os obsoletos. O descarte desses aparelhos pode ser um problema, considerando que em sua composição existem diversos compostos tóxicos. Os metais presentes nestes equipamentos podem ser reciclados e recuperados, minimizando assim, o problema com descarte em aterros, e possibilitando a preservação dos recursos naturais frente a contaminação de espécies metálicas. Diante disso, nesse trabalho foram estudadas variáveis significativas para a determinação de cobre e chumbo presentes em placas de circuito impresso, presentes, principalmente, em microcomputadores. Com o objetivo de obter as

melhores condições de trabalho, foi realizado um planejamento fatorial 23 com ponto central, para avaliação das seguintes variáveis: concentração de HCl e HNO₃ (1:3) para lixiviação dos metais em solução, temperatura de extração dos metais e volume de ácido. De acordo com o planejamento fatorial realizado, foi possível observar que as variáveis estudadas foram significativas no processo de lixiviação dos metais.

PALAVRAS-CHAVE: PCI, cobre, planejamento fatorial, lixiviação.

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND VOLUME OF ACIDS IN THE LEACHING OF CU AND PB PRESENT IN PRINTED CIRCUIT BOARDS

ABSTRACT: With the rapid development of technology, electronic devices have been constantly replaced, their useful life and making them obsolete. Disposing of appliances can be a problem, considering that in its composition there are several toxic compounds. The equivalent metals present can be recycled and recovered, thus minimizing the problem with disposal in landfills, and enabling the preservation of natural resources against the contamination of metallic species. Therefore, in this work, variables related to the determination of copper and lead present in printed circuit boards, mainly present in microcomputers, were studied. In order to obtain the best working conditions, a factorial design 23 was carried out with a central point, to evaluate the following variables: concentration of HCl and HNO₃ (1: 3) for leaching of metals in solution, metal extraction temperature and volume of acid. According to the factorial planning carried out, it

was possible to observe that the studied variables were relevant in the metal leaching process.

KEYWORDS: PCB, copper, factorial planning, leaching.

1 | INTRODUÇÃO

O grande crescimento na fabricação e consumo de equipamentos eletroeletrônicos, bem como a diminuição da vida útil dos equipamentos (obsolescência programada) tem levado a um aumento na produção de lixo eletrônico (SERPE *et al.*, 2014).

Atualmente, o setor industrial que mais cresce no mundo é o de eletrônica, cujo lixo já chega a 40 milhões de toneladas por ano, com previsões de alcançar a 50 milhões de toneladas nos próximos anos (BALDER *et al.*, 2017).

Alguns estudos têm demonstrado que o lixo eletroeletrônico cresce três a cinco vezes mais rápido que o lixo urbano (VIKTOR, 2009). O lixo eletrônico é composto de resíduo de equipamentos eletroeletrônicos, podendo ser qualquer componente. Equipamentos eletrônicos como computadores, televisores, aparelhos de DVD, celulares, calculadoras, além das peças de reposição desses, são descartados por deixarem de funcionar ou por se tornarem obsoletos devido ao inerente avanço tecnológico (WIDMER *et al.* 2005; LI, SHRIVASTAVA, ZONG e ZHANG, 2004).

Os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) são grandes poluidores do meio ambiente por possuírem diversas substâncias e elementos químicos extremamente nocivos à saúde como o cobre, chumbo, cádmio, mercúrio entre outros (MATTOS, 2008).

Os equipamentos eletrônicos são normalmente compostos por uma carcaça metálica ou plástica, cabos elétricos e placas de circuito impresso. Muitos desses materiais têm elevado valor agregado, sendo que a maioria destes se encontra nas placas de circuito impresso (PCI), que possuem uma composição extremamente heterogênea, com a presença de metais preciosos, como ouro e prata (VEIT, PEREIRA E BERNARDES, 2002).

Alguns estudos (KOZLOWSKI, MAZUREK E CZYZYK, 2000) revelam que o teor de alguns metais nas PCI's é muito maior que o teor dos mesmos encontrados nos minérios. Antigamente as minas de cobre economicamente interessantes para exploração tinha cerca de 4% desse metal e, atualmente, tem somente 1%. Isto é, a cada tonelada de minério, há somente 10 kg de cobre. Já nas PCI's, a concentração de metais pode chegar a 30% em massa.

Os processos para reciclagem de uma PCI podem ser mecânicos (cominuição, classificação e separação), químicos (pirometalurgia, hidrometalurgia, eletrometalurgia e biometalurgia) ou térmicos (GERBASE e OLIVEIRA, 2012). De acordo com Petter e colaboradores a digestão das PCI's com água-régia (HNO₃/HCl) apresentou resultados satisfatórios para Au, Cu, Sn e Ni (Petter *et al.*, 2012).

As técnicas espectrométricas comumente empregadas na determinação destes e outros metais são: Espectrometria de Absorção Atômica com Chama (FAAS), Espectrometria

de Absorção Atômica com Forno de Grafite (GF AAS), Espectrometria de Emissão óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES) e Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS). Apesar das técnicas de emissão (ICP-OES e ICP-MS) serem multi-elementares, elas possuem um elevado custo de aquisição e manutenção. Já o GF AAS e a F AAS apresentam menor custo. O desenvolvimento de métodos para a determinação de diferentes metais em placas PCI's tipo motherboard, empregando F AAS, tem se apresentado bastante relevante.

Com o objetivo de obter as melhores condições de lixiviação das espécies metálicas presentes nas PCI's, bem como avaliar as possíveis interações entre as variáveis, foi utilizado nesse trabalho planejamento fatorial.

2 | METODOLOGIA

Foram selecionadas 8 placas obsoletas de PCI's do tipo Motherboard marca (Asus A7A133). As placas passaram por um processo de limpeza com pano pouco úmido e os dissipadores de calor foram retirados. Em seguida, estas placas foram fragmentadas em partes menores que 2 cm e levadas para um moinho de faca, modelo SL32, Solab, a fim de obter partículas menores de 1 mm.

Para obter as melhores condições de lixiviação dos metais foi realizado um planejamento fatorial 2³, com ponto central, onde foi estudado as seguintes variáveis: concentração de ácido PA (+) e PA/4 (-), temperatura 80 °C (+) e 40 °C (-) e volume adicionado de ácidos (1:3) para a extração dos metais 40 mL (+) e 20 mL (-). Os símbolos (-) e (+) significam os níveis mínimo e máximo, respectivamente, avaliados para cada variável. O ponto central foi analisado em triplicata com os seguintes valores das variáveis: Concentração do ácido (PA/2); Temperatura: 60°C; Volume de ácidos (água régia): 30 mL.

Esses experimentos foram conduzidos em um sistema de refluxo, empregando 2,0 g de amostra moída, deixada por 01 (uma) hora em contato com o meio reacional para cada condição de extração do planejamento fatorial, sob agitação magnética a 200 rpm.

Após a extração, a solução foi diluída 2500 vezes (0,1 de solução para 250 mL) e levada para análise por Absorção Atômica com Chama.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Planejamento fatorial para estudo da lixiviação dos metais

A Tabela 1 mostra os dados da matriz do planejamento fatorial 2³ com ponto central, com o objetivo de obter as melhores condições de lixiviação, frente às variáveis concentração, temperatura de extração e volume de ácido. As análises foram realizadas com triplicata do ponto central

Ensaio	Variáveis			Respostas	
	Conc. Ácido	Temperatura (°C)	Volume (mL)	Concentração Cu (mg.mL ⁻¹)	Concentração Pb (mg.mL ⁻¹)
1	(-)PA/4	(-)40	(-)20	12,30	0,284
2	(+)PA	(-)40	(-)20	18,19	1,146
3	(-)PA/4	(+)80	(-)20	14,48	0
4	(+)PA	(+)80	(-)20	11,37	0
5	(-)PA/4	(-)40	(+)40	4,63	0
6	(+)PA	(-)40	(+)40	12,22	0,396
7	(-)PA/4	(+)80	(+)40	7,90	0
8	(+)PA	(+)80	(+)40	8,01	0
PC1	(0) PA/2	(0)60	(0)30	11,32	0,313
PC2	(0) PA/2	(0)60	(0) 30	11,93	0,194
PC3	(0) PA/2	(0)60	(0) 30	11,06	0,279

Tabela 1: Matriz do planejamento fatorial 2³ com ponto central.

Fonte: autor.

Pode-se observar na Tabela 1 que os teores de Cu²⁺ variaram de 4,63 a 18,19 mg.mL⁻¹, o que corresponde uma quantidade de 46,3 a 181,9 mg de cobre para cada grama de PCI submetido à lixiviação. Já os teores de Pb²⁺ variaram de 0,19 a 1,15 mg.mL⁻¹, o que corresponde uma quantidade de 1,9 a 11,5 mg de chumbo para cada grama de PCI submetido à lixiviação.

O gráfico de Pareto foi construído para verificar quais das variáveis avaliadas foram significativas na lixiviação de Cu²⁺ (Figura 1) e Pb²⁺ (Figura 2), bem como a interação entre as mesmas, considerando um nível de confiança de 95%.

