



# **As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 3**

**Henrique Ajuz Holzmann  
(Organizador)**

**Henrique Ajuz Holzmann**  
**(Organizador)**

# **As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente 3**

**Athena Editora**  
**2019**

2019 by Atena Editora  
Copyright © Atena Editora  
Copyright do Texto © 2019 Os Autores  
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora  
Editora Executiva: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira  
Diagramação: Natália Sandrini  
Edição de Arte: Lorena Prestes  
Revisão: Os Autores

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. 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.

#### **Conselho Editorial**

##### **Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie di Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Julio Cândido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

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

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Gílrene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

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

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás  
Prof.ª Dr.ª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª 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. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Msc. Abrâao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba  
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Prof.<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista  
Prof.<sup>a</sup> Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof.<sup>a</sup> Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal  
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

E57 As engenharias frente a sociedade, a economia e o meio ambiente 3  
[recurso eletrônico] / Organizador Henrique Ajuz Holzmann. –  
Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (As Engenharias Frente  
a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente; v. 3)

Formato: PDF  
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader  
Modo de acesso: World Wide Web  
Inclui bibliografia  
ISBN 978-85-7247-432-0  
DOI 10.22533/at.ed.320192506

1. Engenharia – Aspectos sociais. 2. Engenharia – Aspectos  
econômicos. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Holzmann, Henrique  
Ajuz. II. Série.

CDD 658.5

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

Atena Editora  
Ponta Grossa – Paraná - Brasil  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
contato@atenaeditora.com.br

## APRESENTAÇÃO

As obras As Engenharias frente a Sociedade, a Economia e o Meio Ambiente Volume 1, 2, 3 e 4 abordam os mais diversos assuntos sobre métodos e ferramentas nas diversas áreas das engenharias a fim de melhorar a relação do homem com o meio ambiente e seus recursos.

O Volume 1 está disposto em 31 capítulos, com assuntos voltados a engenharia do meio ambiente, apresentando processos de recuperação e reaproveitamento de resíduos e uma melhor aplicação dos recursos disponíveis no ambiente, além do panorama sobre novos métodos de obtenção limpa da energia.

Já o Volume 2, está organizado em 32 capítulos e apresenta uma vertente ligada ao estudo dos solos e aguas, com estudos de sua melhor utilização, visando uma menor degradação do ambiente; com aplicações voltadas a construção civil de baixo impacto.

O Volume 3 apresenta estudos de materiais para aplicação eficiente e econômica em projetos, bem como o desenvolvimento de projetos mecânico e eletroeletrônicos voltados a otimização industrial e a redução de impacto ambiental, sendo organizados na forma de 28 capítulos.

No último Volume, são apresentados capítulos com temas referentes a engenharia de alimentos, e a melhoria em processos e produtos.

Desta forma um compêndio de temas e abordagens que facilitam as relações entre ensino-aprendizado são apresentados, a fim de se levantar dados e propostas para novas discussões em relação ao ensino nas engenharias, de maneira atual e com a aplicação das tecnologias hoje disponíveis.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS CERÂMICOS DE ALUMINA-ZIRCÔNIA PARA APLICAÇÃO COMO FERRAMENTAS DE CORTE	
Miguel Adriano Inácio	
Maria do Carmo de Andrade Nono	
José Vitor Cândido de Souza	
Sergio Luiz Mineiro	
Daniel Alessander Nono	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925061</b>	
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>10</b>
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE MODELO ELASTOPLÁSTICO EM ROCHA CARBONÁTICA CARSTIFICADA	
Rayane Conceição Ribeiro da Silveira Mattos	
Daniel Araújo Farias de Melo	
Marinésio Pinheiro de Lima	
Tiago de Freitas Viana	
Igor Fernandes Gomes	
Leonardo José do Nascimento Guimarães	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925062</b>	
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>26</b>
A INFLUÊNCIA DO NITROGÊNIO EM AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS COM APLICAÇÃO EM PRÓTESES ORTOPÉDICAS	
Glauber Rodrigues Cerqueira de Cerqueira	
Pedro Eliézer de Araújo Júnior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925063</b>	
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>42</b>
MICROPOROUS ACTIVATED CARBON FIBER FELT FROM BRAZILIAN TEXTILE PAN FIBER: PREPARATION, CHARACTERIZATION AND APPLICATION AS SUPERCAPACITOR ELECTRODE	
Jossano Saldanha Marcuzzo	
Aline Castilho Rodrigues	
Andres Cuña	
Nestor Tancredi	
Eduardo Mendez	
Heide Heloise Bernardi	
Mauricio Ribeiro Baldan	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925064</b>	
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>55</b>
ANÁLISE COMPARADA DE UM AGREGADO DE ESCÓRIA DE ACIARIA COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA LASTRO DE VIAS FÉRREAS DO TIPO <i>HEAVY HAUL</i> POR MEIO DE ENSAIOS TRIAXIAIS	
Bruno Guimarães Delgado	
António Viana da Fonseca	
Eduardo Fortunato	
Daniela Raquel Ferreira Coelho	
<b>DOI 10.22533/at.ed.3201925065</b>	

**CAPÍTULO 6 .....** ..... 71

CARACTERIZAÇÃO EM FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA DE FIOS DE ARAME DE SOLDA

Ingrid Ariani Belineli Barbosa

Heide Heloise Bernardi

William Marcos Muniz Menezes

**DOI 10.22533/at.ed.3201925066****CAPÍTULO 7 .....** ..... 80

ESTUDO DA MICROESTRUTURA NA ZONA TERMICAMENTE AFETADA COM A VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM

Luís Henrique Pires da Silva

Alex Sander Chaves da Silva

**DOI 10.22533/at.ed.3201925067****CAPÍTULO 8 .....** ..... 92

ESTUDO DA USINAGEM DA SUPERLIGA A BASE DE FERRO-NÍQUEL UTILIZANDO FERRAMENTA CERÂMICA

Eduardo Pires Bonhin

Sarah David Müzel

Marcel Yuzo Kondo

Lúcia de Almeida Ribeiro

José Vitor Cândido de Souza

Marcos Valério Ribeiro

**DOI 10.22533/at.ed.3201925068****CAPÍTULO 9 .....** ..... 100

CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE NÉVOA SALINA ATENDENDO AOS REQUISITOS MÍNIMOS CONTIDOS NAS NORMAS ISO 9227 e ASTM B-117

Leonardo de Souza Coutinho

Alexandre Alvarenga Palmeira

**DOI 10.22533/at.ed.3201925069****CAPÍTULO 10 .....** ..... 111

MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA: COLHEITADEIRAS AXIAIS X RADIAIS

Filipi José Arantes Lemos

João Mario Mendes de Freitas

**DOI 10.22533/at.ed.32019250610****CAPÍTULO 11 .....** ..... 127

MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLOGÍCA PARA O PROJETO DE MODELOS DE BIELAS E TIRANTES

Jamile Maria Araujo Tavares

Rejane Martins Fernandes Canha

**DOI 10.22533/at.ed.32019250611****CAPÍTULO 12 .....** ..... 142

ESTUDO NUMÉRICO DE UM EQUIPAMENTO DE SECAGEM

Eduardo Dal Piva Schuch

Magaiver Gabriel Lamp

Conrado Mendes Morais

Ângela Beatrice Dewes Moura

**DOI 10.22533/at.ed.32019250612**

<b>CAPÍTULO 13 .....</b>	<b>153</b>
SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA A COMBUSTÃO DE GASOLINA	
Felipe Michael Grein	
Jean Lucas Pereira	
Luiz Felipe Weck	
Olaf Graupmann	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250613</b>	
<b>CAPÍTULO 14 .....</b>	<b>156</b>
MODELAGEM DE PID PARA SISTEMA DE CONTROLE DE RAMPAS DE TEMPERATURA EM BRASSAGEM	
Gabriel Queiroz	
Marcelo Barros de Almeida	
Márcio Jose da Cunha	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250614</b>	
<b>CAPÍTULO 15 .....</b>	<b>168</b>
MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS DINÂMICOS: UMA ABORDAGEM DIDÁTICA	
Lucas Divino Alves	
Neylor Makalister Ribeiro Vieira	
Emerson Paulino dos Reis	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250615</b>	
<b>CAPÍTULO 16 .....</b>	<b>183</b>
APLICAÇÃO E ANÁLISE VIA MEC EM PROBLEMAS DE TERMOELASTICIDADE 2D	
Luis Vinicius Pereira Silva	
Gilberto Gomes	
João Carlos Barleta Uchôa	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250616</b>	
<b>CAPÍTULO 17 .....</b>	<b>198</b>
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INJEÇÃO DE ÁGUA EM RESERVATÓRIO DE PETRÓLEO HETEROGÊNEO	
Raquel Oliveira Lima	
José Arthur Oliveira Santos	
Antônio Jorge Vasconcellos Garcia	
Felipe Barreiros Gomes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250617</b>	
<b>CAPÍTULO 18 .....</b>	<b>207</b>
TANQUES FLASH: DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE CUSTOS NO SOFTWARE DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO EMSO	
Erich Potrich	
Sérgio Correia da Silva	
Larissa Souza Amaral	
<b>DOI 10.22533/at.ed.32019250618</b>	

**CAPÍTULO 19 ..... 215**

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE DEPOSIÇÃO ORGÂNICA EM OPERAÇÕES DE MISTURA DE PETRÓLEOS NO TANQUE DE ESTOCAGEM EM REFINARIAS DE PETRÓLEO

Rosberguer de Almeida Camargo  
Mauren Costa da Silva  
Rafael Beltrame  
Darci Alberto Gatto  
Antônio Carlos da Silva Ramos

**DOI 10.22533/at.ed.32019250619**

**CAPÍTULO 20 ..... 223**

AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA MENSURAR A ILUMINÂNCIA EM UM AVIÁRIO EXPERIMENTAL

Giovanni Polette Dalla Libera  
Victor Moreira Leão  
Vitor Augusto de Sousa  
Matheus Fernando Lima Zuccherelli de Souza  
Renata Lima Zuccherelli de Oliveira  
Marcelo Eduardo de Oliveira  
Adriano Rogério Bruno Tech

**DOI 10.22533/at.ed.32019250620**

**CAPÍTULO 21 ..... 230**

CONTROLADOR FUZZY SINTONIZADO POR ALGORITMO GENÉTICO EM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Lenon Diniz Seixas  
Diego Solak Castanho  
Hugo Valadares Siqueira  
Fernanda Cristina Corrêa

**DOI 10.22533/at.ed.32019250621**

**CAPÍTULO 22 ..... 243**

CONTROLADORES ROBUSTO APLICADO A CONVERSORES CC-CC

Luiz Otávio Limurci dos Santos  
Luiz Antonio Maccari Junior

**DOI 10.22533/at.ed.32019250622**

**CAPÍTULO 23 ..... 261**

PROPOSTA DE PLATAFORMA PARA ESTUDO DE MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8/6

Marcos José de Moraes Filho  
Luciano Coutinho Gomes  
Darizon Alves de Andrade  
Josemar Alves dos Santos Junior  
Wanberton Gabriel de Souza  
Cássio Alves de Oliveira

**DOI 10.22533/at.ed.32019250623**

**CAPÍTULO 24 .....** ..... 275

ESTUDO COMPARATIVO DE MODELAGENS DE ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISES DE ESFORÇOS ELETROMECÂNICOS

Pedro Henrique Aquino Barra  
Arnaldo José Pereira Rosentino Junior  
Antônio Carlos Delaiba

**DOI 10.22533/at.ed.32019250624**

**CAPÍTULO 25 .....** ..... 287

PROCEDIMENTO PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DO LAÇO DE HISTERESE MAGNÉTICA

Vítor Hörbe Pereira Da Costa  
Antônio Flavio Licarião Nogueira  
Leonardo José Amador Salas Maldonado

**DOI 10.22533/at.ed.32019250625**

**CAPÍTULO 26 .....** ..... 294

SIMULAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO E CORRENTE ELÉTRICA EM TECIDOS BIOLÓGICOS

Guilherme Brasil Pintarelli  
Afrânio de Castro Antonio Jr.  
Raul Guedert  
Sandra Cossul  
Daniela Ota Hisayasu Suzuki

**DOI 10.22533/at.ed.32019250626**

**CAPÍTULO 27 .....** ..... 307

SISTEMA DE PRESENÇA UTILIZANDO IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA

Giovani Formaggio Mateus  
Ricardo Barroso Leite

**DOI 10.22533/at.ed.32019250627**

**CAPÍTULO 28 .....** ..... 322

SISTEMAS DEFASADORES EM ALTA FREQUÊNCIA UTILIZANDO MICROFITA EM SUBSTRATO FR4

Jobson De Araújo Nascimento  
José Moraes Gurgel Neto  
Alexsandro Aleixo Pereira da Silva  
Regina Maria de Lima Neta

**DOI 10.22533/at.ed.32019250628**

**CAPÍTULO 29 .....** ..... 333

ANÁLISES DA RUPTURA EM TRECHO DA BR-060 NO MUNICÍPIO DE ALEXÂNIA, GOIÁS, E CONDIÇÕES APÓS SEIS ANOS DA RECUPERAÇÃO

Rideci Farias  
Tiago Matias Lino  
Haroldo da Silva Paranhos  
Itamar de Souza Bezerra  
Ranieri Araújo Farias Dias  
Alexsandra Maiberg Hausser

**DOI 10.22533/at.ed.32019250629**

**SOBRE O ORGANIZADOR..... 346**

# CAPÍTULO 1

## ANÁLISE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS CERÂMICOS DE ALUMINA-ZIRCÔNIA PARA APLICAÇÃO COMO FERRAMENTAS DE CORTE

**Miguel Adriano Inácio**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE),  
LABAS , São José dos Campos, SP, Brasil.

**Maria do Carmo de Andrade Nono**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE),  
LABAS , São José dos Campos, SP, Brasil.

**José Vitor Cândido de Souza**

Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita  
Filho, UNESP SP –Brasil.

**Sergio Luiz Mineiro**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE),  
LABAS,  
São José dos Campos, SP, Brasil.

**Daniel Alessander Nono**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE),  
LABAS,  
São José dos Campos, SP, Brasil.

compósitos de alumina-zircônia com diferentes quantidades de  $ZrO_2$  (de 30 e 18,5 % em peso) foram estudadas. Os pós foram misturados a úmido em moinho de bolas, compactados com 50 MPa (prensagem uniaxial), 300 MPa (prensagem isostática) e sinterizados ao ar em 1600 °C, por 3 horas. Após as caracterizações químicas e físicas (difração de raios X, microscopia óptica de varredura e densidade) os resultados indicaram um aumento de tenacidade à fratura no compósito  $0,815Al_2O_3 - 0,185ZrO_2$ .

**PALAVRAS CHAVE:** zircônia, alumina, ferramenta de corte, tenacidade.

MECHANICAL PROPERTIES ANALYSIS OF  
ALUMINA-ZIRCONIA COMPOSITE CERAMIC

FOR APPLICATION AS CUTTING TOOLS

**ABSTRACT:** Alumina ceramics present various superior properties to most ceramic materials, such as fracture strength, hardness, wear resistance, chemical and thermal stabilities. However, its use as structural ceramics is limited by the small values of fracture toughness (2-4 MPa). These values can be increased by adding tetragonal zirconia polycrystals (TZP) to the alumina matrix forming a  $ZrO_2-Al_2O_3$  composite. Mechanical properties of Hardness and fracture toughness of alumina-zirconia composites with

**RESUMO:** Cerâmicas de alumina apresentam várias propriedades superiores à maioria dos materiais cerâmicos, tais como: resistência à fratura, dureza, resistência ao desgaste, estabilidades química e térmica. Porém, seu uso como cerâmica estrutural é limitado pelos valores pequenos de tenacidade à fratura (2 a 4 MPa). Estes valores podem ser aumentados adicionando-se zircônia tetragonal policristalina (TZP) à matriz de alumina, formando um compósito  $Al_2O_3-ZrO_2$ . Propriedades mecânicas de dureza e de tenacidade à fratura de

different amounts of ZrO<sub>2</sub> (30 and 18.5 wt%) were studied. The powders were mixed in a ball mill, compacted at 50 MPa (uniaxial), 300 MPa (isostatic pressing) and sintered in air at 1600 °C for 2 hours. After the chemical and physical characterizations (X-ray diffraction, optical microscopy and density) the results indicated an increase in fracture toughness in 0.815 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite - 0.185 ZrO<sub>2</sub>.

**KEYWORDS:** zirconia, alumina, cutting tool, toughness.

## 1 | INTRODUÇÃO

O atual cenário mundial necessita de grandes esforços por parte de pesquisadores direcionados ao desenvolvimento de novos materiais. Neste contexto encontram-se as cerâmicas de alumina e zircônia como alternativa em diversos campos e dentre eles no campo tribológico. Os materiais cerâmicos, de um modo geral, são relativamente limitados em termos das suas aplicações devido às suas propriedades mecânicas, as quais, em muitos aspectos, são inferiores àquelas exibidas por outros materiais, a exemplo, os metais. A principal desvantagem é a disposição à fratura catastrófica de maneira frágil com absorção de energia muito pequena. Porém, cerâmicas à base de alumina e de zircônia, após processamento adequado, podem apresentar altas densidades e microestrutura controladas, tornando-se qualificadas para garantir um alto desempenho mecânico. Isso faz com que as indústrias de manufaturas gastem cada vez mais tempo no processo de fabricação. Dentre os mais importantes processos de fabricação, destacam-se os processos de usinagem que possuem uma parcela considerável do custo final do produto, sendo de grande importância o desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte que possibilitem trabalhar com velocidades cada vez maiores e a um custo cada vez mais reduzido. A seleção de materiais para componentes em aplicações tribológicas não é baseada somente no comportamento tribológico, mas requer uma avaliação prévia do seu desempenho, resistência à corrosão, fluênciа, tensão, compressão, dobragem e fadiga, estabilidade dimensional, propriedades térmicas, tipo de fabricação e custos. O presente trabalho trata do estudo e desenvolvimento de ferramentas cerâmicas de corte de ZTA - zircônia tetragonal - alumina para aplicações em usinagem de materiais utilizados pelas indústrias Aeroespaciais, com objetivo de obter possíveis avanços tecnológicos e redução de custo. O processamento e caracterização das composições desenvolvidas nesse trabalho visou a obtenção de cerâmicas densas de alta resistência para posteriores testes como ferramentas de corte sendo que a seleção dos pós precursores deve-se a características peculiares dos materiais Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e nano 3Y-ZrO<sub>2</sub> como boa dureza e resistência mecânica para alumina e boa tenacidade para a zircônia com o objetivo de se observar de maneira sistemática a importância dessas propriedades para aplicações como ferramentas de corte. Porém, fatos como obtenção de propriedades mecânicas consolidadas pelas fases obtidas, e microestrutura adequada devem fazer parte da continuidade dos estudos para que se

possa obter uma ferramenta com excelentes propriedades físicas e mecânicas.

## 2 | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiais

Neste item são apresentadas as características principais dos materiais utilizados durante os experimentos, bem como sua identificação e procedência. Os materiais que foram utilizados neste trabalho são adquiridos comercialmente.

**a)** Pó de zircônia ( $\text{ZrO}_2$ ) nanoparticulado dopado com ítria.

A zircônia utilizada foi a zircônia policristalina estabilizada com 3 % mol ou 5,2 % em peso de ítria ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ), ZS2 da Shandong Zhongshun Sci. & Tech. Devel. Co. Ltd.

**b)** Pó de Alumina ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) submicroparticulado.

O pó de alumina reativa OP1000 submicroparticulado comercial utilizado neste trabalho foi fornecido pela empresa pela Alacan-Alumínio do Brasil Ltda.

### 2.2 Mistura

A composição estudada teve como base óxido de alumínio submicrométrico ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de zircônio estabilizado com óxido de ítrio nanométrico ( $3\text{Y-ZrO}_2$ ). Utilizou-se para as composições A= 81,5 wt % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 18,5 wt % de  $3\text{Y-ZrO}_2$  nano e B= 70 wt % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 30 wt % de  $3\text{Y-ZrO}_2$ .

## 3 | PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

As matérias primas foram caracterizadas por difração de raios X. A composição A foi homogeneizada em moinho convencional por 8 horas com velocidade de 200 rpm. Após este período, a composição foi filtrada, e subsequente secada em estufa a 100 °C por 24 horas. Em seguida, foram desagregadas em almofariz de ágata e submetidas ao peneiramento em malha de 120 mesh. A composição foi compactada com uma carga de 80 MPa durante 30 segundos com subsequente descompressão com tempo de 60s e posteriormente seguida de prensagem isostática a frio com pressão de 300 MPa. A dimensão utilizada foi de 16,36 x 16,36 x 7,5 mm, com objetivo de obter uma geometria final de 12,76 x 12,76 x 4,76 mm, de acordo com a NORMA ISO 1832. As matrizes utilizadas na confecção dos corpos de prova foram matrizes com camisa flutuante. Após essa etapa os corpos a verde foram submetidos ao processo de sinterização na temperatura de 1600 °C com taxa de aquecimento de 10 °C/min e patamar de 3 horas. Os insertos para ferramenta de corte foram caracterizados quanto à perda de massa, densidade a verde, retração linear, difração de raios X, densidade relativa, microestrutura, microdureza e tenacidade à fratura e análise da topografia por perfilometria óptica.

## 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Fases presentes nos pós de partida

Nos difratogramas de raios X foram observadas as seguintes fases: alumina ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), zircônia ( $3\text{Y-ZrO}_2$ ) tetragonal majoritária, e monoclinica (baddeleíta) em menor quantidade.

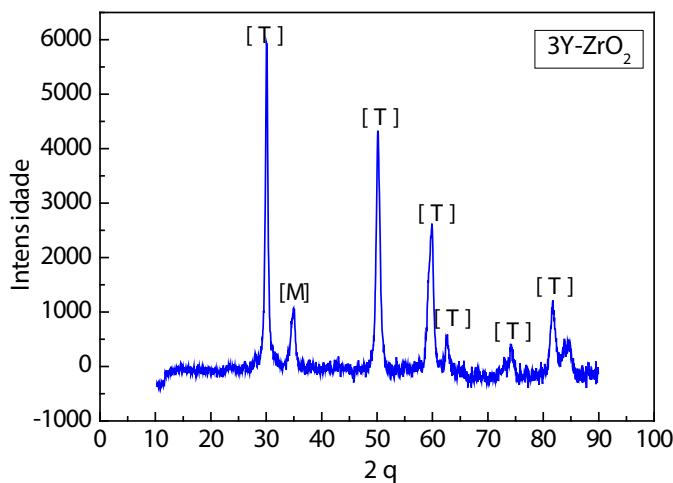


Fig.1 - Difratograma de raios X do pó de  $3\text{Y-ZrO}_2$  nano.

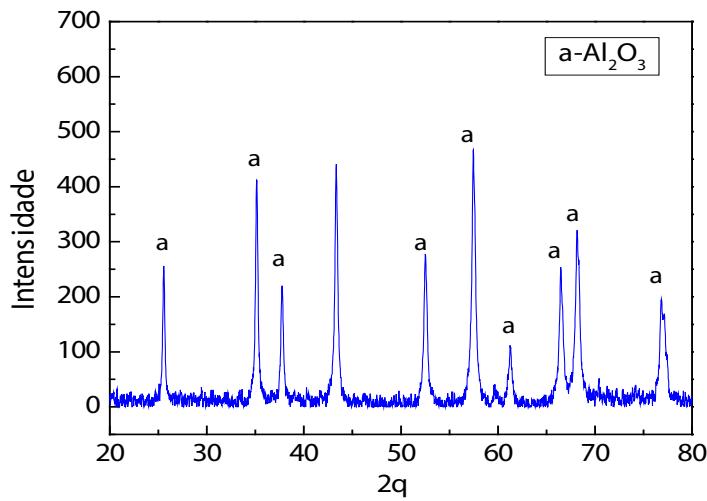


Fig. 2 - Difratograma de raios X do pó de  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

## 5 | PROPRIEDADES FÍSICAS

Os valores de massa específica a verde, massa específica teórica e densidade relativa a verde estão mostrados na Tabela 1. Estes valores mostram variações muito pequenas para os compactados com composições dos tipos A e B.

Compactado	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica teórica (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade relativa (%)
A	2,49	5,03	49,48
B	2,52	5,22	48,38

Tabela 1 – Valores de massa específica e de densidade a verde dos compactados.

Esses resultados se mostram importantes na obtenção de cerâmicas com propriedades mecânicas necessárias para a confecção e aplicação tribológica de ferramentas de corte.

## 6 | ANÁLISE DE FASES DAS AMOSTRAS SINTERIZADAS

Na Figura 3 (composição A), pode-se observar a presença majoritária de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com a estrutura cristalina da alumina a e de  $\text{ZrO}_2$  com estrutura cristalina tetragonal. Já na Figura 4 observa-se presença majoritária de  $\text{ZrO}_2$ . As intensidades relativas dos picos de difração de ambos os materiais são consistentes com as quantidades de alumina e de zircônia utilizadas na composição B.

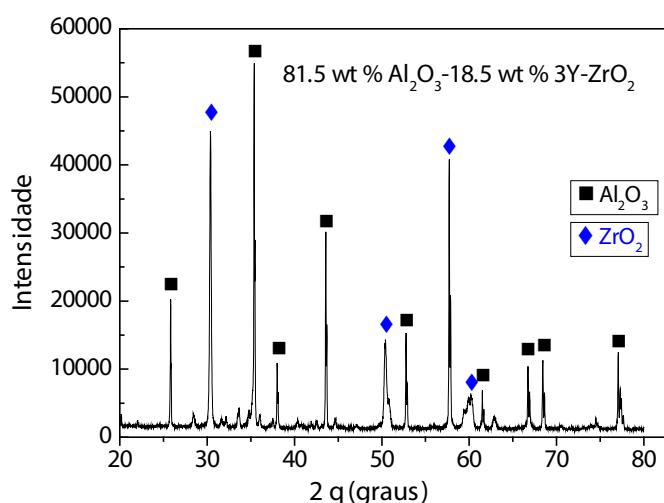


Fig. 3 - Difratograma de raios X da amostra A, sinterizada a 1600 °C.

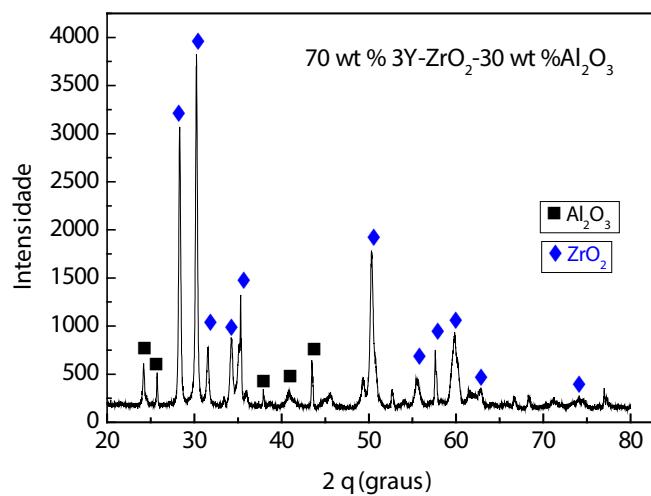


Fig. 4 - Difratograma de raios X da amostra B, sinterizada a 1600 °C.

## 7 | CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

As microestruturas das superfícies de fratura dos compósitos cerâmicos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{ZrO}_2$  são mostradas nas Figuras 5 e 6. Na Figura 5 (amostra B) pode ser observada uma distribuição homogênea da alumina na estrutura. É possível verificar que os grãos de alumina são maiores, e isso pode ocorrer em função do tempo utilizado no processo de sinterização. O crescimento de grão da alumina é diretamente proporcional ao tempo de sinterização (patamar), quanto maior o tempo maior os grãos. Já o expoente de crescimento de grão da zircônia e da alumina é relatado de ser entre 3 e 4, em função do tempo de sinterização, e isso indica que, possivelmente, diferentes mecanismos de crescimento de grãos estejam atuando nessas duas fases. Na Figura 6 (amostra A) o crescimento de grãos foi diferente da amostra representada na Figura 5. Isto pode estar relacionado à uma maior a quantidade de grãos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  que foi utilizado na amostra A em relação à amostra B, sendo possível a zircônia atuar como reforço dos grãos que se apresentam distribuídos em forma de ilhas na microestrutura. Contudo, como os parâmetros de sinterizações são os mesmos eles também podem promover influência na microestrutura dos materiais.

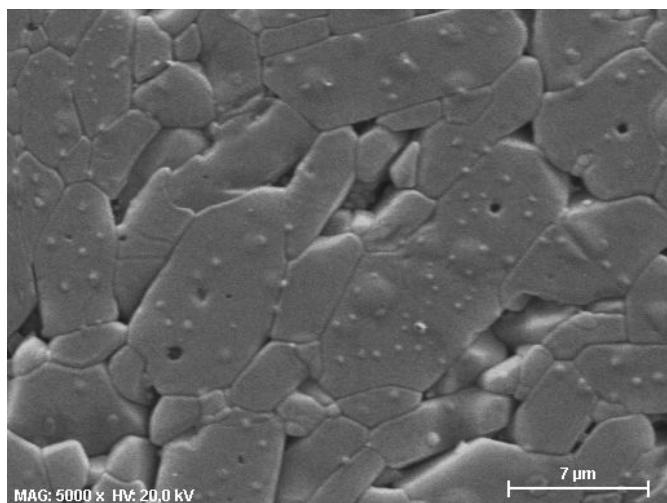


Fig. 5 – Micrografias da amostra B.

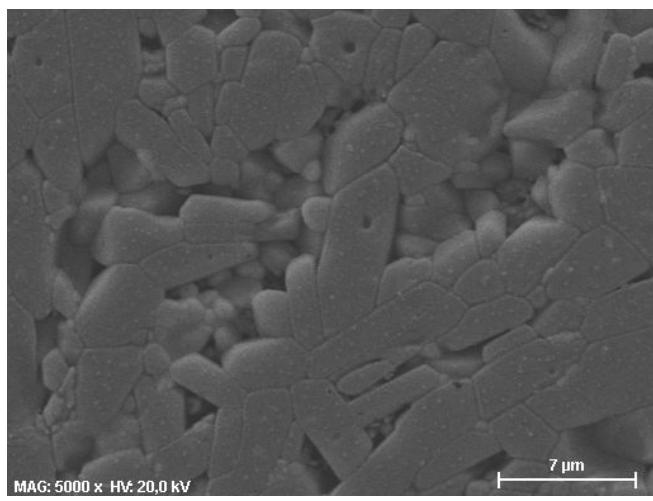


Fig. 6 – Micrografias da amostra A.

## 8 | PROPRIEDADES MECÂNICAS ( DUREZA E TENCIDADE À FRATURA)

As propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos são muito importantes para definir seu campo de aplicação. Os resultados de dureza obtida pelo método de dureza Vickers e da tenacidade à fratura ( $K_{IC}$ ) são apresentados respectivamente na Tabela 2.

Composição	Sinterização em 1600 °C	
	$K_{IC}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	Dureza Vickers (GPa)
A	6,21 ± 0,24	16,22 ± 0,10
B	7,20 ± 0,16	15,04 ± 0,07

Tabela 2 - Valores de dureza e tenacidade à fratura das cerâmicas.

A densificação das amostras são da ordem de 98 %, indicando que a dureza e tenacidade a fratura dos insertos cerâmicos são característicos des natureza dos materiais. Isso fica mais evidente devido aos parâmetros de sinterização ter sido os mesmos para ambos compósitos cerâmicos. Entretanto, na Tabela 2 fica evidente que a composição que utilizou maior quantidade de alumina (A) apresentou maior dureza, enquanto que a composição com maior quantidade de zircônia estabilizada apresentou dureza de 15,04 GPa. Matematicamente podemos observar que houve uma redução dos valores de 7% de dureza da composição A para B, enquanto que os valores de tenacidade à fratura são inversos aos valores de dureza. De uma maneira geral observando os valores de densidade relativa em conjunto com os resultados de desvio padrão apresentados isso indica uma homogeneidade dos valores de dureza no interior da amostra.

## 9 | GEOMETRIA DA FERRAMENTA DE CORTE

Na escolha da geometria das ferramentas deve-se atentar pelo tipo de processo e material a ser trabalhado (desbaste pesado, médio e acabamento) (7). A obtenção da geometria das ferramentas foi em função da norma ISO 1832, onde definiu-se uma ferramenta que apresentasse um maior campo de aplicação com boa resistência, e possibilidade de utilização no torneamento de desbaste e acabamento. Segundo esses parâmetros foi definida a geometria 12,76 x 12,76 x 4,76 mm, conforme Figura 7a. A ferramenta com maior quantidade de zircônia apresentou, como era de se esperar, menor rugosidade superficial devido à maior concentração de partículas nanométricas de zircônia presentes. Uma imagem da aresta de corte da ferramenta também é mostrada na Figura 7b. Já a figura 7c apresenta a imagem da topologia da superfície de saída da ferramenta com maior concentração de zircônia por perfilometria óptica.

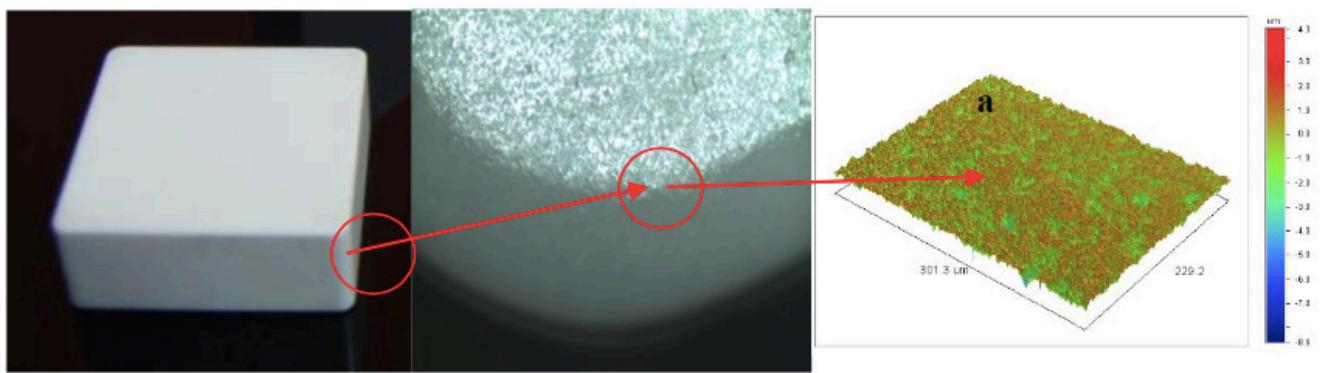


Fig.7 - a) Ferramenta desenvolvida, b)aresta de corte c) Topografia.

Foram realizadas, 10 varreduras em diferentes áreas da superfície das ferramentas. A análise da imagem permite visualizar uma topografia do tipo dente de serra (irregularidades superficiais com formato de serra), sendo que esta topografia influenciará na ação de abrasão sobre o cavaco, tendo como função, a quebra do cavaco. Os valores de rugosidade média ( $R_a$ ) são de 605,20 nm para ferramenta com menor quantidade de zircônia e de 344,77 nm maior quantidade de zircônia.

## 10 | CONCLUSÃO

O objetivo de produzir corpos cerâmicos com propriedades físicas e mecânicas promissoras para uso como ferramentas de corte foi alcançado com sucesso. Verificou-se ainda, que a temperatura de 1600 °C foi eficiente para obtenção de materiais com baixa porosidade (alta densidade), promovendo dureza Vickers de 16,22 GPa e tenacidade à fratura de  $6,21 \text{ MPa.m}^{1/2}$  para a composição A (81,5 wt %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -18,5 wt %  $3\text{Y-ZrO}_2$ ), 15,04 GPa e  $7,20 \text{ MPa.m}^{1/2}$  para a composição B (70 wt %  $3\text{Y-ZrO}_2$ -30 wt % $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Esses valores credenciam a aplicação dessas ferramentas em processos de usinagem.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo suporte.

## REFERÊNCIA

SOUZA, J. V. C., **Desenvolvimento de pastilhas cerâmicas à base de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  para aplicações tribológicas**. Guaratinguetá, UNESP, (2005) Tese de Doutorado.

C. O. Sasseron, J. Marchi, J.C. Bressiani e A.H.A. Bressiani, **Sinterização de cerâmicas à base de alumina, zircônia e titânio**. Anais do 50º Congresso Brasileiro de Cerâmica Proceedings of the 50th Annual Meeting of the Brazilian Ceramic Society 22 a 25 de maio 2006 – Blumenau, SC.

FONSECA, S. T. **Processamento e caracterização de pós e de cerâmicas de alumina total e**

**parcialmente nanoestruturadas.** 2007. 89 p. (INPE-15153-TDI/1285). Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2007. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/12.07.12.40>>. Acesso em: 12 abr. 2010.

NONO, M.C.A., **Cerâmicas à base de zircônia tetragonal policristalina do sistema CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> (Ce-TZP)**, S.J.Campos-SP, ITA-CTA, 1990, Tese de doutorado.

ALEXANDER, K.B., Becher, P.F., Waters, S.B., Bleier, A., **Grain growth kinetics in Alumina-Zirconia (CeZTA) Composites**, J. Am Ceram Soc. (1994) Vol.4, p.939-46.

RALPH, B., Shim, K.B., Huda, Z., Furley, J., Edirisinghe, M.E., **The effect of particles and solutes on grain boundary migration and grain growth**, Mater Sci Forum,(1992) p. 94-95.

DINIZ, A. E., Marcondes, F. C. Coppini, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos materiais**. 6<sup>a</sup> Ed., Artliber Editora.(2008) p.95.

## SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE MODELO ELASTOPLÁSTICO EM ROCHA CARBONÁTICA CARSTIFICADA

**Rayane Conceição Ribeiro da Silveira  
Mattos**

Universidade Federal de Pernambuco  
Recife - Pernambuco

**Daniel Araújo Farias de Melo**  
Universidade Federal de Pernambuco  
Recife - Brasil

**Marinésio Pinheiro de Lima**  
Universidade Federal de Pernambuco  
Recife - Brasil

**Tiago de Freitas Viana**  
Universidade Federal de Pernambuco  
Recife - Brasil

**Igor Fernandes Gomes**  
Universidade Federal de Pernambuco  
Recife - Brasil

**Leonardo José do Nascimento Guimarães**  
Universidade Federal de Pernambuco  
Recife – Brasil

**RESUMO:** Ao longo dos anos inúmeras pesquisas vêm sendo realizadas dentro do contexto da engenharia de petróleo com o intuito de realizar análises mais realistas de cenários de produção. No que se refere aos reservatórios carbonáticos, além das fraturas, um sistema cárstico pode desempenhar um papel importante no escoamento de fluidos no interior do reservatório. Portanto, o estudo da geração de carste e o mecanismo de colapso

associado é de grande importância para o entendimento da disposição e interação das feições cársticas no interior do reservatório. Desta forma, este trabalho tem como objetivo fazer uma simulação numérica do colapso de um depósito carbonático cárstico através do método dos elementos finitos. A proposta trata-se de um cenário carbonático fictício com carstes bem desenvolvidos e não preenchidos, sobreposto por quatro camadas rochosas de propriedades distintas, com uma sobrecarga de 13 MPa, representando o soterramento das camadas. Na simulação foi utilizado o programa *in house* de elementos finitos CODE\_BRIGHT considerando para as camadas rochosas envolvidas o modelo elasto-plástico de Mohr-Coulomb com regularização viscosa de Perzyna. A formação do carste foi modelada empregando-se um algoritmo de escavação da região considerando, em uma abordagem mecânica e em deformação plana, a representação de um processo de dissolução da rocha carbonática. Observou-se os processos de plastificação no entorno das três cavidades devido a concentração de tensões. Também foi verificado o arqueamento das tensões na rocha e zonas potenciais de fraturamento por tração e cisalhamento, o que foi mais evidenciado com o emprego de um modelo de *softening*.

**PALAVRAS-CHAVE:** Carste, Colapso, Plasticidade, Simulação Numérica.

**ABSTRACT:** Over the years, lots of researches have been carried out within the context of petroleum engineering in order to come up with realistic analyzes of production numerical scenarios. Regarding carbonate reservoirs, in addition to fractures, a karst system can have great importance in the flow system into the reservoir. Therefore, the study of karst formation and its associated collapse mechanism is of indispensable to the understanding of the arrangement and interaction of karstic features within the reservoir. Following this context, this work aims to present a numerical simulation of the collapse of a karstic carbonate deposit through the finite element method. The proposal is a fictitious carbonate scenario, which has well developed and unfilled karst, with four rock layers of distinct properties, with an overload of 13 MPa, representing the rearrangement of layers. In the simulation, the in-house program of CODE\_BRIGHT finite elements was used considering the rocky layers with the elasto-plastic model of Mohr-Coulomb with viscous Perzyna regularization. The formation of the karst was modeled using an algorithm of excavation of the region considering, in a mechanical approach and in plan deformation, which represents a process of dissolution of the carbonate rock. It was observed that the plastification processes in the surroundings of all three karsts due to the concentration of tensions. It was also noticed the arching of stress in the rock and potential areas of fracturing by traction and shear, which was more evidenced with the use of a softening model.

**KEYWORDS:** Karst, Collapse, Plasticity, Numerical Simulation.

## 1 | INTRODUÇÃO

Durante o processo de extração do petróleo o reservatório sofre alterações no seu estado de tensões inicial devido à alteração do campo de pressão, temperatura e saturação, levando à alterações das propriedades permoporosas da rocha. Referindo-se a rochas carbonáticas, existe uma dificuldade de previsão da variação da porosidade e permeabilidade nesse tipo de reservatório. Além disso, a elevada sensibilidade química dos carbonatos é um fator importante neste modelo de depósito, porque esse fato resulta numa dinâmica de dissolução, reprecipitação e neomineralização por toda a extensão do reservatório. Portanto, em razão da natureza reativa dessas rochas aos fluidos circulantes e a sua alta tendência à formação de carste, existe um grande interesse da indústria do petróleo em estudar esses depósitos carsticos. O carste é produzido por um processo de dissolução da rocha, geralmente carbonática ou evaporítica, levando à formação de cavidades. O processo de carstificação se dá comumente pela ação da água da chuva que infiltra na formação (carste epigênico) como também pela ação de fluidos subterrâneos hidrotermais ascendentes (carste hipogênico). O evento acontece em escalas variadas, desde o poro até a ocorrência de cavernas (Drew, 1985). Segundo Martini (1979) e Klimchouk (2009), no processo de carstificação, a porosidade secundária, representada por planos de acamamento, juntas, falhas e outras descontinuidades é muito relevante no fenômeno. Vários acidentes, como confinamento de ferramentas e desabamento de intervalos de poços,

podem acontecer durante a produção.