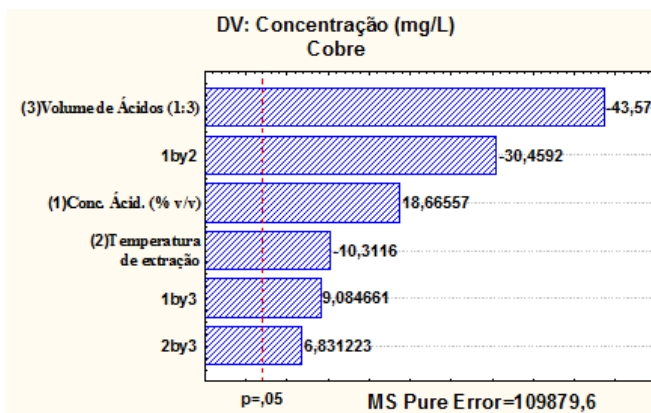


Figura 1: Gráfico de Pareto obtido a partir do planejamento fatorial 2³ com ponto central, para otimização das variáveis (1) concentração de ácido, (2) temperatura de extração e (3) volume de ácido para lixiviação do cobre em placas de circuito impresso.

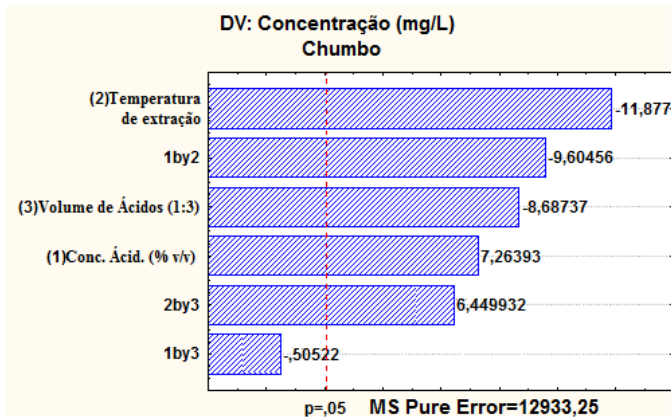


Figura 2: Gráfico de Pareto obtido a partir do planejamento fatorial 23 com ponto central, para otimização das variáveis (1) concentração de ácido, (2) temperatura de extração, (3) volume de ácido para lixiviação do chumbo em placas de circuito impresso.

Analisando as variáveis independentes para a otimização da lixiviação das espécies metálicas, observa-se que todas as variáveis: temperatura de extração (2), Concentração de ácidos (1) e volume de ácidos (3) foram significativas, ultrapassando a linha de 95% de confiança. Neste estudo para os dois metais analisados, a temperatura de extração (2) e o volume de ácidos (3) tem resposta mais significativa para menor valor, ou seja, temperatura de 40 °C e volume dos ácidos de 20 mL. A concentração do ácido para os dois experimentos foi significativo para valores mais altos, concentração PA.

No estudo das interações de duas variáveis para a lixiviação do cobre, a interação entre a concentração dos ácidos e a temperatura de extração (1 by 2) foi significativa ao nível mais baixo, indicando que se deve trabalhar em faixas mais próximas dos menores valores escolhidos no planejamento. O contrário ocorreu com as interações: temperatura de extração e volume dos ácidos (2 by 3) e concentração dos ácidos com volume de ácidos (1 by 3). Estas interações apresentaram significância para níveis mais altos. Assim, as melhores condições são obtidas próximas dos valores mais altos avaliados no planejamento. Esta condição é extração a 80 °C, empregando 40 mL de mistura ácida PA. Essa condição foi aplicada também para o chumbo.

Não foram encontrados na literatura, trabalhos que utilizam a ferramenta do planejamento fatorial para o estudo das variáveis significativas no processo de lixiviação de metais em placas de circuito impresso. No trabalho de Petter *et al.* (2012), foram estudados diferentes lixivantes alternativos para extração de metais em placas de circuito impresso de celular, variando a temperatura de extração de 60 e 80 °C e o tempo de extração de 1 e 2 h. O autor concluiu que os valores das temperaturas foram muito próximos indicando que não haver a necessidade de maiores gastos de energia para a lixiviação dos elementos além disso não foi detectada uma grande variação nos resultados variando o tempo de ensaio de 1 hora e 2 horas.

4 | CONCLUSÕES

Com o planejamento fatorial 2³ com ponto central foi possível analisar as variáveis significativas de lixiviação dos metais nas placas de circuito impresso. Todas as variáveis estudadas foram significativas ao nível de 95% de confiança. A melhor condição estudada para a lixiviação dos metais foi: temperatura de extração a 80 °C, empregando 40 mL de mistura ácida PA. Este estudo poderá ser realizado para outros metais presentes em placas de circuito impresso.

REFERÊNCIAS

BALDE, C. P., FORTI, V., GRAY, V., KUEHR, R., STEGMANN, D. P., 2017. **The global e-waste monitor 2017**.

GERBASE, A. E., OLIVEIRA, C. R., 2012. **Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química**. Quím. Nova, vol.35, n.7, pp.1486-1492. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422012000700035>.

KOZLOWSKI, J., MAZUREK, T. E CZYZYK, H., 2000. **The recovering metals and alloys from the electronic scrap**. Metall. v. 54, n. 11, p. 645-649.

LI, J., SHRIVASTAVA, P., ZONG, G. E ZHANG, H. C., 2004. **Printed circuit board recycling: a state of the art survey**. IEEE Transaction on electronics packaging manufacturing. v. 27, n. 1, p. 33-42.

MATTOS, K. M. C., 2008. **Os impactos ambientais causados pelo lixo eletrônico e o uso da logística reversa para minimizar os efeitos causados ao meio ambiente**. XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Anais... Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PETTER, P. M. H., BRITO, D. O., VEIT, H. M., BERNARDES, A. M., 2012. **“Estudo de lixiviantes alternativos para a extração de metais de Placas de Circuito Impresso”**. VIII Simpósio Internacional da Qualidade Ambiental, ID 461; 1-10.

SERPE, A., ARTIZZU, F., ESPA, D., RIGOLDI, A., MERCURI, M., DEPLANO, P. (2014). **From trash to resource: A green approach to noble-metals dissolution and recovery**. Green Processing and Synthesis. DOI: <https://doi.org/10.1515/gps-2014-0004>

VEIT, H. M., PEREIRA, C. D. E BERNARDES, A. M., 2002. **Using mechanical processing in recycling a printed wiring boards**. JOM. v. 54, n. 6, p. 45-47.

VIKTOR, M., 2009. **Onde os eletrônicos vão morrer (e matar)**. Galileu, n. 218, jul. 2009, seção ambiente.

WIDMER, R., KRAPF, H. O. E KTHETRIWAL. D. S., SCHNELLMANN, M.; BONI, H., 2005. **Global perspective on ewaste**. Environmental Impact assessment review. v. 25, p. 436-458, 2005.

ANÁLISE DA SINTERIZAÇÃO E DENSIFICAÇÃO DE LIGA Nb-Ni-Fe-Si VIA SINTERIZAÇÃO POR PLASMA PULSADO (SPS)

Data de aceite: 01/11/2020

Data de submissão: 26/10/2020

Yara Daniel Ribeiro

Universidade Federal do Espírito Santo
Alegre – Espírito Santo
<http://lattes.cnpq.br/6619922564101297>

Alexandre Candido Soares

Universidade Federal do Espírito Santo
Alegre – Espírito Santo
<http://lattes.cnpq.br/5768088781427355>

Sara Daniel Ribeiro

Universidade Federal do Espírito Santo
Alegre – Espírito Santo
<http://lattes.cnpq.br/9069893392409430>

RESUMO: O presente trabalho tem como objetivo a análise da sinterização e densificação de ligas de Nb-Ni-Fe-Si. Para realizar esta pesquisa foram utilizadas cinco composições de níquel e nióbio metálico, as quais foram misturadas em um moinho de jarros por 2 horas, variando o teor de Ni entre 0, 10, 20, 30 e 100% em peso. Todas as amostras foram sinterizadas via Sinterização por Plasma Pulsado (SPS) com pressão uniaxial de 30 MPa e temperaturas de 1000 °C, 1100 °C, 1200 °C e 1300 °C. O resultado do ensaio de densificação demonstrou que a sinterização foi efetiva para a maioria das composições e temperaturas. As amostras 10% Ni, sinterizada em 1300 °C, e as de 20 e 30% Ni sinterizadas nas temperaturas de 1100 e 1200 °C apresentaram densificação superior a 92%, estando de acordo

com os valores encontrados na literatura. A pior densidade relativa foi encontrada para a amostra de 100% nióbio metálico, fabricada em 1200 °C, atingido apenas 70% da densidade teórica. A curva registrada pelo SPS nesta temperatura confirma os resultados encontrados no ensaio de densificação, apresentando maior redução volumétrica para a amostra de 20% Ni, e redução desprezível para a amostra que é composta somente por Fe-Nb. Os dados obtidos demonstram que a SPS foi eficiente para a preparação das amostras, atingindo baixa quantidade de poros.

PALAVRAS-CHAVE: Metalurgia do pó, nióbio, densidade.

ANALYSIS OF SINTERIZATION AND DENSIFICATION OF ALLOY Nb-Ni-Fe-Si THROUGH SPARK PLASMA SINTERING (SPS)

ABSTRACT: This work aims to analyze the sintering and densification of Nb-Ni-Fe-Si alloys. To carry out this research five compositions of nickel and metallic niobium were used, which were mixed in a jar mill for 2 hours, varying the Ni content between 0, 10, 20, 30 and 100% by weight. All samples were sintered via Pulsed Plasma Sintering (SPS) with uniaxial pressure of 30 MPa and temperatures of 1000 °C, 1100 °C, 1200 °C and 1300 °C. The result of the densification test demonstrated that sintering was effective for most compositions and temperatures. Samples 10% Ni, sintered at 1300 °C, and those of 20 and 30% Ni sintered at temperatures of 1100 and 1200 °C showed densification greater than 92%, in accordance with the values found in the literature. The worst relative density was found

for the 100% metallic niobium sample, manufactured at 1200 ° C, reaching only 70% of the theoretical density. The curve recorded by SPS at this temperature confirms the results found in the densification test, showing a greater volumetric reduction for the sample of 20% Ni, and a negligible reduction for the sample that is composed only of Fe-Nb. The data obtained show that the SPS was efficient for the preparation of the samples, reaching a low amount of pores.

KEYWORDS: Powder metallurgy, niobium, density.

1 | INTRODUÇÃO

Com o intuito de acompanhar o acelerado desenvolvimento tecnológico mundial e as crescentes exigências impostas aos desempenhos dos materiais utilizados na engenharia, percebe-se nos últimos anos um grande empenho dos pesquisadores para desenvolver novos materiais. Os estudos que estão sendo realizados têm como finalidade tanto elevar o desempenho dos já conhecidos, quanto desenvolver novos para diversas aplicações. Isso acarreta maior conhecimento da relação entre composição química, estrutura e microestrutura, além de aperfeiçoamento dos processos de fabricação, melhorando o desenvolvimento do material para a aplicação desejada (PARUCKER; KLEIN, 2014).

Diante desse contexto, cresce a busca por equipamentos para aplicações em ambientes extremos com alta oxidação e temperatura. As ligas a base de Ni são os materiais dominantes em motores aeronáuticos e turbinas, por conta de suas propriedades mecânicas e estabilidade estrutural em temperaturas altas, até aproximadamente 1200°C (CUI et al., 2020; KAKEHI et al., 2020) Al-rich oxide particles were observed around the δ phase which is detrimental to creep life and ductility. The adding of Y to SLM superalloy formed Y oxide (yttria. Porém, a necessidade de elevar a eficiência energética desses equipamentos gera um aumento na temperatura de trabalho, e isso faz com que se intensifique a busca por materiais que sejam capazes de suportar temperaturas cada vez mais elevadas, limitando a aplicação das ligas de Ni (GAO et al., 2020).

Com isso, devido ao notável desempenho em elevadas temperaturas, os metais refratários, como por exemplo, Nb, W, Ta têm recebido grande atenção (ZHU et al., 2019). Entre eles, as ligas à base de Nióbio possuem alto potencial para substituir as ligas de Níquel, isso ocorre devido as suas excelentes características, como elevados pontos de fusão e baixas densidades, além do fato de manterem boas propriedades em temperaturas superiores às suportadas pelas ligas de Ni (SHI et al., 2020; SUN et al., 2020) . Com isso, são adequadas para aplicações nucleares, espaciais e aeronáuticas (NICO; MONTEIRO; GRAÇA, 2016).

Diferentes elementos de liga podem ser adicionados nas ligas à base de nióbio com o intuito de alcançar as propriedades desejadas, como por exemplo, o W, Ti, Ni, Zr, Si e C (SILVA et al., 2012). A adição do Ni nessas ligas é benéfica por gerar o fortalecimento da liga por meio de precipitações do intermetálico NbNi₃, o qual também pode gerar aumento na dureza do material (NAFFAKH MOOSAVY et al., 2013; ZHAO et al., 2008). Já o ferro

foi utilizado com o intuito de ocasionar melhoras nas propriedades da liga, e pelo fato de reduzir a difusão e solubilidade do oxigênio no Nb, sendo então benéfico para aumentar a resistência a oxidação (Senkov, 2020). Por fim, o Si é o principal elemento para resistência a oxidação das ligas de Nb, permitindo que essas sejam aplicadas em ambientes agressivos (XIONG et al., 2019).

É importante ressaltar que o processo de produção também tem alta influência no material final, por isso as ligas de Nb já foram produzidas por fusão a arco (AFONSO et al., 2020) 15, 20, 30, 40, 45, 52 and 57 wt %, por formação a laser (SHI et al., 2020), solidificação direcional (FANG; GUO; QIAO, 2020) e sinterização por plasma pulsado (HOU et al., 2020). Ao comparar a sinterização por plasma pulsado (SPS) com técnicas de sinterização convencionais tem-se como vantagens temperaturas de sinterização comparativamente mais baixas e tempo de sinterização relativamente curtos. Esse método permite obter peças com boas propriedades mecânicas, densificação elevada, crescimento limitado de grãos e perda mínima de material durante a sinterização, consolidando-se como uma técnica promissora com grande potencial (KIANI KHOUZANI; BAHRAMI; YAZDAN MEHR, 2019).

Portanto, este trabalho pretende analisar a eficiência da sinterização e a densificação de uma liga composta por Nb-Ni-Fe-Si fabricada por SPS, variando o teor de níquel em cada composição e a temperatura de sinterização.

2 | METODOLOGIA

Para determinar a composição da liga que resultará na melhor densificação, foram realizadas misturas com diferentes concentrações de “nióbio metálico” e níquel. A tabela 1 apresenta a composição química de todas as misturas que foram realizadas.

Material	Porcentagem em massa (%)				
	0	10	20	30	100
Níquel	0	10	20	30	100
Nióbio Metálico	100	90	80	70	0

Tabela 1: Composição das amostras para a sinterização.

O pó de “Nióbio Metálico” foi fornecido pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), e possui a composição apresentada na tabela 2.

Elemento	Nb	Fe	Si	C	S	Ta	P	Al
% por peso	65,5	28,9	2,4	0,12	0,01	0,11	0,12	0,6

Tabela 2: Composição do pó de nióbio metálico fornecido pela CBMM.

Com o objetivo de atingir a granulometria desejada, inferior a 0,044 milímetros, o nióbio metálico foi submetido a 10 horas de moagem. Já o níquel utilizado possuía tamanho de partículas adequados para a etapa de sinterização. Após a adequação dos materiais de origem na granulometria desejada foram pesadas as quantidades de pós necessárias para cada composição, e então todas seguiram para o moinho por 2 horas com intuito de garantir homogeneidade da mistura obtida.

Ao término do processo de moagem as amostras foram sinterizadas pela técnica sinterização por plasma pulsado. O equipamento utilizado é da marca FUJI, modelo SPS-211-LX pertencente ao Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) da UENF. Para isso o material foi depositado em uma matriz de grafite que seguiu para a máquina de SPS. Durante o processo de sinterização todas as misturas foram submetidas a pressão uniaxial de 30MPa e a diferentes temperaturas, sendo 1000 °C, 1100 °C, 1200 °C e 1300 °C.

Os corpos de prova sinterizados passaram pelo teste de Arquimedes, com o objetivo de analisar a densificação de cada material obtido. Para isso primeiramente foi necessário determinar a massa seca das amostras (m_s , g); em seguida montar o aparato para determinação da massa imersa; com isso, aferir a massa imersa (m_i , g), e por fim, determinar a massa úmida (m_u , g) de todos os corpos de prova. Vale ressaltar que a temperatura da água foi medida em todas as etapas para definir sua densidade (d_{H_2O}). Com todos os dados obtidos, utilizou-se a equação (1) para realizar o calculo da densidade das amostras (d_c , g/cm³).

$$d_c = \frac{m_s}{m_u - m_i} \times d_{H_2O} \quad (1)$$

A densidade teórica (d_t) foi determinada de acordo com a regra das misturas pela equação (2).

$$d_t = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{\frac{m_1}{d_1} + \frac{m_2}{d_2} + \dots + \frac{m_n}{d_n}} \quad (2)$$

Onde:

m_n : massa dos componentes da mistura (g);

d_n : densidade dos componentes da mistura (g/cm³);

n: elemento que compõe a amostra.

A densificação ($d_{\%}$) é a razão entre a densidade aparente do material e sua densidade teórica, a qual foi obtida pela equação (3).

$$d_{\%} = \frac{d_c}{d_t} \quad (3)$$

O cálculo da densificação foi realizado para todos os corpos de prova sinterizados.

3 | RESULTADOS

Na Figura 1 está sendo apresentado o gráfico que relaciona a temperatura de sinterização e a densificação para cada composição das amostras.