Reservatórios carbonáticos com presença de feições carsticas podem, portanto, favorecer a produção do óleo devido ao aumento da porosidade global do reservatório com a casrtificação da rocha bem como a permeabilidade associada também ao sistema de fraturas que os conectam. Porém, é de grande relevância o estudo do comportamento mecânico deste tipo de rocha uma vez que as deformações podem oferecer riscos ou benefícios à produção, especialmente no que se refere à compactação diferencial (heterogênea) promovida pela variação espacial das propriedades elásticas da rocha pelas zonas de carste (Nadeau & Ehrenberg, 2006; Gale & Gomes, 2007; Silva, 2011; Jeanne *et al.*, 2012).

O sistema cárstico em rochas carbonáticas geralmente leva à formação de uma região de colapso cuja geometria depende diretamente de fatores locais como o estado de tensões e suas direções, a existência e direções de falhas e fraturas e a extensão da camada carbonática onde o processo de carstificação ocorre, entre outros.

Loucks (1999) discute que reservatórios carbonáticos com presença de sistema de carste apresentam uma heterogeneidade maior que no caso de carste isolados, uma vez que as zonas de colapso são mais frequentes e levam a uma interconexão entre as cavernas (no caso de carste nessa ordem de escala).

Nos eventos de colapso, novas fraturas se desenvolvem não só no teto das cavidades como também nas zonas entre estas que podem evidenciar a sua comunicação. Portanto, o estudo do colapso de uma região com feições carsticas, e da interação entre diferentes cavidades, se mostra relevante para a predição da região influenciada por esse processo. Isto pode subsidiar a estimativa de zonas de porosidade e permeabilidade diferenciada dentro do reservatório carbonático.

Uma alternativa para este tipo de estudo, além das atividades de caracterização e modelagem geológica baseada em dados geofísicos, de testemunho e de afloramentos análogos, é a modelagem numérica ao se empregar modelos matemáticos adequados para uma simulação fisicamente aproximada do problema.

Em face do que foi exposto, e em virtude do crescimento das atividades produtoras de petróleo em depósitos carbonáticos, este trabalho tem como objetivo fazer uma simulação numérica de um modelo mecânico elastoplástico do colapso de um depósito carbonático cárstico através do Método dos Elementos Finitos (MEF), para melhor compreensão do fenômeno geotécnico que envolve este processo.

## 2 | METODOLOGIA

O cenário sintético criado representa um depósito carbonático com três cavidades bem desenvolvida e não preenchidas, sobreposta por quatro camadas rochosas de diferentes litologias. Para isso foi empregada uma malha de elementos finitos tipo triângulo linear, não estruturada, com 9639 nós e 19002 elementos (Figura 1). O

domínio é submetido a uma condição edométrica, ou seja, as faces laterais e base são restrinidas quanto ao deslocamento na direção normal e na face superior é prescrita uma tensão vertical de 13 MPa representando o soterramento da camada. Foram criadas as geometrias das cavidades, com cerca de 10 metros da abertura lateral e 6 metros de altura dispostas de forma aleatória entre si.

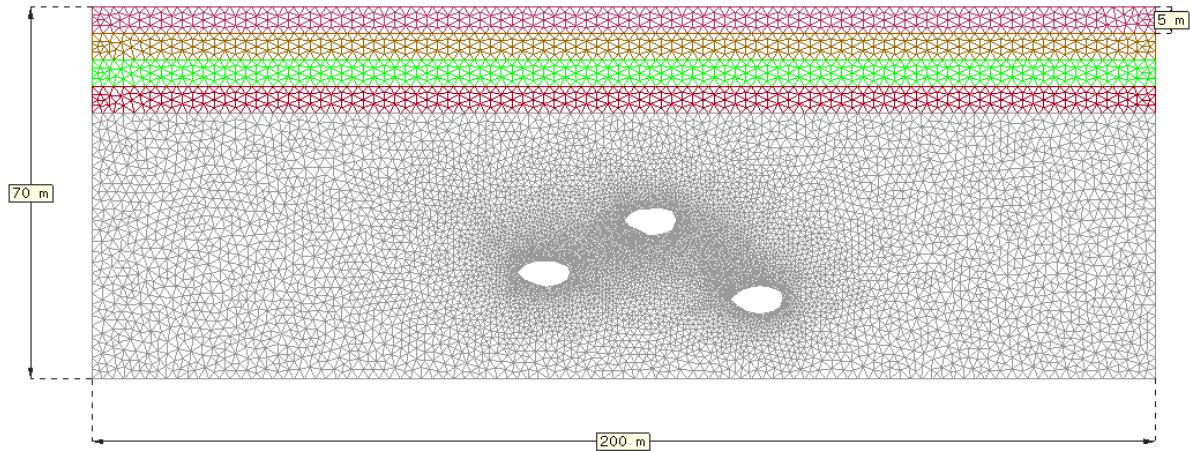


Figura 1 - Malha de elemetos finitos.

Os parâmetros geomecânicos das rochas encontram-se listados na Tabela 1, as camadas foram enumeradas em ordem crescente de cima para baixo. O material do interior das cavidades é o mesmo da camada carbonática (Rocha 5).

Rocha	<b>c</b> (MPa)	<b>φ</b> (°)	<b>E</b> (GPa)	<b>v</b>	<b>η</b> (%)
1	3,17	23	10,4	0,30	15
2	4	23	8,0	0,15	16
3	2	30	9,5	0,30	26
4	3.17	23	10,4	0,30	15
5	4	23	8,0	0,15	16

Tabela 1 - Parâmetros Geomecânicos das Rochas.

Onde  $c$  é a coesão,  $\phi$  o ângulo de atrito,  $E$  o módulo de elasticidade,  $v$  o coeficiente de Poisson e  $\eta$  a porosidade da rocha.

A simulação numérica foi realizada utilizando o programa *in house* de elementos finitos CODE\_BRIGHT (*COupled DEformation, BRine, Gas and Heat Transport*). O modelo elasto-plástico adotado foi o de Mohr-Coulomb com regularização viscosa de Perzyna. No primeiro momento foi gerado um estado de tensão inicial no modelo, posteriormente aplicou-se um algoritmo de escavação na região, em uma abordagem mecânica e em deformação plana, representando o processo de dissolução da rocha carbonática.

Foram empregados os modelos de plasticidade perfeita e de plasticidade com

*softening* e comparados os múltiplos efeitos da plastificação em cada caso.

## 3 | FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

### 3.1 Equações do Problema Mecânico

Para analisar o comportamento mecânico do meio em questão, é necessário observar suas condições de equilíbrio, cinemáticas e constitutivas. A equação do equilíbrio de tensões é dada pela Equação 1, onde  $\sigma$  representa o tensor de tensões e  $\mathbf{b}$  representa as forças de corpo do material.

$$\nabla \cdot \sigma + \mathbf{b} = 0 \quad (1)$$

As Equações 2 e 3 representam as condições de contorno de Dirichlet e Neumann, respectivamente.

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}^* \text{ em } \Gamma_u \quad (2)$$

$$\mathbf{t} = \sigma \cdot \mathbf{n}_\Gamma = \mathbf{t}^* \text{ em } \Gamma_t \quad (3)$$

Onde  $\mathbf{n}_\Gamma$  é o vetor normal ao contorno  $\Gamma$  e  $\mathbf{u}^*$  e  $\mathbf{t}^*$  são os valores prescritos de deslocamentos e cargas nos contornos  $\Gamma_u$  e  $\Gamma_t$ , respectivamente.

As restrições cinemáticas relacionam os deslocamentos  $\mathbf{u}$ , ocorridos devido a variações no estado de tensões, com as deformações  $\boldsymbol{\varepsilon}$ , conforme Equação 4.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \quad (4)$$

A relação entre tensão e deformação consiste em um modelo constitutivo elastoplástico definido por função de fluência  $F(\sigma, k)$ , obtida em função das tensão e dos parâmetros plásticos do material. O valor da função de fluência identifica o tipo do comportamento do material, como ilustra a Figura 2.

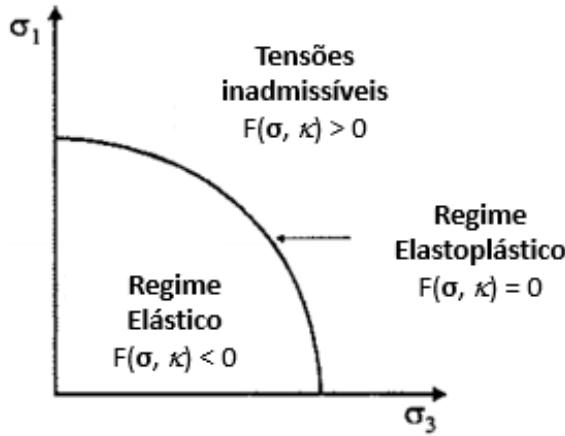


Figura 2 – Curva de função de fluência. Fonte: (Adaptado de Potts & Zdravkovic, 1999).

No regime elástico, tensões e deformações são relacionadas através do tensor elástico  $D_e$ . No regime elastoplástico,  $D_{ep}$  relaciona as tensões e deformações conforme a Equação 5. Segundo Abbo (1997) e Gomes *et al.* (2006), este tensor é determinado em função do tensor elástico e dos gradientes da função de fluência  $F(\sigma, k)$  e do potencial plástico  $P(\sigma, m)$ , com relação ao estado de tensões, ao multiplicador  $\Delta\lambda$  e ao gradiente da função de fluência com relação às variáveis de história  $k$  (apud Gomes *et al.*, 2009).

$$\dot{\sigma} = D_{ep} \cdot \dot{\varepsilon} \quad (5)$$

Aqui é adotada a regularização viscosa da plasticidade por meio do modelo viscoplastático de Perzyna, pois, neste modelo, o estado de tensões pode assumir valores que ultrapassem a superfície de fluência. Sua regra de fluxo é dada pela Equação (6), resultado da adaptação da regra de fluxo utilizada na análise plástica por meio do multiplicador  $\lambda$ , representado na Equação (7), onde  $\mu$  é o parâmetro de viscosidade (Gomes *et al.*, 2009).

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \lambda \cdot \frac{\partial P(\sigma, q)}{\partial \sigma} \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{\langle \phi(F(\sigma, \kappa)) \rangle}{\mu} \quad (7)$$

Onde  $\varepsilon^{vp}$  é a parcela de deformação viscoplastática que é somada a uma parcela de deformação elástica para resultar na deformação total utilizada no modelo de Perzyna.

Análogo ao que acontece para plasticidade associada, quando consideramos a viscoplasticidade perfeita, a função potencial  $P(\sigma, q)$  iguala-se à função de fluência

$F(\sigma, q)$ . O modelo de Perzyna considera a adoção de uma nova matriz tangente  $D^*$  em função do gradiente de deformação viscoplastica, seguindo pela aplicação na equação discretizada de equilíbrio de tensões.

O critério de Mohr-Coulomb (Equação 8) foi o adotado no modelo de plastificação. Esta equação resulta em uma superfície piramidal de base pentagonal irregular, como mostra a Figura 3, e envolve também os dados de resistência  $c$  e  $\phi$ , coesão e ângulo de atrito, respectivamente (Abbo, 1997; Potts & Zdravkovic, 1999; Gomes *et al.*, 2009).

$$F(\sigma, \kappa) = J - \left( \frac{c}{\tan \phi} + p \right) g(\theta) = 0 \quad (8)$$

$$g(\theta) = \frac{\sin \phi}{\cos \theta + \frac{\sin \theta \cdot \cos \phi}{\sqrt{3}}} \quad (9)$$

Onde  $p$ ,  $J$  e  $\theta$  são os invariantes de tensão definidos como tensão média, desviadora e ângulo de Lode, respectivamente.

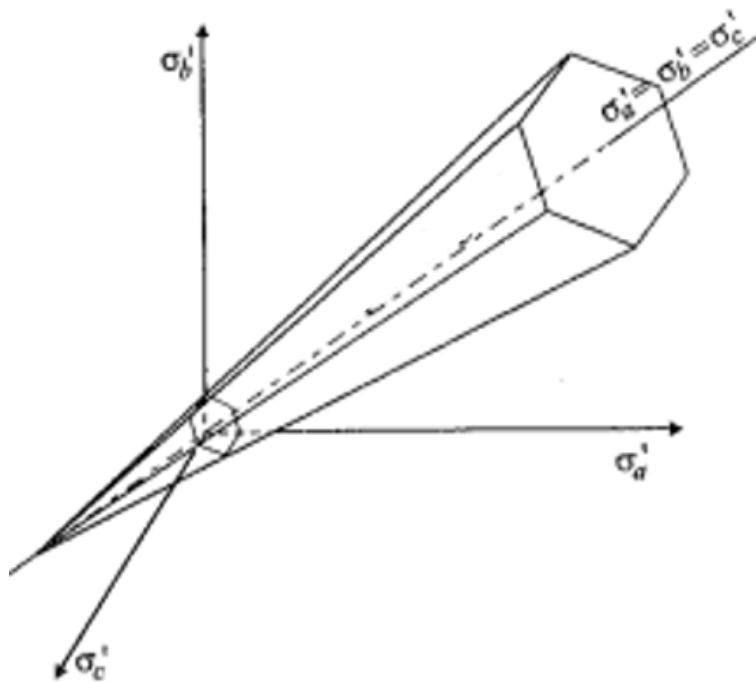


Figura 3 – Superfície de fluência de Mohr-Coulomb no espaço de tensões principais. Fonte: (Adaptado de Potts & Zdravkovic, 1999).

### 3.2 Plasticidade com Softening

O modelo de *softening* pode ser descrito por uma diminuição na superfície de fluência com o aumento da deformação plástica (Figura 4), que por sua vez é relacionada ao parâmetro  $k$  (Fjaer *et al.*, 2008). Seguindo o carregamento mostrado na Figura 4.b, para o modelo de *softening* e de plasticidade perfeita, a superfície de fluência inicial

é atingida no ponto b. Uma vez atingida essa superfície de fluência iniciam-se as deformações plásticas e a superfície diminui. Se, durante as deformações plásticas, o material for descarregado, o mesmo se comportará elasticamente, conforme a trajetória c-d da Figura 4.b. Se carregado novamente, o seguimento de descarregamento c-d será retraçado até a rocha encontrar a nova superfície de fluência, no ponto c. Como se percebe na Figura 4.a, a superfície de fluência será, portanto, menor do que a inicial.

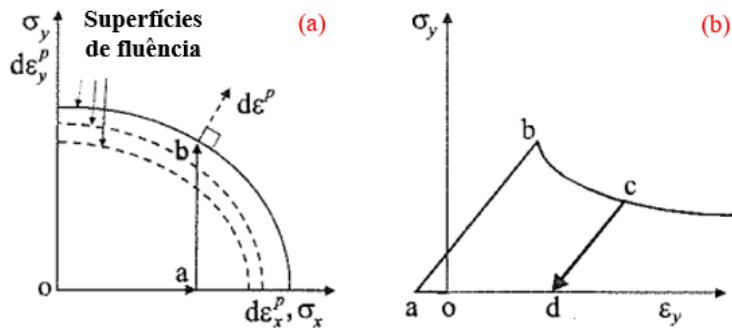


Figura 4 – Comportamento de um material elastoplástico com *softening*. (a) Comportamento da superfície de fluência e (b) Comportamento da tensão *versus* deformação. Fonte: (Adaptado de Potts & Zdravkovic, 1999).

Segundo Potts & Zdravkovic (1999), no modelo de Mohr-Coulomb, os parâmetros de resistência, coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ ) variam linearmente com as deformações plásticas desviadoras acumuladas. Esta relação é mostrada na Figura 5.

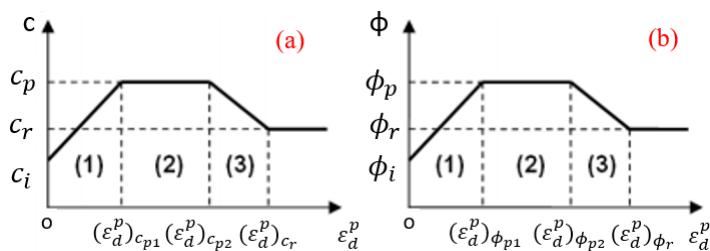


Figura 5 – Lei de hardening/softening para (a) coesão e (b) ângulo de atrito. Fonte: (Adaptado de Potts & Zdravkovic, 1999).

Como se vê na Figura 5, existem três tipos de comportamento. Na zona 1, os parâmetros de resistência aumentam linearmente dos valores iniciais para os valores de pico, registrando, portanto, um comportamento de *hardening*. Na zona 2, esses parâmetros permanecem constantes e iguais aos valores de pico, ilustrando a plasticidade perfeita. Já na zona 3, adotada neste trabalho, a coesão e o ângulo de atrito diminuem linearmente dos valores de pico para os valores residuais, caracterizando o comportamento de *softening*.

## 4 | RESULTADOS

Os resultados foram obtidos para os modelos de plasticidade perfeita e plasticidade com *softening*. Para alguns resultados foram analisados os resultados nos pontos 1 e 2, identificados na Figura 6, em ambos os modelos.

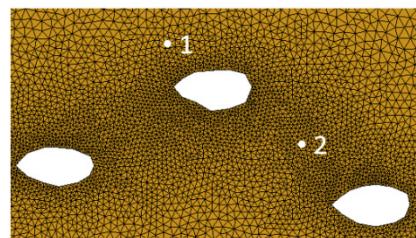


Figura 6 – Identificação dos pontos analisados.

### 4.1 Tensões

Nas Figuras 7 e 8, encontram-se os valores das tensões cisalhantes resultantes dos processos de plastificação dos modelos de *softening* e plasticidade perfeita, a convenção de sinais adotada é de positivo para tração e negativo para compressão. Ambos os modelos apresentam zonas de cisalhamento com considerável nível de tensão cisalhante, equivalente entre eles, porém o modelo com *softening* caracteriza melhor essas zonas, inclusive dando uma melhor indicação de propagação destas zonas para as camadas acima da rocha carbonática bem como para a interação entre as cavidades.

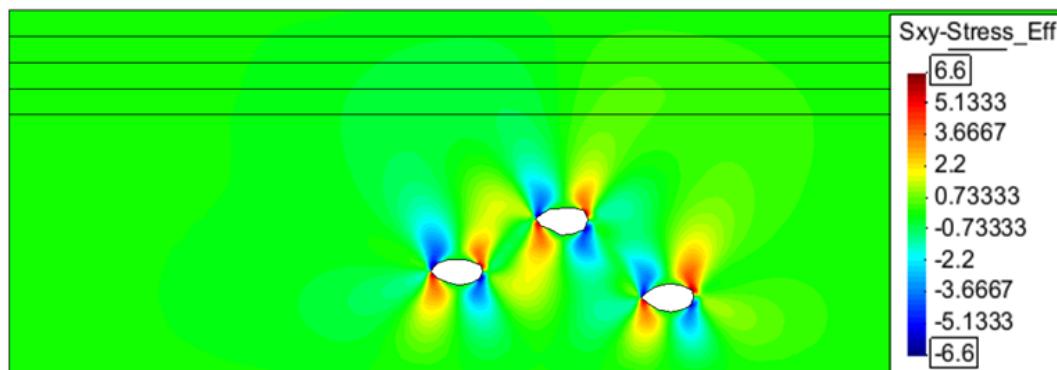


Figura 7 – Tensão de cisalhamento com Plasticidade Perfeita (tempo =  $2 \times 10^7$  s).

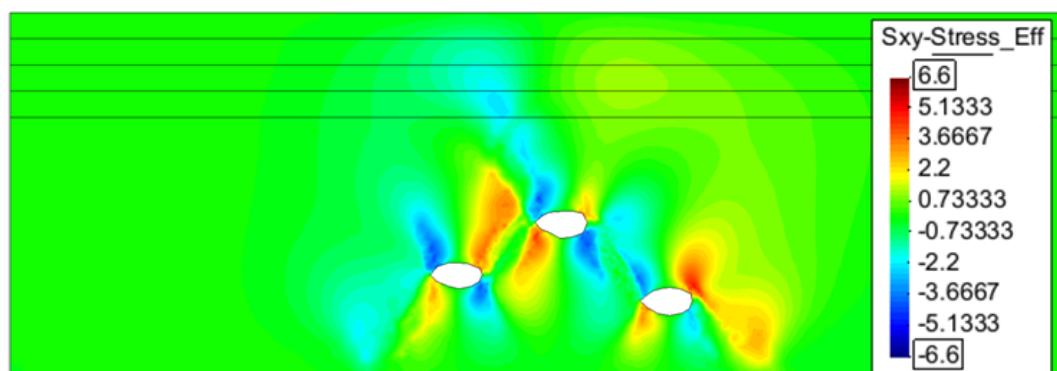


Figura 8 – Tensão de cisalhamento com *softening* (tempo =  $2 \times 10^7$  s).

Nas Figuras 9 e 10, são ilustrados os valores das tensões verticais resultantes. Nota-se que para a região sobre e sob o teto e base das cavidades há a formação de uma zona de tração (dada por tensões positivas) enquanto que entre as cavidades há uma concentração de tensões verticais de compressão, com magnitude bastante superior às tensões de tração. Isto consiste no efeito do alívio de tensões e perda de suporte da região devido ao processo de carstificação representado pela simulação da escavação ao longo de tempo. É importante também verificar que em ambos os casos há uma concentração de tensões de compressão na região entre os carstes, representando de forma adequada a distribuição de tensões em um sistemas de câmaras e pilares.

No caso em que se considera o modelo de softening, observa-se uma maior projeção das tensões de tração nas camadas acima.

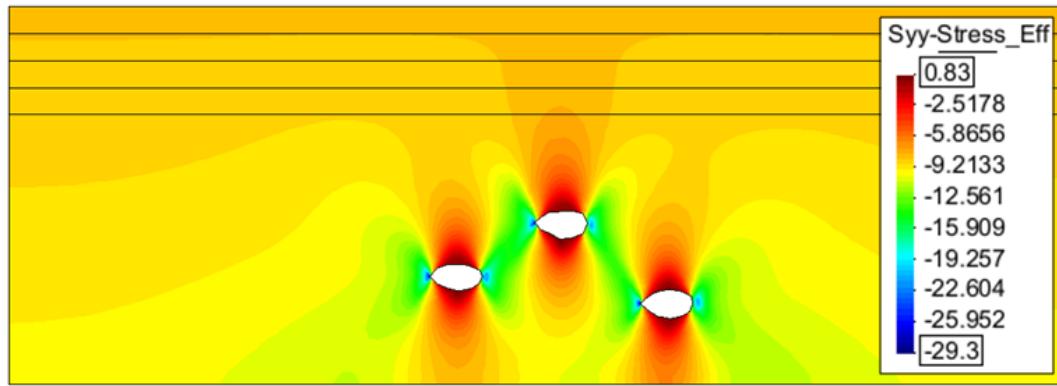


Figura 9 – Tensão Vertical com Plasticidade perfeita (tempo =  $2 \times 10^7$  s).

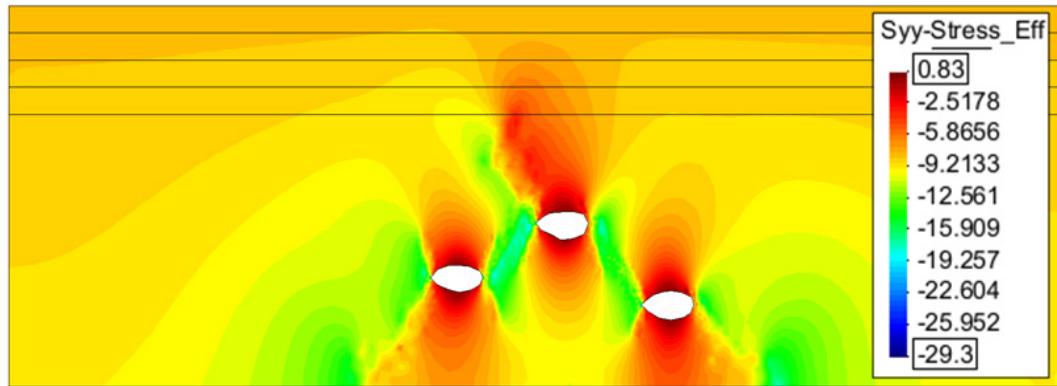


Figura 10 – Tensão Vertical com softening (tempo =  $2 \times 10^7$  s).

Na Figura 11 também é possível ver os efeitos do modelo viscoplástico de Perzyna, onde as tensões assumem valores que excedem a superfície de fluência, tanto no modelo com plasticidade perfeita como no de *Softening*.

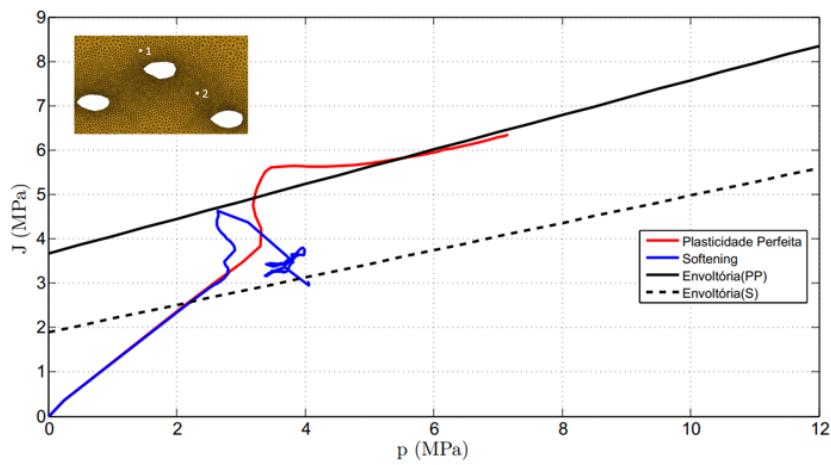


Figura 11 – Trajetória de tensões no ponto 2, com a envoltória de tensões máximas admissíveis.

#### 4.2 Evolução das Deformações Plásticas e Porosidade

As deformações plásticas encontram-se ilustradas nas Figuras 12 e 13, observando-se uma zona de ruptura, através das deformações plásticas, melhor definida no modelo de *softening*. Verifica-se também a tendência de comunicação entre as cavidades (carste).

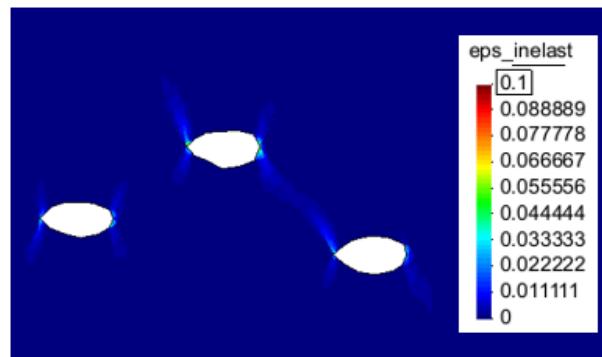


Figura 12 – Deformação plástica para modelo de plasticidade perfeita (tempo =  $2.7 \times 10^7$  s).

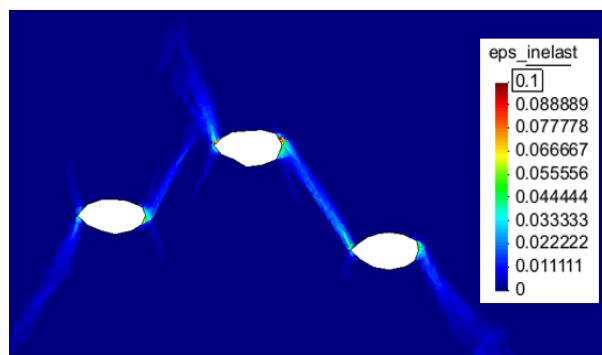


Figura 13 – Deformação plástica para modelo de plasticidade com *softening* (tempo =  $2 \times 10^7$  s).

Nas Figuras 14 a 15 são ilustrados, para cada modelo, os valores das deformações plásticas e da porosidade ao longo do tempo, respectivamente, para o ponto 1.

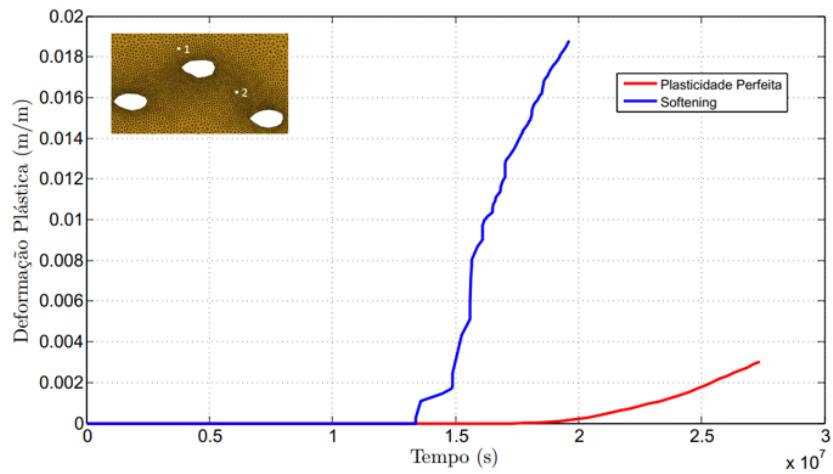


Figura 14 – Evolução das deformações plásticas no ponto 1 para os modelos de Plasticidade perfeita e *softening*.

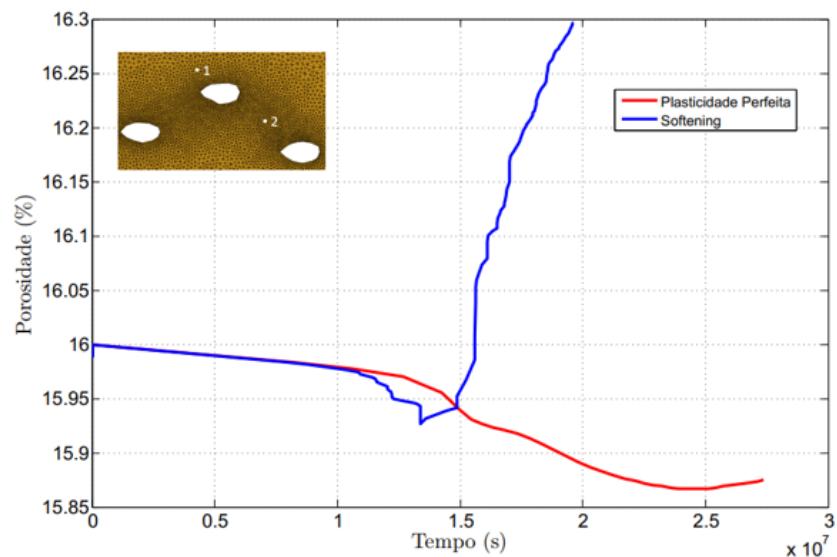


Figura 15 - Evolução das porosidades no ponto 1 para os modelos de Plasticidade perfeita e *softening*.

Nas Figuras 16 e 17 são ilustrados, para cada modelo, os valores da deformação plástica e porosidade ao longo do tempo, respectivamente, para o ponto 2.

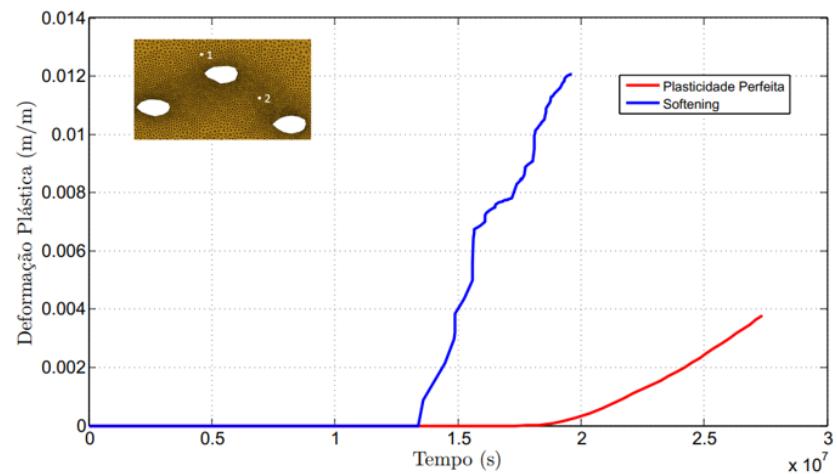


Figura 16 – Evolução das deformações plásticas no ponto 2 para os modelos de Plasticidade perfeita e *softening*.

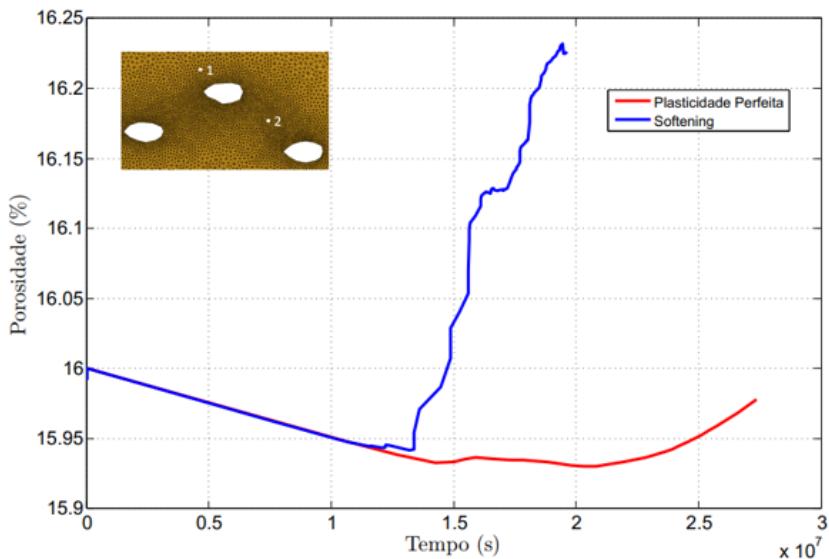


Figura 17 - Evolução das porosidades no ponto 2 para os modelos de Plasticidade perfeita e *softening*.

A partir das Figuras 14 e 16, verifica-se que para o modelo de plasticidade perfeita a rocha apresenta um comportamento elástico por um maior período. Nas Figuras 15 e 17 podemos observar um aumento na porosidade caracterizando o fenômeno de dilatância, ocorrido devido a concentração de tensões cisalhantes.

#### 4.3 Deslocamentos e Subsidiência

Nas Figuras 18 e 19 observam-se os resultados dos deslocamentos verticais devido ao processo de formação dos carstes. Os deslocamentos observados no gráfico da Figura 20 correspondem a subsidiência ocorrida no topo da formação. Portanto, através destes perfis, pode-se ter uma estimativa do contorno da dolina formada pelo colapso deste sistema cárstico. Como ilustrado, no modelo de plasticidade com *softening* os efeitos do processo de plastificação e intercomunicação entre as cavidades são mais intensos.

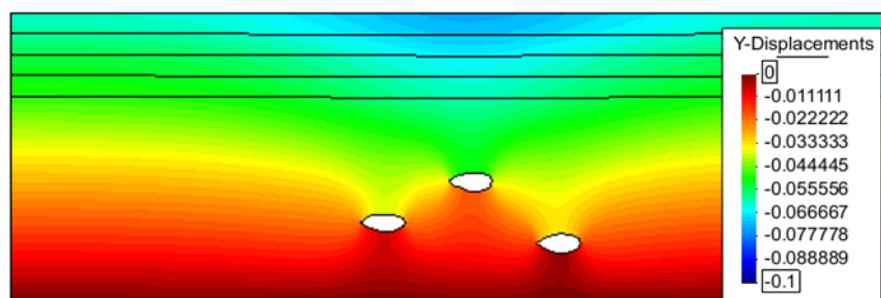


Figura 18 – Deslocamento Vertical com malha deformada (Fator 25) com Plasticidade Perfeita (tempo =  $2 \times 10^7$  s).

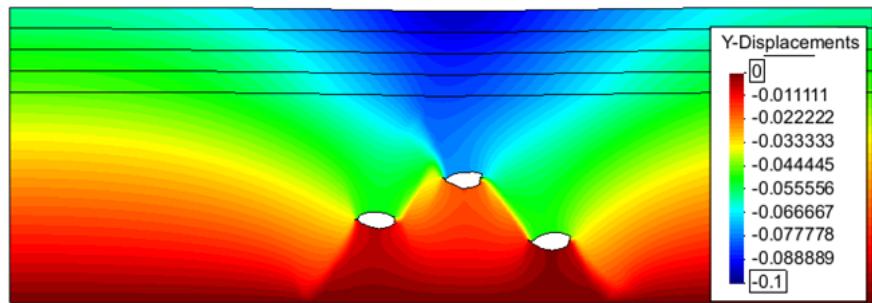


Figura 19 – Deslocamento Vertical com malha deformada (Fator 25) com *softening* (tempo =  $2 \times 10^7$  s)

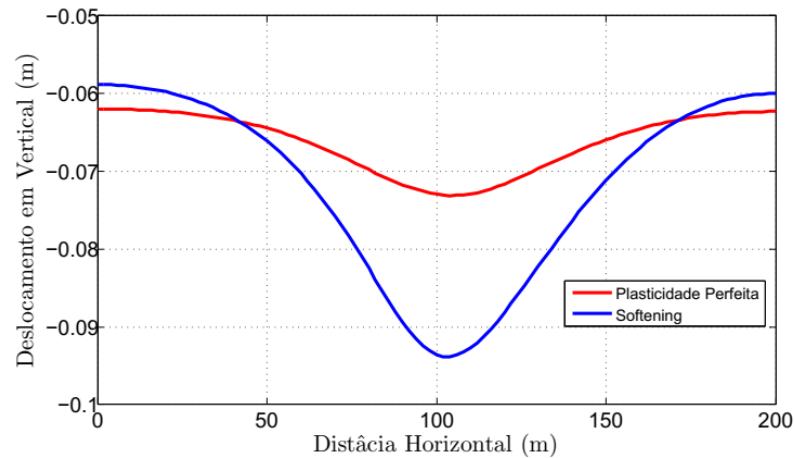


Figura 20 – Deslocamentos verticais no topo da formação (tempo =  $2 \times 10^7$  s).

#### 4.4 Evolução dos Parâmetros de Resistência: coesão e ângulo de atrito

De acordo com modelo de *softening*, os valores dos parâmetros de resistência da rocha, coesão e ângulo de atrito, variam com o aumento das deformações plásticas. Essa variação, para cada ponto especificado, pode ser observada nas Figuras 21 e 22, dado que a diminuição nos valores desses parâmetros ocorre no mesmo tempo em que se iniciam as deformações plásticas, conforme Figuras 14 e 16. Esse comportamento se mostrou coerente com o apresentado na Figura 5.

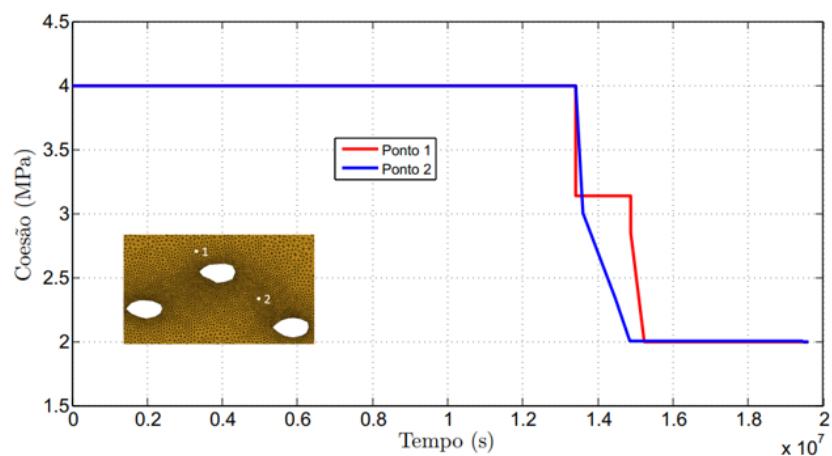


Figura 21 – Evolução da coesão com o tempo.

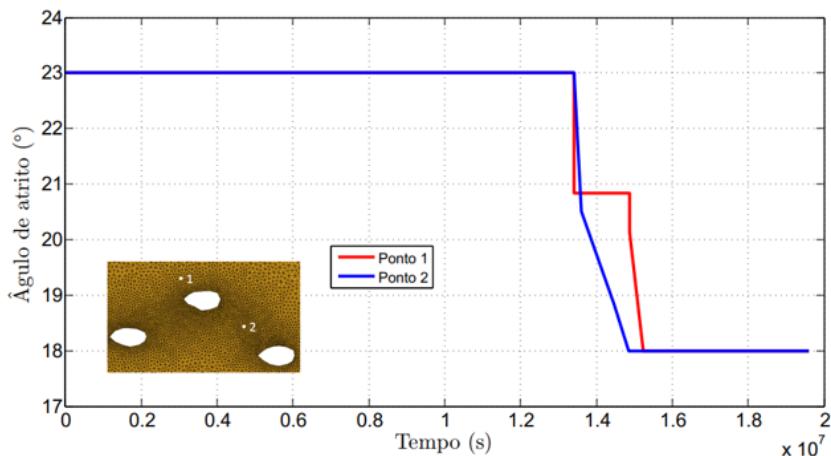


Figura 22 – Evolução do ângulo de atrito com o tempo.

Na figura 23, encontram-se ilustrados os valores de coesão para as diferentes camadas do cenário. As deformações plásticas, na camada 5, são caracterizadas por uma região de menor coesão devido ao fenômeno de *softening*. Novamente se observa a tendência de comunicação entre os cartes, justificada pela concentração de tensões nessa região, como apresentado em 4.1.

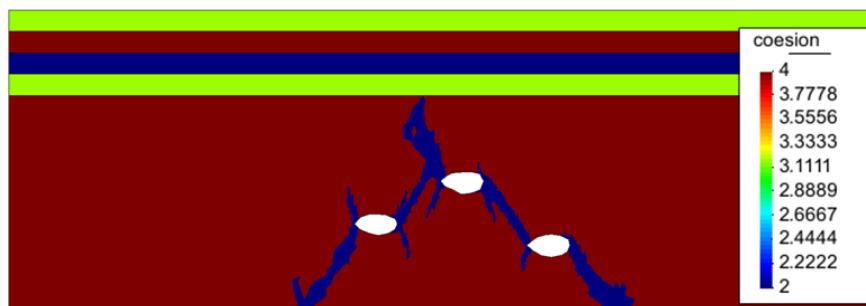


Figura 23 – Valores de coesão para o modelo de plasticidade com *softening*.

## 5 | CONCLUSÕES

Foi possível perceber nos modelos de plasticidade perfeita e plasticidade com *softening* regiões de plastificação no entorno dos carstes, evidenciadas nas Figuras 12 e 13, e comprovado através dos gráficos de evolução da deformação plástica (Figuras 14 e 16).

Observou-se uma tendência de comunicação pela ruptura por cisalhamento entre as cavidades, representada pela zona de deformação plástica e de tensões cisalhantes e evidenciada pelo aumento da porosidade e redução da coesão e ângulo de atrito. Ao se considerar o modelo elastoplástico de Mohr Coulomb empregando uma lei de *softening*, chegou-se a uma resposta tensão deformação mais realista, com uma melhor definição da região de ruptura e sua influência sobre as demais camadas.

A regularização viscosa da plasticidade, através do modelo viscoplastico de Perzyna, permitiu avaliar a resposta mecânica após a ruptura em uma condição de

redistribuição de tensões.

Verificou-se que o colapso associado a um sistema cárstico tem forte influência sobre a configuração mecânica e hidráulica da formação geológica, implicando em uma heterogeneidade importante a ser considerada no modelo de reservatório. A interação entre as cavidades, nas condições geométricas e de contorno modeladas, foi observada.

## REFERÊNCIAS

- Abbo, A. J. (1997). **Finite Element Algorithms for Elastoplasticity and Consolidation**. PhD Thesis, University of Newcastle, pp. 271, February.
- Drew, D. (1985). **Karst Processes and Landforms**. Londres: Macmillan Education.
- Fjaer, E.; Holt, R. M.; Horsrud P.; Raaen A. M.; Risnes, R. (2008). **Petroleum Related Rock Mechanics. Developments In Petroleum Science**, 2º ED. Elsevier.
- Fernandes, G. I. (2009). **Implementação em elementos finitos das equações de pressão e saturação para simulação de fluxo bifásico em reservatórios de petróleo deformáveis**. PhD thesis, Tesede Doutorado de Pernambuco, Brasil.
- Gale, J. F. W.; Gomez, L. A. (2007). **Late opening mode fractures in karst-brecciated dolostones of the Lower Ordovician Ellenburger Group, west Texas: Recognition, characterization, and implications for fluid flow**. American Association of Petroleum Geologist, 91(7), 1005-1023.
- Jeanne, P.; Guglielmi, Y.; Lamarche, J.; Cappa, F.; Marié, L. (2012). **Architectural characteristics and petrophysical properties evolution of a strike-slip fault zone in a fractured porous carbonate reservoir**. Journal of Structural Geology, 44, 93-109.
- Klimchouk, A. (2009). **Morphogenesis of hypogenic caves**. Geomorphology, 106, 100-117.
- Loucks, R. G. (1999). **Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications**. AAPG bulletin, 83, 1795-1834.
- Martini, J. (1979). **Karst in the Black Reef Quartzite near Kaapsehoop**. Annals of the Geological Survey of South Africa, 13, 115-128.
- Nadeau, P. H.; Ehrenberg, S. N. (2006). **Sandstone vs. carbonate petroleum reservoirs: A global perspective on porosity-depth and porosity-permeability relationships: Reply**. AAPG Bulletin, 90(5), 811-813.
- Potts, D. M.; Zdravković, L. (1999). **Finite element analysis in geotechnical engineering**. Vol. 1, Published by Thomas Telford Publishing, London.
- Silva, A. T. (2011). **The contribution of brittle deformation processes on improving hydrocarbon carbonate reservoirs**: the Jandaíra Formation (Turonian – Campanian) as analogue. Tese (Doutorado). Roma: Dipartimento di Scienze Geologiche – Roma Tre.

## A INFLUÊNCIA DO NITROGÊNIO EM AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS COM APLICAÇÃO EM PRÓTESES ORTOPÉDICAS

**Glauber Rodrigues Cerqueira de Cerqueira**

Graduando em Engenharia Mecânica, Universidade Salvador - UNIFACS. Bolsista PIBIC - FAPESB. E-mail: glauberrcerqueira@gmail.com

**Pedro Eliézer de Araújo Júnior**

Docente Orientador Mestre em Engenharia Mecânica , Universidade Salvador - UNIFACS. E-mail: pedro.junior@pro.unifacs.br

a viabilidade do aumento do teor de N em detrimento da redução de Ni tendo em conta que o N estabelece funções nas propriedades dos aços de reforço a resistência mecânica e a corrosão, além da redução de custos na fabricação dessas próteses.

**PALAVRAS-CHAVES:** Materiais Metálicos; Aços Inoxidáveis; Biomateriais.

**ABSTRACT:** In the face of technological modernity, it is necessary to introduce innovations in the steel market, which is becoming more and more demanding by rapidly establishing techniques for the improvement of these materials with satisfactory mechanical properties. Austenitic stainless steel is widely used in the biomaterial industry as orthopedic prostheses because of its high mechanical strength and corrosion, considering the use of high loads, especially if the prosthesis replaces lower limbs of the patient, and direct contact with liquid sodium chloride solutions within the human body promoting corrosive action. The chemical composition of austenitic stainless steels is basically composed of Fe-Cr-Ni, with Cr and Ni being fundamental in the process of corrosion resistance, although Ni is extremely allergic in contact with human body, consequently the feasibility of increasing the N content to the detriment of the Ni reduction taking into account that the N establishes functions in the properties

**RESUMO:** Perante a modernidade tecnológica faz-se necessário à introdução no desenvolvimento de inovações no mercado de aço, que vem se tornando cada vez mais exigente estabelecendo rapidamente as técnicas de aperfeiçoamento desses materiais com propriedades mecânicas satisfatórias. O aço inoxidável austenítico é muito utilizado na indústria de biomateriais como próteses ortopédicas, devido a sua alta resistência mecânica e à corrosão, tendo em vista o emprego de elevadas cargas, principalmente se a prótese substitui membros inferiores do paciente, e o contato direto com soluções líquidas de cloreto de sódio dentro do corpo humano promovendo ação corrosiva. A composição química dos aços inoxidáveis austeníticos é formada basicamente de Fe-Cr-Ni, sendo o Cr e o Ni fundamentais no processo de resistência a corrosão, entretanto o Ni é extremamente alérgico em contato com o corpo humano, consequentemente existe

of the steels of resistance to mechanical resistance and corrosion, besides the reduction of costs in the manufacture of these prostheses.

**KEYWORDS:** Metallic Materials; Stainless Steel; Biomaterials.

## 1 | INTRODUÇÃO

Os materiais classificados como biomateriais são utilizados em contato com o corpo humano com o objetivo de recondicionar ou comutar tecidos estragados. É de suma importância à evolução dos biomateriais devido a impactos no bem estar, expectativa de vida e saúde em geral dos pacientes. à vista disso, constata-se ao longo dos anos um vasto estímulo na elaboração de novos utensílios biomédicos (REIS, 2007).

Alguns implantes ortopédicos são denominados de temporário, pertinentes à substituição e desempenho de finalidade por um determinado período de tempo, como as placas e parafusos estabilizadores de fratura. Já os permanentes visam a reposição perpétua do componente danificado, exibindo as funções do mesmo por toda a vida do paciente. Assim que colocados, os biomateriais passam a maior parte do tempo em contato com fluídos corpóreos, que apesar de serem inofensivos apresentam ao longo do tempo degradação concebíveis desses materiais. Os biomateriais empregados como próteses ortopédicas são submetidos a grandes esforços cíclicos e estáticos, ocorrendo preferencialmente nos membros inferiores. A aglutinação de alta resistência à corrosão e propriedades mecânicas fazem do aço inoxidável austenítico, um interessante material para esse objetivo (GIORDANI, 2007).

Sendo assim a temática estudada tem um papel de grande relevância na sociedade atual, principalmente no ramo da medicina, visto que testes realizados com a substituição passiva de elemento químico nocivo ao corpo humano, como é o caso do Ni, ao emprego de N pode melhorar as características do biomaterial além de reduzir os custos. Em consequência vêm sendo motivo de estudos pelos produtores de aço e interesse pela indústria em geral.

## 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aços inoxidáveis austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos são utilizados a mais de meio século como material de implante ortopédico para fixação de fraturas e substituição de juntas (PADILHA, 1994).

Os aços inoxidáveis são aços com teor acima de 12% de Cr tendo em vista a sua alta resistência à oxidação. Há um grande atrativo nesses aços devido a sua propriedades mecânicas em elevadas temperaturas, resistência à oxidação e à corrosão, e para os austeníticos, boa tenacidade. Contudo não existe material metálico

passivo de ação corrosiva, por isso deve-se atentar ao tipo de aplicação a julgar pelo fato de que materiais como aço carbono em meio corrosivo pode apresentar resistência à corrosão significativa perante o aço inoxidável designado inapropriadamente. A ocorrência da resistência à corrosão pelos aços inoxidáveis se dá pelo fenômeno de passivação, com o qual ligas de Fe-Cr formam na sua camada óxidos mistos de Ferro, Cromo e outros elementos de liga que se dilui no meio corrosivo (SILVA, 2010).

Os aços inoxidáveis austeníticos designam-se basicamente de Cr e Ni como principais elementos de liga e dentre os aços inoxidáveis são considerados os mais importantes. Habitualmente o teor de carbono é baixo na base de 0,08%, contudo admite-se valor máximo de 25%, desde que o cromo seja aumentado a níveis de 22, 24 e 26% e níquel a teores de 12, 15 e 22%. Ulteriormente após passar por tratamento térmico, os aços inoxidáveis austeníticos podem perfazer limites de resistência à tração de 60 a 70 Kgf/mm<sup>2</sup>, limites de escoamento de 21 a 28 Kgf/mm<sup>2</sup>, alongamento de 45% a 60%, dureza Brinnel de 140 a 175 e resistência ao choque correspondente a 9,7 e 15,2 Kgf.m (CHIAVERINI, 1986).

Os aços austeníticos retêm mesmo em baixas temperaturas, comparáveis às do corpo humano, a estrutura CFC do ferro, que lhes garante propriedades peculiares, mecânicas e de resistência à corrosão. Em grandes quantidades, todos os elementos constituintes do aço são nocivos ao ser humano. No entanto, o conhecimento da resistência desse material em fluídos biológicos pode levar ao controle da dissolução metálica em níveis permissíveis, isto é, não prejudiciais à saúde. A Tabela 1 apresenta a composição química dos quatro principais aços inoxidáveis empregados em implantes ortopédicos. A Tabela 2 indica os papéis dos elementos químicos no comportamento desses aços inoxidáveis (SILVA, 2011).

Metal	ASTM 316L	ASTM F138 (ISO 5832-1)	ASTM F1586 (ISO 5832-9)	ASTM F2229 (Livre de Ni)
Cromo (Cr)	16,6	17,4	20,3	23,0
Níquel (Ni)	12	14,1	10,6	<0,05
Molibdênio (Mo)	2,11	2,08	2,47	1,5
Nitrogênio (N)	0,078	-	0,36	1,1
Nióbio (Nb)	-	-	0,29	-
Manganês (Mn)	1,4	1,74	4,04	24
Fósforo (P)	0,039	-	0,022	
Carbono (C)	0,025	0,01	0,035	<0,08
Ferro (Fe)	bal.	bal.	bal.	bal.

**Tabela 1:** Composição química dos quatro principais aços inoxidáveis empregados em implantes ortopédicos (% em massa).

Fonte: International Organization for Standardization (ISO)

Metal	Efeito dos elementos
Cromo (Cr)	Confere a passividade (acima de 12%); Aumenta a resistência à corrosão; Forma uma película de óxido ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) fina e aderente que retarda ou impede a ação corrosiva; Eleva ligeiramente a resistência mecânica.
Níquel (Ni)	Confere estabilidade a austenita; Eleva a resistência ao choque; Eleva a resistência à corrosão.
Molibdênio (Mo)	Eleva a resistência à corrosão por pites dos aços austeníticos; Aumenta a resistência mecânica;
Manganês (Mn) Nitrogênio (N)	Substituem parcialmente o níquel como estabilizador de austenita aumentando a solubilidade do nitrogênio.
Nióbio (Nb) /Titânio (Ti)	Atuam como estabilizadores, combinando-se preferencialmente com ele e evitando a formação de carboneto de cromo e a corrosão intergranular.
Silício (Si)	Acima dos teores usuais, eleva a resistência à oxidação a altas temperaturas.
Enxofre (S) /Selênio (Se)	Facilitam a usinabilidade.

**Tabela 2:** Efeito dos elementos de liga que compõem o aço ISO 5832-9

Fonte: International Organization for Standardization (ISO)

## 2.2 Aços nitrogenados

Os aços inoxidáveis austeníticos com teor considerável de N em sua composição são conhecidos como aços nitrônicos ou nitrogenados que devem conter de 0,8 a 0,32% de N, adicionados com o objetivo de aumentar a resistência mecânica em temperatura ambiente. Com a presença do N aumenta-se o teor de Mn na liga para 12% reduzindo drasticamente o teor de Ni para 1,6% ampliando o limite de resistência a tração para mais de 150Kgf/mm<sup>2</sup>, tornando-o muito interessante para os esforços de tração realizados por uma prótese ortopédica (CHIAVERINI, 1986).

Os aços inoxidáveis austeníticos ligados ao nitrogênio são materiais estruturais importantes utilizados em reatores nucleares como vaso de pressão, trocadores de calor, mecanismo de transferência de fluídos, etc. (SUNDARARAMAN, 1996).

Em 1990, na Europa, começou a ser estudada uma nova classe de aços inoxidáveis austeníticos com baixo teor de carbono e elevado teor de nitrogênio, até que em 1992 estes aços foram classificados como ISO 5832-9, pela *International Organization for Standardization*, como alternativa para substituir o 316L. Algumas vantagens desse novo aço, já foram apontadas por alguns pesquisadores, em especial sua maior resistência mecânica e maior resistência à corrosão por pite e sob fadiga (SOKEI, 2004).

O aço inoxidável austenítico ISO 5832-9 consiste de uma matriz austenítica com nióbio e nitrogênio entre outros elementos. Estudos recentes avaliando a resistência mecânica determinaram limite de escoamento plástico dos aços ISO 5832-9 no valor

de 496 MPa e ASTM F 138 no valor de 246 MPa. A combinação dos mecanismos de endurecimento pelo nitrogênio em solução, endurecimento pelo nitrogênio em solução, endurecimento por precipitação e endurecimento por refino de grão é responsável pela maior resistência mecânica do aço ISO 5832-9 quando comparado com o aço F138 (GIORDANI, 2001).

É pertinente destacar algumas vantagens que o nitrogênio pode trazer como elemento de liga no aço inoxidável:

- O nitrogênio, assim como o carbono, é um elemento de liga intersticial, entretanto a solubilidade do nitrogênio é muito maior que a do carbono (ITOLA, 1998).
- O nitrogênio estabiliza a austenita, reduzindo tanto a formação de ferrita em altas temperaturas como a formação de martensita em baixas temperaturas. Tudo isso associado a um baixo custo, evitando assim a utilização de elementos estabilizadores mais caros, como por exemplo, o níquel (ITOLA, 1998).
- O nitrogênio em solução sólida aumenta a resistência mecânica mais do que o carbono ou mesmo do que qualquer outro elemento de liga em solução sólida, sem perda considerável da tenacidade (STEIN. 1995).
- A formação de nitretos, mais estáveis do que os carbonetos, proporciona o aumento da resistência mecânica por precipitação, assim como aumenta a resistência mecânica em temperaturas intermediárias, além de aumentar a resistência à fluência (STEIN, 1995).
- O nitrogênio em solução aumenta a endurecimento por deformação a frio e suprime a formação de martensita induzida por deformação (STEIN, 1995).
- O nitrogênio em solução reduz a difusividade do carbono, retardando assim a precipitação de carbonetos e, consequentemente, reduzindo o fenômeno da sensitização (REED, 1989).
- O nitrogênio em solução melhora as propriedades de fadiga (MACHADO, 1995).
- O nitrogênio em solução melhora as propriedades de corrosão, corrosão sob tensão e fadiga-corrosão (STEIN, 1995).
- O nitrogênio em solução e na forma de nitretos duros aumenta a resistência ao desgaste (BERNS, 1996).

### 2.3 Solubilidade do nitrogênio

Até pouco tempo atrás, a concentração de nitrogênio era originada naturalmente do processo de produção dos aços e o nitrogênio não era considerado como um elemento de liga significativo. A adição de nitrogênio como elemento de liga constituiu um passo promissor em busca de melhores propriedades mecânicas dos aços. Entretanto, a solubilidade do nitrogênio no ferro, quando no estado líquido e a pressão atmosférica, não ultrapassa 0,04% em peso. Contudo, o aumento da concentração de nitrogênio pode ser obtido pela a adição de elementos de liga que aumentem a

solubilidade do nitrogênio (STEIN, 1995).

A solubilidade do nitrogênio no aço, tanto no líquido como no sólido, decresce com o aumento da temperatura, como ilustrado na figura 1. Alguns elementos, como por exemplo, molibdênio, manganês, cromo, vanádio, nióbio e titânio diminuem a atividade do nitrogênio no metal fundido e consequentemente aumentam sua solubilidade. Entretanto, a solubilidade desses elementos diminui demasiadamente na austenita e, desta forma, as adições de titânio, nióbio e vanádio devem ser reduzidas caso se pretenda dissolver os nitretos durante tratamentos térmicos (BERNS, 1996). Na ausência desses elementos microligantes, fortes formadores de nitretos, a primeira fase contendo nitrogênio a precipitar no sólido é geralmente o nitreto de cromo, Cr<sub>2</sub>N (REED, 1989).

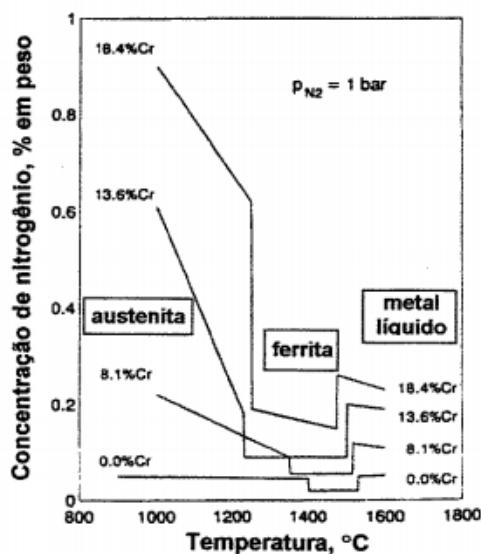


Figura 1: Solubilidade do nitrogênio no aço em função da temperatura e da concentração de cromo

Fonte: BERNS, 1996.

A figura 2 ilustra o efeito dos elementos de liga na solubilidade do nitrogênio em uma liga Fe-18Cr-8Ni a 1600°C e pressão de 0,1 MPa. Observa-se que a solubilidade do nitrogênio aumenta com a concentração de quase todos os elementos importantes na composição dos aços inoxidáveis austeníticos, com exceção principalmente do níquel e silício (REED, 1989). A explicação mais provável para o aumento da solubilidade do nitrogênio na austenita é o desarranjo da estrutura cristalina proporcionado pela presença de átomos de diferentes tamanhos, resultando em um grande número de sítios intersticiais para os átomos de nitrogênio (LEVEY, 1995).

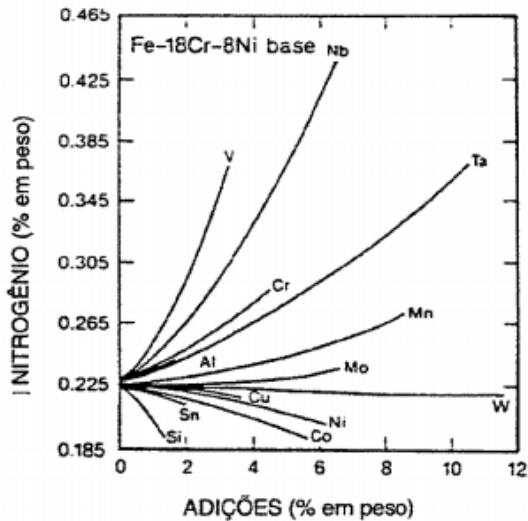


Figura 2: Influência de vários elementos de liga na solubilidade do nitrogênio na liga Fe-18Cr-8Ni a 1600°C (estado líquido) e pressão de 0,1 MPa.

Fonte: PADILHA, 1994.

O manganês tem um efeito benéfico no aumento da solubilidade do nitrogênio na austenita, sendo que o cromo e o molibdênio têm efeito similar. Desta forma, elevados teores de nitrogênio podem ser atingidos combinando-se a adição de cromo e molibdênio, mesmo com adições reduzidas de manganês (LILJAS, 1999). Entretanto, o manganês, além de aumentar a solubilidade do nitrogênio, é um elemento estabilizador da austenita pela diminuição das temperaturas de inicio e fim da transformação martensítica (LLEWELLYN, 1993).

Uma das técnicas utilizadas no processo de fabricação de aços inoxidáveis austeníticos para atingir elevados teores de nitrogênio é pela adição de ligas, por exemplo Fe-Cr-N, no processo de fundição. Por esse método, pode-se obter e manter elevados teores de nitrogênio. Entretanto, a precisão dessa adição não é muito boa (LILJAS, 1999).

## 2.4 Biomateriais

Biomaterial é qualquer material sintético que substitui ou restaura a função de tecidos do corpo e que mantém contato contínuo ou intermitente com os fluidos. (MORAIS, 2007). Segundo Callister.(2016), os biomateriais são empregados em componentes implantados no corpo humano para a substituição de partes do corpo doentes ou danificadas. Esses materiais não devem produzir substâncias tóxicas e devem ser compatíveis com os tecidos do corpo.

Deve-se atentar a definição de biocompatibilidade dos biomateriais, julgando pelo conceito obsoleto de que todo biomaterial é aquele que é estático ao corpo humano sem levar em consideração as reações químicas e físicas do meio biológico a que se está inserida. Atualmente, constata-se que a assiduidade desse material ao corpo humano provoca reações do organismo. Sendo assim, para avaliar a biocompatibilidade

é necessária uma série de estudos comportamentais entre biomaterial e tecido (ORÉFICE, 2005).

Análise de ensaios de biocompatibilidade para materiais novos e dispositivos candidatos a biomateriais estão de acordo com a ISO 10993 - *Biological evaluation of Medical Devices*, com os quais são realizados testes de citotoxicidade, sensibilização, reatividade intracutânea, sensibilização, implantação e hemocompatibilidade (LIMA, 2001).

## 2.5 AISI 316L

O AISI 316L é um aço inoxidável austenítico, não magnético, dúctil, e normalmente apresenta um percentual residual de enxofre em sua composição química. O AISI 316L tem a mesma composição química do 316, porém ele apresenta um teor extra baixo de carbono, no máximo 0,03% em peso de C, contribuindo para uma melhor resistência à corrosão. A Tabela 3 apresenta a composição do 316 e 316L onde pode-se constatar esta redução de carbono. O enxofre está presente nesse tipo de aço como impureza, em teores menores que 0,03%, ou é adicionado para melhorar a usinabilidade, mas a sua presença prejudica a resistência à corrosão (FONSECA, 2005).

Elemento	C	Mn	K	S	Si	Cr	Ni	Mo
Composição (%) (316L)	0.03 máx	2.00 máx	0.03 máx	0.03 máx	0.75 máx	17.00- 20.00	12.00- 14.00	20.00- 40.00
Composição (%) (316)	0.08 máx	2.00 máx	0.03 máx	0.03 máx	0.75 máx	17.00- 20.00	12.00- 14.00	20.00- 40.00

Tabela 3: Composição dos aços inoxidáveis 316 e 316L

Fonte: Núcleo Inox

O aço inoxidável austenítico mais utilizado como biomaterial na indústria ortopédica é o ASTM F138, da classe AISI 316L, contudo particularidades como baixa resistência mecânica na condição de recozimento, e propenso à corrosão localizada limitam o emprego desse material no sentido amplo em implantes ortopédicos permanentes. Com essa carência houve a conveniência do desenvolvimento de uma nova classe de aços inoxidáveis austeníticos com alto teor de N com classificação ISO 5832-9 combinando alta resistência mecânica e à corrosão localizada (GIORDANI, 2007).

Apesar do aço AISI 316L ser o mais usado, é recomendável preferencialmente para uso em próteses temporárias, embora, uma pequena porcentagem de implantes permanentes são fabricados com este material. O aço AISI 316L é suscetível à corrosão localizada quando em contato com fluído corpóreo, motivo pelo qual seu uso é indicado principalmente para aplicações temporárias (TAIRA, 1992).

## 2.6 Implantes Ortopédicos

Os materiais empregados na fabricação de implantes ortopédicos devem possuir alguns requisitos essenciais como: biocompatibilidade, resistência à corrosão no ambiente hospedeiro, biofuncionalidade, propriedades mecânicas adequadas a sua funcionalidade e um preço compatível com a realidade brasileira (RAMIRES, 1996).

Os implantes ortopédicos podem ser divididos em duas categorias: implantes temporários de fixação de fraturas e implantes permanentes de substituição de partes do esqueleto humano. No implante temporário, espera-se resistência mecânica suficiente para substituir temporariamente o papel desempenhado pelo osso em determinado segmento do aparelho locomotor, aliados a composições que não promovam reações indesejáveis no organismo, até que o osso esteja totalmente restabelecido. Exemplos clássicos de um implante temporário que podem ser citados são as placas de fixação para ossos fraturados, os pinos e os parafusos. No desafio adicional: suportar contínuos movimentos e transmitir carga, que é o caso de próteses de joelho, quadril e cotovelo (CHOHFI, 1997; FRAKER 1977).

Atualmente mais de 90% dos implantes ortopédicos tem vida útil de pelo menos dez anos, no entanto, ainda existe uma necessidade de melhoria na qualidade dos mesmos. A falha de um implante ortopédico tem consequência não somente para o paciente, que necessitará de nova cirurgia, mas para o próprio sistema de saúde, pois significa re-trabalho. Devido aos altos custos envolvidos, contínuos esforços têm sido realizados de modo a aumentar a vida útil dos implantes para pelo menos 20 anos (SLOTEN, 1998).

Devido às atividades físicas rotineiras e forças resultantes da atividade muscular, próteses implantadas no corpo humano estão sujeitas a cargas cíclicas de magnitudes muitas vezes maiores do que o próprio peso do corpo. Para uma atividade correspondente a uma caminhada este valor varia de 3 a 5 vezes o peso do corpo. Portanto, não é surpresa possibilidade de falha da mesma (RIMNAC, 1991).

Grande parte das falhas em implantes ocorre devido a fatores biomecânicos, bioquímicos ou clínicos que conduzem à fadiga ou à corrosão, ou à interação desses dois mecanismos, conforme a Figura 3 (SILVA NETO, 2001).

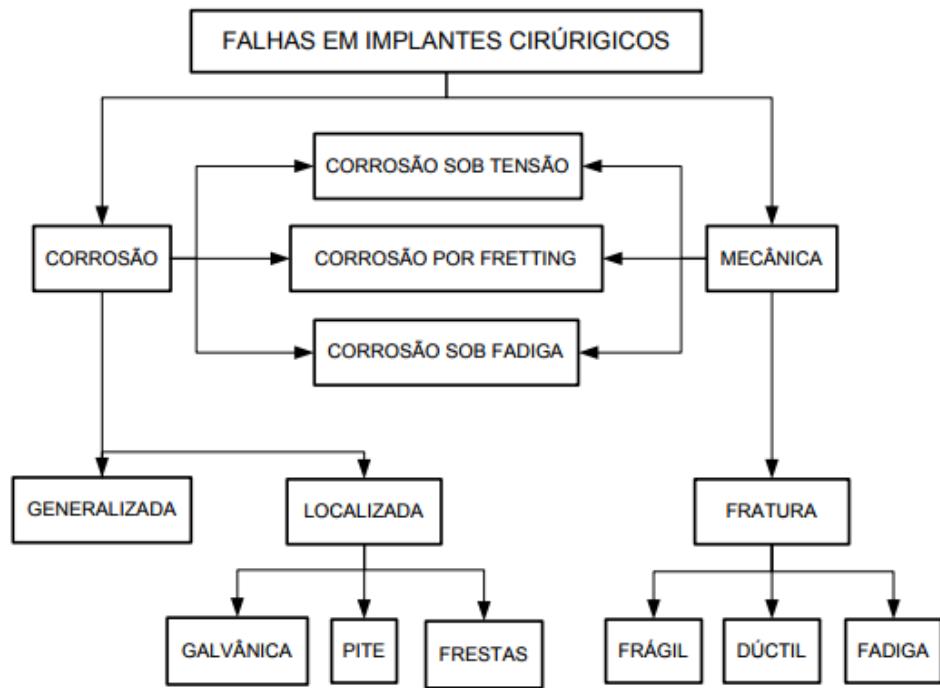


Figura 3: Falhas em implantes cirúrgicos

Fonte: SILVA NETO, 2001.

## 2.7 Corrosão

Num aspecto muito difundido e aceito universalmente pode-se definir corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos. A deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o seu meio operacional representa alterações indesejáveis, sofridas pelo material, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, tornando-o inadequado para o uso (GENTIL, 1996).

Segundo Callister.(2016), a corrosão é definida como o ataque destrutivo e não intencional de um metal; esse ataque é eletroquímico e começa normalmente na superfície. O problema da corrosão metálica é de proporções significativas; em termos econômicos estima-se que aproximadamente 5% das receitas de uma nação industrializada sejam gastos na prevenção de corrosão e manutenção ou substituição de produtos perdidos ou contaminados como resultados de reações de corrosão.

Os aços inoxidáveis austeníticos devem sua resistência à corrosão a formação de um filme superficial protetor de óxido ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) denominado filme passivo. Esse filme passivo é aderente à superfície do metal e inibe a corrosão, mantendo a corrente e a liberação de íons em níveis muito baixos. Nessas condições, fica fácil entender porque as formas mais comuns de corrosão associadas a esses materiais são do tipo localizada. A corrosão localizada pode ser definida como a remoção seletiva de metal pela corrosão em pequenas áreas sobre a superfície do metal (GIORDANI, 2001).

Pesquisas comparativas de resistência à corrosão mostraram que o aço ISO 5832-

9 apresenta maior resistência à corrosão localizada do que o ASTM F138, atribuída ao aumento de estabilidade do filme passivo, favorecido pela presença de nitrogênio em solução sólida na matriz. Sendo esta elevada resistência à corrosão desejável em materiais para aplicações ortopédicas, tendo em vista que a menor liberação de íons metálicos, pelos processos de corrosão, reduz o risco de rejeição por reações alérgicas ou mesmo pela falha estrutural do implante (GIORDANI, 2004).

Os íons liberados pelo processo de corrosão têm o potencial de interagir com os tecidos, por meio de diferentes mecanismos. As reações biológicas acontecem pela interação do íon liberado com uma molécula do hospedeiro, sendo a composição da liga de fundamental importância. Os efeitos causados no organismo aparecem devido à influência do íon sobre os mecanismos de adesão bacteriana, por toxicidade, efeitos subtóxicos ou alergia aos íons metálicos liberados (MORAIS, 2007).

### 3 | MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados, nesses estudo, foram os aços inoxidáveis austeníticos que atendem as especificações das normas ASTM F138 e ISO 5832-9, produzidos pela antiga Eletrometal S.A e Villares Metals S.A, respectivamente.

ELEMENTOS	AISI 316L	ISO 5832-1*	ASTM F138/ ASTM F139
Carbono (C)	0,03 máx.	0,03 máx.	0,03 máx.
Manganês (Mn)	2 máx.	2,0 máx.	2,00 máx.
Fósforo (P)	0,045 máx.	0,025 máx.	0,025 máx.
Enxofre (S)	0,03 máx.	0,010 máx.	0,010 máx.
Nitrogênio (N)	0,010 máx.	0,10 máx.	0,1 máx.
Cromo (Cr)	16 – 18	17,0 – 19,0	17,00 – 19,00
Molibdênio (Mo)	2 – 3	2,25 – 3,0	2,25 – 3,00
Níquel (Ni)	10 – 14	13,0 – 15,0	13,00 – 15,00
Cobre (Cu)	--	0,50 máx.	0,50 máx.
Silício (Si)	0,75 máx.	1,0 máx.	0,75 máx.
Ferro (Fe)	Balanço	Balanço	Balanço

\* Equivalente à norma brasileira NBR ISO 5832-1.

Tabela 4: Composição (%) dos aços inoxidáveis AISI 316L, ISO 5832-1 e ASTM F138/139

Fonte: International Organization for Standardization (ISO)

As propriedades mecânicas básicas foram determinadas através de ensaios de tração, conduzidos segundo a norma ASTM E 8M. A figura 4 mostra as dimensões do corpo de prova utilizados no ensaio. As propriedades mecânicas foram determinadas

através de ensaios de fadiga axial, com base na norma ASTM E 1801. Foram levantadas as curvas S-N (tensão máxima x números de ciclos até a fratura), em meio neutro (no ar) e em meio agressivo, simulando o fluído corpóreo (solução aquosa de NaCl a 0,9% a 37°C). Para os ensaios em meio agressivo, foi utilizada uma câmara de acrílico, que permitiu a exposição da seção útil do corpo de prova à solução aquosa, que, aquecida em um banho, circulava no interior dessa câmara, enquanto o corpo de prova era solicitado ciclicamente (GIORDANI, 2007).

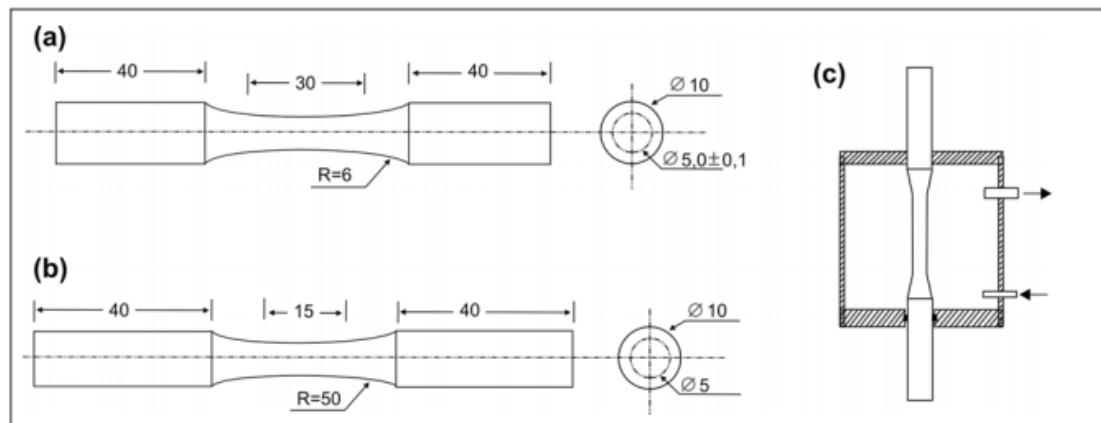


Figura 4: Desenho dos corpos de prova utilizados em ensaios de tração (a) e fadiga (b). Representação esquemática da câmara utilizada em ensaios de fadiga (c).

Fonte: GIORDANI, 2007.

## 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 apresenta curvas representativas obtidas em ensaios de tração para os aços ASTM F138 e ISO 5832-9 solubilizados. A Tabela 5 apresentam as propriedades mecânicas básicas obtidas a partir dessas curvas e apresenta os valores mínimos de propriedades mecânicas exigidos pelas normas dos dois materiais (GIORDANI, 2001).

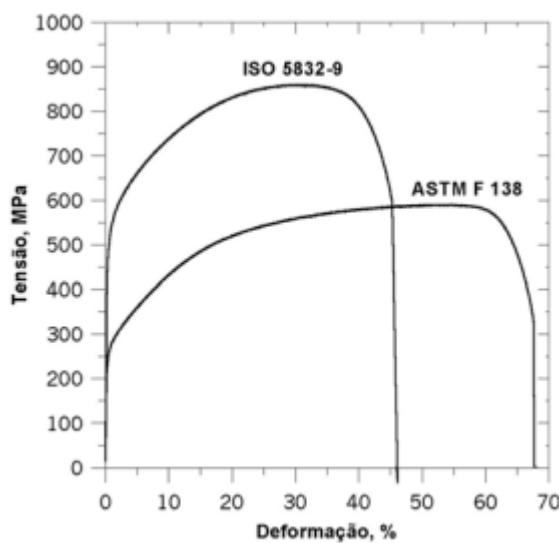


Figura 5: Curvas tensão-deformação obtidas no ensaio de tração para os aços F138 e ISO 5832-9.

<b>Material</b>	<b>F 138</b>	<b>ISO 5832-9</b>
$\sigma_e$ (MPa)	$246 \pm 3,0$ (170)	$496 \pm 17,0$ (430)
$\sigma_t$ (MPa)	$594 \pm 4$ (480)	$861 \pm 3$ (740)
$\varepsilon_t$ (%)	$67,0 \pm 1,0$ (40)	$46 \pm 0,7$ (35)
RA (%)	$80 \pm 1,7$	$68 \pm 1,0$

\* Os valores entre parênteses representam os limites mínimos de propriedades admitidas pelas normas dos materiais.

Tabela 5: Propriedades mecânicas dos aços F138 e ISO 5832-9.

Fonte: GIORDANI, 2007.

A partir da figura 5 e da tabela 5 fica evidente que o aço ISO 5832-9 apresenta níveis de resistência mecânica, traduzidos pelo limite de escoamento,  $\sigma_e$ , e limite de resistência à tração,  $\sigma_t$ , muito superiores aos do aço ASTM F138, onde o valor de  $\sigma_e$  para o aço ISO 5832-9 foi praticamente o dobro e o valor de  $\sigma_t$  foi cerca de 46% maior do que os valores apresentados pelo aço ASTM F138. Em contrapartida, a ductilidade desse material, traduzida pela deformação total na fratura,  $\varepsilon_t$ , e pela redução em área, RA, é consideravelmente menor (GIORDANI, 2001).

Sabe-se que muitos implantes ortopédicos de aço inoxidável austenítico são fabricados por processos de conformação a quente. Muitas vezes, depois de acabado, o implante pode apresentar sua microestrutura totalmente recristalizada, em condições semelhante à dos aços estudados no presente trabalho (GIORDANI, 2001). Sabe-se também, que alguns implantes são projetados para desempenhar sua funcionalidade em condições muito severas de solicitação mecânica. Esses tipos de implantes devem apresentar, como um dos principais requisitos, elevada resistência mecânica. Um problema geralmente enfrentado na fabricação de implantes ortopédicos de aço inoxidável austenítico conformados a quente é que esse material geralmente apresenta baixo limite de escoamento quando na condição de recozido, impossibilitando muitas vezes o atendimento aos requisitos mínimos de resistência mecânica (STEIN, 1995).

A figura 6 traz as curvas S-N obtidas para os aços ISO 5832-9 e F138, em meio neutro e meio agressivo. Observa-se que o aço ISO 5832-9 apresentou um desempenho em fadiga superior ao do aço F138. Esse melhor desempenho se deve, principalmente, à maior resistência mecânica do aço ISO 5832-9. É notável a influência que o meio agressivo exerceu, no sentido de reduzir a vida em fadiga dos dois aços. Essa redução da vida aumentou com o aumento do número de ciclos até a fratura, ou mesmo com o tempo de ensaio, uma vez que a frequência utilizada, para todos os corpos de prova foi igual (GIORDANI, 2007).

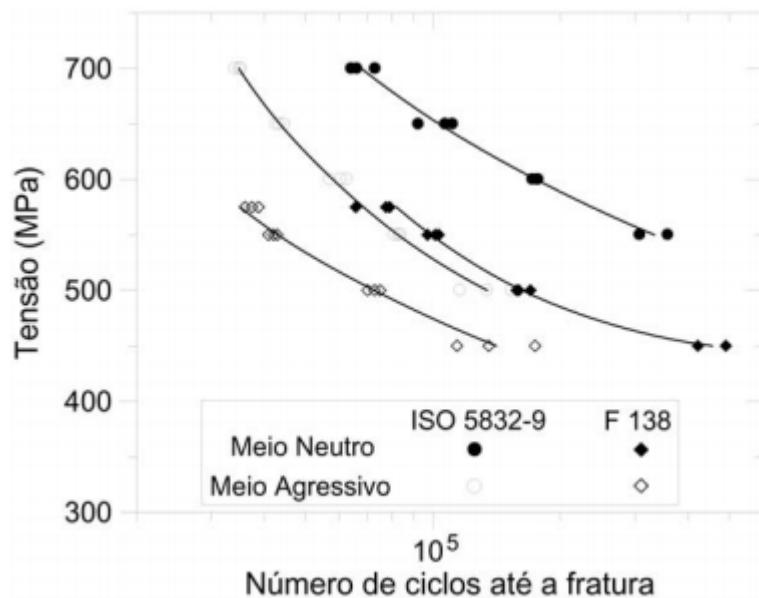


Figura 6: Curvas tensão máxima ( $S$ ) em função do número de ciclos ( $N$ ) até a fratura em meio neutro e meio agressivo para os aços F138 e ISO 5832-9.

Fonte: GIORDANI, 2007.

## 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nota-se a grande capacidade que o nitrogênio tem em fragilizar o material tendo em vista a sua alta resistência mecânica além de aumentar a vida útil do mesmo em fadiga. Sendo assim o aço nitrogenado é um grande material para a fabricação de implantes ortopédicos, principalmente pelo alto limite de escoamento, o que impossibilita o material de entrar em deformação plástica em condições de altas solicitações de cargas essencialmente para pessoas obesas que venham a necessitar de implantes nos membros inferiores, tendo em vista que a deformação plástica deforma o implante para sempre.

Em condições futuras faz-se necessário testes de biocompatibilidade para avaliar o comportamento dos aços nitrogenados como biomateriais, considerando a diminuição de níquel em sua composição possibilitando o acesso a um número maior de pessoas que possuem algum tipo de reação alérgica.

## REFERÊNCIAS

- BERNS, H. **Manufacture and application of high nitrogen steels.** ISIJ International. v.36, n.7, 1996.
- CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CHIAVERINI, V., **Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas.** Vol. I, São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1986.
- CHOHFI, M. **Prótese metal/metal: uma tendência?** Revista Brasileira de Ortopedia, v.32, n.10, 1997.

FONSECA, K. B., PEREIRA, H. H., SILVA, S. N. **Avaliação de falhas em implantes metálicos coxo-femoral e joelho retirados de pacientes**, 2005. Disponível em <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10685/>>. Acesso em: 25 jul. 2017.

FRAKER, A. C., RUFF, A. W. **Metallic surgical implants: state of art**. Journal of Metals, 1977.  
GENTIL, V. **Corrosão**, Rio de Janeiro: LTC, 1996.

GIORDANI, E. J. **Propriedades e mecanismos de nucleação de trincas por fadiga em meio neutro e meio fisiológico artificial de dois aços inoxidáveis austeníticos utilizados como biomateriais**. Tese (doutorado). Campinas: FEM/UNICAMP, 2001. Disponível em <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/263213>>. Acesso em 25 jul. 2017.

GIORDANI, E. J., GUIMARÃES, V. A., PINTO, T. B., FERREIRA, I. **Effect of precipitates on the corrosion-fatigue crack initiation of ISO 5832-9 stainless steel biomaterials**. International Journal of Fatigue 26, 2004.

GIORDANI, E. J., FERREIRA, I., BALACIN, O. **Propriedades mecânicas e de corrosão de dois aços inoxidáveis austeníticos utilizados na fabricação de implantes ortopédicos**, 2007. Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/rem/v60n1/v60n1a09.pdf>>. Acesso em: 29 jul. 2017.

International Organization of Standardization (ISO) 5832-9; Implants for surgery - Metallic materials - Part 9: Wrought high nitrogen stainless steel. Switzerland, 1992.

ITOLA, R., HÄNNINEN, H., KAUPPI, T. **Hot and cold rolling of high nitrogen Cr-Ni and Cr-Mn austenitic stainless steels**. Journal of Materials Engineering and Performance, v.7, n.5, 1998.