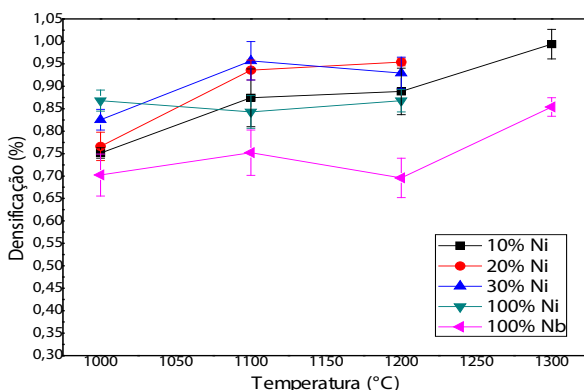


Figura 1: Densificação dos corpos de prova Nb-Ni-Fe.

Fonte: autor.

Ao analisar a Figura 1 é possível perceber que para a temperatura de 1300 °C foram realizadas apenas a sinterização das amostras de 100% Fe-Nb e 10% Ni, pelo fato de ter ocorrido escoamento de material durante a sinterização nas outras amostras. Este acontecimento pode ser explicado pela formação de grande quantidade de fase líquida formada, principalmente para a amostra 100% Ni, uma vez que está muito próximo ao ponto de fusão desse elemento (1455 °C). Deve-se levar em conta o fato da temperatura ser medida na parte externa do molde, o que pode levar a um erro de instrumentação, isto é, na mistura à temperatura pode estar superior em relação ao ponto de medição, então, mesmo com uma diferença entre o ponto de fusão e a temperatura de sinterização, pode ter sido gerado líquido.

Ainda para a temperatura de 1300 °C é notório que a amostra contendo 10% de Ni teve a melhor densificação. Este resultado já era o esperado, uma vez que há níquel na liga e estar sendo submetido à alta temperatura, é viabilizada a formação de fase líquida, diminuindo assim a porosidade e aumentando a densificação. Ao analisar a densificação das amostras de 20% e 30% Ni na temperatura de 1200°C percebe-se, estatisticamente, que para o parâmetro analisado os resultados foram equivalentes.

Ao analisar a densificação das amostras de 20% e 30% Ni na temperatura de 1200 °C percebe-se, estatisticamente, que para o parâmetro analisado os resultados foram equivalentes. Além disso, é possível notar que, nessa temperatura, ambas obtiveram

densificação maior que as de composição 10% Ni, 100 % níquel e nióbio metálico. Já para as temperaturas de 1100 e 1000 °C a amostra composta somente por Nb resultou no pior grau de densificação, e as demais não diferiram estatisticamente.

No trabalho de Xiong (2019) a SPS foi utilizada para fabricar ligas de fibras de carbono curtas reforçadas por Nb/Nb₅Si₃, e o método de Arquimedes também foi utilizado para avaliar a densificação dos corpos de prova. Como resultado obteve-se densidade de 98,35% para as amostras sinterizadas a 1450°C, menor temperatura utilizada no estudo. Já a densidade relativa dos compósitos fabricados a 1500 e 1550°C se aproximaram mais 99% da densidade teórica. Assim para se obter esses compósitos com densidade elevada, a temperatura de sinterização deve atingir no mínimo a 1500 °C (XIONG et al., 2019). Outro estudo utilizou a técnica sinterização por plasma pulsado para a preparação de ligas com composição Ni-50%Fe, e as temperaturas de sinterização aplicadas foram 900, 1000 e 1100 °C. Observou-se que todos os corpos de prova sinterizados possuíram altas densidades relativas (> 97,8%), e além disso, destaca-se que as densidades das amostras aumentam com acréscimo da temperatura de sinterização. Foi possível então concluir que a temperatura é um importante parâmetro da técnica SPS, sendo responsável pela homogeneização da microestrutura e induzindo processos de difusão entre as partículas do pó (MAKENA et al., 2017).

Ao comparar os resultados obtidos com os encontrados na literatura, nota-se que está de acordo que as amostras com menor grau de densificação, em cada composição, tenham sido produzidas, em quase todos os casos, na menor temperatura utilizada. Além disso, as densidades relativas atingidas nas amostras de 10, 20 e 30% de níquel nas temperaturas 1100, 1200 e 1300°C estão de acordo com as obtidas pela técnica de sinterização por plasma pulsado nos trabalhos citados, produzindo materiais com alto grau de densificação.

Para fazer a análise da influência da temperatura no processo de sinterização tem-se uma ferramenta importante, as curvas registradas pelo equipamento SPS. Foi escolhido apresentar esta ferramenta para a temperatura que apresentou maior diferença entre o melhor e o pior resultado para o parâmetro em análise. Com isso, a Figura 12 apresenta as curvas de sinterização das amostras que apresentaram o maior e o menor grau de densificação em 1200 °C.

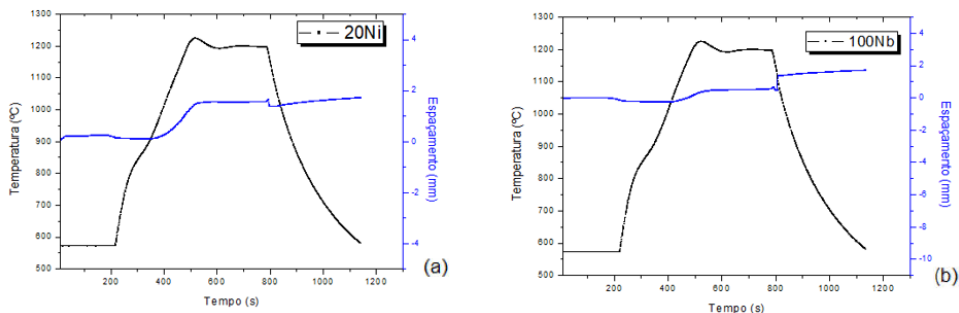


Figura 2: Gráfico da curva de sinterização em 1200 °C para a amostra com composição (a) 20% Ni e (b) 100% Fe-Nb.

Fonte: autor.

Vale destacar que o deslocamento vertical da curva de espaçamento indica a movimentação dos pistões durante o processo de sinterização. Subidas indicam aproximação entre os pistões, e conseqüentemente, redução de volume da amostra. Já descidas na curva indicam expansão do compactado.

Ao analisar a Figura 2, é notório que houve uma maior redução de volume na curva de espaçamento para a amostra de 20% Ni, este fato justifica sua alta densificação, que alcançou um valor de 95,5%. Em contrapartida, é possível observar que a curva para a amostra composta por apenas nióbio metálico apresenta uma redução de volume interior não expressiva, estando de acordo com o baixo grau de densificação obtido, atingindo apenas 70% da densidade teórica.

Além disso, também é evidente que o início do processo de sinterização para a amostra contendo apenas ferro-nióbio ocorreu a aproximadamente 1050 °C e para a composição de 20% Ni ocorreu a 900 °C, sendo estes pontos onde nota-se redução no volume da amostra através da presença de aclave na curva de espaçamento. Tal fato demonstra a importância do níquel no desenvolvimento da sinterização.

Ao realizar uma análise dos resultados obtidos, nota-se que o objetivo produzir corpos de prova com densidades elevadas foi alcançado. Como melhores valores atingidos tem-se a densificação de 99% na amostra com composição de 10% Ni, sinterizada na temperatura de 1300 °C, e densificação superior a 92% nos corpos de prova com 20 e 30% de níquel obtidas em 1100 e 1200°C.

Por fim, como os resultados alcançados estão muito próximo daquilo que se encontra na literatura, logo se acredita que a sinterização por plasma pulsado foi eficiente para efetuar a sinterização das amostras.

4 | CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que a técnica de sinterização por plasma pulsado demonstrou sucesso na sinterização de ligas Nb-Ni-Fe-Si, pois foram alcançadas boas densificações em temperaturas relativamente baixas. Quando sinterizadas em 1100, 1200 e 1300°C as ligas alcançaram densidade relativa acima dos 95%, considerando o erro. Os componentes que apresentaram os melhores resultados foram os compostos de Ni 10%, Ni 20% e Ni 30%, entretanto, o compósito de níquel 10% se mostrou mais efetivo, pois teve aumento de densidade, mais linear, de acordo com o aumento da temperatura. Através da curva de sinterização pode-se perceber para as amostras analisadas que o processo de densificação começa a ocorrer em temperaturas próximas a 1050°C para a amostra que contém somente Nb e a 900°C para a amostra com 20% de Ni.

REFERÊNCIAS

AFONSO, Conrado R. M.; MARTINEZ-OROZCO, Katherine; AMIGÓ, Vicente; DELLA ROVERE, Carlos A.; SPINELLI, José E.; KIMINAMI, Claudio S. **Characterization, corrosion resistance and hardness of rapidly solidified Ni–Nb alloys**. *Journal of Alloys and Compounds*, [S. l.], v. 829, 2020. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.154529.

CUI, Fuhui; WANG, Gang; YU, Dawei; GAN, Xiangdong; TIAN, Qinghua; GUO, Xueyi. **Towards “zero waste” extraction of nickel from scrap nickel-based superalloy using magnesium**. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 262, p. 121275, 2020. b. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121275. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121275>

FANG, Xin; GUO, Xiping; QIAO, Yanqiang. **Effect of Ti addition on microstructure and crystalline orientations of directionally solidified Nb–Si based alloys**. *Intermetallics*, [S. l.], v. 122, n. January, p. 106798, 2020. DOI: 10.1016/j.intermet.2020.106798. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106798>.