LIMA, A. O.; **Métodos de laboratórios aplicados à clínica**. 8<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 2001.

LEVEY, P. R., BENNEKOM, A. **A mechanistic study of the effects of nitrogen on the corrosion properties on stainless steels**, Corrosion, v.51, n.12, 1995.

LILJAS, M., NILSSON, J. O. **Development of commercial nitrogen-rich stainless steels**. Materials Science Forum, v.318-320, 1999.

LLEWELLYN, D. T. **Nitrogen in steels**. Ironmaking and Steelmaking, v.20, n.1, 1993.

MACHADO, I. F., PADILHA, A. F. **Estabilidade microestrutural da austenita Fe-Cr-Ni contendo alto nitrogênio**. 50º Congresso Anual da ABM, 1995.

MORAIS, L. S., GUIMARÃES, G. S., ELIAS, C. N. **Liberação de íons por biomateriais metálicos**, 2007. Disponível em <[http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/46426125/Ion\\_release\\_from\\_metallic\\_biomaterials20160612-12040-dptbk.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1501343264&Signature=pYayfA1IWpHle%2FB8JTJMzE6ZYMA%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3Dion\\_release\\_from\\_metallic\\_biomaterials.pdf](http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/46426125/Ion_release_from_metallic_biomaterials20160612-12040-dptbk.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1501343264&Signature=pYayfA1IWpHle%2FB8JTJMzE6ZYMA%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3Dion_release_from_metallic_biomaterials.pdf)>. Acesso em 25 jul. 2017.

NÚCLEO INOX, Guia brasileiro do Inox, **O Inox, hoje e amanhã.**, 4<sup>a</sup> ed., São Paulo: Clip Editora Ltda., 2001.

ÓREFICE, R. L., **Biomateriais e Biocompatibilidade**. 2<sup>a</sup> ed., Rio de Janeiro, 2005.

PADILHA, A. F., GUEDES, L. C. **Aços Inoxidáveis Austeníticos - Microestrutura e Propriedades**. São Paulo: Hemus Editora, 1994.

RAMIRES, I., ACCIARI, H. A., VAZ, L. G., BEATRICE, C. R. S., GUSTALDI, A. C. **Pesquisas com materiais não ferrosos utilizados como biomateriais.** IX Seminário de metais não ferrosos. 1996.

REED, R. P. **Nitrogen in austenitic stainless steel.** Journal of the Mineral, Metal & Materials Society, v.41, 1989.

REIS, R. F., **Elevação do teor superficial de nitrogênio no aço inoxidável austenítico ISO 5832-1.** Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial; 2007. Tese (Doutorado). Disponível em <[http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/101/1/CT\\_CPGEI\\_D\\_Reis%2c%20Ricardo%20Fernando%20dos\\_2007.pdf](http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/101/1/CT_CPGEI_D_Reis%2c%20Ricardo%20Fernando%20dos_2007.pdf)>. Acesso em 23 jul. 2017.

RIMNAC, C. M., WRIGHT, T. M., BARTEL, D. L., KLEIN, R. W., PETKO, A. A. **Failure of orthopedic implants: Three case histories.** Materials Characterization, v.26, 1991.

SILVA, A. L. C., MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais.** 3<sup>a</sup> Ed. São Paulo: Blucher, 2010.

SILVA NETO, O. V. **Efeito do recozimento térmico e da taxa de deformação na microestrutura e precipitação de um aço inoxidável austenítico com alto teor de nitrogênio utilizado na fabricação de implantes ortopédicos.** Dissertação (mestrado), UNESP, FEIS, Ilha Solteira, 2001.

SILVA, E. S. **Caracterização e modelagem do comportamento plástico do aço inoxidável austenítico ISO 5832-9, utilizado em implantes ortopédicos.** Tese (doutorado), UFSCAR, São Carlos, 2011. Disponível em <<http://www.dema.ufscar.br/termomec/images/Teses-dissertacoes-Completas/Eden%20-%20Doutorado.pdf>>. Acesso em 23 jul. 2017.

SLOTEN, J. V., LABEY, L., AUDEKERCKE, R. V., PERRE, G. V. **Materials selection and design for orthopaedic implants with improved long-term performance.** Biomaterials, v.19, 1998.

SOKEI, C. R., FARIA, E. B., TOKIMATSU, R. C., FERREIRA, I. **Análise das partículas de segunda fase no aço inoxidável austenítico de alto nitrogênio ISO 5832-9,** 2004. Disponível em <[http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/32423852/imp\\_06.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1501348272&Signature=1VBXjZLj8QaaCQGInUnnJdyAgn0%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DANALISE\\_DAS\\_PARTICULAS\\_DE\\_SEGUNDA\\_FASE\\_N.pdf](http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/32423852/imp_06.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1501348272&Signature=1VBXjZLj8QaaCQGInUnnJdyAgn0%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DANALISE_DAS_PARTICULAS_DE_SEGUNDA_FASE_N.pdf)>. Acesso em 23 jul. 2017.

STEIN, G., MENZEL, J. **Nitrogen alloyed steels - a new generation of materials with extraordinary properties,** International Journal of Materials and Products Technology, v.10, n.3-6, 1995.

SUNDARAMAN, D., SHANKAR, P., RAGHUNATHAN, V. S. Electron Microscopic Study of Cr<sub>2</sub>N Formation in Thermally Aged 316LN Austenitic Stainless Steels. **Metallurgical and Materials Transaction A**, v. 27A, 1996.

TAIRA, M., LAUTENSCHLAGER, E. P. **In vitro corrosion fatigue of 316 L cold worked stainless steel,** Journal of Biomedical Materials Research, v.26, 1992.

## MICROPOROUS ACTIVATED CARBON FIBER FELT FROM BRAZILIAN TEXTILE PAN FIBER: PREPARATION, CHARACTERIZATION AND APPLICATION AS SUPERCAPACITOR ELECTRODE

**Jossano Saldanha Marcuzzo**

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
FATEC - Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo  
São José dos Campos – São Paulo

**Aline Castilho Rodrigues**

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
São Jose dos Campos – São Paulo

**Andres Cuña**

Cátedra de Fisicoquímica, Laboratorio de Fisicoquímica de Superficies, DETEMA  
Montevideo, Uruguay

**Nestor Tancredi**

Cátedra de Fisicoquímica, Laboratorio de Fisicoquímica de Superficies, DETEMA  
Montevideo, Uruguay

**Eduardo Mendez**

Laboratorio de Biomateriales - Facultad de Ciencias - Universidad de la República  
Montevideo, Uruguay

**Heide Heloise Bernardi**

LNano/CNPEM - Laboratório Nacional de Nanotecnologia  
Campinas – São Paulo

**Mauricio Ribeiro Baldan**

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
São Jose dos Campos, Brasil

adsorvente devido sua elevada cinética de adsorção e facilidade de manuseio. As FCA podem ser produzidas a partir da fibra de poliacrilonitrila e mesmo processo utilizado na fabricação de fibras de carbono, acoplando-se uma etapa de ativação ao final do processo. Neste trabalho é descrito a produção, caracterização química/morfológica e potencial aplicação de feltros de fibra de carbono ativado (FFCA), produzidos a partir de fibra PAN têxtil nacional em um equipamento experimental. Fibras PAN de 5.0 dtex em cabo de 200 mil filamentos foram oxidadas termicamente e utilizadas como matéria prima para a produção de filtro. O filtro de fibra PAN oxidada (FFPO) foi colocada em um porta-amostra, especialmente desenhado, e inserido em um forno tubular elétrico, carbonizado (900 °C) e em seguida ativado em atmosfera de CO<sub>2</sub> a 1000 °C. Todas as etapas foram feitas na maior taxa possível e as caracterizações foram feitas por isotermas de N<sub>2</sub> a 77 K, a química de superfície foi analisada por titulação de Boehm. Os resultados mostram um material essencialmente microporoso (poros < 3,2nm, concentrados em 1,2 nm) e 1300 m<sup>2</sup> de área específica. O material produzido apresentou forte indicativo de aplicação como eletrodo de supercapacitor.

**PALAVRAS CHAVE:** Fibra de carbono ativada; filtro ativado; eletrodo supercapacitor

**RESUMO:** Fibras de carbono ativado (FCA) são conhecidas por ser um excelente material

**ABSTRACT:** Activated carbon fibers (ACF) are known as excellent adsorbent materials due to their fast adsorption rate and easy handling characteristic. The ACF can be manufactured from the polyacrylonitrile fiber, based on an usual carbon fibers (CF) production process accomplished by an additional activation process. The aim of the present work is to describe the production, chemical/morphological characterization and application potentiality of activated carbon fiber felt (ACFF) produced from textile PAN fiber, using a set of homemade equipment. The 5.0 dtex PAN fiber tow with 200 thousand filaments was oxidized and used as raw material for felt production. The oxidized PAN fiber felt (OPFF) was displaced in a special sample holder, carbonized (900 °C) and then activated in CO<sub>2</sub> atmosphere at 1000 °C in an electric tubular furnace. All steps of the process were performed as fast as possible, and characterization was done by 77 K N<sub>2</sub> isotherms, adsorption isotherms in liquid phase, scanning electronic microscope, X-ray diffraction and surface chemistry by Bhoem methodology. The results confirmed the production of essentially microporous (pore < 3.2 nm, centered on 1.2 nm) and 1,300 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> surface area. The ACFF produced have demonstrated a strong potential application as electrode supercapacitor.

**KEYWORDS:** activated carbon fiber; activated felt, supercapacitor electrodes.

## 1 | INTRODUCTION

Activated Carbons (AC) are one of the most widely used adsorbent materials around the world. Normally, AC is used for drinking and waste water treatment and in many other applications where the removal of generally dispersed contaminant molecules is desired (Marsh 2006). AC also have important applications in energy storage such as a supercapacitors material of and Lithium-ion rechargeable Batteries (Inagaki 2014).

Activated carbon fibers (ACF) have special characteristics when compared with common activated carbons (granular or powder). They can be transformed into fabric, woven or yarn forms which give them self-sustainable characteristics. In addition, ACF show well defined pore structures on their surface which provides a high and fast adsorption capacity for specific components (Solano 2008, Yoon 2000). Facing the application as supercapacitor electrode, ACF have, in comparison with powdered activated carbons, advantages such as a high surface-area, a good electrical conductivity and easy electrode formation and containment (Pandolfo 2006). In spite of all advantages of ACF applications, their use has been limited due to their relatively high cost.

One of the most important characteristics, which makes ACF a very special adsorbent material, is their pore size distribution. The architecture and structure of pores on ACF surface are characterized by a huge amount of micropores localized directly on the surface, leading to a faster and less energetic adsorption mechanism, especially for gases (Mochida 2000)].

The common methods used to produce ACF from a carbon fiber (CF) are not far from those used for AC production. The process can be simply described as a thermal treatment in an oxidant atmosphere at temperatures between 700 and 1000 °C (Solano 2008, Yoon 2000, Carrott 2001).

The ACF are highly quoted for adsorbent use, but it is very brittle and does not have enough mechanical resistance to be applied in normally used textile process. Consequently, it is very difficult to transform ACF in textile form. To solve this problem, oxidized textile PAN fiber was produced and then transformed into oxidized PAN fiber felt (OPFF). The OPFF was carbonized and activated to produce activated carbon fiber felt (ACFF).

## 2 | EXPERIMENTAL

The commercial 200 k tow of 5.0 dtex textile PAN fibers were oxidized in a laboratory scale oven set built, aiming an experimental production of flame-resistant fibers. About 200 kg of oxidized PAN were produced and transformed in felt (OPFF) with 200 g m<sup>-2</sup>.

During the carbonization process, the oxidized PAN loses about 50% in mass and linearly shrinks 10%. The shrinkage is an important parameter and must be controlled (Marcuzzo 2012), and for this purpose, an OPFF sample about 0.7m X 0.25m was cut and displaced in a special sample holder that can control the sample shrinkage in two dimensions.

The set of such sample holder with felt was introduced in an electrical furnace (Figure 1). Both ends of the furnace tube were closed by flanges, which allow the insertion and the purge of argon gas to provide an inert atmosphere condition necessary for carbonization.

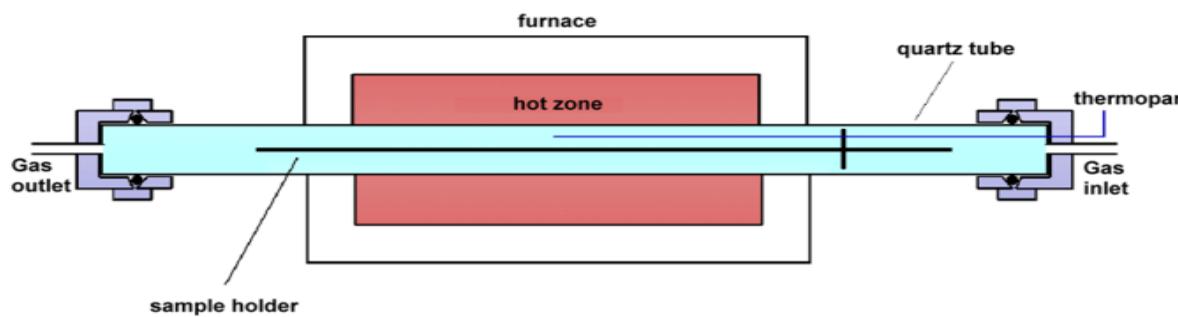


Figure 1. Carbonization and activation set up

The carbonization was performed in argon atmosphere at a final temperature of 900 °C, applying the maximum heating rate attainable (30 °C min<sup>-1</sup>). The processing

time for maximum temperature was set at 20 min for carbonization. The activation process was performed immediately after the carbonization by changing the argon to carbon dioxide and rising up the temperature to 1000 °C; this temperature was maintained during 50 min. The activation time was defined by a previous essay where the mechanical evaluation was done, and it was fixed at 50 min to guarantee the minimal mechanical characteristic for handling the activated fiber samples.

After finishing the carbonization and activation process, the gas was shifted again from CO<sub>2</sub> to Ar and the furnace was turned off. This condition of inert atmosphere was maintained until the room temperature was achieved inside reactor.

The sample characterization was performed by N<sub>2</sub> adsorption aiming the measurements of surface area and pore sizes distribution function. The nitrogen isotherm was performed at 77 K by Beckman Coulter SA 3100 equipment. The BET method was applied to determine the total surface area; the pore size distribution and the micropore volume were estimated by applying the NLDFT method (Tarazona 1995) over the adsorption isotherm. The burn-off was estimated weighing the sample before and after the activation process.

The methylene blue and iodine adsorption capacities were also determined in liquid media, due to the fact that these characteristics are normally used as a reference in the adsorbate industry. High resolution SEM was used to check surface fiber integrity. The structure of activated carbon fiber was analyzed by X-ray diffraction technique (Cuña 2014) operated with monochromatic incident Cu Ka ( $\lambda = 1.5418\text{Å}$ ) ray and an automatic data acquisition system. The carbon surface chemistry was evaluated by the titration method proposed by Boehm (Boehm 1994).

For electrochemical characterization, a two-electrode Swagelok TM-type cells having two tantalum rods as current collectors were used. The electrodes (6.3 mg) were prepared by a rectangular cut of the ACFF, with cross-section areas of 0.8 cm<sup>2</sup> and thickness of 0.0015 m. A glassy microfiber paper (Whatman 934 AH) was used as separator, and 2M aqueous H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> electrolyte was used. Galvanostatic charges and discharges were performed at a current density in the range 1-10 mA cm<sup>-2</sup>, and at the voltage range of 0-1 V. The cross-section area was used to determine the current density. The specific capacitance was determined according to the equation: , where  $I$  is the current applied,  $t$  is the discharge time,  $V$  is the voltage range during the discharge, and  $m_e$  is the mass of the electrode. The volumetric capacitance was determined according to the equation: , where  $\rho$  is the bulk density of the ACFF. The bulk density was determined by measuring the weight and the geometrical dimensions of each electrode. The impedance measurements were carried out in the frequency range from 1 mHz to 100 kHz with a signal of amplitude of 15 mV. All the electrochemical measurements were carried out at room temperature and 2M of sulfuric acid as the electrolytic solution and the setup was VoltaLab PGZ301 equipment.

## 3 | RESULTS AND DISCUSSION

The structural morphology of ACFF was studied by X-ray diffraction and scanning electronic microscopy. For pore structure analysis nitrogen gas adsorption at 77K was determined. In addition, iodine and methylene blue isotherm were used to determine adsorption capacity. For surface chemistry, Boehm methodology was applied [11].

### 3.1 N<sub>2</sub> Isotherm

Figures 2 and 3 show, respectively, the nitrogen gas adsorption isotherm at 77 K and pore size distribution function.

The nitrogen adsorption isotherm at 77K (Figure 2) corresponds to a type I curve, with no hysteresis, and it shows that the gas saturation occurs at 0.2 P/Po, indicating that this activated material is predominantly populated with micropores. The pore size distributions curve performed by NLDFT (Non local density function theory) methodology is shown in Figure 3, and it clearly shows that the maximum pore width presented is around 3.2 nm and the predominant pores are sized at around 1.2 nm. This technique does not give information about pores less than 1.0 nm in diameter, due to the N<sub>2</sub> penetration limit, but it can be clearly observed in this curve that the distribution in the region for a size width less than 1 nm is ascendant in the direction of origin. This fact infers that the actual micropore volume and surface area of this material may be larger than those calculated by using these isotherms.

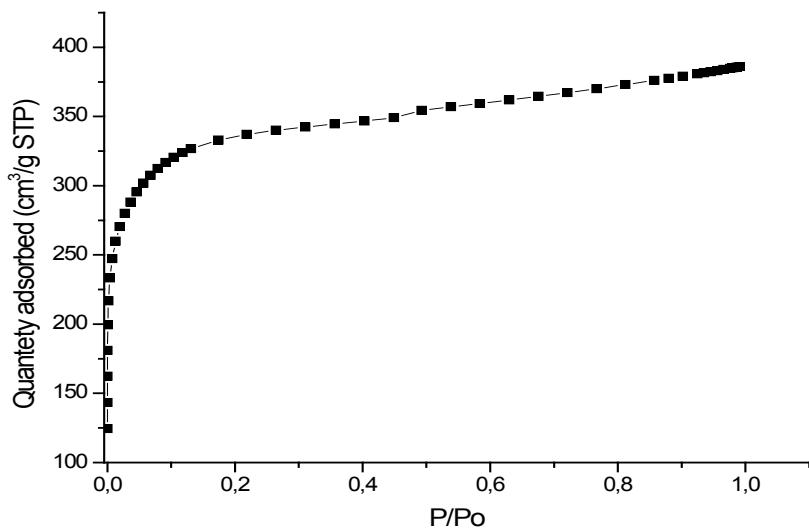


Figure 2. Nitrogen isotherm at 77 K.

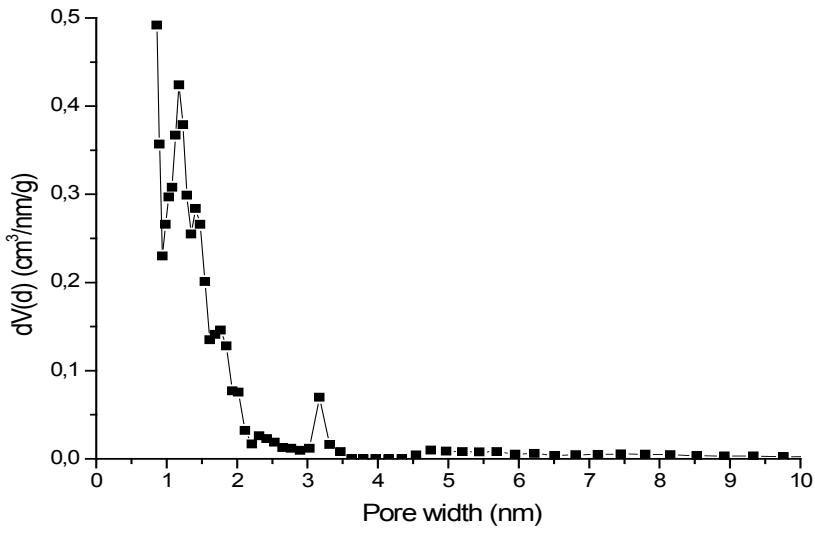


Figure 3. Pore size distribution by NLDFT

Table 1 presents the surface characteristics of activated carbon fiber felt obtained from textile PAN fiber, and the burn-off value of the activation process.

Sample	Burn off (w %)	$S_{BET}$ ( $m^2 g^{-1}$ )	$V_{micropore}$ ( $cm^3 g^{-1}$ )	$V_{Total}$ ( $cm^3 g^{-1}$ )
ACFF	35	1260	0,53	0,59

Table 1. Surface characteristics of ACFF

### 3.2 Iodine and methylene blue Isotherm

Iodine and methylene blue adsorption capacity of activated materials are parameters normally used to classify them as water pollutant organic compounds removing materials. Moreover, the adsorption capacity of iodine is associated to the presence of micropores sized between 0,5 and 1,5 nm (Fernandez-Colinas 1991), while the methylene blue adsorption capacity is related to small mesopores (Baçaoui 2001). For common activated carbon, the typical value of Iodine adsorption is around 1000 mg g<sup>-1</sup> and methylene blue is between 100 and 350 mg g<sup>-1</sup>.

The iodine content for ACFF was determinate by ABNT/MB-3410. The total Iodine adsorption was estimated in 1800mg g<sup>-1</sup>. There isn't a standard to Methylene blue measurement, the common methodology to determine methylene blue in activated materials is by using spectrophotometer (665 nm) with silica sells of length 1cm. This methodology shows a 700 mg g<sup>-1</sup> of methylene blue as ACFF adsorption content.

The amount of methylene blue and iodine ACFF adsorption is significant bigger then the value found for activated carbon on literature. This fact suggests that the ACFF is more efficient then activated carbon for small molecular compounds.

### 3.3 Scanning electronic microscopy

The carbonization heating rate used in this work is a rate not usually applied in the production of a material that essentially contains micropores. The usual heating rate is in the range of 1 to 10 °C/min (Ronaldo 2007), while in this work it was used the maximum heating rate allowed for the furnace which was 30 °C min<sup>-1</sup>. The choice of such high value for this process parameter has been assigned to the production of macropores, cracks and other surface damages, however the SEM analysis of fiber surfaces showed the surface integrity of activated samples.

Figure 4 shows the felt fibers distribution overview. The fibers are not broken for a small length. This is associated to their mechanical characteristics handling.

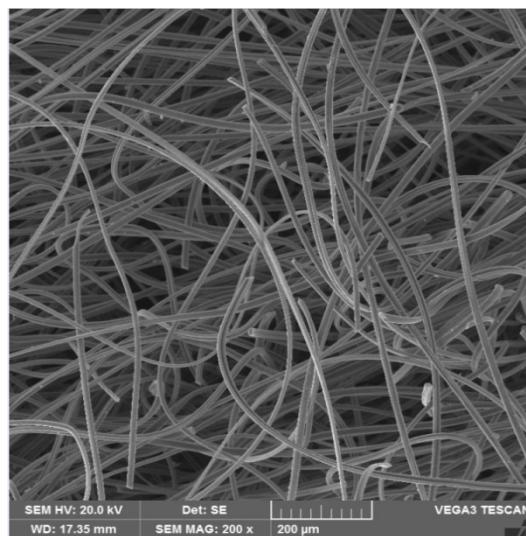


Figure 4. Filament structure ACFF overview.

Figure 5 shows details of the carbon fiber filament. It can be observed that macropores, cracks, collapsed filaments and any other macroscopic surface impairment are absent. In addition, it can be said that the surface of activated fibers is clear and smooth.

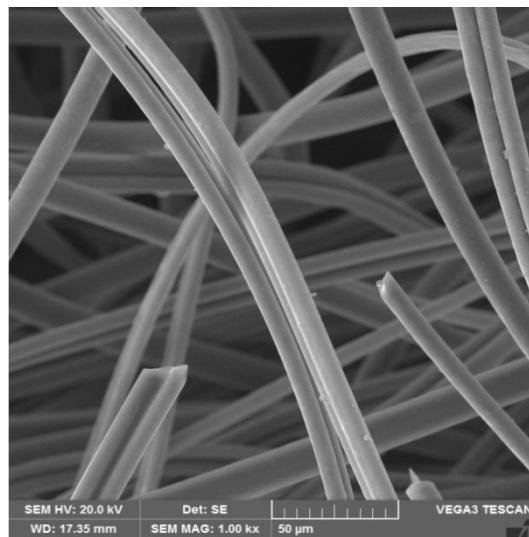


Figure 5. Detail of activated carbon fiber in the filament structure of activated carbon fiber felt.

As the ultimate surface damage analysis, the high-resolution SEM image, with 150 k magnification, is also provided and presented in Figure 6. This micrograph shows that the activated carbon fiber surface is exempted of macro-damages, which in turn indicates that the high heating rate does not have any relationship with macropores or damage production on the activated carbon fiber surface.

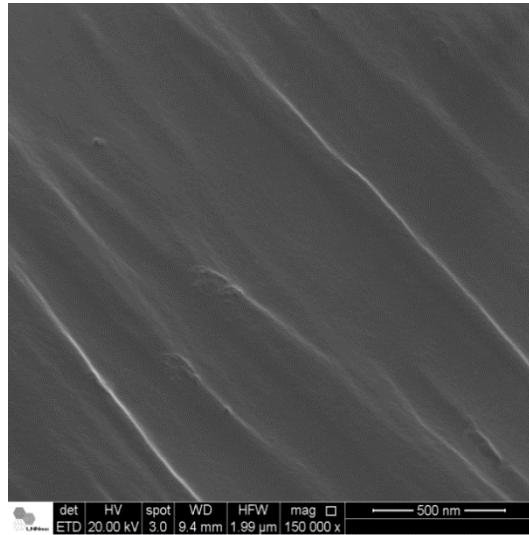


Figure 7. Magnification of 150 K on the activated carbon fiber.

### 3.4 X-ray diffractogram (XRD)

XRD of the activated carbon fiber felt is shown in Figure 7. The amorphous character of this fiber was confirmed. Two broad peaks appear at approximately  $2\theta = 25^\circ$  and  $44^\circ$ . The first peak is associated with  $(002)$  line, while the second at  $2\theta = 44^\circ$  is  $(100)$  line. The presence and the shapes of these two bands indicate that the activated carbon fiber (prepared by carbonization at  $900^\circ\text{C}$ ) has a more organized aromatic structure with marked  $\text{sp}^2$  bonding character than other amorphous carbon, reported in the literature. These materials when prepared at lower temperature, such

as the one used in this work, present higher  $sp^3$  bonding characteristic (Cuña 2014, Celorio 2011, Kennedy 2004, Mochidzuki 2003).

Based on these results, it is expected that this fiber presents a relatively good electrical conductivity, what is an important characteristic for applications such as supercapacitor electrode manufacture [5, 10, 18].

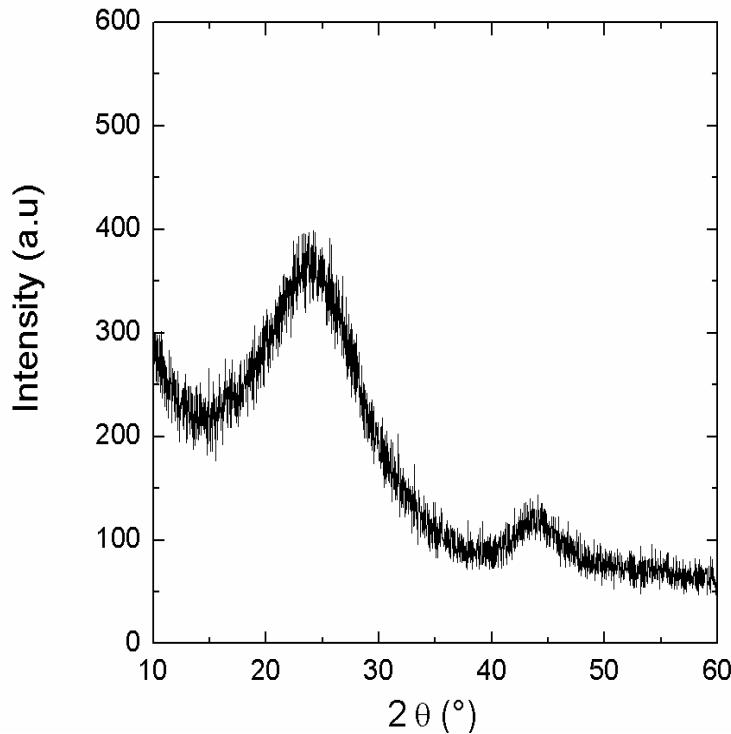


Figure 7. X-ray diffractogram of ACFF

### 3.5 Chemical surface by Boehm

The well known Boehm methodology [11] was used to investigate the activated carbon fiber felt surface chemistry. By using the Boehm titration, it is possible to determine the amount of main acid groups as: carbonyl, carboxyl, phenolic, lactone, and also basic groups that are not detectable per species.

The results are presented on Table 2. It is possible to observe only two different species; however, the presence of carbonyl groups is much less prevalent than the basic groups that show a considerable amount. Consequently, the activated carbon fiber felt surface has basic characteristics. This result indicates a basic behavior for aqueous applications.

### 3.6 Electrochemical characterization as supercapacitor electrode

Figure 8 shows the specific capacitance  $C_s$ , and volumetric capacitance  $C_v$ , as a function of the current density. The ACFF has a high  $C_s$  at low current densities ( $200 \text{ F g}^{-1}$  at  $1 \text{ mA cm}^{-2}$ ), comparable to those reported for other carbon materials using the same electrolyte [5, 10, 18]. This was expected by its the high specific surface area

( $1260 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ) which gives a high double layer capacitance. A current density increase produces a drastic drop in the capacitance, which is mainly due to the high electrical resistance of the cell.

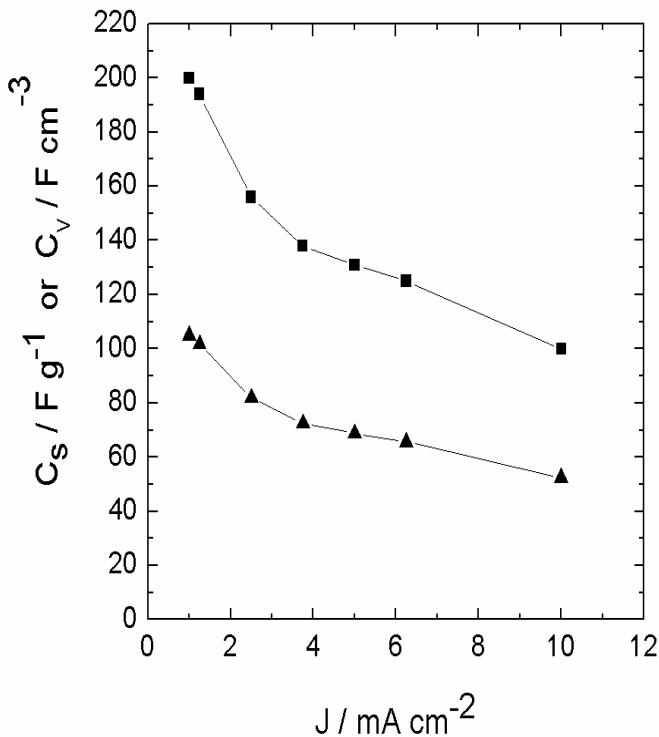


Figure 8. Variation of the specific capacitance  $C_s$  (squares) and the volumetric capacitance  $C_v$  (triangles) with the current density.

This is demonstrated in the Nyquist plot (Figure 9) obtained from the electrochemical impedance measurements. In this plot,  $R_s$  is the ionic resistance of the electrolyte bulk and  $R_a$  is the arc resistance (Figure 9 inset). The total resistance of the cell can be defined as  $R_a+R_s$ .  $R_a$  can be linked to the electric resistance of the electrode plus the resistance of the electrode/current collector contact (Garcia 2010). For the ACFF studied in this work,  $R_a$  has a very high value ( $125 \Omega$ ), highest than the  $R_s$  ( $2.7 \Omega$ ). As discussed in section 3.3, it is expected that the activated fiber has a high electrical conductivity, but the poor connectivity between the fibers in the ACFF determine a high electrode resistance and electrode/current collector contact resistance [5].

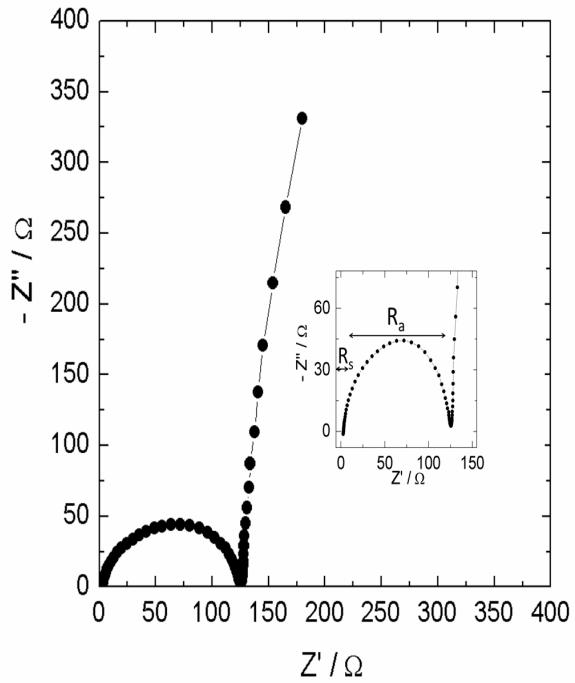


Figure 9. Nyquist diagram for the ACFF cell. Inset: magnification of the high-frequency region showing the arc.  $R_a$  is the arc resistance and  $R_s$  is the electrolyte bulk resistance.

The bulk density of the ACFF was  $0.552 \text{ g cm}^{-3}$ . Given this value,  $C_v$  of the ACFF was determined for different current densities. At  $1 \text{ mA cm}^{-2}$ ,  $C_v$  was  $104 \text{ F cm}^{-3}$ , slightly larger than those reported for bio carbon monoliths (Cuña 2014) but significantly less than that reported for commercial carbon monoliths treated by different methods (Kunowsky 2014). The biggest disadvantage of the ACFF is the drastic drop in capacitance at the highest current density.

#### 4 | CONCLUSION

It was proved that Oxidized PAN fiber felt can be transformed in a relatively high surface specific area activated material, with  $1300 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ . Moreover, the heat treatment and the activation treatment parameters can be adjusted in a way that they drastically reduce the time and energy consumption for the manufacturing process. The surface characterizations showed that the produced activated carbon fiber felt is a material populated essentially by micropores sized at  $1.2 \text{ nm}$ , and with minor amount of  $3.2 \text{ nm}$  mesopores. More work must be performed in the future to better describe the pore structure with sizes below  $1 \text{ nm}$ , which was not accessed by nitrogen. XRD analysis shows that the activated carbon fibers do not present an ordered two-dimensional structure. The activated carbon fiber felt produced from textile PAN fiber, is an interesting material for supercapacitor electrode application, it could be successfully used as a supercapacitor electrode material if its high electrical resistance can be reduced.

## 5 | ACKNOWLEDGMENT

The authors want to acknowledge ITA for the conventional SEM images; the CNPEM/ LNNano for the high-resolution SEM images; the Multivácuo Aeroespacial Ltda. for the laboratorial infrastructure and FAPESP Process 12/51087-6 and 09/52989-0 for the financial support.

## REFERENCES

- Baçaoui, A.; Yaacoubi, A.; Dahbi, A.; Bennouna, C.; Phan Tan Luu, R.; Maldonado-Hodar, F.J.; Rivera-Utrilla, J.; Moreno-Castilla, C. Optimization of conditions for the preparation of activated carbons from olive-waste cakes. *Carbon*, v. 39, p. 425-432, 2001.
- Boehm, H.P. **Some aspects of the surface chemistry of carbon blacks and other carbons.** *Carbon*, v.32 (5), pp. 759-769, 1994.
- Carrott, P.J.M.; Nabais, J.M.V.; Ribeiro Carrott, M.M.L.; Pajares, J.A. Preparation of activated carbon fibers from acrylic textile fibers, *Carbon*, v.39, p. 1543-1555, 2001.
- Celorrio, V.; Calvillo, L.; Pérez-Rodríguez, S.; Lázaro, M.J.; Moliner, R. **Modification of the properties of carbon nanocoils by different treatments in liquid phase.** *Micropor. Mesopor. Mat.* v. 142, p. 55-61, 2011.
- Cuña, A.; Tancredi, N.; Bussi, J.; Deiana, A.C.; Sardella, M.F.; Barranco, V.; Rojo, J.M. **E. grandis as a Biocarbons Precursor for Supercapacitor Electrode Application.** *Waste and Biomass Valor*, v. 5, p. 305–313, 2014.
- Cuña, A.; Tancredi, N.; Bussi, J.; Barranco, V.; Centeno, T.A.; Quevedo, A.; Rojo, J.M. **Biocarbon Monoliths as Supercapacitor Electrodes: Influence of Wood Anisotropy on Their Electrical and Electrochemical Properties.** *Journal of The Electrochemical Society*, 161 (12) A1806-A1811, 2014.
- Fernandez-Colinas, J.; Denoyel, R.; Rouquerol, J. Characterization of The Porosity of Activated Charcoals by Adsorption from Solution. *Studies in Surface Science and Catalysis*, v. 62, p. 399-408, 1991.
- García, A.; Miles, P.; Centeno, T.A.; Rojo, J.M. **Uniaxially oriented carbon monoliths as supercapacitor electrodes,** *Electrochimica Acta*, v. 55, p. 8539, 2010.
- Inagaki, M.; Kang, F.; Toyoda, M.; Konno, H. **Advanced Materials Science and Engineering of Carbon: USA,** Tsinghua University Press Limited, 2014.
- Kennedy, L.J.; Vijaya, J.J.; Sekaran, G. Effect of Two-Stage Process on the Preparation and Characterization of Porous Carbon Composite from Rice Husk by Phosphoric Acid Activation. *Ind. Eng. Chem. Res.* v. 43, p. 1832-1838, 2004.
- Kunowsky, M.; Garcia, A.; Barranco, V.; Rojo, J.M.; Ibañez, J.; Carruthers, D.; Linares-Solano, A.. **Dense carbon monoliths for supercapacitors with outstanding volumetric capacitances,** *Carbon*, v. 68, p. 553, 2014.
- Marcuzzo, J.S.; Otani, C.; Polidoro, H.A.; Otani, S. **Influence of Thermal Treatment on Porosity Formation on Carbon Fiber from Textile PAN.** *Materials Research*. v. 16, p. 136-144, 2012.
- Marsh, H.; Reinoso, F.R. **Activated Carbon,** Elsevier, 2006.

Mochida, I.; Korai, Y.; Shirahama, M.; Kawano, S.; Hada, T.; Seo, Y.; Yoshikawa, M.; Yasutake, A. **Removal of SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> over activated carbon fiber.** Carbon, v. 38, p. 227-239, 2000.

Mochidzuki, K.; Soutric, F.; Tadokoro, K.; Antal Jr, M.J.; Toth, M.; Zelei, B.; Varhegyi, G. **Electrical and Physical Properties of Carbonized Charcoals.** Ind. Eng. Chem. Res. v. 42, p. 5140-5151, 2003.

Pandolfo A.G., Hollenkamp A.F.: **Carbon properties and their role in supercapacitors.** J. Power Sources v. 157, P. 11-27, 2006.

Solano, A.L.; Amorós, D.C. in: Adsorption on Activated carbon fiber: Adsorption by carbon. Elsevier, 2008.

Ronaldo M.A. Roque-Malherbe, Adsorption and diffusion in nanomaterials. USA: Taylor and Francis Group, 2007.

Tarazona, P. **Solid-fluid transition and interfaces with density functional approaches.** Surface Science, v. 94, p. 331-333, 1995.

Yoon, S.H.; Koray, Y.; Mochida, I. in: Carbon Fibers and Activated Carbon fibers: Sciences of Carbon Materials. University of Alicante, 2000.

## ANÁLISE COMPARADA DE UM AGREGADO DE ESCÓRIA DE ACIARIA COMO MATERIAL ALTERNATIVO PARA LASTRO DE VIAS FÉRREAS DO TIPO *HEAVY HAUL* POR MEIO DE ENSAIOS TRIAXIAIS

**Bruno Guimarães Delgado**

CONSTRUCT-GEO, Faculdade de Engenharia da  
Universidade do Porto  
Porto – Portugal

**António Viana da Fonseca**

CONSTRUCT-GEO, Faculdade de Engenharia da  
Universidade do Porto  
Porto – Portugal

**Eduardo Fortunato**

Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Lisboa – Portugal

**Daniela Raquel Ferreira Coelho**

Faculdade de Engenharia da Universidade do  
Porto  
Porto – Portugal

e ambientalmente, inerte comparativamente a um agregado de granito, relativamente à resistência e à deformabilidade. Os ensaios cíclicos foram conduzidos em dois escalões de carga de 500.000 ciclos, sendo cada escalão compatível com o carregamento imposto por vias do tipo *heavy haul* com, respectivamente, 32,5 toneladas/eixo e 40 toneladas/eixo. Os resultados mostraram que o lastro de escória de aciaria apresentou parâmetros de resistência superiores comparativamente ao lastro de granito e um melhor comportamento quanto à deformabilidade, expresso por maiores valores de módulo de resiliência, menores índices de quebra e degradação de partículas e uma maior tendência de estabilização das deformações plásticas, fenômeno conhecido como *shakedown* e que também foi investigado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Lastro Ferroviário, Escória de Aciaria, Ensaios Triaxiais.

**ABSTRACT:** This paper presents a stage of a more embracing research, in progress at the University of Porto by Construct-Geo research group, to evaluate the geomechanical behaviour of alternative raw materials as ballast layer for heavy haul rail tracks. Are shown monotonic and cyclic triaxial tests results carried out on scaled ballast specimens with 150 mm diameter and 300 mm height in a ratio of 1:2.5 from the ballast standard AREMA N. 24. Was evaluated

**RESUMO:** Este artigo apresenta uma etapa de uma pesquisa mais abrangente que está em andamento na Universidade do Porto, no âmbito do grupo de pesquisa Construct-Geo, que visa avaliar os aspectos geomecânicos de materiais alternativos para uso como camada de lastro em vias férreas do tipo *heavy haul*. São apresentados resultados de ensaios triaxiais monotônicos e cíclicos conduzidos em corpos de prova de 150 mm de diâmetro por 300 mm de altura, em escala reduzida numa proporção de 1:2,5 em relação à granulometria de lastro padrão AREMA N. 24. Analisou-se um agregado de escória de aciaria, quimicamente

an aggregate, chemically and environmentally inert, of steel slag in comparison with a granite aggregate regards to shear strength and deformability. The triaxial cyclic tests were conducted in two load steps of 500,000 cycles, each step being compatible with heavy haul loads of 32.5 tonnes/axle and 40 tonnes/axle, respectively. The results showed that the steel slag ballast presented has higher values of shear strength parameters in comparison with the granite ballast and better deformability behaviour, expressed by higher resilient modulus values, lower particle breakage and degradation and a faster tendency for plastic strains stabilization, phenomenon known as ‘shakedown’ and also investigated.

**KEYWORDS:** Railway Ballast, Steel Slag, Triaxial Tests.

## 1 | INTRODUÇÃO

As pressões ambientais têm imposto a adoção de novas abordagens no que tange ao uso dos recursos naturais. No século XXI, nomeadamente na área de engenharia civil, o uso racional dos recursos naturais impõem-se como um novo paradigma de concepção, projeto e construção. Este fato justifica a busca por materiais alternativos aos convencionalmente empregados na indústria ferroviária, como é o caso dos agregados naturais oriundos de rochas britadas.

Em Portugal, segundo Ferreira (2010), os resíduos que satisfaçam os requisitos relativos a geração de lixiviados para aterros inertes podem ser utilizados, conforme previsto no Decreto-Lei nº 183/2009 (Ferreira, 2010). Este decreto estipula valores limites de lixiviação obtidos em ensaios realizados de acordo com as normas Europeias EN 12457-2 (2002) ou EN 12457-4 (2002), dependendo da dimensão das partículas a ensaiar. Os agregados de escória obtidos em Portugal, após processamento pelas usinas, encontram-se hoje classificados como agregados inertes, tendo dado origem à denominação comercial “Agregado Siderúrgico Inerte para Construção (ASIC)”.

Dessa forma, diversos estudos foram conduzidos visando o aproveitamento de materiais deste tipo para aplicações rodoviárias, seja como constituinte das camadas de base e sub-base ou como agregado para misturas asfálticas (Mathur et al., 1999; Rohde, 2002; Castelo Branco, 2004; Pacheco, 2017). Tais estudos avaliaram tanto as propriedades ambientais quanto as características mecânicas quando solicitados por níveis de tensão compatíveis com a aplicação analisada, e têm mostrado ser promissor o emprego do ASIC para as diversas finalidades propostas.

O emprego como material de lastro em vias férreas torna-se atrativo, principalmente em função da grande maioria das usinas siderúrgicas instalarem-se, por questões de competitividade, próximas às malhas ferroviárias. Porém, poucas pesquisas vêm sendo conduzidas no sentido de avaliar este material nas condições de carregamento e contorno da camada de lastro, sendo que os poucos estudos disponíveis concentram-se em avaliar o material sob o ponto de vista ambiental, sua resistividade elétrica ou à luz de parâmetros que possam ser correlacionados com o comportamento mecânico

do agregado, com destaque para parâmetros empíricos, como os obtidos dos ensaios Los Angeles e Micro-Deval, ou baseando-se em resultados de ensaios de compressão simples das partículas (Fernandes et al., 2006; Morata e Saborido, 2016; Kuo e Lin, 2017).

Neste momento, está em curso, no Laboratório de Geotecnia (LabGEO) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), um estudo para avaliar a aplicabilidade do ASIC como material de lastro para vias-férreas de carga, nomeadamente vias do tipo *heavy haul* com 32,5 t/eixo e 40 t/eixo. Para isso estão sendo realizados ensaios triaxiais com corpos de prova em escala reduzida na proporção de 1:2,5, visando comparar o material alternativo proposto (ASIC) com um material convencionalmente empregado na camada de lastro (agregado britado de granito), ambos na mesma granulometria, com parâmetros índice enquadrados dentro de valores admissíveis em Portugal (RF.IT.VIA.015, 2015) e na Europa (EN 13450, 2002), e em níveis de tensão compatíveis com os induzidos na camada de lastro pela passagem dos comboios.

Neste trabalho são apresentados alguns resultados já obtidos, tanto para carregamentos monotônicos quanto para carregamentos cíclicos. Os ensaios monotônicos objetivaram avaliar o potencial do material em proporcionar estabilidade para a via-férrea que, segundo Indraratna et al. (2011), tende a ser tão mais elevado quanto maior for o valor do seu ângulo de resistência ao cisalhamento (), e verificar a viabilidade de aplicação das tensões limite propostas para ciclagem nos ensaios triaxiais de carga repetida, de maneira a não ultrapassar a tensão de ruptura do material durante estes ensaios. Os ensaios de carga cíclica permitiram avaliar o comportamento resiliente e a evolução da deformação permanente dos materiais.

## 2 | PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS

### 2.1 Propriedades do Lastro Ferroviário

A algumas décadas, pesquisadores vêm realizando estudos em laboratório no sentido de compreender o comportamento mecânico de agregados com partículas de grandes dimensões, seja para lastro ferroviário, seja para enrocamentos (Lowe, 1964; Morgan, 1966; Raymond e Davies, 1978; Kolisoja et al., 1998; Varadarajan et al., 2003; Fortunato, 2005; Indraratna et al., 2011). Tais estudos concentramse, em sua maioria, na avaliação das propriedades resilientes destes materiais sob carregamento triaxial cíclico.

No que se refere aos estudos de deformação permanente, têm sido empregadas três abordagens na previsão do nível de plastificação do material sob carregamento repetido: i) em função do estado de tensão cíclico aplicado (Morgan, 1966); ii) em função do número de ciclos de aplicação do carregamento repetido, N (Selig e Waters, 1994; Paute et al., 1996; Kolisoja et al., 1998); e iii) segundo a teoria do *shakedown*

(Werkmeister et al., 2001).

Pesquisadores diversos têm concordado que para o estudo das propriedades mecânicas do lastro sob carregamento repetido é fundamental situar o estado de tensão aplicado relativamente ao estado de tensão de ruptura do material sob carregamento monotônico, pois aquele deve situar-se suficientemente afastado deste último (Selig e Waters, 1994; Indraratna et al., 2011; Sevi e Ge, 2012). Alguns autores propõem que após a realização dos ensaios monotônicos, os possíveis estados de tensão cíclicos a serem aplicados sejam situados em relação à envoltória de ruptura do material (Suiker, 2002; Sevi e Ge, 2012) segundo a razão de tensão cíclica ( $n$ ), dada por:

$$n = q_{cic} / q_f \quad (1)$$

onde  $q_{cic}$  é a tensão desvio cíclica a ser aplicada nos ensaios de carga repetida e  $q_f$  é a tensão desvio de ruptura obtida dos ensaios triaxiais monotônicos, sendo:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2)$$

no qual  $\sigma_1$  é a tensão principal maior (vertical) e  $\sigma_3$  é a tensão principal menor, ou de confinamento, aplicada isotropicamente na amostra no caso de ensaios axissimétricos. Estas tensões podem ser monotônicas, estáticas ou cíclicas consoante o tipo de ensaio e conforme o protocolo utilizado (EN 13286-7, 2004).

## 2.2 Ensaios Triaxiais em Escala Reduzida

Objetivando a representatividade das amostras em ensaios triaxiais, pesquisadores diversos têm recomendado que o diâmetro máximo da partícula utilizada seja igual ou inferior a 1/6 do diâmetro do corpo de prova. Estando tal relação prevista, também, na norma norte-americana ASTM D5311 (2004) para solos, sendo que uma razão de até 1/5 tem, segundo Skoglund (2002), mostrado bons resultados. Bishop e Green (1965) recomendam que a relação entre a altura e o diâmetro da amostra (H/D) seja da ordem de 2, sendo tal recomendação adotada de maneira quase generalizada nos laboratórios de geotecnia. Tais restrições implicam na utilização de equipamentos triaxiais de grande porte (Suiker et al., 2005; Indraratna et al., 2011).

Visando viabilizar a realização de ensaios de materiais grosseiros a custos menores, Lowe (1964) propôs a realização de ensaios com o material em escala reduzida por meio da técnica de decalagem por graduação paralela, onde a granulometria do agregado poderia ser definida pela translação da curva granulométrica em escala real, e com isso se obter parâmetros de resistência e deformabilidade do material a partir de corpos de prova menores.

As técnicas de redução de escala visando avaliar as propriedades mecânicas de

geomateriais não são consensuais entre os pesquisadores. Alguns autores verificaram o aumento de resistência com a diminuição da dimensão máxima das partículas (Marsal, 1965; Fumagalli, 1969; Marachi et al., 1972; Donaghe e Cohen, 1978); outros verificaram o contrário (Dunn e Bora, 1972; Shenton, 1978); e outros, ainda, concluíram que essa variação não era relevante (Vallerga et al., 1956; Holtz e Gibbs, 1956; Selig e Roner, 1987).

Relativamente a parâmetros de deformabilidade, Sevi e Ge (2012) conduziram estudos que apontaram para a possibilidade de realização de ensaios em escala reduzida pela técnica de decalagem por graduação paralela, desde que as características individuais das partículas (principalmente a forma dos grãos) sejam semelhantes, no sentido de garantir que o material se encontre no mesmo nível de compacidade (densidade relativa) seja na escala real, seja na escala reduzida.

Estudos conduzidos por Ferreira (2010) mostraram que pelo menos um aspecto importante na caracterização mecânica de agregados granulares foi pouco afetado pelo fator escala, que foi, nomeadamente, o parâmetro de estado crítico , dado pelo coeficiente angular da linha de estados críticos do material no plano  $p'-q$  (Roscoe et al., 1958; Roscoe et al., 1963) onde representa a tensão efetiva média aplicada na amostra, para um estado de tensão axissimétrico, sendo dada por:

$$p' = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3 \quad (3)$$

Independente, de se buscar a obtenção de parâmetros de projeto por meio de ensaios triaxiais em escala reduzida, entende-se que tal expediente pode ser uma boa alternativa para uma análise comparada entre os materiais, visto que em agregados de granulometria essencialmente grosseira os possíveis efeitos de redução de escala devem se verificar de maneira similar em ambos os materiais, sendo os ensaios em escala reduzida um bom indicativo do comportamento do material na escala real (Aingaran et al., 2018).

## 3 | MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Materiais Analisados

A Figura 1 mostra os dois materiais ensaiados (ASIC e agregado de granito), já devidamente peneirados e homogeneizados, com a mesma curva granulométrica, em escala reduzida na proporção de 1:2,5, obtidas por decalagem paralela de uma curva teórica que se insere nos limites granulométricos da curva de lastro padrão AREMA N. 24 (Figura 2).

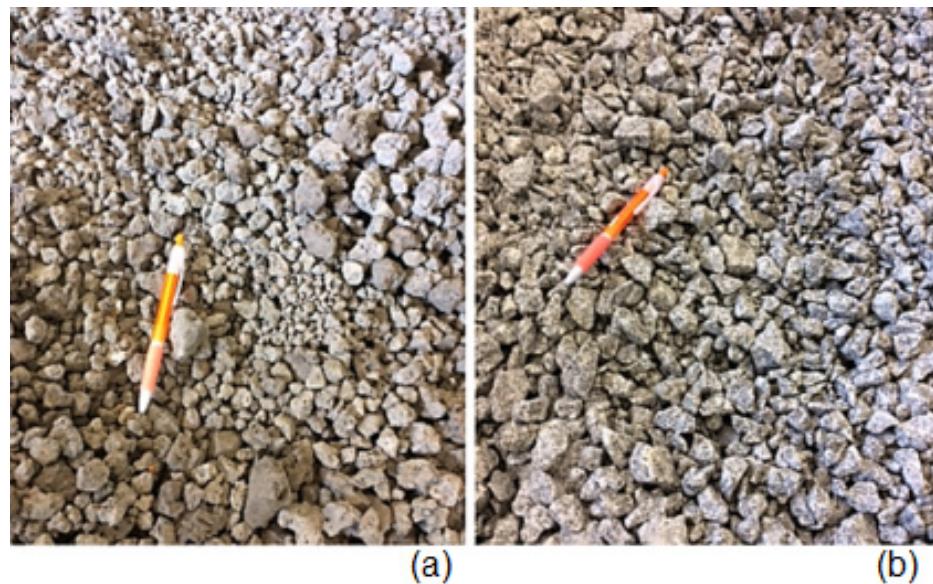


Figura 1. Detalhe do lastro em escala reduzida (1:2,5): (a) ASIC e (b) agregado de granito.

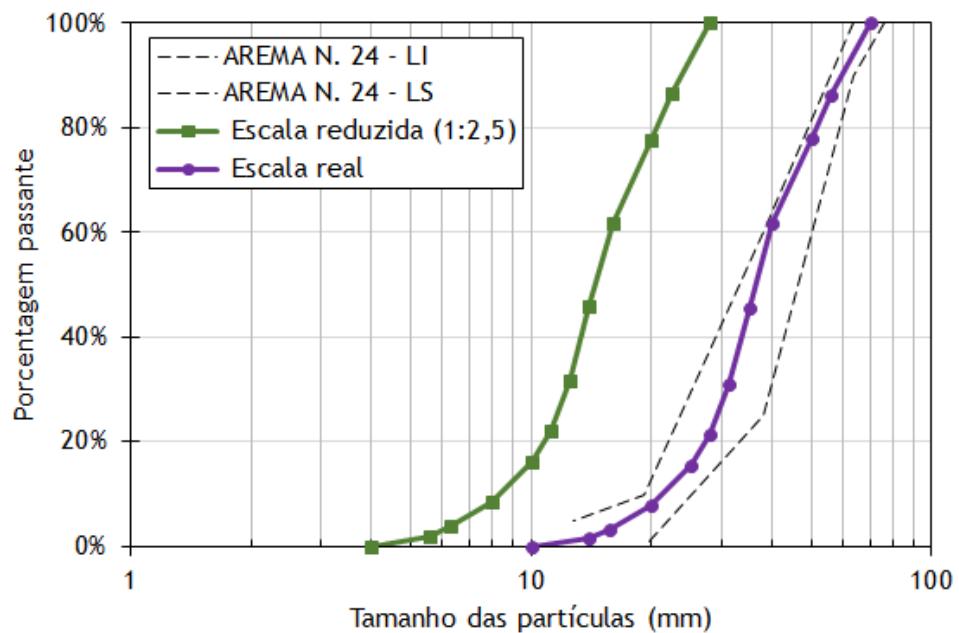


Figura 2. Curva granulométrica do lastro em escala reduzida obtida por decalagem por graduação paralela.

O coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) e o coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) da curva utilizada foram de, respectivamente, 1,94 e 1,02, os quais são típicos de materiais granulares mal graduados, mas, ainda assim, mais bem graduados do que os materiais de lastro normalmente utilizados na Europa, cujas curvas são apresentadas na norma EN 13450 (2002). Os valores da densidade real dos grãos para ambos os materiais, ASIC e agregado de granito, obtidos em laboratório foram, respectivamente, de 3,2 e 2,7.

Com relação aos parâmetros índice dos materiais, ambos, ASIC e agregado de granito, conforme já mencionado, encontram-se enquadrados nos parâmetros índice estipulados para material de lastro em Portugal e na Europa, segundo a Instrução Técnica RF.IT.VIA.015 (2015) e a norma EN 13450 (2002), respectivamente.

### 3.2 Procedimentos Laboratoriais

Na compactação dos corpos de prova encontraram-se dificuldades relacionadas com o emprego de métodos de impacto como, por exemplo, o método Proctor (EN 13286-2, 2010). Tais problemas estão relacionados com a moldagem dos corpos de prova (visto tratar-se de materiais completamente desprovidos de coesão e com baixo imbricamento interparticular) e com a ruptura das membranas por punctionamento. Assim, optou-se por adotar um procedimento no qual os agregados eram colocados “soltos” num molde de PVC, especialmente desenvolvido no LabGeo da FEUP, já com a membrana posicionada. Este molde era removido após aplicação de uma tensão de sucção (70 kPa) para manutenção da geometria do corpo de prova, o que é possível em função de todos os corpos de prova serem moldados com total ausência de umidade. Em seguida o corpo de prova era condicionado na câmara triaxial, tendo sido adotado um procedimento semelhante ao descrito na norma Europeia EN 13286-7 (2004) para ensaios de determinação do módulo de resiliência, que prevê o condicionamento prévio do corpo de prova em 20.000 ciclos de aplicação da tensão desvio cíclica com o valor de 340 kPa (nível de tensão elevado, de acordo com a referida norma), com uma tensão de confinamento de 70 kPa. Nos casos testados observou-se que após 10.000 ciclos de carga o material já apresentava um nível de compacidade satisfatório, pelo que este foi o número de ciclos definido para o fim do condicionamento (Delgado et al., 2017). Na Figura 3 é apresentada a sequência de preparação dos corpos de prova.

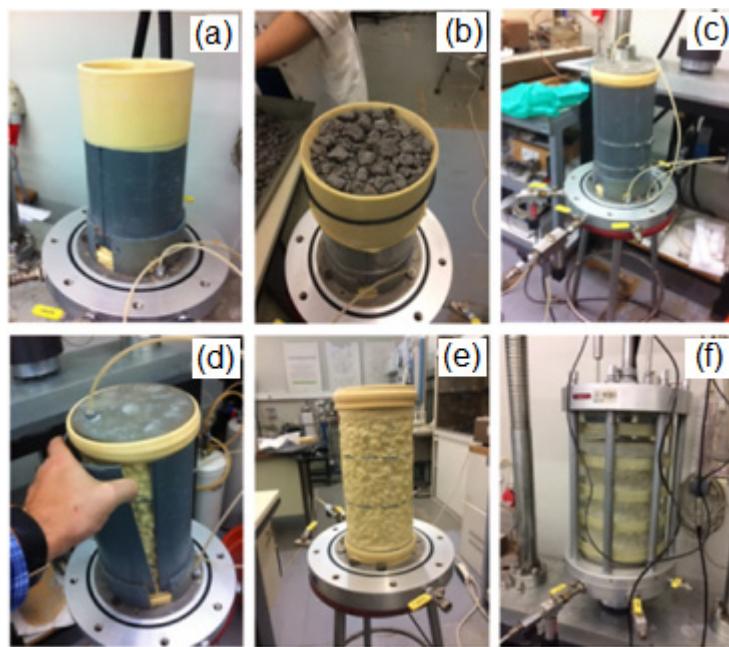


Figura 3. Sequência para moldagem de corpos de prova de lastro em escala reduzida: (a) colocação do molde com a membrana na célula triaxial; (b) colocação manual do material no molde devidamente fixado por meio de duas braçadeiras metálicas; (c) vedação do molde com a colocação do *top-cap* e aplicação do vácuo; (d) remoção do molde após estabilização da sucção imposta pelo vácuo; (e) aspecto do corpo de prova moldado com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura; e (f) colocação do corpo de prova na câmara triaxial para início do condicionamento/compactação.

O procedimento descrito evidenciou boa repetibilidade e garantiu corpos de prova com índices de vazios iniciais situados entre 0,70 e 0,80, valores tipicamente relatados como representativos de uma via-férrea recém entregue para o tráfego dos comboios (Suiker et al., 2005; Indraratna et al., 2011).

Após o condicionamento, os corpos de prova eram removidos da câmara triaxial para medição do diâmetro e consequente determinação do índice de vazios, bem como para instalação de transdutores de deslocamento do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) diretamente nos corpos de prova, tendo sido utilizados 2 LVDTs, posicionados diametralmente opostos um em relação ao outro, em todos os ensaios.

Relativamente aos ensaios monotônicos foram realizados 3 ensaios do tipo CID (Consolidado Isotrópicamente Drenado) para cada material, variando a tensão de confinamento em cada ensaio. Para os dois primeiros ensaios monotônicos em cada material, foram empregadas tensões de consolidação e confinamento ligeiramente inferiores (65 kPa) e superiores (85 kPa) ao confinamento que se pretendia impor nos ensaios cíclicos (70 kPa). O terceiro ensaio foi realizado com tensão de confinamento de 20 kPa com o intuito de melhor caracterizar os parâmetros de resistência, principalmente em níveis de tensão mais baixos, onde as envoltórias de resistência tendem a apresentar uma pronunciada não linearidade.

Em todos os ensaios monotônicos a velocidade de aplicação do carregamento axial foi de 0,028 mm/min, e os dados adquiridos automaticamente a cada 15 segundos, o que foi suficiente para uma boa definição das curvas tensão-deformação, incluindo a aquisição dos valores de pico na ruptura.

Com relação aos ensaios cíclicos foi realizado um ensaio em cada material, com dois escalões de carga consecutivos (500.000 ciclos por escalão) no mesmo corpo-de-prova, sendo o primeiro e o segundo escalões de carga equivalentes ao carregamento imposto na camada de lastro por vias de carga do tipo *heavy haul* com 32,5 t/eixo e com 40 t/eixo, cujas tensões desvio cíclicas, estimadas por meio de métodos analíticos e majoradas em 25%, foram de 280 kPa para o primeiro e de 350 kPa para o segundo escalões, impondo razões de tensão ( $\sigma_1/\sigma_3$ ) de, respectivamente, 5 e 6.

Os ensaios cíclicos foram conduzidos com frequência de 2 Hz (considerada representativa para vias com velocidade máxima de circulação de 100 km/h) por meio de um carregamento senoidal onde a tensão mínima era de 10 kPa (EN 13286-7, 2004). A taxa de aquisição de dados foi de 20 pontos por ciclo, tendo sido satisfatória para uma boa definição das curvas.

## 4 | RESULTADOS OBTIDOS

### 4.1 Triaxiais Monotônicos

Os parâmetros de resistência obtidos, bem como as condições de cada um dos ensaios monotônicos estão expressos na tabela 1.

Observa-se que ambos os materiais apresentaram um comportamento dilatante na ruptura, ocorrendo, no entanto, uma tendência de convergência da linha de estados críticos e da envoltória de ruptura de pico na medida em que se aumenta a tensão de confinamento, implicando que a partir do ponto de convergência destas curvas os materiais passam a apresentar um comportamento contrátil. Indraratna et al. (2011) reportam que essa mudança de comportamento (dilatante para contrátil), sob os níveis de carregamento vertical correntes numa viaférrea, em geral, ocorre a partir de tensões de confinamento de 100 kPa, o que é coerente com os resultados obtidos neste estudo.

Conforme esperado, a resistência é fortemente influenciada pela tensão de confinamento. Pode observar-se que nos ensaios realizados com um baixo nível de tensão de confinamento (20 kPa), ambos os materiais apresentaram um padrão de comportamento quase idêntico. Na medida em que a tensão de confinamento era incrementada, o ASIC apresentava um desempenho superior, comparativamente com o do agregado de granito, tanto no pico (ruptura) quanto no estado crítico. Este comportamento superior do ASIC é, provavelmente, influenciado pela maior rugosidade superficial das partículas. Ressalta-se que, embora o agregado de granito tenha índices de vazios iniciais um pouco mais baixos, este aspecto parece não ser suficiente para sobrepujar o maior atrito interparticular mobilizado no ASIC consoante o aumento do nível de confinamento.

Material	Ensaio	M	$\phi'_{cv}$ (°)	$\phi'_{p}$ (°)	$\Psi$ (°)	$e_o$	$q_f$ (kPa)	$\sigma_3$ (kPa)
ASIC	TM1-PE_A			51,3	3,2	0,78	405	65
	TM2-PE_A	1,98	48,1	48,8	0,7	0,79	457	85
	TM3-PE_A			58,5	10,4	0,79	150	20
Agregado de granito	TM1-PE_G			48,8	2,1	0,75	355	65
	TM2-PE_G	1,91	46,7	46,9	0,2	0,73	413	85
	TM3-PE_G			59,2	12,5	0,74	153	20

Tabela 1. Condições experimentais e parâmetros mecânicos obtidos dos ensaios triaxiais monotônicos.

$M = p/q$  – Parâmetro de estado crítico /  $\phi'_{cv}$  – Ângulo de atrito no estado crítico /  $\phi'_{p}$  – Ângulo de resistência ao cisalhamento /  $\Psi$  – Ângulo de dilatância /  $e_o$  – Índice de vazios inicial /  $q_f$  – Tensão desvio de pico (ruptura) /  $\sigma_3$  – Tensão de confinamento.

Os ensaios monotônicos possibilitaram, ainda, avaliar a magnitude da tensão desvio cíclica, a ser aplicada nos ensaios de carga repetida, em relação a tensão

desvio de ruptura (tabela 2), evidenciando que ambas as trajetórias de tensão cíclicas que foram empregadas nos ensaios de carga repetida situam-se abaixo do limite de ruptura do material, porém em níveis de tensão bastante elevados.

Material	Ensaio	$q_{cici}$ (kPa)	n
ASIC	Escalão I	280	0,59
	Escalão II	350	0,68
Agregado de granito	Escalão I	280	0,74
	Escalão II	350	0,85

Tabela 2. Razão de tensão cíclica () para os ensaios de carga repetida.

## 4.2 Triaxiais Cílicos

Os resultados dos ensaios triaxiais cílicos sobre ambos os materiais são apresentados no gráfico da Figura 4, na qual, por simplificação, somente os valores associados a alguns dos ciclos são representados, nomeadamente (EN 13286-7, 2004): 1 a 20; 50; 100; 200; 400; 1.000; 2.500; 5.000; 7.500; 10.000; 12.500; 15.000; 20.000; 30.000; 50.000; 70.000; 100.000; 150.000; 200.000; 300.000; 400.000; 500.000.

Os índices de vazios iniciais dos corpos de prova (), após o condicionamento, foram de 0,74 para o ASIC e de 0,70 para o agregado de granito.

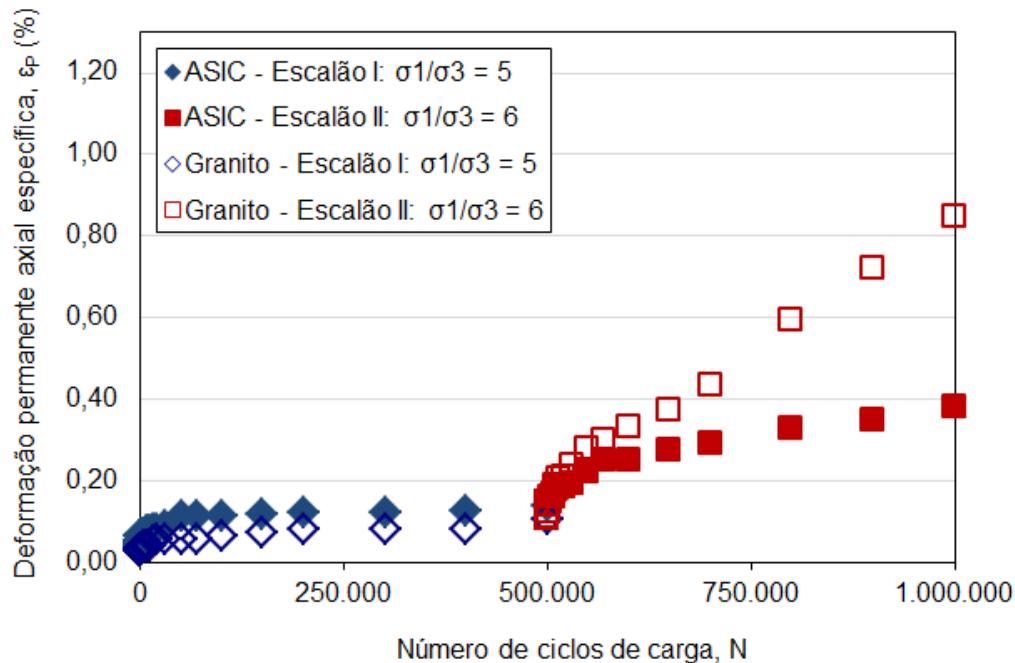


Figura 4. Curvas de deformação permanente específica (%), para o ASIC e para o agregado de granito, em função do número de ciclos de aplicação da carga repetida (N) para os dois escalões de carga ensaiados.

Observa-se que para o primeiro escalão de carga (Escalão I) a performance dos materiais foi bastante similar, sendo que o ASIC apresentou uma maior tendência de

estabilização das deformações permanentes, conforme critério expresso pelo modelo de Dawson e Wellner, no qual a deformação permanente é considerada estabilizada quando a taxa de acréscimo da deformação permanente a cada ciclo de aplicação de carga é da ordem de grandeza de  $10^7$  mm/ciclo de carga, sendo tal aspecto indicativo da ocorrência do fenômeno conhecido como *shakedown* (Dawson e Wellner, 1999 *apud* Werkmeister et al., 2001).

Para o segundo escalão de carga (Escalão II) observa-se que 500.000 ciclos não foram suficientes para conduzir nenhum dos materiais a estabilização das deformações permanentes. Ainda assim, o ASIC apresentou uma maior tendência de estabilização, que deve ser confirmada com ensaios futuros com um maior número de ciclos de carga. A Figura 5 apresenta as curvas de incremento de deformação permanente consoante o modelo proposto por Dawson e Wellner.

Foi analisada ainda a evolução do módulo de resiliência (MR) ao longo dos ciclos de carga, sendo que o ASIC, além de apresentar valores superiores de MR para ambos os escalões de carga, manifestou por ocasião da aplicação do carregamento mais gravoso (Escalão II) uma tendência de maior estabilidade do módulo ao longo dos ciclos de carga (Figura 6).

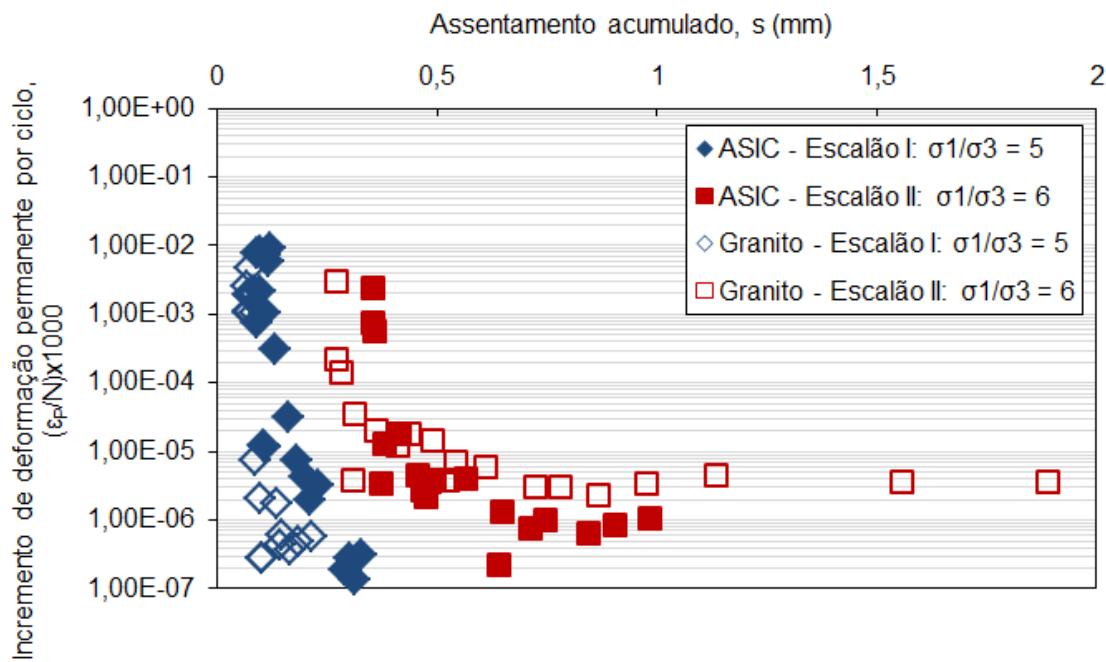


Figura 5. Pesquisa da ocorrência de *shakedown*, para o ASIC e para o agregado de granito segundo modelo de Dawson e Wellner.

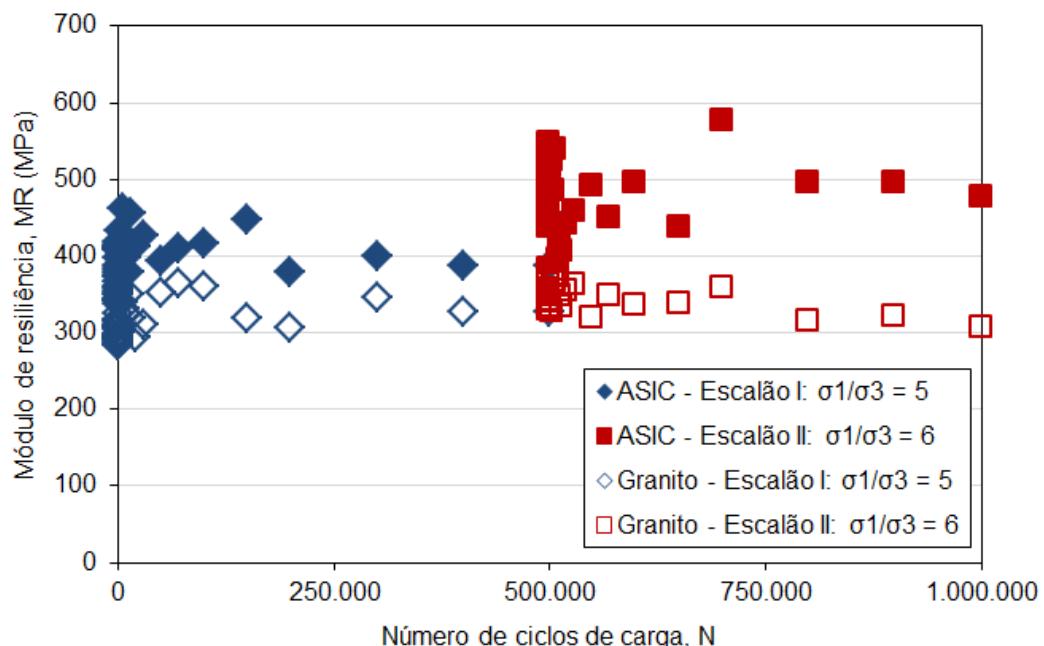


Figura 6. Módulo de resiliência ao longo dos ensaios.

Essa diferença verificada no comportamento plástico, e principalmente no elástico, deve-se a uma ligeira tendência do agregado de granito apresentar uma maior degradação devido a quebra e desgaste superficial dos grãos, provavelmente condicionado pelo regime de ciclagem mais próximo da ruptura neste material. A ocorrência de maior quebra de partículas no agregado de granito foi confirmada pela medição da alteração das curvas granulométricas dos materiais após os ensaios cíclicos, tendo sido utilizado para tal o índice de quebra, (Marsal, 1967). O índice obtido para o ASIC foi de 6,47% e para o agregado de granito foi de 7,39%.

A Figura 7 apresenta a degradação granulométrica para ambos os materiais analisados, indicando as perdas e ganhos de massa por peneira utilizada. No eixo das abscissas são plotadas as aberturas das peneiras e no eixo das ordenadas plotam-se as diferenças entre a massa retida em cada uma das peneiras,  $\Delta W_k$ , antes e após os ensaios cíclicos (em %).

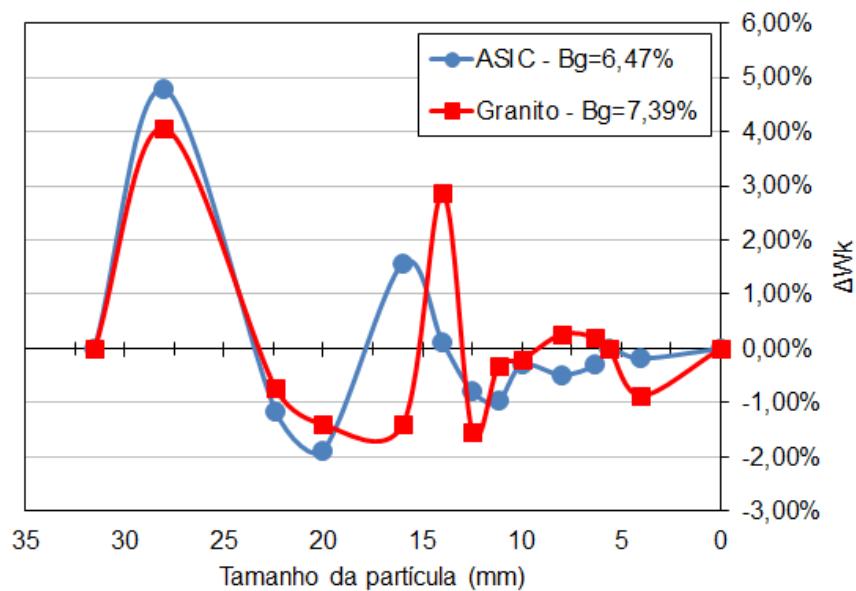


Figura 7. Alteração da curva granulométrica do lastro em escala reduzida ( $B_g$ ) para ambos os materiais.

Pode observar-se que a maior quebra se deu na peneira de maior abertura (#28mm), o que é coerente, visto que grãos maiores tendem a apresentar menor resistência à fragmentação (Lambe e Whitman, 1969). No entanto, a maior diferença entre a curva granulométrica do ASIC e do agregado de granito se deu nos grãos intermediários (#14mm).

## 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos estudos desenvolvidos até o momento, percebe-se que pode ser promissor o emprego da escória de aciaria na camada de lastro, o que pode vir a ser, para além da mais valia ambiental, um atrativo econômico às operadoras ferroviárias. Tal possibilidade de aproveitamento requer ainda estudos complementares, seja através de ensaios laboratoriais, análises numéricas, ou principalmente, pela observação de trechos experimentais instrumentados.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro, aos colaboradores do LabGEO da FEUP, pelo seu continuado apoio, e à Siderurgia Nacional da Maia pela disponibilização do ASIC.

## REFERÊNCIAS

Aingaran, S.; Le Pen, L.; Zervos, A.; Powrie, W. (2018). Modelling the effects of trafficking and tamping on scaled railway ballast in triaxial tests. *Transportation Geotechnics*, 15(1), pp. 84-90.

ASTM D5311 (2004). Standard test method for load cyclic triaxial strength of soil. *American Society for Testing Materials*, USA.

Bishop, A.W.; Green, G.E. (1965). The influence of end restraint on the compression strength of a cohesionless soil. *Géotechnique*, Vol. 15, pp. 243-266.

Castelo Branco, V.T.F. (2004). *Caracterização de misturas com o uso de escória de aciaria como agregado*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Delgado, B.G.; Viana da Fonseca, A.; Fortunato, E.; Paixão, A.; Coelho, D.R.F. (2017). A proposal for molding of reduced scale ballast samples for repeated load triaxial tests. *Proc. of 3th Symposium International GEORAIL*, Champs Sur Marne, France.

Donaghe, R.; Cohen, M. (1978). Strength and deformation properties of rockfill. *U.S. Army Engineer W.E.S., Technical report S-78-1*, Vicksburg, USA.

Dunn, S.; Bora, P.K. (1972). Shear strength of untreated road base aggregates measured by variable lateral pressure triaxial cell. *Journal of Mechanics*, Vol. 7, No. 2, pp. 131-142.

EN 12457-2 (2002). Characterisation of waste – Leaching – Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges: One stage batch test at liquid to solid ratio of 10l/kg for materials with particle size below 4mm (without or with size reduction). *European Committee for Standardization*: Brussels, Belgium.

EN 12457-4 (2002). Characterisation of waste – Leaching – Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges: One stage batch test at liquid to solid ratio of 10l/kg for materials with particle size below 10mm (without or with size reduction). *European Committee for Standardization*: Brussels, Belgium.

EN 13286-2 (2010). Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 2: test methods for laboratory reference density and water content - Proctor compaction. *European Committee for Standardization*: Brussels, Belgium.

EN 13286-7 (2004). Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 7: cyclic load triaxial test for unbound mixtures. *European Committee for Standardization*: Brussels, Belgium.

EN 13450 (2002). Aggregates for railway ballast. *European Committee for Standardization*: Brussels, Belgium.

Fernandes, G.; Gomes, R.C.; Sousa, G.M. Palmeira, E.M. (2006). Caracterização de escória de aciaria utilizada como lastro de ferrovia de tráfego pesado. *XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, Curitiba, Brasil.

Ferreira, S.M.R. (2010). *Comportamento mecânico e ambiental de materiais granulares. Aplicação às escórias de aciaria nacionais*. Tese de Doutorado, Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Guimarães, Portugal.

Fortunato, E.M.C. (2005). *Renovação de plataformas ferroviárias: Estudos relativos à capacidade de carga*. Tese de Doutorado, LNEC/Universidade do Porto, Lisboa, Portugal.

Fumagalli, E. (1969). Tests on cohesionless materials for rockfill dams. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, No. SM1, pp. 313-330.

Holtz, W.G.; Gibbs, H.J. (1956). Triaxial shear tests on previously gravelly soils. *Journal of soil mechanics and foundation engineering division*, ASCE, Vol. 82, No. SM 1, pp.1-22.

Indraratna, B.; Salim, W.; Rujikiatkamjorn, C. (2011). *Advanced rail geotechnology – ballasted track*. Taylor & Francis Group, London, England.

Kolisoja, A.K.; Brown, S.F.; Pell, P.S. (1998). Large scale dynamic triaxial tests. *III. Delprosjektrapport20*, Arbeidsfelleskapet KPG, Oslo, Norway.

Kuo, C.; Lin, C. (2017). Engineering performance of steel slag as railway ballast. *Proc. Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*, pp. 1859-1864.

Lambe, T.W.; Whitman, R.V. (1969). *Soil mechanics*. John Wiley & Sons: New York, USA.

Lowe, J. (1964). Shear strength of coarse embankment dam materials. *Proc. 8th Congress on Large Dams, Transactions*, Vol. III, International Commission on Large Dams, Paris, pp. 745–761.

Marachi, N.D.; Chan, C.K.; Seed, H.B. (1972). Evaluation of properties of rockfill materials. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, Vol. 98, No. SM 1, pp. 95-113.

Marsal, R.J. (1965). Soil properties-shear strength and consolidation. *Proceedings of 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 3, pp. 310-316.

Marsal, R.J. (1967). Large scale testing of rockfill materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Div.*: ASCE, Vol. 93, No. SM2, p. 23-47.

Mathur, S.; Soni, S.K.; Murty, A. (1999). Utilization of industrial wastes in low-volume roads. *Transportation Research Record*, Washington D.C. Nº. 1652, pp. 246-256

Morata, M.; Saborido, C. (2016). Slag aggregates with enhanced performance for railway track bed layers. *Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, pp. 1-17.

Morgan, J.R. (1966). The response of granular materials to repeated loading. 3rd Conf. *Proc., of ARRB*, ARRB, Victoria, Australia, pp. 1178–1192.

Pacheco, J.S. (2017). *Estudo sobre o uso da escória de aciaria de forno elétrico como agregado em misturas asfálticas*. Monografia de Conclusão de Curso. Centro Universitário Univates, Lajeado, Brasil.

Paute, J.L.; Hornych, P.; Benaden, J.P. (1996). Repeated load triaxial testing of granular materials in the French network of laboratoires des ponts et chaussées. *Proc., Flexible Pavements European Symp.* Euroflex 1993, Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 53–64.

Raymond, G.P.; Davies, J.R. (1978). Triaxial testing on dolomite railroad ballast. *J. Geotech. Eng. Div.*, 104(6), pp. 737–751.

RF.IT.VIA.015 (2015). Especificações técnicas para fornecimento de balastro novo. REFER – Rede Ferroviária Nacional: Portugal.

Rohde, L. (2002). *Escória de aciaria eléctrica em camadas granulares de pavimentos – Estudo laboratorial*. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Roscoe, K.H.; Schofield, A.N.; Wroth, C.P. (1958). On yielding of soils. *Géotechnique*, Vol. 8, N. 1.