GAO, Qiuzhi; JIANG, Yujiao; LIU, Ziyun; ZHANG, Hailian; JIANG, Chenchen; ZHANG, Xin; LI, Huijun. **Effects of alloying elements on microstructure and mechanical properties of Co–Ni–Al–Ti superalloy**. *Materials Science and Engineering A*, [S. l.], v. 779, n. October 2019, p. 139139, 2020. DOI: 10.1016/j.msea.2020.139139. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139139>

HOU, Qingyan; LI, Meifeng; SHAO, Wei; ZHOU, Chungen. **Oxidation and interdiffusion behavior of Mo-Si-B coating on Nb-Si based alloy prepared by spark plasma sintering**. *Corrosion Science*, [S. l.], v. 169, n. November 2019, p. 108638, 2020. DOI: 10.1016/j.corsci.2020.108638. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108638>.

KAKEHI, Koji; BANOTH, Santhosh; KUO, Yen Ling; HAYASHI, Shigenari. **Effect of yttrium addition on creep properties of a Ni-base superalloy built up by selective laser melting**. *Scripta Materialia*, [S. l.], v. 183, p. 71–74, 2020. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2020.03.014

KIANI KHOUZANI, M.; BAHRAMI, A.; YAZDAN MEHR, M. **Spark plasma sintering of Stellite®-6 superalloy**. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 782, p. 461–468, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.186>.

MAKENA, Moraka Isaac *et al.* Effect of sintering parameters on densification, corrosion and wear behaviour of Ni-50Fe alloy prepared by spark plasma sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 699, p. 1166–1179, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.12.368>>.

NAFFAKH MOOSAVY, Homam; ABOUTALEBI, Mohammad Reza; SEYEDEIN, Seyed Hossein; MAPELLI, Carlo. Microstructural, mechanical and weldability assessments of the dissimilar welds between γ' - And γ'' -strengthened nickel-base superalloys. *Materials Characterization*, [S. l.], v. 82, p. 41–49, 2013. DOI: 10.1016/j.matchar.2013.04.018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2013.04.018>.

NICO, C.; MONTEIRO, T.; GRAÇA, M. P. F. **Niobium oxides and niobates physical properties: Review and prospects.** *Progress in Materials Science*, [S. l.], v. 80, p. 1–37, 2016. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.02.001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.02.001>

PARUCKER, M L; KLEIN, A N. Desenvolvimento de ligas sinterizadas de níquel para aplicações como matriz de materiais compósitos. v. 1, p. 16–21, 2014.

SENKOV, O. N.; RAO, S. I.; BUTLER, T. M.; DABOIKU, T. I.; CHAPUT, K. J. **Effect of Fe additions on the microstructure and properties of Nb-Mo-Ti alloys.** *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, [S. l.], v. 89, n. February, p. 105221, 2020. b. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2020.105221. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105221>

SHI, Zhiwu; LIU, Jinlai; WEI, Hua; ZHANG, Hongyu; SUN, Xiaofeng; ZHENG, Qi. **Investigation on the microstructure and mechanical behaviors of a laser formed Nb-Ti-Al alloy.** *Materials Characterization*, [S. l.], v. 162, n. November 2019, p. 110193, 2020. a. DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110193. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110193>

SILVA, Cleiton Carvalho *et al.* Aspectos metalúrgicos de revestimentos dissimilares com a superliga a base de níquel Inconel 625. *Soldagem e Inspecao*, v. 17, n. 3, p. 251–263, 2012.

SUN, Le; FU, Qian Gang; SUN, Jia; ZHANG, Guang peng. **Comparison investigation of hot corrosion exposed to Na₂SO₄ salt and oxidation of MoSi₂-based coating on Nb alloy at 1000 °C.** *Surface and Coatings Technology*, [S. l.], v. 385, n. January, p. 125388, 2020. a. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125388. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125388>.

XIONG, Bowen *et al.* Effects of sintering temperature on interface and mechanical properties of short carbon fiber reinforced Nb/Nb 5 Si 3 composites fabricated by spark plasma sintering. *Intermetallics*, v. 108, n. February, p. 66–71, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2019.02.012>>.

ZHAO, K.; LOU, L. H.; MA, Y. H.; HU, Z. Q. **Effect of minor niobium addition on microstructure of a nickel-base directionally solidified superalloy.** *Materials Science and Engineering A*, [S. l.], v. 476, n. 1–2, p. 372–377, 2008. DOI: 10.1016/j.msea.2007.06.041

ESTUDO CINÉTICO DA LIXIVIAÇÃO DE COBRE UTILIZANDO ÁCIDO NITRÍCO

Data de aceite: 01/11/2020

Data de submissão: 26/10/2020

Alexandre Candido Soares

Universidade Federal do Espírito Santo
Alegre – Espírito Santo
<http://lattes.cnpq.br/5768088781427355>

Yara Daniel Ribeiro

Universidade Federal do Espírito Santo
Alegre – Espírito Santo
<http://lattes.cnpq.br/6619922564101297>

Sara Daniel Ribeiro

Universidade Federal do Espírito Santo
Alegre – Espírito Santo
<http://lattes.cnpq.br/9069893392409430>

RESUMO: Para reduzir o impacto ambiental causado pelo descarte inadequado de resíduos eletrônicos, uma das alternativas é realizar a reciclagem e a recuperação desses materiais. Nesses resíduos, têm-se as placas de circuito impresso (PCI), que são constituídas de até 30% de Cobre, um metal com alto valor de mercado e demanda comercial. O presente trabalho tem por objetivo o estudo cinético da extração de Cobre de PCI's utilizando a técnica da lixiviação ácida em diferentes temperaturas. Para isso, as placas foram inicialmente trituradas visando obter uma granulometria adequada para o tratamento químico nos ensaios experimentais. Em seguida, a quantidade total de Cobre das amostras foi conhecida por meio de solubilização em água régia e quantificada por espectrofotometria

de absorção atômica com chama (FAAS). A lixiviação foi realizada com ácido nítrico a 1 e 2 mol.L⁻¹ empregando diferentes temperaturas que variaram entre 40 e 80°C. Com a água régia foi possível constatar que as PCI's estudadas possuem teor de 22,67% de Cobre. Observou-se também um efeito positivo no aumento da temperatura em ambas as concentrações utilizadas nos experimentos de lixiviação, possibilitando extração acima de 75% para a temperatura de 60 °C e concentração de 2 mol.L⁻¹, apresentando recuperações superiores a 90% do Cobre lixiviado. Por fim, foi realizado um estudo cinético para verificar qual o passo controlador do processo, além de confirmar seu comportamento com o aumento da temperatura. No estudo concluiu-se que o passo controlador do processo é o de reação química, pois a difusividade não exerceu grande influencia na reação.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrometalurgia, Cobre, PCI, Cinética.

KINETIC STUDY OF COPPER LEACHING USING NITRIC ACID

ABSTRACT: To reduce the environmental impact caused by the inappropriate disposal of electronic waste, one of the alternatives is to carry out the recycling and recovery of these materials. In this waste, there are printed circuit boards (PCI), which are made up of 30% copper, a metal with high market value and commercial demand. The present work aims at the kinetic study of the extraction of copper from PCI's using the acid leaching technique at different temperatures. For this, the plates were initially crushed in order to

obtain a suitable particle size for the chemical treatment in the experimental tests. Then, the total amount of copper in the samples was known through solubilization in aqua regia and quantified by flame atomic absorption spectrophotometry (FAAS). The leaching was performed with nitric acid at 1 and 2 mol.L⁻¹ using different temperatures that varied between 40 and 80 ° C. With the regal water it was possible to verify that the studied PCI's have a content of 22.67% of copper. It was also observed a positive effect in the temperature increase in both concentrations used in the leaching experiments, allowing extraction above 75% for the temperature of 60 °C and concentration of 2 mol.L⁻¹, showing recoveries above 90% of the Leached copper. Finally, a kinetic study was carried out to verify the controlling step of the process, in addition to confirming its behavior with increasing temperature. In the study it was concluded that the controlling step of the process is the chemical reaction, because the diffusivity did not exert a great influence on the reaction.

KEYWORDS: Hydrometallurgy, Copper, PCB, Kinetic.

1 | INTRODUÇÃO

Cada vez mais o mundo vem se tornando dependente de dispositivos eletrônicos e da tecnologia. Concomitantemente a esse fato tem-se um rápido desenvolvimento da indústria eletrônica, o que gera um grande desafio em relação ao tratamento dos resíduos gerados por esse setor (SOVACOO, 2019; ZHANG; HE; HAN, 2020). Sabe-se que em 2016 foram descartados em todo mundo 44,7 milhões de tonelada de lixo eletrônico (BALDE *et al.*, 2017), e estima-se que esse valor passe para 52,2 milhões de toneladas em 2021 (AWASTHI; LI, 2019). Com isso, o destino final dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) tornou-se um problema emergente em todo o mundo (ISMAIL; HANAFIAH, 2019).