Roscoe, K.H.; Schofield, A.N.; Thuarairajah, A. (1963). Yielding of clays in states wetter than critical. *Géotechnique*, Vol. 13, N. 3.

Selig, E.T.; Roner, C.J. (1987). Effects of particle characteristics on behavior of granular material. *Transportation Research Record 1131*, Transportation Research Board, National Research Council,

Washington, D.C., USA, pp. 1-6.

Selig, E.T.; Waters, J.M. (1994). *Track geotechnology and substructure management*. Thomas Telford Publishers, London.

Sevi, A.; Ge, L. (2012). Cyclic Behaviors of Railroad Ballast within the Parallel Gradation Scaling Framework. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 24, pp. 797–804.

Shenton, M.J. (1978). Deformation of railroad ballast under repeated load conditions. *Railroad Track Mechanics and Technology*, New York, Pergamon Press.

Skoglund, K.A. (2002). *A study of some factors in mechanistic railway track design*. PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway.

Suiker, A.S.J. (2002). *The mechanical behaviour of ballasted railway tracks*. Ph.D. Thesis. Delft University of Technology, Netherlands.

Suiker, A.S.J.; Selig, E.T.; Frenkel, R. (2005). Static and Cyclic triaxial testing of ballast and subballast. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, N. 6.

Vallerga, B.A.; Seed, H.B.; Monismith, C.L.; Cooper, R.S. (1956). Effect of shape, size and surface roughness of aggregate particles on the strength of granular materials. *ASTM STP 212*, pp.63-76.

Varadarajan, A.; Sharma, K.G.; Venkatachalam, K.; Gupta, A.K. (2003). Testing and modeling of two rock fill materials. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 129(3), pp. 206–218.

Werkmeister, S.; Dawson, A.R.; Wellner, F. (2001). Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept. *Transportation Research Board, 80th Annual Meeting*, Transportation Research Board, Washington, DC.

## CARACTERIZAÇÃO EM FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA DE FIOS DE ARAME DE SOLDA

**Ingrid Ariani Belineli Barbosa**

Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos - Prof. Jessen Vida

São José dos Campos – São Paulo

**Heide Heloise Bernardi**

Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos - Prof. Jessen Vida

São José dos Campos – São Paulo

**William Marcos Muniz Menezes**

Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos - Prof. Jessen Vida

São José dos Campos – São Paulo

**RESUMO:** O objetivo deste trabalho foi determinar a vida em fadiga de materiais na forma de fios sob esforços de flexão rotativa e também identificar parâmetros de carregamento mecânico e deformação associados às características da ruptura gerada pela fadiga, a fim de se estabelecer procedimentos para prevenção dessas falhas. Utilizou-se como material de teste um arame de solda da classe AWSA5.18 com diâmetro de 0,80 mm. Os corpos de prova, na forma de fio, foram submetidos à rotação média de 611 rpm com um raio de flexão de 80 mm. Os resultados mostram que o arame de solda suporta em torno de 10.000 ciclos até a fratura, e as análises fractográficas indicaram uma fratura combinada de falha por fadiga e fratura dúctil.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fadiga, Flexão rotativa, Arame de solda.

**ABSTRACT:** The objective of this work was to determine the fatigue life of wire materials by rotary bending and to identify parameters of mechanical loading and deformation associated with the characteristics of the rupture generated by fatigue to prevent failures. An AWS A5.18 welding wire with diameter 0.80 mm was used as the specimen. The welding wire specimens were subjected to an average rotation of 611 rpm with a bending radius of 80 mm. The results show that the welding wire supports around 10,000 cycles until its fracture, and SEM image analysis indicates a combined fracture of failure and ductile fractures.

**KEYWORDS:** Fatigue, Rotating beam, Welding wire.

### 1 | INTRODUÇÃO

O estudo do fenômeno da fratura do material por esforços mecânicos cílicos apresenta especial relevância na flexão rotativa de fios, dado aos processos de fabricação e utilização dos fios metálicos, que invariavelmente impõem ao arame a movimentação entre polias ou mesmo seu deslocamento por sinuosas guias de máquinas.

O arame de solda classe AWS A5.18 estudado neste trabalho foi produzido pela siderúrgica Gerdau, sendo indicado para processos industriais em soldagens semiautomáticas, mecânicas e robotizadas. Sua versatilidade permite o uso em diversas aplicações como em fabricação de carrocerias automotivas, caldeirarias, e em construções mecânicas (GERDAU, 2017). O arame de solda AWS A5.18 é utilizado em soldagem MIG (Metal Inert Gas), e durante sua utilização em soldagem o fio não sofre esforços mecânicos de forma considerável. No entanto, a necessidade de conhecer as características mecânicas deste tipo de material é importante para o controle do processo de conformação dos fios de solda.

A falha por fadiga de um material metálico deve-se ao carregamento mecânico cíclico, capaz de gerar danos progressivos e localizados. A tensão aplicada ao material no processo de fadiga é inferior ao limite de escoamento. Muito embora a fadiga possa ser estudada sob condições de esforços solicitantes puros, neste trabalho utilizaram-se os ensaios de flexão rotativa para avaliar a resistência do material à fadiga (ASKELAND & WRIGHT, 2014). Dessa forma, a vida em fadiga é determinada pelo número total de ciclos que o material consegue resistir até a sua ruptura e/ou falha (DIETER, 1981).

Materiais submetidos à fadiga mecânica apresentam uma fratura característica, cuja morfologia pode apresentar: (a) marcas de praia que são formadas por cada parada da máquina ou por mudança de carga; (b) estrias que são formadas por cada ciclo de carga aplicado e (c) dimples (microvoids) que iniciam a formação das trincas (OLSON, SIEWERT, LIU, & EDWARDS, 1993), (ESAB, 2016).

Baseado nisso, o objetivo deste trabalho foi avaliar mecanicamente um arame de solda por meio de ensaio de fadiga por flexão rotativa, e posteriormente foi realizada a fractografia do material por microscopia eletrônica de varredura.

## 2 | EXPERIMENTAL

### Material

Neste trabalho foi estudado um arame para solda classe AWS A5.18 tipo ER70S-6 com limite de escoamento da ordem de 400 MPa e diâmetro nominal de 0,80 mm (GERDAU, 2017).

O fio de arame de solda estudado trata-se de um aço de baixo carbono (inferior a 0,25% p. carbono) submetido à normalização, trefilação, e tratamento de galvanização eletrolítica para cobreamento.

De acordo com a Eq. 1 do Instituto Internacional de Soldagem (International Institute of Welding (IIW)) (OLSON, SIEWERT, LIU, & EDWARDS, 1993), o carbono equivalente ( $C_{eq}$ ) de um arame de solda classe AWS A5.18 tipo ER70S-6 corresponde à 0,567. O  $C_{eq}$  (% p.<sub>max</sub>) foi calculado usando as informações da composição química do material apresenta na Tabela 1.

Elementos (p. %)	C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo	V
%Min	0,06	0,8	1,4	-	-	-	-	-	-	-
%Máx	0,15	1,15	1,85	0,035	0,025	0,5	0,15	0,15	0,15	0,03

Tabela 1 Composição química do arame AWS A5.18 (GERDAU, 2017).

O C<sub>eq</sub> é associado à soldabilidade, quanto menor o carbono equivalente, menor a probabilidade de obter um segundo estagio de precipitação (carboneto) ou uma microestrutura martensítica e consequentemente, uma melhor soldabilidade do aço (0,40 ≤ C<sub>eq</sub> ≤ 0,60 soldabilidade média). Na soldabilidade, é importante conhecer a composição química do material base para selecionar a temperatura correta de pré-aquecimento (ESAB, 2016). O carbono equivalente e a liga do material são dois fatores importantes e necessários para determinar a temperatura de pré-aquecimento. Quanto maior for o número do carbono equivalente do material, mais alta será a temperatura para o pré-aquecimento (FORTES & ARAÚJO, 2005).

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad (1)$$

### Ensaio de fadiga por flexão rotativa

Os ensaios de fadiga por flexão rotativa foram realizados na máquina modelo ROTATFLEX 180 desenvolvida por Menezes (WMM, 2013), (MENEZES, MATHEUS & OTUBO, 2014). O comprimento das amostras foi de 394 ± 7 mm, suficientes para a fixação no mandril rotativo da máquina e para a obtenção de uma curva de semicircunferência.

Todos os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de fadiga por flexão rotativa utilizando-se um raio de curvatura em flexão de 80 mm; para tal flexão obteve-se uma deformação teórica de 0,5% ( $\epsilon_a$ ), o que significa deformação máxima em tração ou compressão na superfície mais externa do fio flexionado. A velocidade de rotação em torno de 611 rpm teve pequena variação, apresentando um desvio padrão de 6,2 rpm.

Todos os corpos de prova foram ensaiados em temperatura ambiente até a sua ruptura. A Figura 1 apresenta o desenho esquemático da máquina utilizada no teste.

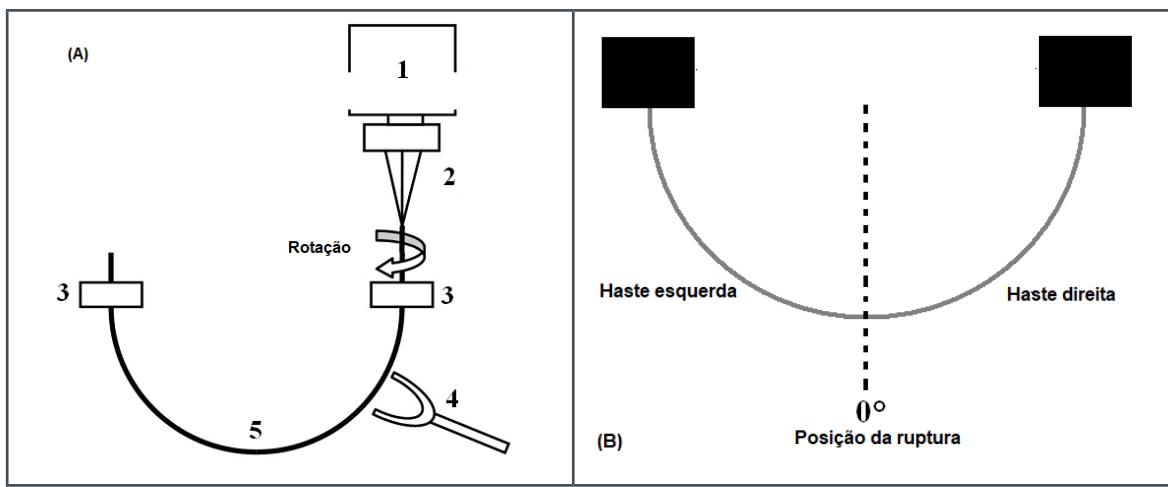


Figura 1 Desenho esquemático: (A) Máquina ROTATFLEX 180 indicando (1) o motor, (2) o mandril para fixar a amostra, (3) os mancais de suporte da amostra, (4) o sensor de ruptura da amostra, e (5) a amostra flexionada (WMM, 2013), (B) os parâmetros mecânicos do teste.

## Fractografia

As análises fractográficas foram realizadas com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca TESCAN modelo VEGA3. A tensão de aceleração utilizada foi de 25kV. As imagens foram geradas no modo de elétrons secundários (SE).

## 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Material

A vida em fadiga por flexão rotativa de um material na forma de fio é determinada pelo número de ciclos de esforço, sob certas condições como velocidade média de rotação do fio ( $\omega$ ), diâmetro do fio (d), raio de flexão do fio (R) e sua deformação ( $\epsilon$ ). Quanto à deformação do fio, dada à condição de flexão rotativa cíclica foi considerada  $\epsilon_{ac}$  como máxima deformação em compressão, e  $\epsilon_{at}$  como máxima deformação em tração. Para este trabalho considerou-se também que os efeitos da fadiga e do encruamento foram os mesmos para deformação em tração e em compressão dada a natureza similar desses fenômenos em pequenas deformações. Assim denominou-se tanto  $\epsilon_{ac}$  e  $\epsilon_{at}$  como simplesmente  $\epsilon_a$ .

Em relação à deformação ( $\epsilon_a$ ) esta foi calculada de acordo com a Eq. 2, considerando-se a superfície neutra no centro do fio, longitudinalmente. Para o cálculo da deformação  $\epsilon_a$  do arame de solda considerou-se seu diâmetro de 0,80 mm e o raio de flexão de 80 mm, obtendo-se como resultado  $\epsilon_a = 0,50\%$ .

$$\varepsilon_a = \frac{d}{2R} \times 100\% = \frac{0,80}{2 \times 80} \times 100\% = 0,50\% \quad (2)$$

Para determinação da deformação máxima na condição elástica ( $\varepsilon_e$ ), de acordo com a Eq. 3, consideraram-se os seguintes parâmetros do material: limite de escoamento (LE) de 400 MPa e módulo de elasticidade (E) de 210 GPa. Obteve-se como resultado final  $\varepsilon_e = 0,19\%$ .

$$\varepsilon_e = \frac{LE}{E} = \frac{400}{210000} = 0,0019 \quad (3)$$

A deformação é diretamente proporcional ao diâmetro do fio, como pode ser verificado na Eq. 3; assim, infere-se que a seção circular no centro do fio, relativa a 38% de seu diâmetro, esteve submetida a ciclos de deformação puramente elástica e consequentemente ciclos de fadiga, ao passo que a seção transversal que corresponde à uma coroa de círculo mais externa, submetida à uma deformação superior a 0,19% sofreu deformação com ciclos de encruamento. Ou seja, para uma seção transversal do fio, durante o ensaio de fadiga por flexão rotativa, a distribuição da deformação do centro até a superfície do fio ocorreu como apresentado na Figura 2, e pode ser descrita como: (a) no centro do fio a deformação devida à flexão foi desprezível ou mesmo nula, (b) do centro do fio até 38% de seu diâmetro ocorreu ciclagem sob deformação elástica e, portanto em fadiga e (c) a região entre 38% (0,38 d) do diâmetro do fio até sua superfície sofreu deformação elasto-plástica e consequentemente encruamento do material.

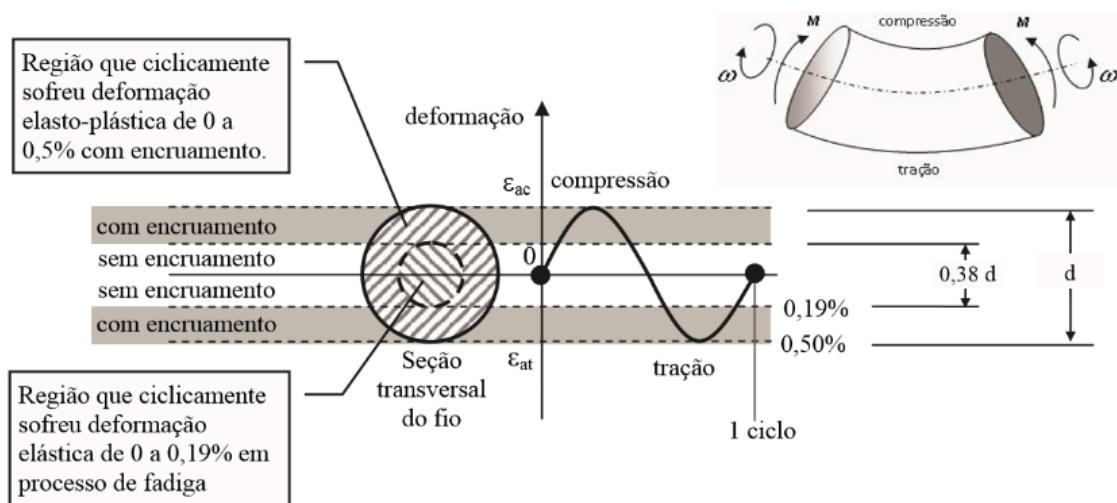


Figura 2 Deformação do fio segundo sua seção transversal.

Para o arame estudado neste trabalho, foi possível calcular (Eq. 4) o diâmetro

da região que sofreu deformação elástica, considerando-se o raio de curvatura (R) de 80 mm e deformação máxima em condição elástica ( $\epsilon_e$ ) de 0,0019 (valor obtido na Eq. 3). Obteve-se um diâmetro (d) de 0,304 mm, representando a região que sofreu deformação elástica.

$$\epsilon_e = \frac{d}{2R} \rightarrow 0,0019 = \frac{d}{2 \times 80} \rightarrow d = 0,304 \text{ mm} \quad (4)$$

### Fadiga por flexão rotativa

A Tabela 2 apresenta os resultados do ensaio de fadiga por flexão rotativa para os CDP's de arame de solda. Os 4 CDP's estudados suportaram em média  $10,4 \times 10^3$  ciclos até a sua ruptura com uma velocidade média de rotação de 611 rpm, por um período médio de 17 minutos.

Variáveis	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
Número total de ciclos (Nf)	9599	10747	10177	10903
Tempo até ruptura (min)	15	17	17	18
Velocidade de rotação (rpm)	615	618	606	606
Comprimento da haste direita após ruptura (mm)	177	195	133	183
Posição da ruptura	3°	3°	2°	3°

Tabela 2 Resultados do ensaio de fadiga por flexão rotativa para os CDP's de arame de solda

### Fractografia

Com base nas análises fractográficas e nos cálculos obtidos, observou-se uma superfície de fratura combinada: fratura por fadiga e fratura dúctil. Nas bordas da superfície do fio ( $\epsilon_a = 0,5\%$ ), durante o processo de fadiga, esta região sofre deformação plástica e encruamento, resultando em locais propícios para o surgimento de trincas. Figura 3a mostra a propagação das trincas, e a área delimitada pelo círculo branco corresponde à região que sofreu deformação elástica ( $d = 0,304 \text{ mm}$ ). A propagação das trincas ocorre em direção ao centro do fio na região de deformação elástica ( $\epsilon_a = 0$ ).

A propagação das trincas que iniciam na superfície de fratura do fio (Figura 3b) ocorre no sentido da máxima amplitude de deformação (superfície cilíndrica) para mínima amplitude (zero) no centro do fio, que corresponde à sua linha neutra em flexão rotativa (WMM, 2013).

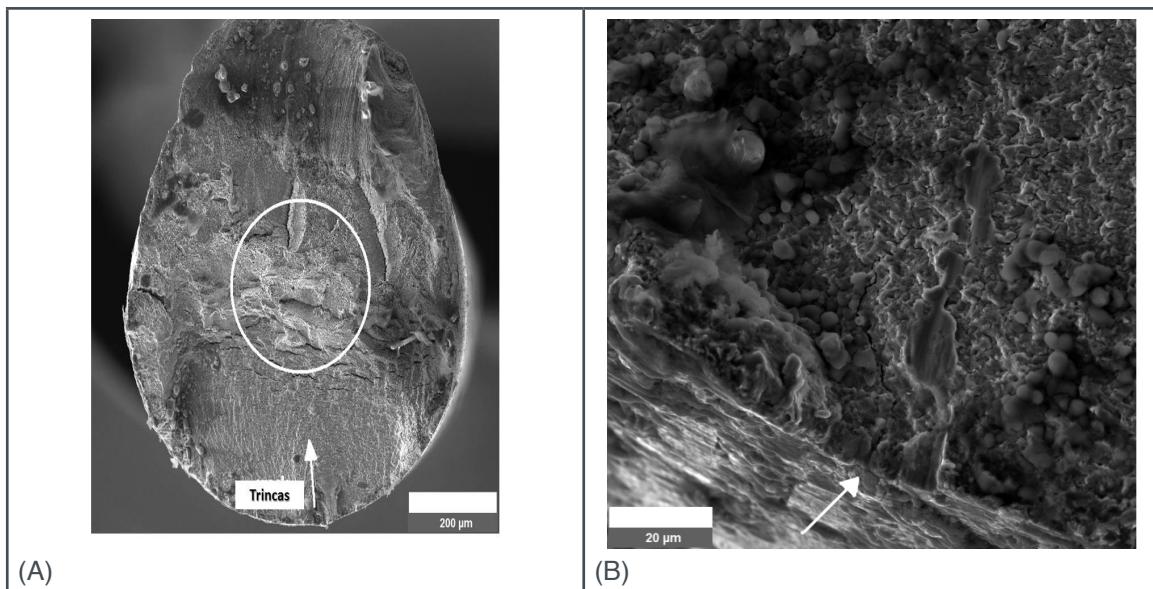


Figura 3 Fio e superfície da fratura mostrando (A) nucleação e propagação de trincas, e (B) vista detalhada do inicio das trincas (SEM-SE).

Com a carga cíclica, as trincas começarão a se formar na região de maior concentração de tensão após um número crítico de ciclos. As trincas se propagarão e, após certa distância, a seção transversal não poderá mais suportar as cargas e ocorrerá a ruptura final. Em geral, as falhas por fadiga ocorrem da seguinte forma: (A) deformação plástica cíclica antes do início das trincas; (B) inicio e propagação de trincas, e (C) ruptura final (MILLS, 1987).

A Figura 4 mostra que a fratura combinada resultou em características contrastantes entre a borda da superfície (origem da fratura) e o centro do fio (fratura final). Na superfície do fio, onde ocorre o encruamento do material, ocasionou uma fratura com características do tipo dúctil (região A da Figura 4a). A superfície da fratura junto à origem da trinca tende a ser lisa (Figura. 4b) (DIETER, 1981). Na borda pode-se dizer que a morfologia da fratura é relativa à completa fadiga, enquanto que no centro é relativa à fratura sem fadiga (fratura dúctil). A fratura dúctil ocorre praticamente de forma instantânea quando a tensão mínima para ruptura é atingida em função da redução da área da seção (regiões B da Figura 4a).

Na região correspondente a fratura dúctil, pode ser observada uma superfície rugosa, fibrosa e a presença de dimples, que são características de fratura dúctil (Figura 4b). Dimples são resultantes do micro-alongamento dos grãos até o seu rompimento. Desta forma, a fratura é precedida por um acúmulo de energia em forma de deformação plástica, ou seja, a presença de dimples indica que ocorreu fratura dúctil no material.

O tipo de carga que o material sofreu durante a sua fratura determina o tipo de dimples produzidas, e a presenças de estrias indica o sentido e direção de propagação das trincas. Dimples equiaxial são formados sob condições de deformação plástica uniforme na direção da tensão de tração aplicada, tipicamente produzido sob condições de sobrecarga de tração. Por outro lado, dimples alongados resultam de condições

de deformação plástica não uniforme, como flexão. Estes dimples são alongados na direção da propagação das trincas e revelam a origem da fratura. Figuras 4c e 4d mostram dimples equiaxial e alongados, respectivamente.

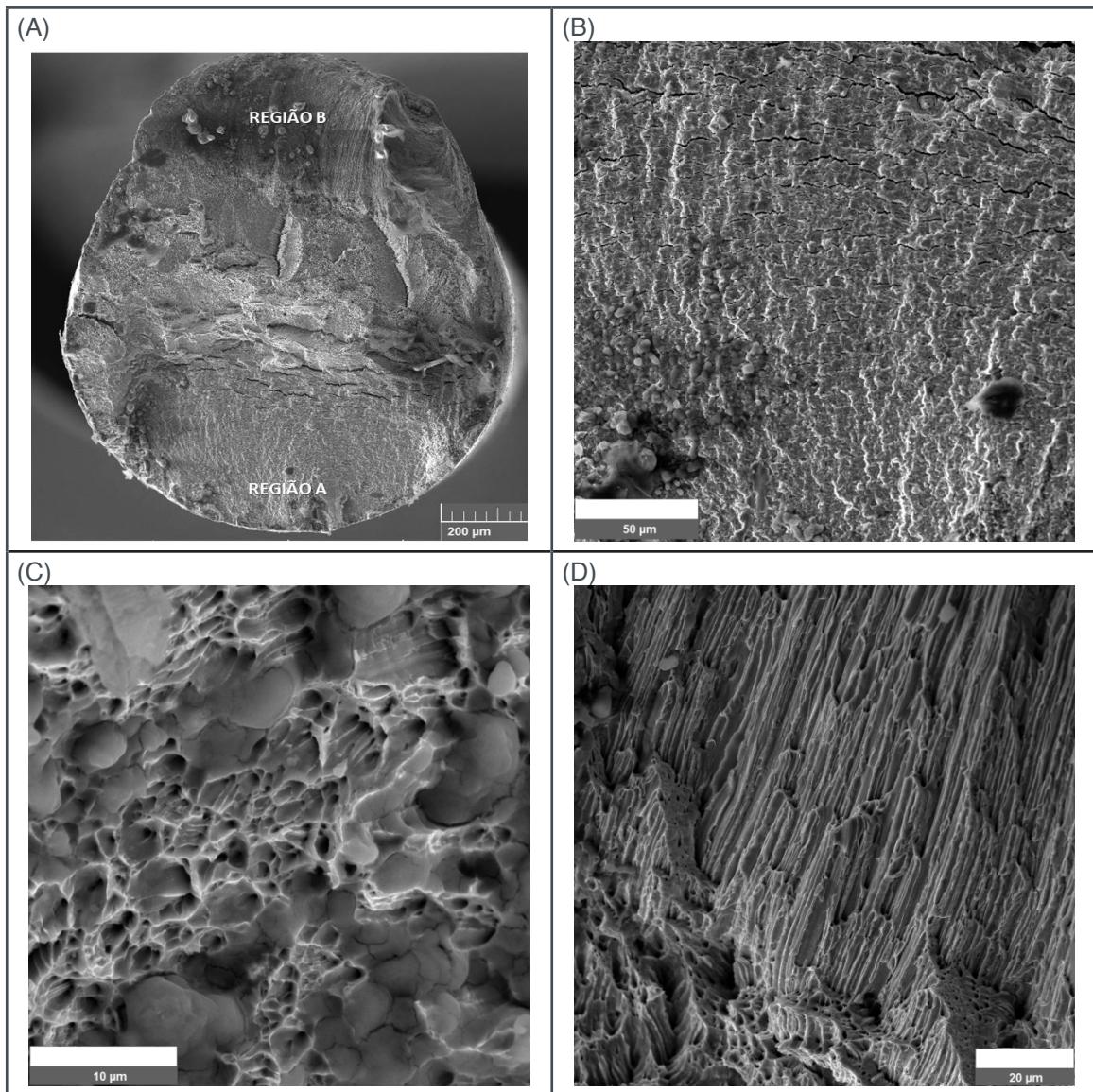


Figura 4 Fractografia do fio de arame de solda mostrando: (A) Macrografia da superfície da fratura; (B) Vista detalhada da região A; (C) A presença de dimples equiaxial, e (D) a presença de dimples alongados (SEM-SE).

## 4 | CONCLUSÃO

Após as análises dos testes de fadiga por flexão rotativa nos CDP's de arame de solda AWS A5.18 tipo ER70S-6, conclui-se que as características da falha é ocasionada pela combinação de fratura por fadiga e fratura dúctil. No entanto, em função do encruamento que ocorre na superfície do material, a fratura possui um aspecto de fratura frágil na borda do fio. Embora tenha aspecto de fratura frágil, é uma fratura dúctil com um desenvolvimento progressivo gerado pelo encruamento na direção radial.

## 5 | AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Materiais e Processos do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) pela utilização do MEV.

## REFERÊNCIAS

- Askeland DR, Wright WJ. **Ciência e engenharia dos materiais**. 3 ed. São Paulo: Cengage Learning; 2014.
- Dieter GE. **Metalurgia Mecânica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois; 1981.
- ESAB. **Technical Handbook Submerged Arc Welding** [internet]. ESAB; 2016. [Cited 2018 Jan. 27]. Available from: <http://assets.esab.com/asset-bank/assetfile/12295.pdf>
- Fortes C, Araújo W. **Apostila de metalurgia da soldagem** [internet]. Contagem: ESAB; 2005. [Cited 2018 Jan. 17]. Available from: <http://www.esab.com.br/pt/education/apostilas/upload/apostilametalurgiasoldagem.pdf>
- GERDAU. **Arames para Solda** [internet]. São Paulo: Gerdau; 2017. [Cited 2017 Aug. 8]. Available from: <https://www.gerdau.com.br/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/catalogo-arames-para-solda.pdf>
- Menezes WMM, Matheus TCU, Otubo J. **Projeto, fabricação e qualificação de equipamento para flexão rotativa de fios superelásticos de NiTi em ensaios de fadiga**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. 2014;11(1):14-21. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.2014.005>
- Menezes WMM. **Influência do teor de carbono e oxigênio sobre a vida em fadiga por flexão rotativa de fios de ligas NiTi com Efeito Memória de Forma** [PhD Thesis]. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica; 2013
- Mills K, editor. **ASM Handbook: fractography**. v. 12. Novelty: ASM International; 1987.
- Olson DL, Siewert TA, Liu S, Edwards GR, editors. **ASM Handbook: welding, brazing and soldering**. v. 6. Novelty: ASM International; 1993.

# CAPÍTULO 7

## ESTUDO DA MICROESTRUTURA NA ZONA TERMICAMENTE AFETADA COM A VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SOLDAGEM

**Luís Henrique Pires da Silva**

Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)

Engenharia Mecânica

São João del-Rei – Minas Gerais

**Alex Sander Chaves da Silva**

Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)

Departamento de Engenharia Mecânica

São João del-Rei – Minas Gerais

STUDY OF THE MICROSTRUCTURE IN  
THE AREA THERMALLY AFFECTED  
WITH THE VARIATION OF THE WELDING  
PARAMETERS

**ABSTRACT:** This work presents the behavior of a SAE 1045 steel in the microstructural environment, when it was submitted to the MIG / MAG welding process with variation of some essential parameters in the welding procedure. Some samples were welded with different values of current, voltage and protection gas and later their microstructures and microhardness were analyzed and compared with that of the base steel received from the manufacturer. It was possible to conclude that the soldering process in question contributed to a significant variation of the microstructure compared to the base steel, but there were no large variations of samples for welded samples with different parameters.

**KEYWORDS:** Thermally affected zone, microstructure, microhardness, parameters.

### 1 | INTRODUÇÃO

Reducir custos, seja talvez, o grande desafio da engenharia. Tornar processos e produtos os mais eficazes o possível com o mínimo de perdas e orçamentos reduzidos, fomenta os engenheiros a otimizar o seu objeto

**RESUMO:** Este trabalho apresenta o comportamento, da zona termicamente afetada, de um aço SAE 1045, no âmbito microestrutural, quando este foi submetido ao processo de soldagem MIG/MAG com variação de alguns parâmetros essenciais no procedimento de solda. Algumas amostras foram soldadas com diferentes valores de corrente, tensão e gás de proteção e posteriormente foram analisadas e comparadas suas microestruturas e microdurezas, com a do aço base recebido do fabricante. Foi possível concluir que o processo de solda em questão, contribuiu para uma significante variação da microestrutura, comparado com o aço base, porém não houve grandes variações de amostras para amostras que foram soldadas com diferentes parâmetros.

**PALAVRAS CHAVE:** Zona termicamente afetada, microestrutura, microdureza, parâmetros.

de trabalho, afim de torná-lo competitivo no mercado consumidor. A zona termicamente afetada (ZTA), em um processo de soldagem, pode influenciar muito a qualidade do produto ou serviço feitos. Estudá-la e analisar o seu comportamento quanto a microestrutura do material soldado, gerará uma série de respostas convenientes no sentido de aprimorar os parâmetros de soldagem evitando perdas e proporcionando um serviço ou produto com um maior grau de qualidade.

Soldagem é a operação que visa a união de duas ou mais peças, assegurando na junta, a continuidade das propriedades mecânicas, químicas e físicas. O arco elétrico consiste de uma descarga elétrica, sustentada através de um gás ionizado, a alta temperatura, conhecido como o plasma, podendo produzir energia térmica suficiente para ser usado em soldagem pela fusão localizadas das peças a serem soldados (MODENESI, 2008). Nesta pesquisa será utilizado o processo MIG/MAG pela sua grande utilização, tanto em grandes empresas nos processos automatizados, quanto em oficinas de pequenos trabalhos. É fundamental para o sucesso de uma boa qualidade do cordão de solda MIG ou MAG, a correta seleção dos parâmetros de soldagem, tais como intensidade de corrente, tensão do arco, velocidade de soldagem, tipos de gases de proteção, entre outros (MOREIRA, 2008).

O arco elétrico tem um grande poder calorífico e consegue atingir altas temperaturas, causando a fusão de metais com atos pontos de fusão. O calor produzido não fica somente no cordão de solda, por radiação e condução, ele vai se afastando para as extremidades da peça a ser soldada. Essa área do material não se funde, mas dependendo da temperatura obtida no processo, pode-se acontecer uma mudança na microestrutura ou alterações nas propriedades do material. A essa área dá-se o nome de zona termicamente afetada (ZTA). O cordão de solda tem a característica de manter as propriedades físicas, químicas e mecânicas do material, a ZTA, por sua vez, tende a ser uma região que pode apresentar algum tipo de defeito indesejado. Dependendo do processo, do operador e/ou do tipo de material, podem ocorrer mudanças bruscas na microestrutura e nas propriedades mecânicas, gerando complicações no trabalho que estes componentes realizarão.

Segundo Serna (2001), a intensidade da corrente e a tensão de soldagem, parâmetros que sofrerão alterações nesse experimento, exercem papel importante no ciclo térmico e na distribuição de calor nos processos de soldagem, o que influencia a ZTA e a microestrutura do metal de base. A difusão de calor para o metal de base é fortemente influenciada pela temperatura da poça de fusão e pela velocidade de soldagem. Soldagens com alta potência e alta velocidade reduzem esse gradiente térmico (PERINI, 2008).

Saber como a microestrutura e suas propriedades mecânicas, se comportam perante as mudanças de parâmetros de soldagem, irá otimizar a produção e a manutenção, no âmbito de facilitar a operação, evitar perdas de eletrodos e gás protetor, gastos desnecessários com energia elétrica e um produto resultante mais confiável. A microestrutura da zona termicamente afetada, resulta das transformações

estruturais do metal base associada com os ciclos térmicos e deformações durante a soldagem. Para fins de estudo, pode-se considerar a ZTA dos aços transformáveis como sendo formada por diferentes regiões, à medida que se afasta do cordão de solda: região de granulação grosseira, região de granulação fina, região intercrítica, região subcrítica (PERINI, 2008). Onde cada uma dessas regiões apresentam suas devidas características mecânicas e microestruturais.

## 2 | MICROESTRUTURA

A compreensão dos diagramas de fases para sistemas de ligas é extremamente importante, pois existe uma forte correlação entre microestrutura e as propriedades mecânicas, e o desenvolvimento da microestrutura de uma liga está relacionado às características de seu diagramas de fases. (CALLISTER, 2000). O diagrama de fases mais utilizados é o Ferro-Carbono ou Ferro-Carbeto de ferro. Esse diagrama de fases mostra o comportamento de ligas formadas por ferro e carbono, tanto na variação da temperatura quanto a variação das composições. Com ele consegue-se analisar as variações da microestrutura dos aços e ferros fundidos, dois dos materiais mais usados nas indústrias.

Ferrita, austenita, cementita são fases que se apresentam nos aços. A ferrita possui uma estrutura cristalina ccc (cúbica de corpo centrada) e é relativamente dúctil. A austenita apresenta estrutura cristalina cfc (cúbica de face centrada). A cementita ( $Fe_3C$ ) tem características de maior dureza e fragilidade e se forma à uma concentração de 6,7% de carbono no ferro, se apresenta nos aços e ferros fundidos em menores concentrações, que a de formação, e coexiste junto com a ferrita e austenita. Perlita é uma microestrutura em que seus grãos são formados por lamelas de ferrita e cementita, e tem características mecânicas intermediárias as que a compõe. A bainita também é composta de ferrita e cementita porém, esta tem uma estrutura de agulhas ou placas devido a sua temperatura de transformação e pode ser dura ou dúctil. Geralmente é conseguida em transformações a temperaturas mais baixas. Uma outra microestrutura é a martensita, ela é obtida através do resfriamento extremamente rápido da austenita, sem deixar que ocorra a difusão do carbono. Esta tem características de dureza e fragilidade e os grãos tem uma disposição alongada, lembrando formato de agulhas.

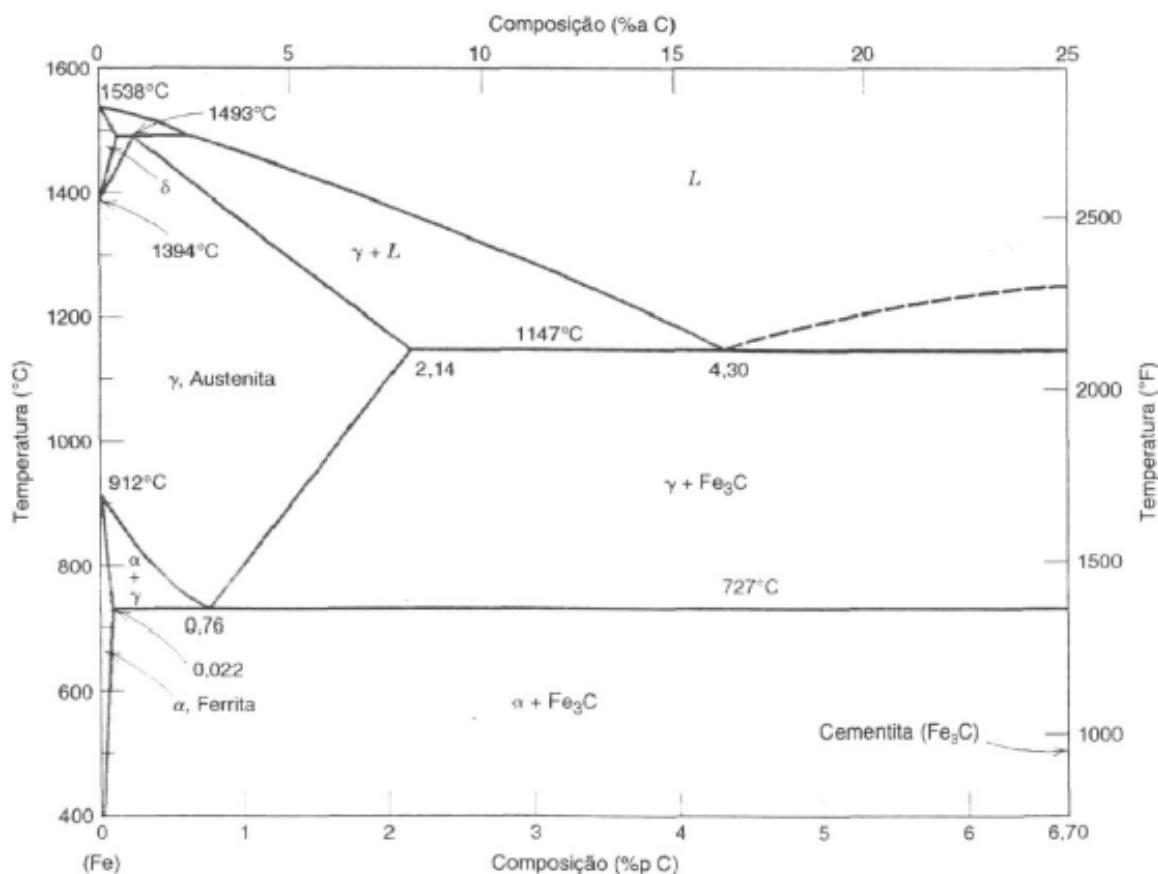


Figura 1. Diagrama de fases Ferro-Carbono.

Fonte: CALLISTER, 2000.

Através da metalografia podemos perceber a concentração de carbono, ferrita e perlita da peça e fazer algumas relações quanto a resistência mecânica, ductilidade, entre outros. O exame metalográfico de uma amostra envolve três estágios fundamentais de preparação do corpo de prova: preparação da superfície, ataque químico e observação no microscópio.

Outro fator importante a ser analisado é a microdureza. Podemos definir a dureza do material como sendo a capacidade que este tem de resistir à penetração de outro material. Assim podemos definir a dureza Vickers como sendo a capacidade de um material resistir à penetração de uma ponta de diamante com forma piramidal (PONTES, 2013). A microdureza vickers é encontrada realizando o cálculo a partir das diagonais da geometria do trapézio, deixado na superfície do material pelo penetrador, e da carga aplicada. Muitos microdurometros já disponibilizam o valor da dureza, em seus displays no momento do ensaio.

## 3 | METODOLOGIA

Neste trabalho foram analisados a microestrutura da zona termicamente afetada (ZTA), com variação dos parâmetros do processo de soldagem MIG/MAG. Todos os experimentos foram realizados nos laboratórios de fabricação e de metalografia da Universidade Federal de São João Del Rei (UFSJ). Para a realização da solda, foi

utilizada a máquina de solda White Martins modelo VL250, um arame eletrodo de 0,8 mm e uma mistura de gás Argônio + oxigênio, que caracteriza o processo MIG. Afim de tornar o processo de solda melhor e mais eficaz, foi utilizado um dispositivo que permite a mecanização do procedimento. O funcionamento do equipamento, se dá através de um motor elétrico, de baixa rotação, que gira um eixo acoplado em um sistema de transmissão que movimenta uma pequena mesa, onde são colocadas as amostras a serem soldadas. A tocha é fixada em um pedestal de modo a ficar com as corretas altura e angulação. O operador só precisa posicionar as amostras, de modo a centralizar com o eletrodo, e iniciar o processo apertando o gatilho da tocha e o botão de avanço da mesa. O dispositivo pode ser visto na figura 2.



Figura 2. Dispositivo de mecanização do processo de soldagem.

### 3.1 Preparação das amostras para soldagem

A princípio foram cortadas 12 chapas de 100 X 100 X 2,5 mm, de um aço SAE1045, disponível no laboratório de fabricação. Todos os procedimentos de corte foram realizados em uma máquina serra de fita com fluido de corte/refrigerante, disponível no laboratório, afim de não alterar a estrutura da amostra. A etapa seguinte ao corte foi a realização da remoção de todo o óxido presente na superfície da peça. Este trabalho foi realizado com o auxílio de uma lixadeira manual com uma escova de aço rotativa.

### 3.2 Soldagem

Em cada par de chapas foi realizado uma solda com junta de topo sem fresta, com variação em alguns parâmetros e manutenção de outros. Como discutido anteriormente existem vários parâmetros que modificados aumentam ou diminuem a intensidade da solda. Essas variações de intensidades, tendem a modificar a transferência de calor para a ZTA, e consequentemente influenciar na microestrutura. Os parâmetros definidos a serem variados foram a corrente, voltagem e vazão do gás de trabalho. Corrente e tensão são medidas chaves para qualquer operação de solda. Para a máquina utilizada no experimento, os valores de corrente e tensão, são variados juntos, de acordo com uma tabela, disponibilizada na carcaça do próprio equipamento.

Uma das principais funções do gás de proteção é criar uma atmosfera ionizável

para a abertura do arco elétrico. Quanto maior a vazão do gás, maior a ionização e consequentemente uma maior propagação de calor sobre a peça. A vazão do gás pode ser facilmente regulada pelos manômetros presentes nos cilindros. Os outros parâmetros como velocidade de alimentação do arame, velocidade de soldagem e altura da tocha, por exemplo, foram mantidos constantes. A apostila de soldagem MIG/MAG da ESAB (2005), fornece uma série de tabelas com faixas de valores ideias para cada condição de soldagem. Os valores dos parâmetros dessa pesquisa foram retirados coerentemente desta apostila. Na figura 3, é possível ver como ficou o cordão de solda de uma das amostras.



Figura 3. Cordão de solda da amostra 6.

A tabela 1 apresenta a intensidade e a variação dos parâmetros em questão.

Amostra	Parâmetro		
	Corrente (A)	Tensão (V)	Vazão do gás (l/min)
1	80	18	16
2	80	18	18
3	95	19	16
4	95	19	17
5	120	20	16.5
6	130	22	18.5

Tabela 1. Variação dos valores para cada amostra

### 3.3 Preparação das amostras para a metalografia e ensaio de microdureza

Após a soldagem foram retirados 6 corpos de prova de 5 X 5 mm, a uma distância de 5 mm da extremidade do cordão de solda e no meio da chapa. Isto, para que

seja possível abranger a ZTA, objeto de estudo, visto que como houve variação nos parâmetros, o tamanho da ZTA poderá não ser o mesmo para todas as amostras. Um sétimo corpo de prova, de dimensões semelhantes, foi retirado da chapa de aço inicial, onde não sofreu nenhum processo de soldagem, para servir de base de comparação para as análises.

Os corpos de prova seguiram para o laboratório de metalografia onde foram submetidos ao embutimento, lixamento e atacados quimicamente. O primeiro passo, embutimento, tem a função de facilitar e dar segurança no manuseio durante as atividades, as amostras foram embutidas com material termoplástico, neste caso utilizado Baquelite. É realizado por meio de uma prensa, utilizando pressão e aquecimento. A pressão de trabalho foi de 120 bar e a temperatura máxima atingida de 180 °C. O tempo é controlado automaticamente pelo equipamento. Este procedimento, foi realizado na máquina embutidora metalográfica da TECLAGO, modelo EM30D.

O segundo passo, lixamento, é necessário para obter uma imagem nítida no microscópio. A técnica de lixamento consiste em lixar a amostra com lixa de granulometria sucessivamente menor, até conseguir uma superfície com poucos riscos e espelhada. Para isso, faz-se uso de uma máquina politriz com fluxo de água. A granulometria das lixas utilizadas neste processo foram de, respectivamente: 80, 200, 240, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1500 mesh. Quanto maior o valor da granulometria da lixa, menor o tamanho do grão abrasivo, que neste caso era o carbeto de silício. A finalidade do polimento é obter uma superfície plana, livre de riscos e com alta refletividade. Este é realizado através de um pano de polimento, fixado sobre uma base rotativa, com a adição de um agente polidor, neste caso a alumina. As amostras foram então, polidas até a obtenção de uma superfície ideal, lavadas em água corrente e secadas com secador afim de evitar a oxidação.

Por fim os corpos de provas foram submetidos ao ataque químico com Nital 3%, durante 15 segundos, para revelar a microestrutura existente. Em seguida, é necessário que a amostra seja limpa em água e álcool, para que o processo de corrosão termine e foi completamente secada com secador. A figura 4, apresenta uma imagem da amostra depois de passar por todos estes processos.



Figura 4. Amostra pronta para os ensaios.

## 4 | RESULTADOS

Para a caracterização microestrutural, foi utilizado o microscópio óptico Olympus BX51, com captura de imagens. Foram registradas imagens com aumento de 50, 100, 200, 500, 1000 vezes, respectivamente para todas as amostras. Para o ensaio de microdureza fez-se uso do microdurometro MITUTOYO, modelo MVK – G1, com marcador de ponta de diamante e aplicada uma carga de 300 gramas durante 15 segundos.

### 4.1 Micrografia

Abaixo estão apresentadas as imagens obtidas, da microestrutura, de cada amostra, sequencialmente da amostra 0, aço base que não sofreu nenhum processo de soldagem, até amostra 6, que foi soldada com parâmetros específicos.

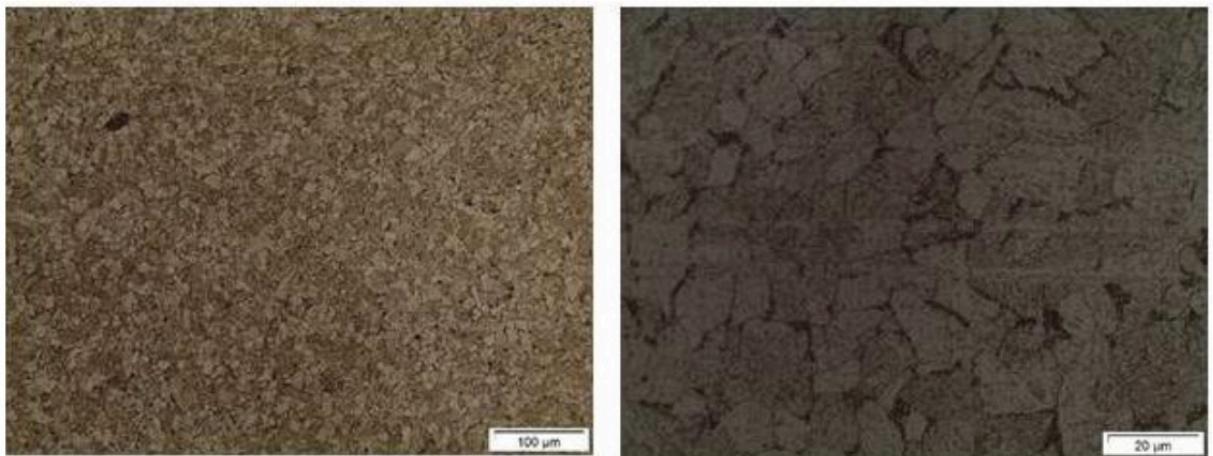


Figura 5. Amostra 0. (a) aumento 200X. (b) aumento 1000X.

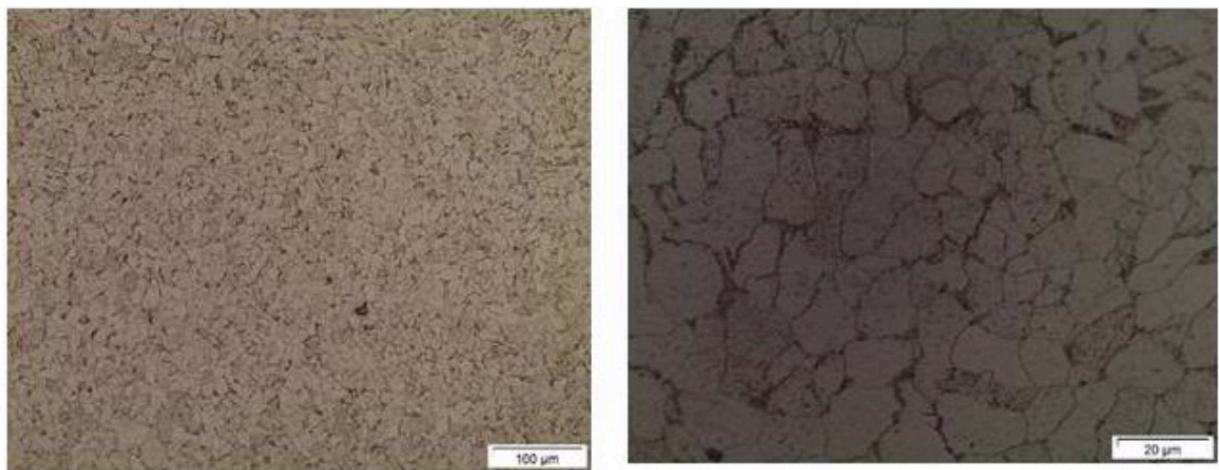


Figura 6. Amostra 1. (a) aumento 200X      (b) aumento 1000X.

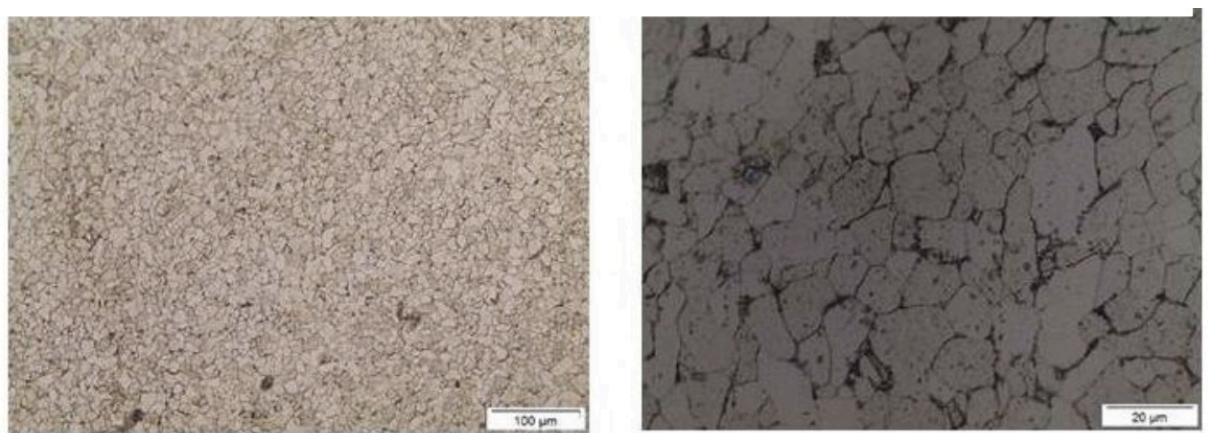


Figura 7. Amostra 2. (a) aumento 200X      (b) aumento 1000X

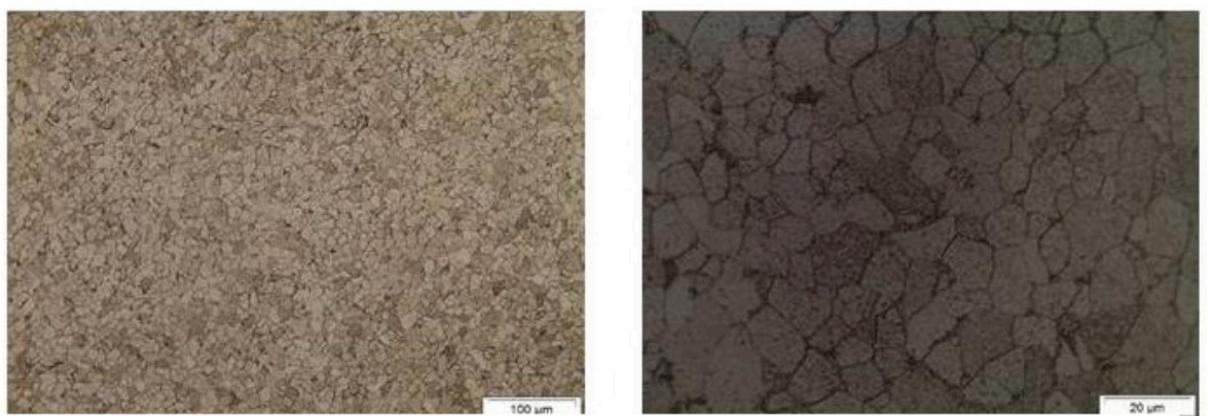


Figura 8. Amostra 3. (a) aumento 200X.      (b) aumento 1000X.

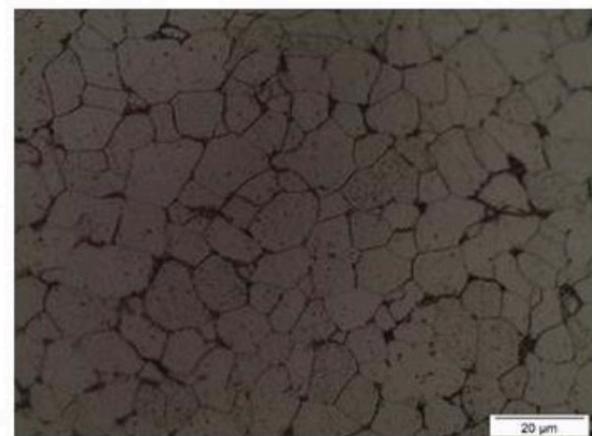


Figura 9. Amostra 4. (a) aumento 200X. (b) aumento 1000X.

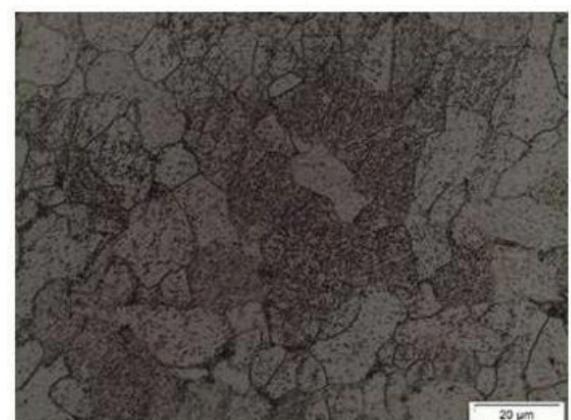


Figura 10. Amostra 5. (a) aumento 200X. (b) aumento 1000X.

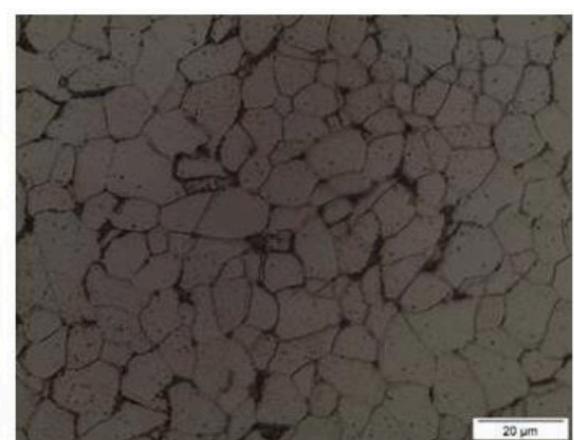
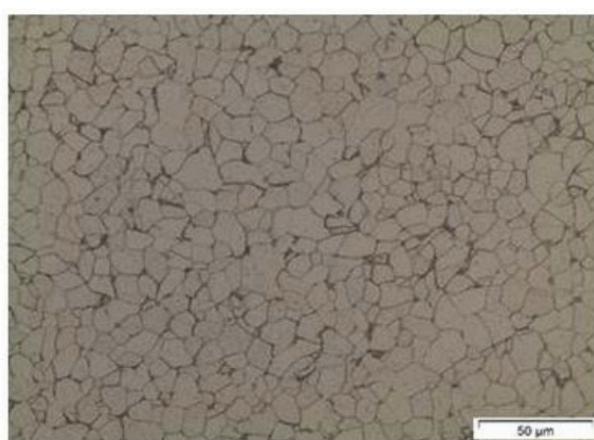


Figura 11. Amostra 6. (a) aumento 200X. (b) aumento 1000X.

## 4.2 Microdureza

Foram medidos três pontos distintos de microdureza e calculado a média entre eles, para cada amostra. Na tabela 2, é possível ver o valor de dureza para cada ponto e suas respectivas medias calculadas.

Amostra	Ponto	Dureza (HV)	Média
Amostra 0	1	125	124,67
	2	120	
	3	129	
Amostra 1	1	130	129,33
	2	123	
	3	127	
Amostra 2	1	124	125
	2	124	
	3	127	
Amostra 3	1	131	127
	2	127	
	3	123	
Amostra 4	1	121	123
	2	123	
	3	125	
Amostra 5	1	126	127,3
	2	130	
	3	126	
Amostra 6	1	139	132
	2	129	
	3	128	

Tabela 2. Microdureza

## 5 | CONCLUSÃO

A microestrutura do aço 1045 bruto é composta de ferrita e perlita, a parte clara para ferrita e a parte escura para perlita, como é possível observar na figura 5. Foi possível verificar uma diminuição da fase escura de perlita e consequentemente um aumento da fase clara de ferrita. Houve também uma diminuição no tamanho dos grãos e os mesmos ficaram mais homogêneos, em algumas amostras. Esta consequência, fica nítida nas figuras 9 e 11, amostras 4 e 6 respectivamente. É provável, que isso se deu pelo fato de que houve um grande aumento da temperatura, por volta de 1200°C, e um resfriamento, razoavelmente lento, ao ar livre.

O fato de algumas amostras permanecerem com uma alta porcentagem de perlita e ferrita, após sofrerem o procedimento de soldagem, como é possível perceber na amostra 5, figura 10, dá-se pois foram analisados pontos aleatórios e esses pontos deveriam estar mais longe do cordão de solda fugindo da zona termicamente afetada e se aproximando da microestrutura do aço base. Na tabela de microdurezas, nota-se que não houve uma discrepância entre as medidas, para as diferentes condições de

soldagem.

O processo de soldagem, abordado neste trabalho, gerou mudanças significativas na microestrutura das amostras. A diminuição e a homogeneização dos grãos fica aparente nas imagens e a diminuição da fase perlita sugere que houve uma possível descarbonetação durante o procedimento. A variação dos parâmetros de amostra para amostra, não influenciou significamente no comportamento das microestruturas bem como das microturezas. Para valores maiores dos parâmetros de soldagem, é provável que aconteçam outras mudanças significantes na microestrutura e microtureza, porém isso prejudicaria o cordão de solda e a peça submetida ao processo gerando danos na utilização deste componente.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN WELDING SOCIETY. (2001) AWS 3.0: *Standard Welding Terms and Definition*. Miami.
- CALLISTER, W. D, Jr. (2000). *Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução*. 5º edição. Rio de Janeiro. LTC, 2000.
- CIRO K, T. O. (2009). *Simulação de Ciclos Térmicos a partir da Equação de Rosenthal e a Validação da mesma em Aços Cromo-Molibdênio*. Universidade Federal do Paraná Departamento de Engenharia Mecânica Laboratório Aplicado de Tecnologia da Soldagem, Curitiba, Paraná.
- FORTES, C. (2005). *Metalurgia da soldagem. Engenheiro Metalúrgico, MSc. Assistência Técnica Consumíveis* – ESAB BR.
- LIMA, E. G; FERREIRA, F. J; SILVA REIS, K. P; COBAXO, R; ANDRADE, W. C; BARBOSA, R. P. *Estudo da influência dos parâmetros de soldagem do processo eletrodo tubular na dureza da ZTA de um aço CrMo*. Centro Universitário do Leste de Minas Gerais – Unileste-MG.
- MODENSI, P. J.; MARQUES, P. V; BRACARENSE, A. Q. (2011). *Soldagem fundamentos e tecnologia*. 3º edição. Belo Horizonte. Editora UFMG 2011.
- MOREIRIA, H.S. (2008). *Estudo da influência dos parâmetros de soldagem MIG e da morfologia do cordão no comportamento à fadiga de juntas soldadas de um eixo traseiro veicular*. Escola politécnica da Universidade de São Paulo.
- PERINI, F.G. (2008). *Propriedades mecânicas e microestruturais de aços de alta resistência e baixa liga soldados*. Universidade de Caxias do Sul.
- PONTES, T.O. (2013). *Caracterização da microestrutura e microtureza de um aço sae 1010 laminado a quente em planta industrial*. Universidade federal do Ceará. Centro de tecnologia. Departamento de engenharia metalúrgica e de materiais curso de engenharia metalúrgica.
- SERNA GIRALDO, C. P.(2001). *Precipitação de fases intermetálicas na zona afetada pelo calor de temperatura baixa (ZACTB) na soldagem multipasse de aços inoxidáveis duplex*. Escola politécnica da Universidade de São Paulo.
- SILVA, R.A; NETO, A.F. (2012). *Estudo da microestrutura do aço sae 1045 para a melhoria da usinabilidade. Uma proposta para a gestão dos processos de usinagem*. Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté (UNITAU).

# CAPÍTULO 8

## ESTUDO DA USINAGEM DA SUPERLIGA A BASE DE FERRO-NÍQUEL UTILIZANDO FERRAMENTA CERÂMICA

**Eduardo Pires Bonhin**

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp), Departamento de Materiais e Tecnologias, Guaratinguetá – São Paulo

**Sarah David Müzel**

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp), Departamento de Materiais e Tecnologias, Guaratinguetá – São Paulo

**Marcel Yuzo Kondo**

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp), Departamento de Materiais e Tecnologias, Guaratinguetá – São Paulo

**Lúcia de Almeida Ribeiro**

Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC), Pindamonhangaba – São Paulo

**José Vitor Cândido de Souza**

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp), Departamento de Materiais e Tecnologias, Guaratinguetá – São Paulo

**Marcos Valério Ribeiro**

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp), Departamento de Materiais e Tecnologias, Guaratinguetá – São Paulo

**RESUMO:** O objetivo da pesquisa foi avaliar a eficiência da ferramenta de corte à base de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), na usinagem da superliga VAT 32®. Foram feitos ensaios de torneamento a cada 30 mm linear, realizando a medição da rugosidade do trecho, bem como os desgastes e avarias na ferramenta. Os testes foram

realizados utilizando velocidades de corte de 270, 280 e 300 m/min, velocidades de avanço de 0,10 e 0,18 mm/rotação e profundidade de corte de 0,50 mm. Para a determinação do acabamento superficial foi utilizado um rugosímetro. Os desgastes e avarias foram analisados com microscópio estereoscópico e um de medição. Os parâmetros que resultaram em melhor acabamento superficial foram à velocidade de corte de 270 m/min e velocidade de avanço 0,10 m/rotação. Nesses parâmetros a rugosidade média ( $\text{Ra}$ ) foi de 1,132  $\mu\text{m}$  com desgaste abrasivo no flanco pequeno e sem grandes avarias. Demonstrando que a ferramenta cerâmica tem grande potencial para usinagem dessa liga.

**PALAVRAS-CHAVES:** Alumina, Desgastes de ferramenta, Acabamento superficial.

**STUDY THE MACHINABILITY OF THE BASE SUPERALLOY IRON / NICKEL VAT-32 WITH CERAMIC TOOL**

**ABSTRACT:** The objective of the research was to evaluate the efficiency of alumina-based cutting tool ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), machining of superalloy VAT 32®. Turning tests were made at 30 mm linear conducting passage measurement of roughness and the wear and damage to the tool. The tests were performed using shear rates of 270, 280

and 300 m/min, feed rates of 0.10 and 0.18 mm / rev and depth of cut 0.50 mm. For determining the surface finish was using a profilometer. The wear and damage were analyzed with microscope stereoscope and measurement. The parameters that resulted in better surface finish were the cutting speed of 270 m/min, feed rate 0.10 m/rev and depth of 0.50 mm. These parameters the average roughness (Ra) was 1.132  $\mu\text{m}$  to abrasive wear on the small side and no major damage. Demonstrating that the ceramic tool has great potential for machining this league.

**KEYWORDS:** Alumina, tool Burnouts, surface finish.

## 1 | INTRODUÇÃO

Existem relatos na literatura do uso de materiais cerâmicos como ferramentas de corte desde a década 50, porém nos últimos anos o seu uso vem ganhando grande destaque na usinagem em alta velocidade, visto que elas possibilitam a utilização de velocidades de corte de 4 a 5 vezes maior que as ferramentas de metal duro, reduzindo assim o tempo de usinagem, e consequentemente, aumentando a produtividade (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Isso se deve ao fato de que os materiais cerâmicos apresentam algumas propriedades muito interessantes para ferramentas de corte, como dureza a quente e a frio, resistência a desgaste e estabilidade química. Porém também apresentam algumas propriedades que não são favoráveis, tais como baixa condutividade térmica e baixa tenacidade (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2013; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Atualmente as ferramentas cerâmicas comercializadas podem ser classificadas em três principais grupos: a base de óxido de alumínio, a base de nitreto de silício e cermets (TRENT; WRIGHT, 2000; SHAW, 2005; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). As ferramentas a base de óxido de alumínio, também chamadas de cerâmicas brancas, podem ser divididas em três classes: mistas, alumina reforçada com “whiskers” e puras. As cerâmicas mistas contêm além de alumina o carboneto de titânio (TiC) ou nitreto de titânio (TiN). A alumina classificada como reforçada com “whiskers” é constituída de uma matriz cerâmica de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com reforço de monocristais. E as cerâmicas chamadas de pura são constituídas de óxido de alumínio puro em finos grãos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , podendo apresentar algum teor de MgO para inibir o crescimento dos grãos, titânio e níquel para aumentar a resistência mecânica e óxido de zircônio ( $\text{ZrO}_2$ ) para aumentar a tenacidade (SANTOS; SALES, 2007; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Hoje em dia o emprego de ferramentas cerâmicas na usinagem de superligas vem sendo alvo de muitos estudos, devido à dificuldade que as ferramentas tradicionais encontram para usinar essas ligas. O termo superligas foi dado uma gama de ligas desenvolvidas para suprir a necessidade por materiais que apresentassem maior durabilidade, menor custo com manutenção, maior tenacidade e principalmente melhor resistência à corrosão e oxidação (REED, 2006; THAKUR; RAMAMOORTHY;

VIJAYARAGHAVAN, 2009; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

As superligas possuem uma composição química com elevado teor de elementos de liga, ou seja, uma grande porcentagem de elementos que proporcionam uma melhora das propriedades do material metálico. Porém além do incremento em suas propriedades, a elevada porcentagem desses elementos acaba gerando grande afinidade com os materiais das ferramentas de corte, ocasionando problemas em sua usinagem, pois suas propriedades acabam sendo superiores as das ferramentas de corte atualmente comercializadas (CHOWDHURY; EL-BARADIE, 1998; HUTTON, 2004; REED, 2006; THAKUR; RAMAMOORTHY; VIJAYARAGHAVAN, 2009; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Atualmente são utilizadas ferramentas de metal duro, da classe ISSOS-Materiais resistentes ao calor (superligas e ligas de titânio). Entretanto, além da baixa velocidade de trabalho, há um grande número desgastes e avarias dessas ferramentas, o que causa um grande número de paradas para a troca da ferramenta e acerto da máquina, aumentando consideravelmente os chamados tempos improdutivos de operação (DORNELAS, 2012). Dessa maneira, uma solução para otimizar o processo de usinagem das superligas seria estudar a utilização de ferramentas cerâmicas.

Este trabalho foi desenvolvido com objetivo de avaliar o potencial da utilização da ferramenta a base de óxido de alumínio e óxido de magnésio na usinagem da superliga VAT-32®, aplicável em válvulas automotivas sujeitas a altas temperaturas, corrosão e desgastes (EZUGWU; BONNEY; YAMANE, 2003; EZUGWU, 2005; PERVAIZ et al., 2014; M'SAOUBI et al., 2015; THAKUR; GANGOPADHYAY, 2016)

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização deste trabalho foi utilizada a superliga metálica à base de ferro e níquel VAT-32®, proveniente de doação da empresa Villares Metals S.A., localizada no município de Sumaré - SP.

As ferramentas de corte foram confeccionadas em laboratório pelo Prof. Dr. José Vitor Cândido de Souza, sendo elas à base de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) com óxido de magnésio (MgO) e geometria do tipo SNMA. A Tabela 1 apresenta as propriedades físico-mecânicas desta ferramenta.

Propriedade	Valor
Densidade Teórica	99% m/m $\pm$ 0,15
Dureza	17 GPa $\pm$ 0,20
Tenacidade	7,8 MPa/ m <sup>2</sup> $\pm$ 0,12

Tabela 1: Propriedades físico-mecânicas da ferramenta cerâmica.

Para a usinagem do material foi realizado o processo torneamento externo com parâmetros típicos de acabamento. Esse processo foi realizado em um torno CNC

Inicialmente foram realizados ensaios preliminares partindo de parâmetros sugeridos pela literatura para ferramenta do tipo cerâmica da classe óxido de alumínio, em seguida foram definidas três velocidades de corte ( $V_c$ ) de 270, 280 e 300 m/min, duas velocidades de avanço ( $f$ ) de 0,10 e 0,18 m/rotação e uma profundidade de corte ( $a_p$ ) fixa de 0,50 mm.

Para cada combinação de parâmetros de corte utilizada foi realizada a usinagem em duplicada de um trecho de 30 mm, sendo que cada aresta das ferramentas foi empregada uma única vez. Na sequência foi efetuada a medição da rugosidade conforme as normas ABNT NBR ISO 4287:2002 e ABNT NBR ISO 4288:2008, em três pontos distintos com auxílio de um rugosímetro da marca Mahr, modelo MarSurf M300, utilizando a rugosidade média ( $R_a$ ) como parâmetro.

Na sequência foi realizada a análise do desgaste e avarias sofridas pelas ferramentas foi realizada conforme a ISO 3685: 1993 utilizando um microscópio estereoscópico da marca Mahr, modelo MarVision MM200 e um microscópio óptico da Zeiss.

## 3 | RESULTADOS E DISCUÇÕES

### 3.1 Integridade superficial

Através da análise do acabamento superficial (Figura 1) verificou-se que a velocidade de corte não é o fator de maior atuação na variável resposta, sendo a velocidade de avanço o fator que apresentou maior influência no processo. O melhor acabamento superficial ocorreu para combinação da velocidade de corte de 270 m/min e velocidade de avanço de 0,10 mm/volta. Para essa combinação a rugosidade  $R_a$  foi de 1,132  $\mu\text{m}$ .

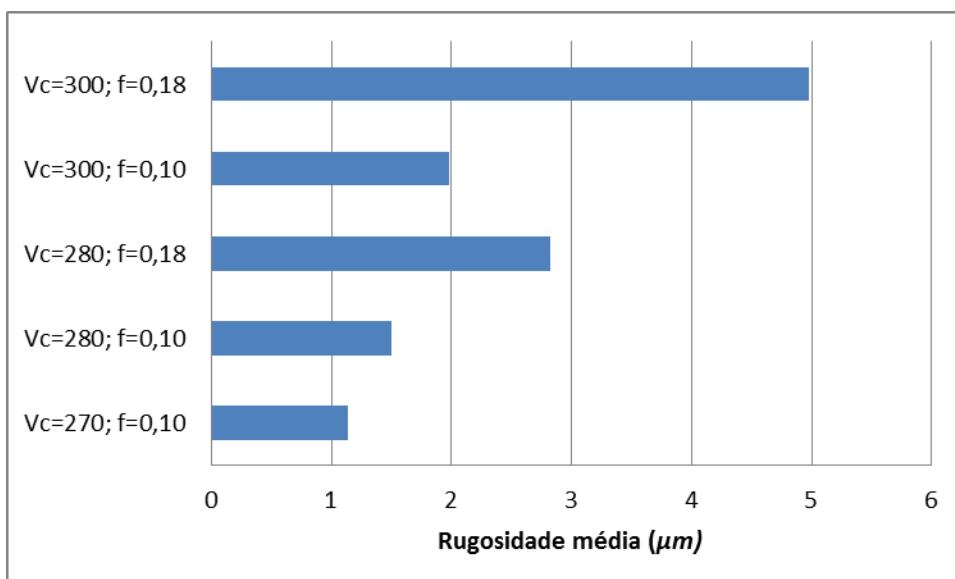


Figura 1: Gráfico de rugosidade média

Comparando os resultados obtidos com a literatura, verificou-se que o comportamento da rugosidade em relação à velocidade corte é coerente, pois inicialmente ela tende a aumentar com o acréscimo da velocidade e diminui após determinada velocidade, isso ocorre devido a velocidade de corte ser a responsável pela velocidade de remoção de material, favorecendo a saída de cavaco e consequentemente melhorando o acabamento (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Entretanto não foi possível identificar a velocidade de corte na qual a rugosidade começa a diminuir por se tratar de um experimento com limitação no número de ensaio. Com relação à velocidade de avanço, o comportamento da rugosidade segue exatamente o descrito na literatura, a qual cita que a diminuição da velocidade de avanço proporciona um melhor acabamento na peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

### 3.2 Desgaste e avarias da ferramenta

A partir dos resultados obtidos para os desgaste das ferramentas (Figura 2) verificou-se que o menor desgaste ocorreu para os parâmetros de  $V_c = 270 \text{ m/min}$  e  $f = 0,10 \text{ mm/rotação}$ , sendo ele de  $0,16 \text{ mm}$ .

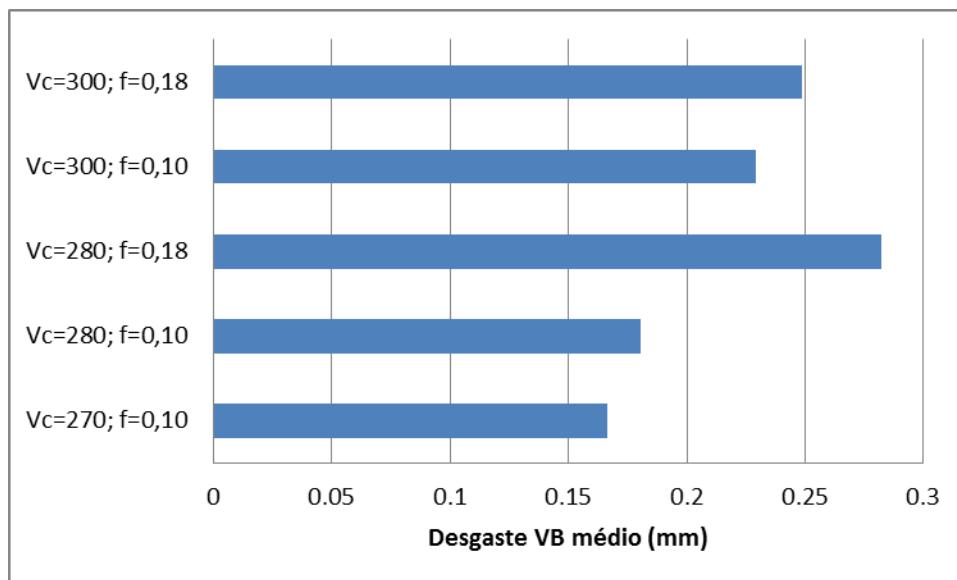


Figura 2: Gráfico de desgaste médio

Com relação aos parâmetros de usinagem, a combinação de uma menor velocidade de corte com uma menor velocidade de avanço proporcionou em um menor desgaste da ferramenta, resultado coerente com a literatura.

De acordo com a literatura a velocidade de corte é o parâmetro que mais influencia a progressão do desgaste, seguida pelo avanço e pela profundidade de corte. Com relação à velocidade de corte, o acréscimo dela interfere na temperatura que a aresta de corte atinge, sendo que temperaturas elevadas proporcionam o aumento do desgaste, reduzindo assim drasticamente a vida da ferramenta. Com relação à velocidade de avanço, avanços muito altos geram um grande aumento de temperatura

e consequentemente proporcionam desgaste frontal (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

A fim de comparar o desgaste e às avarias ocorridas nas ferramentas foram fotografadas aquelas cujos parâmetros resultaram no melhor e no pior acabamento superficial (Figuras 3 e 4).

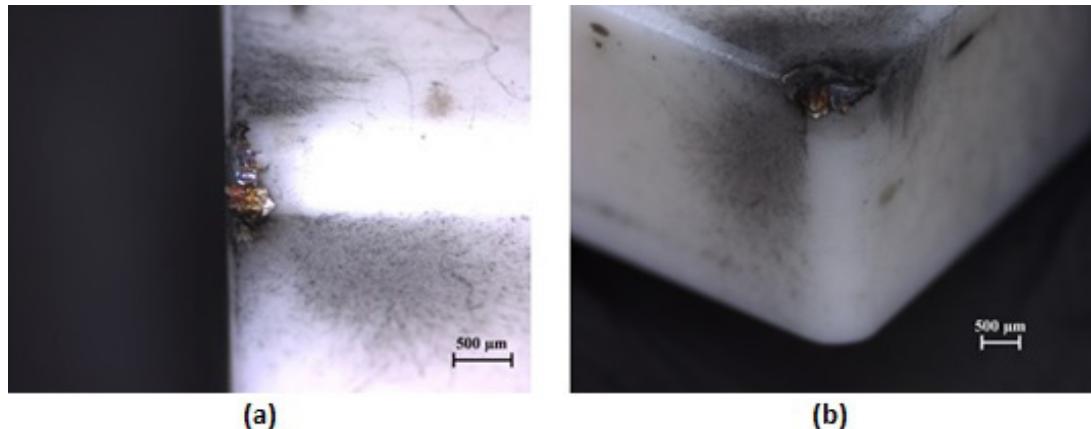


Figura 3: Desgaste e avarias causados pelo parâmetro  $V_c = 300$  e  $f = 0,18$ . (a) Flanco, (b) Faces.

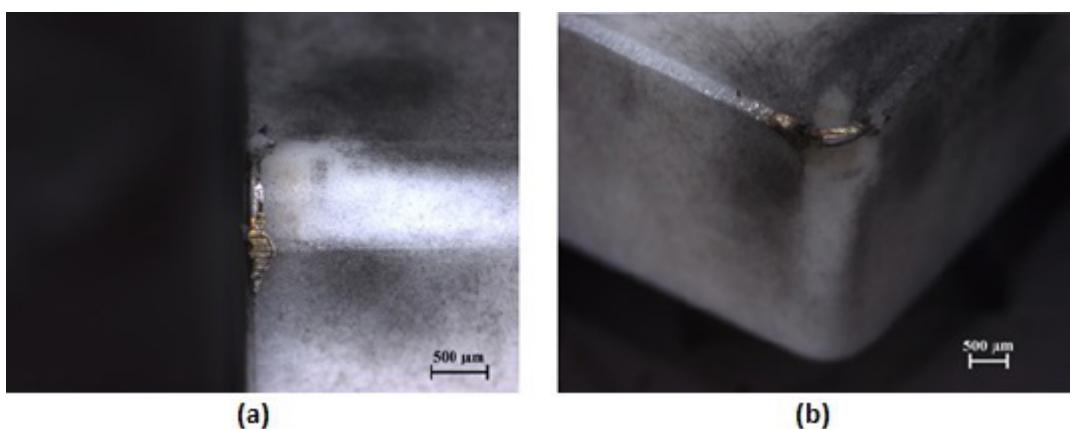


Figura 4: Desgaste e avarias causados pelo parâmetro  $V_c = 270$  e  $f = 0,10$ . (a) Flanco, (b) Faces.

Em relação às avarias a mais comum foi a de quebra/lascamento, presentes em ambas as condições. Elas ocorreram principalmente pela baixa tenacidade da ferramenta e pela presença de carbonetos na composição da superliga, os quais possuem maior dureza que a ferramenta.

## 4 | CONCLUSÃO

Conclui-se com esse trabalho que a ferramenta a base de óxido de alumínio e óxido de magnésio apresenta grande potencial para ser utilizada na usinagem da superliga VAT-32®, pois o acabamento superficial gerado na usinagem atende os requisitos mínimos para aplicação em válvulas de motores, além de possibilitar o aumento da velocidade de corte, diminuindo assim o tempo de usinagem desse

material. Entretanto mesmo que a usinagem com a ferramenta resulte em bons acabamentos causa um grande desgaste na aresta corte, sendo necessário o uso de uma grande quantidade de ferramentas para processos longos.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Jose Vitor Candido de Souza por fornecer em parceria com a empresa Villares Metals os materiais necessários para realização do trabalho.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4288**: Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro, 2008.

CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 8. ed. [s.l.] LTC, 2013.

CHOUDHURY, I. .; EL-BARADIE, M. . Machinability of nickel-base super alloys: a general review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 77, n. 1–3, p. 278–284, maio 1998. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013697004299>>.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia de Usinagem dos Materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013.

DORNELAS, D. A. **Caracterização mecânica em temperaturas elevadas da Superliga MAR-M247**. 2012. Universidade de São Paulo, Lorena, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/97/97134/tde-01102013-105701/>>.

EZUGWU, E. .; BONNEY, J.; YAMANE, Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 134, n. 2, p. 233–253, mar. 2003. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013602010427>>.

EZUGWU, E. O. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 12–13, p. 1353–1367, out. 2005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695505000544>>.

HUTTON, D. V. **Fundamentals of Finite Element Analysis**. 1. ed. New York: The McGraw-Hill, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **3685**: Tool-life testing with single-point turning tools, 1993.

M'SAOUBI, R.; AXINTE, D.; SOO, S. L.; NOBEL, C.; ATTIA, H.; KAPPMEYER, G.; ENGIN, S.; SIM, W.-M. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. **CIRP Annals**, v. 64, n. 2, p. 557–580, 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850615001419>>.

PERVAIZ, S.; RASHID, A.; DEIAB, I.; NICOLESCU, M. Influence of Tool Materials on Machinability of Titanium- and Nickel-Based Alloys: A Review. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 29, n. 3, p.

219–252, 4 mar. 2014. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10426914.2014.80460>>.

REED, R. C. **The Superalloys: Fundamentals and Applications**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2007.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, In, 2005.

THAKUR, A.; GANGOPADHYAY, S. State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 100, p. 25–54, jan. 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695515300730>>.

THAKUR, D. G.; RAMAMOORTHY, B.; VIJAYARAGHAVAN, L. Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning. **Materials & Design**, v. 30, n. 5, p. 1718–1725, maio 2009. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306908003506>>.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4. ed. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2000.

## CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA DE NÉVOA SALINA ATENDENDO AOS REQUISITOS MÍNIMOS CONTIDOS NAS NORMAS ISO 9227 E ASTM B-117

**Leonardo de Souza Coutinho**

UniFOA – Mestrado em Materiais / MEMAT

Volta Redonda – Rio de Janeiro

**Alexandre Alvarenga Palmeira**

UERJ – Departamento de Mecânica e Energia /

FAT

Resende – Rio de Janeiro

um saturador fará filtrar e fornecer um ar com temperatura controlada, painel de comando e coletor de solução, tudo em um ambiente estanque.

**PALAVRAS-CHAVE:** normas, névoa salina, corrosão, câmara, procedimentos

**ABSTRACT:** The need to increase the knowledge about the degree of resistance to various mechanical, chemical, thermal and other requests made it possible to have a glimpse of a real need to have an apparatus with characteristics as different as that of simulating a corrosive atmosphere. This need served as a driving force to develop this project. The same was based on translation and interpretation of standards allied to technical visits with searches on websites and catalogs. A compendium of ideas was elaborated whose objectives are to ally the minimum that the norms request with solutions implemented and already sacramentadas commercially. This work takes place in two distinct parts that are the applied engineering for the construction of the machine and the elaboration of procedures to reach the final objective for which it is intended. The chamber was made of carbon steel plate, coated with fiber, has a saturator to humidifying and provide a temperature controlled air, control panel and solution collector, all in a leakproof environment.

**RESUMO:** A necessidade de se ampliar os conhecimentos sobre o grau de resistência a várias solicitações sejam elas mecânicas, químicas, térmicas e outras fez com que houvesse um vislumbramento de uma necessidade real de se ter um aparelho com características tão distintas quanto o de simular uma atmosfera corrosiva. Essa necessidade serviu de propulsor para desenvolver este projeto. O mesmo se deu baseado em tradução e interpretação de normas aliados a visitas técnicas com pesquisas em sites e catálogos. Foi elaborado um compêndio de idéias cujos objetivos são de aliar o mínimo que as normas solicitam com soluções implementadas e já sacramentadas comercialmente. Este trabalho se dá em duas partes distintas que são a engenharia aplicada para a construção da máquina e a elaboração de procedimentos para se alcançar o objetivo final ao qual ela se destina. A câmara construída foi feito em chapa de aço carbono, revestida com fibra, possui

**KEYWORDS:** standards, salt spray (fog), corrosion, chamber, procedures.

## 1 | INTRODUÇÃO

Devido a sua importância, inclusive no desenvolvimento da humanidade, o aço e as ligas ferrosas se tornaram objetos de estudos onde os investimentos alcançam a casa dos milhões de dólares.