Como é necessária uma administração responsável dos REEE, a reciclagem desse tipo de resíduo vem crescendo rapidamente em países de alta renda. Além de consequências ambientais positivas, a reciclagem desses resíduos também tem vantagens econômicas. Isso ocorre devido ao fato de o lixo eletrônico conter metais valiosos em concentrações superiores às normalmente encontradas nos minérios equivalentes (DIAS; BERNARDES; HUDA, 2018).

Nesse contexto, as placas de circuito impresso (PCI), principal componente dos produtos eletrônicos, são as maiores fontes de metais valiosos. Estas contêm mais de 60 elementos, entre eles Au, Cu, Pd, Ni e Pb (LI *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2020; QIU *et al.*, 2020). Entre esses se destaca o cobre, pela quantidade contida nas PCI's, que pode conter cerca de 30 a 40 de vezes mais desse elemento do que a encontrada no minério (SODHA; TIPRE; DAVE, 2020).

Dentre as diversas técnicas de recuperação do Cobre das PCI's, destaca-se o processo de hidrometalurgia utilizando ácido nítrico (HNO₃) como agente lixiviante, que segundo trabalhos encontrados na literatura, tem apresentado resultados satisfatórios,

atingindo até 90% de extração desse metal (BARNWAL; DHAWAN, 2020; DUTTA *et al.*, 2018).

Diante desse contexto, verifica-se a importância do reaproveitamento desses resíduos, tanto relacionadas às razões de natureza ambiental quanto pela comercial devido ao elevado valor econômico dos metais contidos nas placas de circuito impresso.

2 | MATERIAIS E MÉTODOS

As PCI's foram inicialmente desmontadas, retirando todos os componentes soldados ou colados na placa. Em seguida foram cortadas em tamanhos menores e enviadas para a fragmentação, utilizando um Moinho de facas Macro, Modelo SL32, até atingir a granulometria menor que 1 mm em todo o material. Após a fragmentação, o material foi homogeneizado e quarteado segundo a norma NBR 10007:2004. Após essa etapa, uma parte do material homogeneizado seguiu para a caracterização com água régia, para quantificar o cobre total nas placas. Já a outra parte foi enviada para as lixiviações utilizando ácido nítrico nas concentrações de 1 e 2 mol.L⁻¹, onde permaneceram por durante duas horas em agitação constante e nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C. Após a lixiviação, a solução foi analisada para determinar a quantidade de cobre extraída. Para a quantificação desse elemento em solução em todas as etapas do estudo, foi utilizada a técnica de espectrometria de absorção atômica com chamas (F AAS), com o equipamento da marca Thermo elétron, series s. Para o estudo dos parâmetros cinéticos foi utilizado o software Excel® para plotar os gráficos e as regressões lineares.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Desmantelamento, moagem, peneiração e homogeneização

Foram pesadas 900 gramas de PCI's já desmontadas e enviadas para fragmentação, onde se obteve cerca de 889,25 g de placa triturada, uma perda de aproximadamente 1,2% em relação ao total. Essa perda de material provavelmente está relacionada com o funcionamento do moinho de facas.

Todas as placas trituradas ficaram com granulometria inferior a 1 mm, como mostrado na Figura 1, possibilitando que a maior parte do Cobre contido ficasse expostos ao ataque químico.

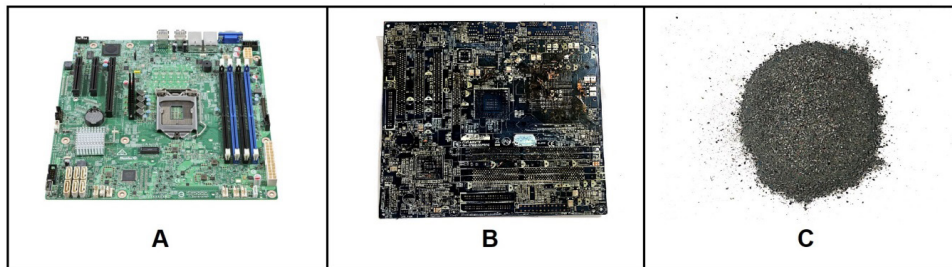


Figura 1: A: Placa mãe inteira, B: Placa mãe desmantelada e C: Placa fragmentada (<1 mm).

Fonte: autor.

3.2 Quantificação do Cobre total contido nas PCI's via digestão com água régia

Após 24 horas de reação as soluções filtradas foram analisadas por FAAS e então o Cobre presente foi quantificado. Com base nos valores das triplicatas analisadas, a quantidade média desse elemento na solução foi $11,33 \text{ g.L}^{-1}$, representando portanto, em média, 22,67% em peso desse metal nas PCI's.

Em caracterizações de PCI's encontrados na literatura (BIRLOAGA *et al.*, 2014), foi demonstrado que as porcentagem de Cobre nas placas variam entre 21 e 24% aproximadamente, mostrando que o valor encontrado na presente pesquisa esta dentro da faixa de concentração dos trabalhos consultados.

3.3 Análise da lixiviação utilizando ácido nítrico (HNO_3)

As porcentagens de lixiviação usando ácido nítrico foram calculadas tomando como base a quantidade máxima de Cobre encontrada com a água régia, sendo de $11,33 \text{ g.L}^{-1}$ desse metal, ou seja, assumiu-se esse valor como 100%.

Os resultados obtidos das lixiviações utilizando o HNO_3 nas concentrações de 1 e 2 mol.L^{-1} , em todas as temperaturas estudadas, estão apresentados na Figura 2, juntamente os erros relacionados as triplicatas realizadas.

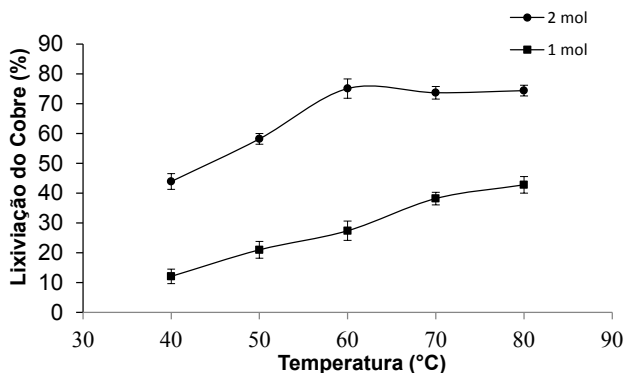


Figura 2: Lixiviação do Cobre em relação à temperatura de reação.

Fonte: o autor.

Nota-se que existem dois comportamentos distintos, um relacionado ao acréscimo de temperatura e o outro com o aumento da concentração do ácido.

Como mostrado na Figura 2, no caso do acréscimo da concentração, ocorre um aumento acentuado da lixiviação do Cobre em todas as temperaturas estudadas, demonstrando que para o tempo estudado (2 horas de reação), maiores concentrações tendem a lixiviar esse metal mais rapidamente.

Em relação à temperatura, com o seu aumento se tem uma maior extração do Cu até atingir um patamar que prossegue praticamente constante em ambas as concentrações.

Ainda em relação à Figura 2, para a temperatura de 40 °C se observa que o valor médio obtido na lixiviação foi de 18,09 ± 1,45% para a concentração de 1 mol.L⁻¹ e 43,90 ± 2,64% para 2 mol.L⁻¹, apresentando uma baixa extração do Cobre total presente nas placas. O mesmo ocorreu no ensaio de 50 °C, o qual obteve o valor de 21,01 ± 1,81% e 58,20 ± 0,78% de lixiviação para as respectivas concentrações.

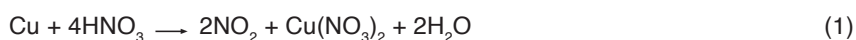
Para os ensaios a 60, 70 e 80 °C utilizando a solução de 1 mol.L⁻¹ de HNO₃ a lixiviação aumentou, porém ficando a baixo de 43%, ainda sendo consideradas baixas. O contrário se observa na lixiviação para a concentração de 2 mol.L⁻¹, na qual ocorreu um aumento acentuado, ficando em, respectivamente, 75,07 ± 3,27%, 73,68 ± 2,11% e 74,38 ± 1,78% de extração de Cobre das placas, considerado uma boa extração.

Acredita-se que esse aumento na lixiviação nas temperaturas mais altas, se deve ao fato de que nessas condições se tem energia suficiente para o processo ocorrer com uma maior velocidade de reação. Além do fato que o aumento dessa variável também influencia positivamente no coeficiente de transferência de massa e a difusividade (DUTTA *et al.*, 2018).

Com base nessas informações, o rendimento da lixiviação utilizando o ácido nítrico, de forma geral, aumenta com maiores concentrações e com o acréscimo da temperatura.

Porém, no caso da temperatura, esse aumento se tem até 60 °C, não ocorrendo variação nas porcentagens de lixiviação a partir dessa temperatura, se for considerado o erro experimental.

A pouca variação de lixiviação após 60 °C a 2 mol.L⁻¹ pode ser explicado pelo consumo do reagente na reação com outros metais que compõe as PCI's. Analisando a reação estequiométrica, apresentada na Equação 1, a quantidade necessária de ácido para a solubilização completa do Cobre contido em 10 g de PCI's (2,26 g de Cu) é de 0,14 mol de HNO₃. Então os 200 mL de ácido nítrico a 1 e 2 mol.L⁻¹ utilizados, contendo 0,2 e 0,4 mol desse reagente, respectivamente, eram mais que o suficiente para a reação. Porém, pela grande variedade de metais nas placas podem ter ocorrido lixiviações secundárias de outros elementos levando ao consumo do ácido antes de lixiviar todo o Cobre.



3.4 Estudo cinético do processo de lixiviação das PCI's

Como demonstrado nos tópicos anteriores, a melhor condição para a recuperação do Cobre contido nas PCI's foi de 2 mol.L⁻¹, sendo essa então, o alvo do estudo cinético. Na Figura 5 foi plotado os gráficos das porcentagens de lixiviação em relação ao tempo.

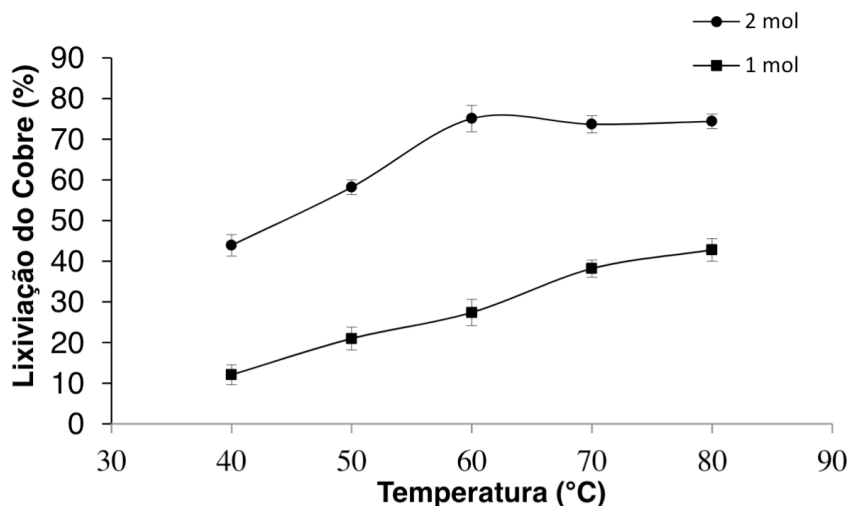


Figura 3: Lixiviação do Cobre em relação ao tempo para as duas concentrações e em diversas temperaturas. Fonte: o autor.

Como pode-se observar na Figura 3, nos experimentos a 70 e 80 °C ocorreu uma exceção nos pontos analisados. Nestes casos as retas foram ajustadas aos pontos nos instantes 0 e 10 minutos, pois devido à temperatura e a concentração de HNO₃ a reação é muito rápida, consumindo mais da metade do reagente a partir dos primeiros 10 minutos e o método não iria ser eficaz para analisar tal comportamento. Anomalia essa também observada por Nogueira (2002) e Oliveira (2012), que relataram o mesmo problema nas temperaturas mais elevadas. Sendo que a alternativa para contornar esse problema, em ambos os autores, também foi analisar somente até os 10 primeiros minutos, não ocasionando nenhum erro no estudo cinético.

Para as outras condições, afirma-se que a velocidade inicial da reação é lenta, pelo baixo coeficiente angular das retas, provavelmente devido ao processo de ativação da reação. No caso de 70 e 80 °C, a rápida reação se justifica pela alta temperatura, mostrando ser suficiente para a energia de ativação.

Um dos motivos descritos na literatura (NOGUEIRA, 2002) para ativação da reação necessitar de tanta energia, são as camadas passivadora na superfície dos metais, pois há necessidade de destruir primeiramente essas camadas para iniciar o processo de lixiviação, levando a velocidade de reação ser lenta, inicialmente.

Outro motivo para isso é a falta de íons na solução para o transporte de elétrons nos processos de lixiviação, que inicialmente é muito baixa, contendo só os íons do próprio ácido, com isso a velocidade de reação é lenta. Porém ao longo do tempo a quantidade de íons dos metais na solução vai aumentando, como o Cu²⁺, auxiliando no transporte de elétrons e acelerando a reação (NOGUEIRA, 2002).

Outra informação importante relacionado à Figura 3, é que a velocidade da reação é favorecida pela temperatura, pois as inclinações das retas aumentam em função da temperatura.

3.5 Determinação da ordem de reação e da energia de ativação

A Figura 4 apresenta o gráfico obtido a partir da aplicação dos dados encontrados de velocidade inicial descrita na equação 3 para cada temperatura e concentração do ácido.

$$\log \left(\frac{dX}{dt} \right)_0 = \log k_0 + n \log C_{(HNO_3)_0} \quad (3)$$

As velocidades iniciais $(dX/dt)_0$ dadas em min⁻¹ e concentração inicial do ácido nítrico $(C_{(HNO_3)_0})$ em mol.

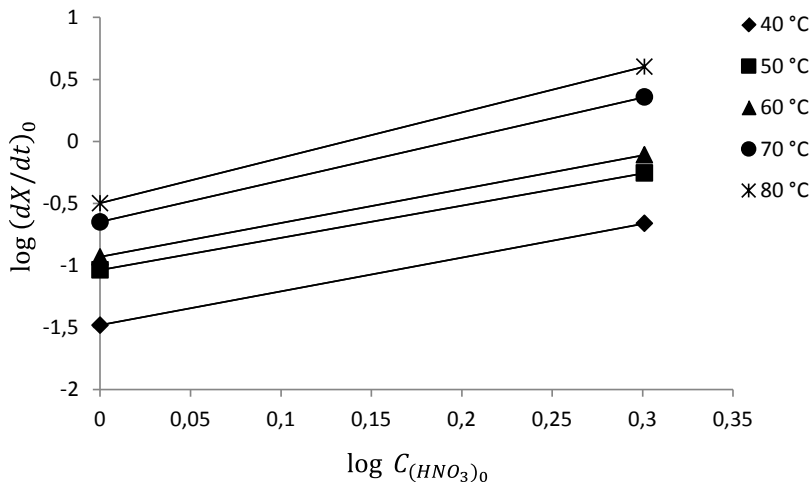


Figura 4: Gráfico da aplicação da equação logarítmica da velocidade inicial de reação.

Fonte: o autor.

Com base nas equações das retas para cada temperatura empregada nos experimentos, foi montada a Tabela 1 com as ordens de reação (n), obtida pelos coeficientes lineares das retas, e as constantes aparentes (k_0) dos coeficientes angulares.

Temperatura (°C)	Constante aparente k_0 ($L^{3n} mol^{-n} min^{-1}$)	Ordem de reação (n)
40	0,03	1,48
50	0,09	2,60
60	0,12	2,74
70	0,22	3,35
80	0,32	3,66

Tabela 1: Constantes aparentes de velocidade e ordens de reação do Cu, pelo método das velocidades iniciais.

Fonte: o autor.

Nitidamente ao observar a Tabela 1, percebe-se que a ordem de reação e a constante aparente de velocidade tendem a aumentar em função da temperatura, ou seja, como já citado anteriormente, essa reação química é termicamente favorecida, estando de acordo com a literatura estudada (NOGUEIRA, 2002; OLIVEIRA, 2012).

Com as velocidades aparentes determinadas, plotou-se o gráfico da aplicação da forma linearizada da equação de Arrhenius, mostrado na Figura 5.

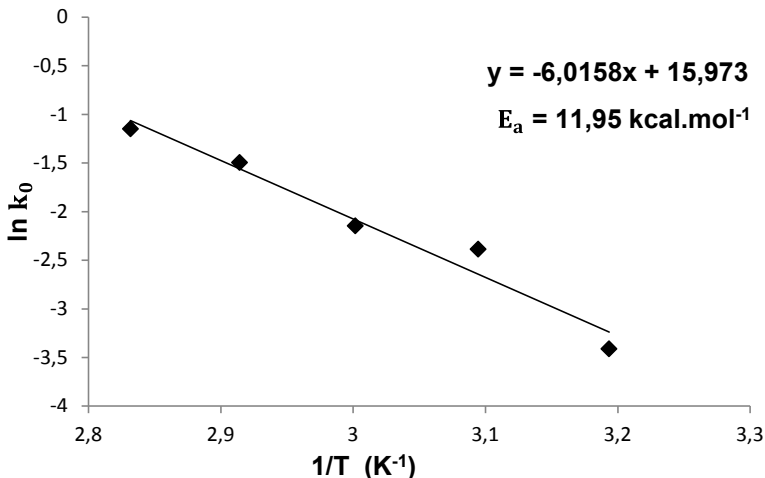


Figura 5: Determinação da energia de ativação da lixiviação do Cobre pela equação de Arrhenius.

Fonte: o autor.

Pela Figura 5 foi determinada a energia de ativação, sendo que o valor foi de 11,95 kcal.mol⁻¹, considerado relativamente alto. Com isso, pode-se deduzir que a lixiviação do Cobre das placas de circuito impresso tem como passo controlador do processo a velocidade de reação química, mostrando que o processo difusional não exerce influência significativa na velocidade de reação.

4 | CONCLUSÃO

O processamento mecânico das placas de circuito impresso se mostrou eficiente na diminuição da granulometria, para partículas menores que 1 mm. Em relação à perda de material pelo moinho de facas, ficou menor que 1,2%.

Os ensaios preliminares com água régia mostraram que existe uma quantidade significativa de Cobre contido nas amostras, superiores a 22% em peso.

Em relação à lixiviação do Cu, utilizando ácido nítrico diluído, a melhor condição encontrada nesse trabalho foi de 60 °C, com lixiviação média de 75% desse metal. Observou-se também que o aumento da temperatura influencia na lixiviação até o valor de 60 °C, não tendo muitas influências para as maiores temperaturas empregadas nos ensaios experimentais.

No estudo cinético da lixiviação do metal em estudo nas PCI's, verificou-se que o passo controlador do processo é a reação química, sendo a difusão pouco relevante. Além disso, também se calculou o valor da energia de ativação do processo, 11,95 kcal.mol⁻¹ e confirmou-se que o processo é termicamente favorecido por meio dos parâmetros cinéticos encontrados.

Em suma pode-se afirmar que dentro das condições operacionais propostas nesse trabalho, a recuperação de Cobre contido nas PCI's utilizando a lixiviação com ácido nítrico (HNO₃) demonstrou-se eficiente, principalmente a 60°C.

REFERÊNCIAS

AWASTHI, Abhishek Kumar; LI, Jinhui. **Sustainable Bioprospecting of Electronic Waste**. Trends in Biotechnology, v. 37, n. 7, p. 677–680, 2019.

BALDE, C.P. *et al.* **The global e-waste monitor 2017**. [S.l.: s.n.], 2017.

BARNWAL, Amit; DHAWAN, Nikhil. **Recycling of discarded mobile printed circuit boards for extraction of gold and copper**. Sustainable Materials and Technologies, v. 25, 2020.

BIRLOAGA, Ionela *et al.* **An advanced study on the hydrometallurgical processing of waste computer printed circuit boards to extract their valuable content of metals**. Waste Management, v. 34, n. 12, p. 2581–2586, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.028>>.

DIAS, Pablo; BERNARDES, Andréa Moura; HUDA, Nazmul. **Waste electrical and electronic equipment (WEEE) management: An analysis on the australian e-waste recycling scheme**. Journal of Cleaner Production, v. 197, p. 750–764, 2018.

DUTTA, Deblina *et al.* **Sustainable recycling process for metals recovery from used printed circuit boards (PCBs)**. Sustainable Materials and Technologies, v. 17, p. e00066, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00066>>.

ISMAIL, Haikal; HANAFIAH, Marlia M. **Discovering opportunities to meet the challenges of an effective waste electrical and electronic equipment recycling system in Malaysia**. Journal of Cleaner Production, v. 238, 2019.

LI, Jingying *et al.* **Bioleaching of gold from waste printed circuit boards by alkali-tolerant Pseudomonas fluorescens**. Hydrometallurgy, v. 194, n. December 2019, p. 105260, 2020.

LIU, Gongqi *et al.* **A new facile process to remove Br⁻ from waste printed circuit boards smelting ash: Thermodynamic analysis and process parameter optimization**. Journal of Cleaner Production, v. 254, p. 120176, 2020.

NOGUEIRA, C. **Reciclagem de Baterias de Níquel-Cádmio por Processamento Hidrometalúrgico**. Tese (Doutorado), Instituto Superior Técnico - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2002.

OLIVEIRA, P. C. F. **Valorização de Placas de Circuito Impresso por Hidrometalurgia**. 2012. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia do Ambiente, Universidade Técnica de Lisboa Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2012.

QIU, Ruijun *et al.* **Recovering full metallic resources from waste printed circuit boards: A refined review**. Journal of Cleaner Production, v. 244, p. 118690, 2020.

SODHA, Asha B.; TIPRE, Devayani R.; DAVE, Shailesh R. **Optimisation of biohydrometallurgical batch reactor process for copper extraction and recovery from non-pulverized waste printed circuit boards**. Hydrometallurgy, v. 191, n. September 2019, p. 105170, 2020.

SOVACOOOL, Benjamin K. **Toxic transitions in the lifecycle externalities of a digital society: The complex afterlives of electronic waste in Ghana**. Resources Policy, v. 64, n. July, p. 101459, 2019.

ZHANG, Tao; HE, Gang; HAN, Yinuo. **How to optimize retailers' recovery strategies for electronic waste**. Journal of Cleaner Production, v. 244, p. 118796, 2020.

SOBRE OS ORGANIZADORES

HENRIQUE AJUZ HOLZMANN - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutorando em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

JOÃO DALLAMUTA - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia de Telecomunicações pela UFPR. MBA em Gestão pela FAE Business School, Mestre em engenharia elétrica pela UEL. Doutorando em Engenharia Espacial pelo INPE. Trabalha com os temas: Gestão da Inovação, Inteligência de Mercado e Planejamento de Missões Espaciais.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Aços 23, 24, 51

Alumina 24, 81, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 106, 108, 109, 110, 111, 112

Aquecimento 40, 62, 67, 68, 69, 70, 71, 75, 77, 81, 100, 103

B

Biodiesel 99, 100, 101, 102, 105, 109, 110, 111, 112

C

C260 59, 60, 61, 62, 65, 66

CAD 1, 2, 3, 15, 126

Catálise 99, 103

Celeron 93, 94, 95, 96, 97, 98

Chapas 2, 11, 61, 66, 78, 93, 96, 97, 98

CNC 13, 14, 15, 16, 17, 20, 22, 31, 40, 45, 62

Combustão Interna 101, 117, 118, 119, 130

Comportamento Superficial 13, 14, 20, 22

Compósito 13, 196

Controle 4, 5, 9, 40, 41, 48, 49, 58, 66, 118, 131, 133, 135, 136, 137, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 181, 182

Corrosão 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 68, 94, 101, 209

D

Desincorporador 79, 80, 82, 86

Dureza 7, 8, 23, 24, 25, 26, 27, 59, 61, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 70, 71, 73, 75, 76, 77, 78, 79, 82, 85, 90, 91, 190

Duto 46

E

Enxuta 172, 173, 174, 176, 178, 181, 182

Estampagem 1, 2, 12, 62

F

Fluidodinâmica 117, 120, 130

Fotopletismografia 134, 135

Fricção 59, 60, 66

FSW 59, 60, 61, 62, 63, 66

G

Gesso 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92

Gestão 11, 50, 172, 174, 177, 182, 209

I

Impregnação de Metal 99

Ishikawa 1, 2, 3, 6

L

Linha de Transmissão 140, 143

M

Manufatura 13, 20, 35, 41, 45, 174

Medição 19, 22, 23, 24, 43, 47, 70, 72, 116, 135, 137, 164, 193

Microusinagem 29, 30, 31, 34, 37, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 45

Modelagem 22, 130, 140, 143, 147, 150, 151

Motor 101, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 126, 127, 129, 130, 131, 132, 133, 174

O

Orifício 36, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 168, 169

P

Parâmetros de Corte 13, 14, 16, 17, 19, 22, 30, 31, 34

PDCA 172, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181

Petróleo 46, 47, 48, 49, 51, 52, 55, 57, 58, 95, 100, 101, 110

Planejamento 3, 58, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 181, 182, 183, 185, 186, 187, 188, 209

Prática 50, 66, 160, 161, 164, 165, 170, 172, 179

Processamento de Sinais 134, 135

Propriedades 13, 14, 22, 29, 30, 37, 40, 43, 59, 61, 63, 65, 67, 68, 72, 73, 77, 87, 91, 92, 93, 95, 96, 97, 103, 104, 111, 119, 190, 191

R

Radiofrequência 140

Renshape 13, 14, 15, 22

Reservatório 160, 162, 164, 165, 166, 168

Resíduo 46, 79, 80, 81, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 184, 199

Resina Fenólica 93, 94, 96

Resistencia 191

Revestimento 46, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 56, 57

Ritmo Cardíaco 134, 135, 136, 137, 138

Rugosidade 13, 14, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 32, 33, 34, 36, 37, 38

S

Simulações 38, 114, 140, 141, 142, 143, 147, 151

Soldagem 59, 60, 62, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 75, 76, 77, 78, 197, 209

T

Termofixo 93, 94

Transesterificação 99, 101, 102, 103, 105, 109, 111

Tratamento Térmico 67, 68, 71, 74, 75, 77

Turbocompressor 117, 118, 120, 121, 129, 130

V

Vazão 160, 163, 164, 168, 169, 171

Vergalhão 1, 2, 3, 8

Vibração 84, 94, 117, 119, 126, 127, 128

ENGENHARIAS:

Metodologias e Práticas de Caráter Multidisciplinar

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

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

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 

ENGENHARIAS:

Metodologias e Práticas de Caráter Multidisciplinar

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

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

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 