O uso massificado do aço como material para construção em engenharia forçou a elevar o conhecimento sobre as ações que a corrosão desenvolve sobre ele, tendo em vista que o aço possui baixa resistência a este fenômeno.

Não existe no Brasil estudos conclusivos ou pesquisas que envolvam os prejuízos causados pela corrosão, entretanto é importante destacar recentes resultados extraídos do estudo intitulado “Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United State” que se deu no período compreendido entre 1999 e 2001 por CC Technologies Highway Administration. Dele chegou-se na cifra de 276 bilhões de dólares que equivale a 3,1% do PIB dos EUA e em 552 bilhões de dólares de custo indireto<sup>[Gentil, 2011]</sup>. O gráfico abaixo mostra os gastos com corrosão no período considerado nos cinco maiores setores da economia norte americana que ajudam a compor a cifra citada acima.

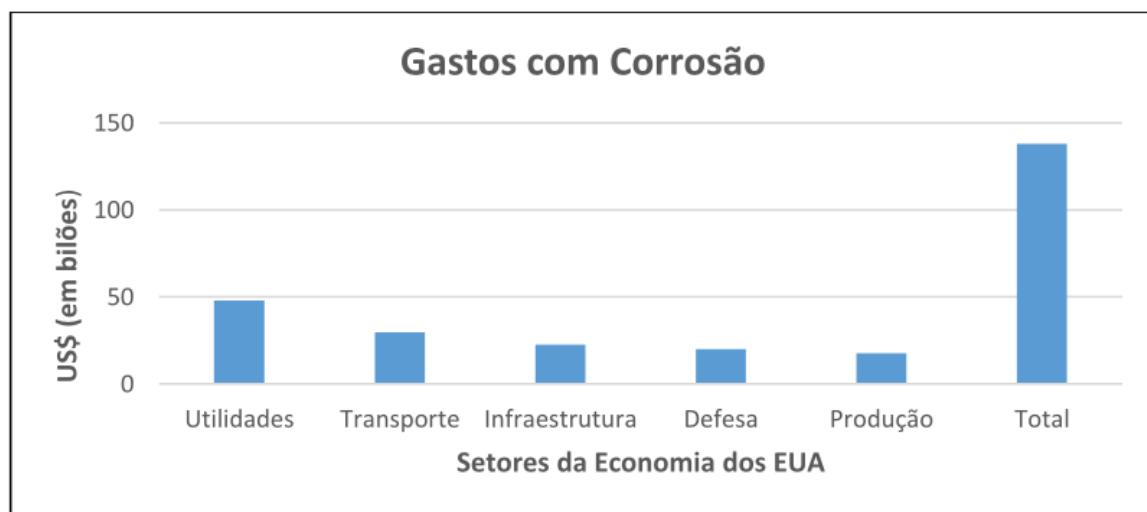


FIGURA 1: Gastos com corrosão nos EUA entre 1999 e 2001

É importante salientar que proteger contra a corrosão é mais que uma questão puramente econômica. É imperativo para a proteção do meio ambiente, garantia da integridade dos ativos, saúde e segurança das pessoas. No Brasil a mola propulsora para o estudo da corrosão se deve principalmente a PETROBRAS, devido a suas plataformas de estruturas metálicas se encontrarem no mar e os estudos e procedimentos lá elaborados servem de parâmetro de utilização para as outras empresas em todo o país.

O conhecimento da composição do aço e suas ligas associados aos fenômenos

da corrosão se faz necessário para elaborar o melhor procedimento, que atenda a maior quantidade possível de requisitos no combate a sua deterioração. Conhecer e saber identificar os conceitos de composição do aço a ser trabalhado, a corrosão, a oxidação e outros contrapontos são de suma importância para a elaboração de tais procedimentos de proteção que visam mitigar a ação externa sobre as estruturas.

Desenvolver uma máquina para execução de corrosão acelerada por névoa salina com pulverização de uma solução salina sobre as amostras a serem testadas se faz importante em um cenário onde as empresas necessitam um alto grau do produto seja ele vendido ou comprado. Os resultados obtidos por ensaio de névoa salina são utilizados sobretudo em especificações preestabelecida por clientes e literatura técnica servindo para avaliar, por exemplo, os benefícios de novos sistemas de pintura.

## 2 | OBJETIVOS

Construir uma máquina que obedeça os requisitos mínimos necessários para a execução e verificação de ensaios acelerados de corrosão em materiais metálicos já estabelecidos e avaliar a corrosividade de uma câmara de salt spray mediante a normas internacionais.

## 3 | MÁQUINA DE TESTE (SALT SPRAY)

O aparato para teste deve, obrigatoriamente, possuir itens que permitam sua execução. Estes itens são: câmara, reservatório de solução, fornecimento adequado de ar comprimido, no mínimo um bico atomizador, suporte para os corpos de provas, sistema de aquecimento da câmara e um controle eficaz das variáveis físicas tais como: pressão, temperatura, vazão e perda de massa [ASTM B117, 2003].

## 4 | MATERIAIS E MÉTODOS

Para este trabalho em questão, serão consideradas duas divisões para materiais e métodos. A primeira é sobre o projeto de construção da máquina e a segunda é sobre sua operacionalização que não será abordada neste artigo.

Foi usado névoa salina neutra (NSS) a base de cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ), embora a máquina também esteja preparada para receber névoa salina por ácido acético (AASS) ou névoa salina por ácido acético acelerado por cobre (CASS), desde que a mesma seja lavada adequadamente e usado reservatório de solução distintos.

A máquina construída necessita atender aos pré requisitos descritos abaixo segundo ao que a Norma ISO 9227 solicita. São elas:

- O volume interno do gabinete não deve ser inferior a  $0,4 \text{ m}^3$ ;
- A pressão de atomização deve ter uma sobrepressão garantida de 0,7 BAR;

- De acordo com a pressão de trabalho, há um guia de valores de temperatura de água quente dentro da torre de saturação que deve ser respeitado [ISO 9227, 2006].
- A máquina deve possuir dispositivo de coleta de névoa adequado constituídos por funis que deverão ser inseridos em coletores graduados ou recipiente semelhante;
- Deve-se usar de 4 a 6 corpos de provas de tiras laminadas a frio cujas dimensões são: 1 milímetro de espessura com  $150 \pm 70$  milímetros de comprimento e largura;
- A operação do equipamento de teste somente será considerada satisfatória se a perda de massa de cada amostra devidamente posicionada dentro do aparato for de  $70 \pm 10$  g/m<sup>2</sup> durante 48 horas de operação;

#### 4.1 Projeto da Máquina

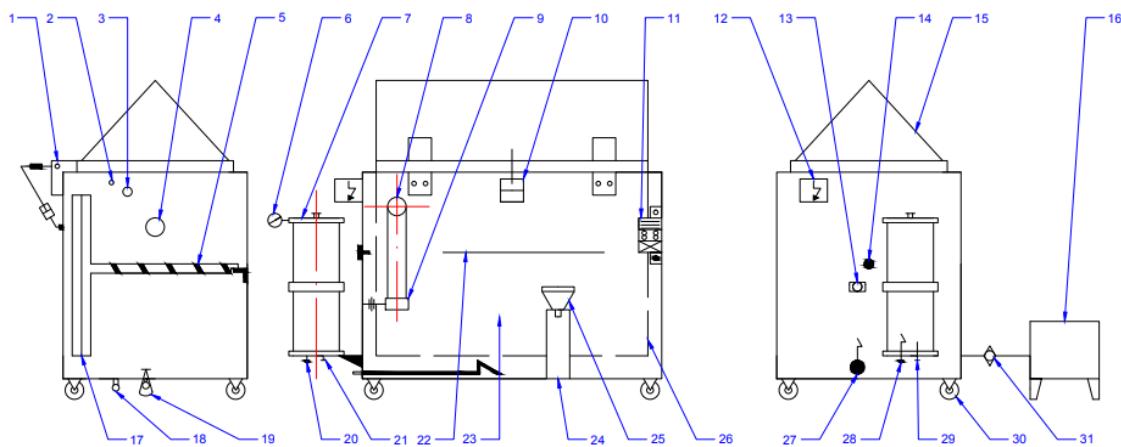


FIGURA 2. Esquemático Salt Spray Modelo Coutspray Fogtest

Os itens da numeração contida na figura 2 serão detalhados abaixo seguindo a ordem, quando aplicável e possível, do desenho.

##### 1. Mancal da Articulação

Foi projetado um modelo de mancal articulável por com auxílio de pino que possibilita a abertura e fechamento da tampa do gabinete (item 1 da figura 2). Os mesmos foram confeccionados de PVC por se tratar de um elemento inerte a qualquer tipo de solução que possa vir a ser utilizada. Os pinos foram confeccionados de aço inox por possuir maior resistência mecânica que os mancais.

##### 2. Bocal de Enchimento

Foi concebido único e exclusivamente no preenchimento de óleo do reservatório da jaqueta (item 2 da figura 2). O preenchimento deve ser executado com o auxílio de um funil plástico que acompanha a máquina, cuja finalidade é mitigar possíveis ocorrências de contaminação do solo pelo óleo utilizado em possíveis vazamentos durante o preenchimento.

##### 3. Respiro de Ar da Jaqueta

Com o intuito de manter a pressão atmosférica dentro deste reservatório, foi introduzido um sistema conhecido como respiro de ar (item 3 da figura 2) [Drexler, 2008].

É prática comum a instalação de respiros na parte superior de todo e qualquer reservatório para garantir que a pressão atmosférica no tanque [Fialho, 2003].

#### 4. Exaustão da câmara

Todo excedente de névoa produzido deve ser devidamente descartado fora do recinto onde se encontra a máquina de salt spray (item 4 da figura 2) sob o risco de proporcionar contaminações indesejadas nas outras instalações do laboratório.

#### 5. Suportes dos Corpos de prova

Foram confeccionados suportes em madeira (item 5 da figura 2) e com a menor área de contato possível com os corpos de prova conforme ilustração contida na figura 3.

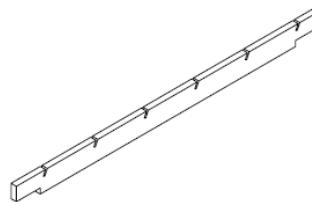


FIGURA 3 . Suporte dos corpos de provas

#### 6. Regulador de pressão

Regula (ajusta) a pressão de ar fornecido pelo compressor (item 6 da figura 2). Possui um elemento filtrante incorporado no seu corpo cuja função é o de reter particulado sólido contidos no trecho de tubulação contido entre o compressor e o consumidor final que neste caso é a própria máquina de ensaio.

#### 7. Saturador

Equipamento responsável por saturar o ar comprimido a ser pulverizado dentro da câmara de ensaio acelerado de corrosão com aumento de sua umidade garantindo um nevoeiro úmido (item 7 da figura 2) [ASTM B 117, 2003; ISO 9227, 2006].

Equipamento adquirido por fabricante homologado. Este saturador não deve interferir na temperatura interna do gabinete. A pressão e temperatura do ar saturado podem ser controladas por instrumentos tais como termômetro e manômetro montados logo após o saturador.

#### 8. Torre nebulizadora

Projeto baseado (idealizado) em um sistema de nebulização da indústria fabricante de pneu. Esta torre (item 8 da figura 2) é responsável por conduzir a névoa produzida até a parte superior do gabinete antes do início da tampa e vedação da máquina.

#### 9. Suporte e Bico Pulverizador

Também adquirido por fabricante homologado, este particionado da máquina é

responsável por efetuar a mistura da solução de NaCl com o ar comprimido fornecido sob a pressão de 0,7 BAR (item 9 da figura 2). Esta mistura é expulsa do pulverizador sob a forma de névoa salina saturada.

A figura abaixo ilustra a forma construtiva do bico segundo a ASTM B-117

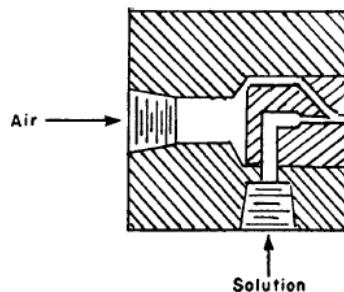


FIGURA 4 . Bico pulverizador típico, sugerido por norma

## 10. Acionamentos Pneumáticos

Foram introduzidos um sistema que inclui uma válvula direcional e um cilindro pneumático (itens 10 e 11 da figura 2) que possibilitam o controle de fechamento e abertura da tampa do gabinete.

## 11. Painel Elétrico de Comando

Painel desenvolvido com dois controladores cuja função é o de sincronizar a entrada e a saída do acionamento das resistências fazendo uma interface de comunicação entre as mesmas e os termômetros instalados (item 12 da figura 2). Este painel também possui um contador de tempo que trabalha exclusivamente na modalidade automática de parametrização com display dedicado conforme figura 5.

Neste mesmo painel é possível controlar a abertura e fechamento da tampa devido a sua ligação direta aos solenóides da válvula direcional. Os valores de comando ajustados são referenciados em normas.



FIGURA 5 . Painel elétrico de comando

## 12. Manômetros e Termômetros (PT100)

Instrumentos instalados que pertencem ao quadro de comando das variáveis de

controle da máquina contruída (itens 13, 14 e 29 da figura 2). Os manômetros são instrumento que auxiliam no ajuste das pressões conforme solicitações das normas e os termômetros PT100 para para coletar informações de temperatura do saturador e da jaqueta de óleo. Esse range a ser respeitado de temperaturas máximas e mínimas podem ser acompanhados pelo display digital dos controladores instalados no painel elétrico de comando.

### **13. Tampa do Gabinete**

Concebida em material acrílico (item 15 da figura 2) respeitando a geometria baseado em solicitação normativa e seu ângulo de cunha foi dado por 125 graus conforme indicado na figura 7 [ASTM B 117, 2003]. Projetada de maneira tal que, as gotículas de solução pulverizada que se formam em sua superfície não caia nos corpos de prova que estão sendo testados [ASTM B 117, 2003; ISO 9227, 2006] conforme figura 6.

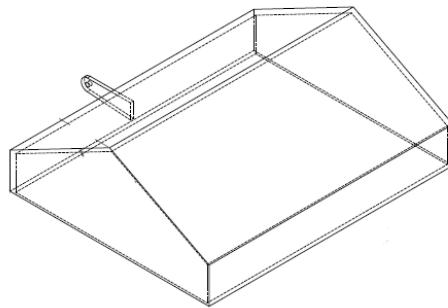


FIGURA 6 . Tampa do gabinete

### **14. Reservatório de Solução**

Componente do projeto responsável por armazenar a solução preparada (item 16 da figura 2). Deve possuir capacidade suficiente de armazenamento de solução que seja capaz de atender todo o ensaio em sua execução.



FIGURA 7 . Reservatório de solução

### **15. Visor de Nível da Jaqueta de Óleo**

Responsável por indicar o nível de óleo contido na jaqueta (item 17 da figura 2).

Este nível deve ser constantemente inspecionado, onde em caso de nível baixo pode ocasionar um superaquecimento da resistência e sua possível queima, além de não proporcionar um aquecimento uniforme na atmosfera interna do gabinete.

## 16. Drenos Incorporados

A máquina possui dois drenos embarcados (itens 18 e 19 da figura 2), um para o óleo da jaqueta e outro a ser utilizado após utilização da máquina que deve estar livre de resquício de qualquer tipo de contaminação proveniente do ensaio antecessor.

## 17. Anteparo para Suportes dos Corpos de Prova

Idealizado para comportar os suportes de madeira dos corpos de prova (item 22 da figura 2).

## 18. Gabinete

O gabinete (item 23 da figura 2) não deve possuir uma capacidade atmosférica interior inferior a 0,4 m<sup>3</sup> uma vez que, em volumes menores, houve dificuldades em garantir um distribuição uniforme do spray [iso 9227, 2006]. Para tanto, foram calculados as dimensões mínimas que devem ser atendidas, considerando a área do cubo do gabinete mais a área geométrica fornecida pela tampa. Na tabela abaixo será explanado as dimensões consideradas.

Região do Gabinete	Frente (em m)	Altura (em m)	Profundidade (em m)	Volume (em m <sup>3</sup> )
Cubo Interior	0,77	0,73	0,61	0,343
Cubo Retangular da Tampa	0,825	0,13	0,645	0,0692
Cubo Triangular da Tampa	0,645	0,16788	0,825	0,0447
<b>Volume Total</b>	<b>0,457 m<sup>3</sup></b>			

TABELA 1 . Volume Interno do Gabinete (em m<sup>3</sup>)

## 19. Sistema de Coleta de Solução para Análise

A coleta de solução deve ser feito por dispositivo feito de material quimicamente inerte, em recipiente graduado (item 24 da figura 2). Este recipiente deve ser acoplado a um funil de diâmetro de 100 milímetros, o que corresponde a uma área de recolha de aproximadamente 80 cm<sup>2</sup>. Os dispositivos coletores devem ser colocados na zona do gabinete interno onde os corpos de prova são colocados. Estes valores de coleta são tabelados por norma.

## 20. Jaqueta de Óleo

Item 25 da figura 2, a jaqueta é um recipiente localizado entre os gabinetes interno e externos da máquina cuja principal finalidade é proporcionar um aquecimento indireto e homogêneo da temperatura interna do gabinete. Para este projeto foi deixado uma distância lateral de 25 milímetros nas laterais e na parte frontal e 45 milímetros no fundo onde será inserido uma resistência de imersão como particionado importante

no controle desta temperatura.

### 21. Resistências Elétricas

A máquina possui duas resistências elétricas instaladas, uma na jaqueta de óleo e outra no saturador (itens 26 e 27 da figura 2 respectivamente). A função da resistência é a de reaquecer e manter a temperatura dos fluidos dos dois reservatórios que, em conjunto com um termostato liga e desliga de acordo com o range de temperatura previamente ajustado sugerido em norma.



FIGURA 8 .Resistência elétrica

### 22. Rodízios

Elementos de máquina instalados cuja finalidade é de facilitar a movimentação da máquina dentro do laboratório (item 29 da figura 2).

### 23. Filtro de Solução

Elemento introduzido ao projeto conforme figura 9 para que fique em um posição intermediária ao reservatório de solução e o sistema de atomização (item 30 da figura 2). Os orifícios do bico pulverizador são de diâmetros muito pequenos e pensando como um possível contra medida para o não entupimento deste bico foi introduzido um elemento filtrante cuja finalidade primordial é impedir que eventuais cristais de cloreto de sódio possa vir a entupir este bico [ABNT NBR 8094, 1983].



FIGURA 9 . Filtro de solução

## 5 | MÁQUINA CONSTRUÍDA

A máquina construída apresentou os aspecto físico mostrado na figura 10 abaixo.



FIGURA 10 .Aspecto físico da máquina após sua utilização

## 6 | CONCLUSÃO

A máquina foi confeccionada dentro do que foi planejado respeitando todos os detalhes construtivos e obedecendo o que a norma ISO 9227 solicita, associada as valiosas informações contidas na norma ASTM B 117. Foi inserido uma automação robusta para controle dos parâmetros determinados.

Da parte operacional, foram feitos os testes com 4 corpos de prova, quantidade esta solicitada em normas, em uma operação de 48 horas de exposição, sendo atingidos os resultados esperados. O gráfico abaixo melhor ilustra os resultados obtidos.

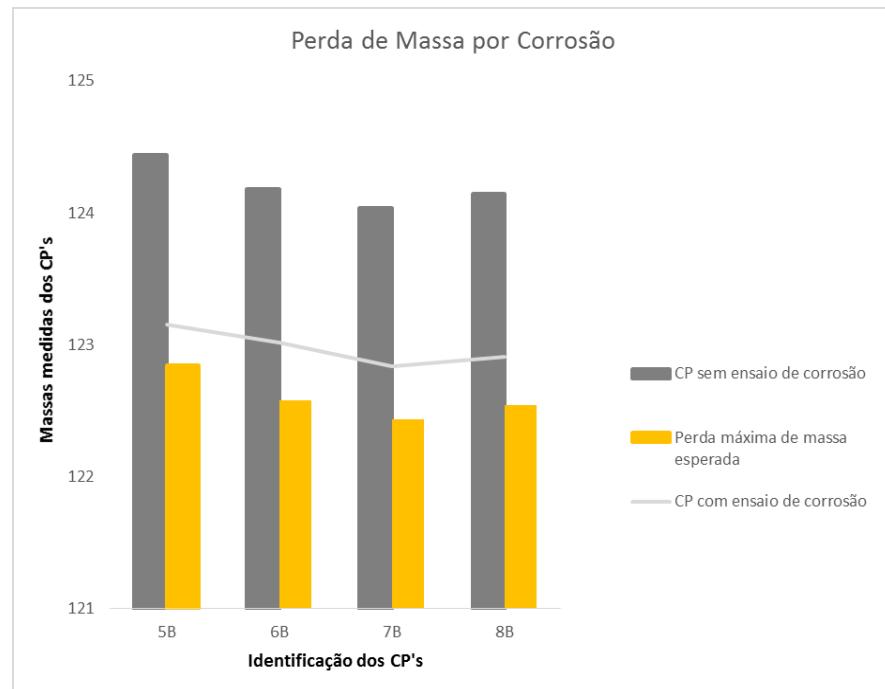


FIGURA 11 . Resultado dos testes alcançados

Este gráfico nos informa que foram verificadas as massas dos corpos antes e logo após o ensaio. O valor esperado teria que necessariamente estar compreendido entre o valor máximo de massa do corpo de prova medido antes da execução do ensaio e a

massa máxima perdida devido a execução do ensaio. O gráfico aponta que a máquina alcançou este objetivo, podendo portanto, ser utilizada como uma ferramenta de caracterização de resistência do metal submetida em atmosferas corrosivas altamente concentradas.

A mesma se mostrou robusta para ensaios com alta repetitividade com pouco ou nenhum desgaste aparente da máquina e seus instrumentos embarcados. O único problema encontrada e já alterado no projeto original concebido foi aumentar a espessura das paredes da tampa e inserir o olhal na mesma fazendo-a como sendo peça única para receber o encaixe do cilindro pneumático.

Para manusear a máquina de forma que a mesma possua repetitividade nos ensaios futuros, um treinamento específico deverá ser dado junto aos técnicos executantes do laboratório da instituição.

A máquina se mostrou eficaz e confiável ao processo a que se destina aparentando, visualmente, que consegue manter uma repetitividade de ensaios de forma confiável.

## REFERÊNCIAS

ABNT NBR 8094 Jul 1983 - **Material metálico revestido e não revestido - Corrosão por exposição à névoa salina** - Jul 1983

ASTM B-117; **Methods of Salt Spray (Fog) Testing, Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.02**, (Philadelphia, PA: ASTM) – 2003

DREXLER. P., et al – **Planejamento e Projeto de Sistemas de força hidráulica** – volume 3 - 2008

FIALHO, A. B., **Automação Hidráulica (Projetos, Dimensionamento e Análise de Circuitos)**. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2003

GENTIL,V. **Corrosão**. 6<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2011

ISO 9227 International Standard; **Corrosion tests in artificial atmospheres - Salt spray tests** - jul 2006

## MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA: COLHEITADEIRAS AXIAIS X RADIAIS

**Filipi José Arantes Lemos**

Graduado em engenharia mecânica pelo Centro Universitário do Sul de Minas.  
Varginha – MG.

**João Mario Mendes de Freitas**

Mestre em engenharia elétrica, especialista em gestão de TI e robótica industrial, graduado em engenharia mecânica e administração. Varginha – MG.

**RESUMO:** Este trabalho através da pesquisa bibliográfica aborda o desenvolvimento de colheitadeiras de grãos, com o sistema de trilha axial e radial ou tangencial. Tal abordagem é devida ao fato, da agricultura implementar esta tecnologia, e também com o crescimento da população e a alta demanda de alimentos, precisa-se de equipamentos que consigam suprir esta demanda, e oferecer ao produtor qualidade no serviço e lucro na produção, reduzindo perdas da lavoura, e à população alimentos saudáveis e com menos tempo de produção. O objetivo deste estudo é demonstrar a tecnologia aplicada nas máquinas, demonstrando as mudanças efetuadas nas máquinas radiais para a tecnologia axial. Este propósito será conseguido através de pesquisa sobre as máquinas mais antigas que utilizam do sistema radial, e um estudo nas máquinas modernas, compostas pelo sistema axial e

demonstrar a eficiência dessas máquinas e a facilidade na sua utilização. Demonstrando também a tecnologia embarcada nessas colheitadeiras.

**PALAVRAS-CHAVE:** Colheitadeiras. Axial. Radial.

**ABSTRACT:** This work through the bibliographical research deals with the development of grain harvesters, with the axial and radial or tangential track system. Such an approach is due to the fact that agriculture implements this technology, as well as population growth and high food demand, equipment that can meet this demand is needed, and to provide the producer with quality in service and profit in production, reducing crop losses, and to the population healthy food and with less time of production. The objective of this study is to demonstrate the technology applied in the machines, demonstrating the changes made in the radial machines for the axial technology. This purpose will be achieved through research on the older machines that use the radial system, and a study on the modern machines, composed by the axial system and demonstrate the efficiency of these machines and the ease of use. Demonstrating also the technology embedded in these harvesters.

**KEYWORDS:** Harvesters. Axial. Radial.

## 1 | INTRODUÇÃO

O agronegócio é uma relação industrial e comercial, envolvendo uma cadeia produtiva na agricultura e pecuária. Associada a tecnologias avançadas que utilizam pouca mão de obra e mais da máquina. Com isso, faz-se referência ao termo “mecanização agrícola”, cujo objetivo principal é empregar o uso de máquinas e equipamentos agrícolas.

No Brasil, a mecanização agrícola, começou a ser difundida depois da Segunda Guerra Mundial, com os equipamentos importados do mercado americano e europeu, e com isso o país teve que se adaptar a esses maquinários. Desde então os tratores são usados para o manejo e controle da produção, e com isso também foram surgindo os implementos e colhedoras que eram e são acopladas aos tratores, mas nos últimos anos a tecnologia vem crescendo cada dia mais e o uso dos tratores tornou-se indispensável para a produção.

Vários implementos que eram acoplados aos tratores no decorrer dos anos se tornaram independentes, ou seja, implementos automotrices. Um exemplo disso são as colheitadeiras, que devido o avanço da tecnologia e da engenharia, tornou-se um equipamento independente do uso do trator e preciso, podendo tomar decisões no desenvolvimento de serviços, com seu sistema informatizado que pode ser composto de computadores de bordo, sistema de controle de estabilidade, GPS, piloto automático, dentre vários outros itens que com o decorrer dos anos vem auxiliando o produtor e a população. Justamente pelo crescimento da população, que se fez-se necessário o avanço dessa tecnologia, para acompanhar o crescimento e fornecer o alimento para todos.

As primeiras colheitadeiras, as chamadas colheitadeiras radiais ou tangenciais, possuem cilindro e côncavo na transversal da máquina, onde o material cortado passa entre o cilindro e o côncavo para acontecer a trilha, posteriormente passando para o sistema de limpeza e a palha conduzida para o saca-palhas, passando pelo batedor traseiro. A característica do uso desse sistema, é mudar a trajetória do material pela rotação do cilindro, mas com isso causa uma certa demora na saída dos grãos, acarretando em perdas mecânicas, perdas da produção e o retardamento do fluxo da colheitadeira.

Com o avanço tecnológico, e com a tentativa de diminuir as perdas causadas pelo sistema tangencial das colheitadeiras, foi desenvolvido as colheitadeiras axiais, cuja característica do sistema é a instalação do rotor e do côncavo no sentido longitudinal da colheitadeira, evitando com isso, a demora do material na trilha, fazendo com que o material cortado se desloque paralelamente ao eixo do rotor, com maior tempo de separação dos grãos, reduzindo com isso, as perdas da produção.

Ao decorrer deste trabalho, serão descritas as diferenças entre esses dois sistemas de separação e limpeza dos grãos, evidenciando as diferenças entre eles e detalhando cada sistema com suas devidas características.

E demonstrando também algumas tecnologias que foram implantadas nas colheitadeiras, pois com o aumento da população e a alta demanda de alimentos e produtos, fez-se necessário que essas máquinas se modernizassem. Com isso, a tecnologia cresceu e pode ajudar na solução da alta demanda. Com a mecanização agrícola, e o avanço da tecnologia, o que no passado levava dias para produzir e colher, hoje conseguimos fazer em horas e em alta escala, proporcionando um produto de maior qualidade aos consumidores, com menos perdas da lavoura, maior produção de alimentos, atendendo a demanda por alimentos e contribuindo na lucratividade do produtor.

## 2 | HISTÓRIA DAS COLHEITADEIRAS

Em 1965, a empresa gaúcha Schneider, Logemann & Cia. Ltda, foi a responsável pela produção da primeira colheitadeira autopropelida do Brasil, a máquina pioneira foi a SLC 65-A, apresentada na figura 1, equipada com motor a gasolina Chevrolet, baseada na tecnologia do modelo 55 da norte-americana John Deere.

O projeto foi coordenado pelo engenheiro Fernando Krause. Em 1969 a 65-A foi substituída pela SLC 1000, já com projeto próprio, que teria grande aceitação e seria fabricada por dez anos. Equipada com motor Mercedes-Benz e caixa de cinco marchas acoplada a variador de velocidades hidráulico, possuía plataforma de corte com largura de 4,2 m. A seguir vieram os modelos de maior porte 2000 e 2200 (JOHN DEERE, 2018).



Figura 1: Primeira colheitadeira, SLC 65-A.

Fonte: Lexicar, 2018.

Em 1983 foi lançada um equipamento totalmente novo – a 6200, conforme mostrada na figura 2 – com tecnologia norte-americana. Usando pela primeira vez

em suas máquinas a cor verde da *John Deere*, embora mantendo sua própria marca. O modelo traria como opcionais itens inéditos no segmento, tais como motor turboalimentado e transmissão hidrostática. Em 1986 seria disponibilizada a versão Turbo, com motor Mercedes-Benz de 148 cv. Equipamento de grande sucesso, o modelo 6200 dominaria o mercado nos anos seguintes, com alguns milhares de unidades fabricadas. Naquele mesmo ano a linha de produtos foi enriquecida com a introdução de plantadeiras de precisão, também de projeto *Deere* (JOHN DEERE, 2018).



Figura 2: SLC 6200

Fonte: John Deere, 2018.

Em 1987 seria lançada a SLC 7200 (figura 3), maior colheitadeira brasileira de então, com motor aspirado de 148 cv ou turbo de 162 cv, tanque graneleiro de 4.800 l e plataformas de corte de até 6,0 m de largura. A máquina recebeu o Prêmio Gerdau Melhores da Terra do ano, na categoria Destaque. A linha de colheitadeiras foi renovada em 1993, com quatro modelos: 6300 e 7300 (atualização dos antigos 6200 e 7200), e as novas 7500 e 7700, as duas últimas novamente agraciadas com o Prêmio Gerdau: a 7700 Turbo em 1994, com o Troféu Prata na categoria Destaque, e a 7500 em 1996, com o Troféu Ouro na categoria Novidade (LEXICAR BRASIL, 2018).

Toda a linha de colheitadeiras, naquela altura, já vinha equipada com motores *John Deere* importados da Argentina. A SLC tornara-se, aos poucos, virtual dependente técnica da *Deere*, sendo simples questão de tempo sua absorção total pela empresa norte-americana. Ainda em 1996 a participação no capital da empresa gaúcha aumenta para 40%, levando à alteração da razão social para SLC-John Deere Ltda (LEXICAR BRASIL, 2018).

Em 1999, foi integrado o primeiro pacote de mapeamento de rendimento, o sistema *GreenStar™*, para todas as colheitadeiras *Maximizer™* da série 9000. Ele fornece o rendimento em movimento e leituras de umidade, informações de posição diferencialmente corrigidas e processamento de dados. Com isso começava a implementação de tecnologia para uso no campo.



Figura 3: Modelo SLC 7200 turbo.

Fonte: John Deere, 2018.

### 3 | COLHEITADEIRAS DE GRÃOS

As colheitadeiras de grãos podem ser de arrasto, quando tracionadas pela barra de tração e acionadas mecanicamente pela tomada de potência, montadas, semelhante às de arrasto, porém acopladas ao sistema de levante hidráulico do trator, e autopropelida, quando as máquinas possuem fonte de potência própria. (NUNES, 2016).

A colhedora autopropelida, possui sistemas com funções específicas. Os principais são o corte, a alimentação, a trilha, a separação e a limpeza do produto, mostrados na figura 4. Seus diversos setores podem ser regulados em função das condições e do tipo de cultura a ser colhida, entre elas, a soja, milho, arroz, trigo, sorgo, cevada, aveia, alfafa e malte.

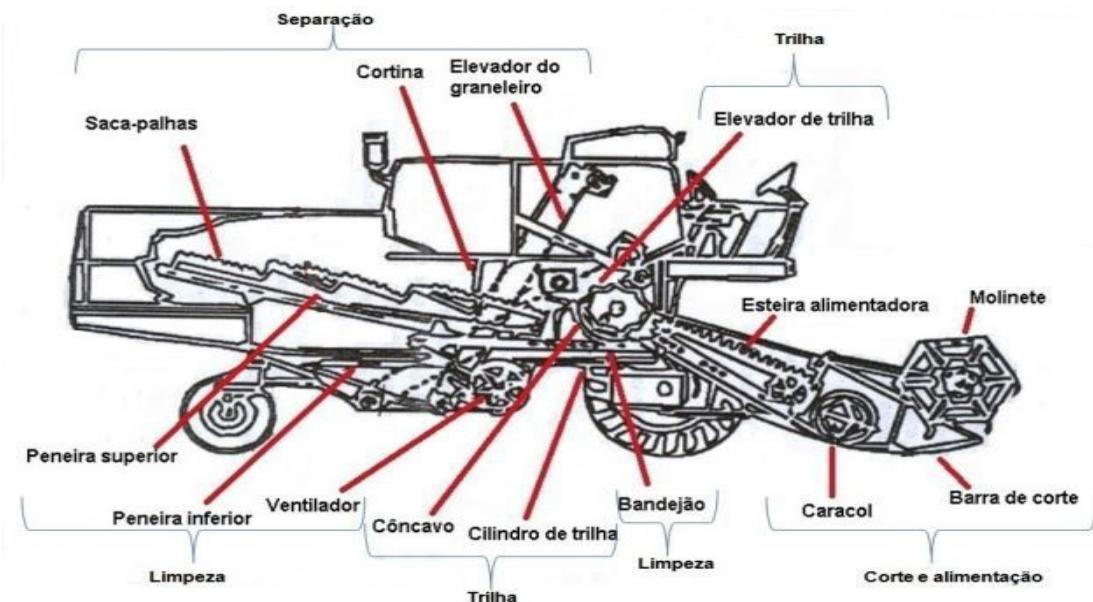


Figura 4: Colhedora convencional.

Fonte: NUNES, 2016

No sistema de corte e alimentação, temos as plataformas que são acopladas as colheitadeiras, temos a plataforma para o cultivo de milho figura 5, e a plataforma de corte, figura 6 para o cultivo de cereais como soja, feijão, aveia, arroz, etc.



Figura 5: Plataforma para colheita de milho.

Fonte: John Deere, 2018.



Figura 6: plataforma para colheita de cereais.

Fonte: John Deere, 2018.

No sistema de trilha é efetuado a debulha do material cortado, onde trilhar significa remover os grãos das vagens, das espigas ou das panículas. Mais de 70% dos grãos são separados nessa área da colhedora, isto é, quando passam através do côncavo para o bandejão. Os 30% restantes são separados pelas demais unidades do equipamento (FAGENELLO, 2018). Pode-se dizer que o funcionamento de toda a colhedora depende diretamente da unidade de trilha, pois, se ela não for bem-sucedida, as outras funções da máquina serão afetadas. Por exemplo, se for muito pequena a quantidade de grãos separados na unidade de trilha, uma quantidade excessiva de grãos será lançada sobre os saca-palhas junto com a palha, ocasionando as perdas pelos saca-palhas. Na trilha tem-se a presença do cilindro de trilha e do côncavo.

Onde o cilindro de trilha é composto de barras estriadas dispostas sobre uma estrutura metálica em forma de cilindro. Tem a função de exercer ações mecânicas de impacto, compressão e atrito, por esfregamento. Já o côncavo possui forma aparente de uma calha tendendo a envolver o cilindro de trilha. Composto de barras estriadas unidas por estrutura metálica que toma forma de uma grelha que permite a filtração das sementes, vagens e fragmentos de vagens e de hastes (NUNES, 2016). Na figura 7 temos um exemplo da trilha.

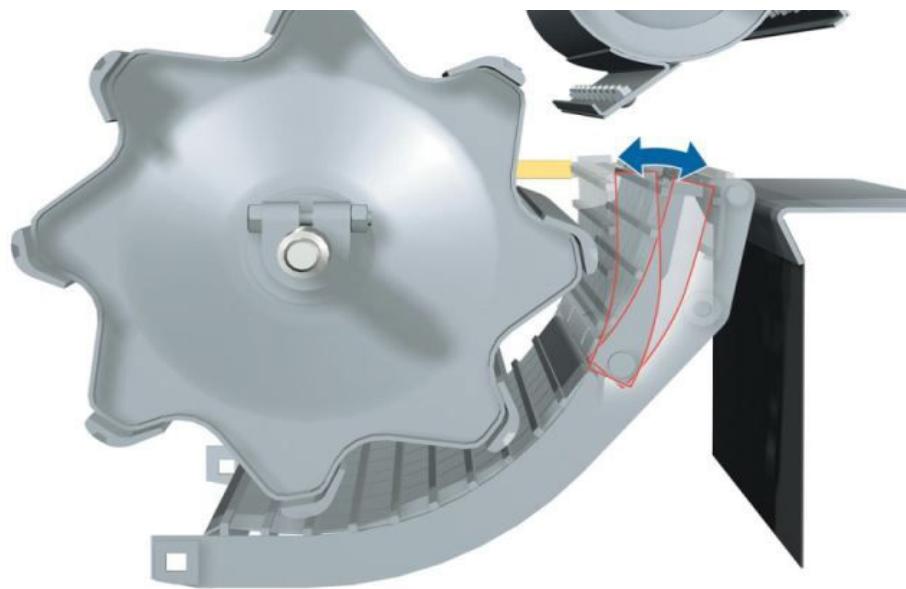


Figura 7 : sistema de trilha.

Fonte: Nunes, 2016.

No sistema de separação, temos presente o saca-palhas, mostrado na figura 8, cuja finalidade é eliminar a palha graúda e recuperar as sementes misturadas à mesma. Composto geralmente de 4 a 6 calhas perfuradas, com grelhas no seu interior para a recuperação e escoamento das sementes e com as bordas em forma de cristas voltadas para a parte traseira para eliminar a palha graúda. Possui também o batedor que reduz a velocidade da palha eliminada pela abertura de saída do sistema de trilha e direcioná-la para a parte frontal do saca-palhas, realizando ainda uma batedura final da palha graúda. As cortinas retardadoras estão situadas sobre o saca-palhas e têm a função de retardar a velocidade de eliminação da palha, para garantir a filtragem das sementes. E fazendo parte também do sistema de separação tem-se a extensão regulável do côncavo, responsável por suspender o fluxo de palha e sementes, de forma que o batedor direcione o mesmo sobre o extremo dianteiro do saca-palhas, aproveitando, toda a área de separação. Na falta da extensão do côncavo, a maior parte do material trilhado cairia sobre o bandejão, indo posteriormente sobrecarregar as peneiras.



Figura 8 : exemplo do saca-palhas.

Fonte: NUNES, 2016.

Por fim tem-se o sistema de limpeza, responsável pela limpeza dos grãos, demonstrado na figura 9, composto pelo bandejão que é uma superfície em forma de crista, que alterna partes inclinadas e verticais, voltada para a parte posterior da colheitadeira, situada abaixo do côncavo e possui um movimento retilíneo de vai-e-vem. As partículas mais pesadas, no caso as sementes, ficam embaixo, e as partículas mais leves, o palhiço, em cima. Na parte final do bandejão, um pente de arame facilita a separação dos grãos e da palha, auxiliado pela corrente de ar do ventilador. Já a peneira superior, possui uma abertura ajustável e um movimento de vai-e-vem. Recebe o material vindo do bandejão e tem a função de filtrar os grãos. Pelo movimento de vai-e-vem, as vagens inteiras devem ser transportadas até a parte posterior da peneira onde passarão à extensão da peneira superior, que possui abertura um pouco maior do que a peneira inferior. Nesta extensão, as vagens inteiras e pedaços de vagens ainda contendo sementes, serão filtrados e dirigidos novamente ao mecanismo de trilha. Abaixo da peneira superior tem-se a peneira inferior, similar à superior, devendo ter sua abertura ajustada para permitir somente a passagem de sementes. E por último o ventilador, com a função de gerar uma corrente de ar ascendente que age por baixo das peneiras eliminando todas as partículas mais leves que as sementes. Retirando possíveis sujeiras não eliminadas no sistema de separação, conforme figura 9.



Figura 9: sistema de limpeza.

Fonte: Nunes, 2016.

Esses sistemas citados estão presentes basicamente nas colheitadeiras radiais ou tangenciais, porém como esse sistema possui algumas falhas e acaba sendo lento justamente pelo funcionamento do sistema, podendo-se dizer que a maioria das perdas ocorre nos sistemas de trilha e separação (BISOGNIN, 2014).

Com o intuito de melhoria do sistema foi desenvolvido o sistema axial, esses dois sistemas vão ser descrevidos posteriormente, demonstrando suas características e mostrando justamente a causa das perdas e como o sistema axial diminui esses efeitos, oferecendo rentabilidade e agilidade no processo de colheita.

### 3.1 Colheitadeira radial ou tangencial

O sistema radial, possui cilindro e côncavo na transversal, a trilha acontece através do acesso do material cortado pela esteira, passando entre o cilindro e o côncavo onde acontece a trilha. Grande parte dos grãos separados na trilha desce pelo côncavo em direção ao sistema de limpeza e a palha graúda é conduzida para o saca-palhas, passando pelo batedor traseiro, recebendo impacto contra o pente do côncavo complementando a trilha e contribuindo na separação (PINHEIRO, 2014).

Como o sistema muda a trajetória do material pela rotação do cilindro, acaba causando a morosidade de saída dos grãos, acarretando em danos mecânicos aos grãos, bem como o retardamento do fluxo da palha, sobre carregando o sistema de separação e limpeza. O maior tempo de permanência do material, causa maior impacto agressivo, comprometendo a qualidade da colheita.

O sistema de trilha na colheitadeira de grãos é sem dúvida o mais importante e que define resultados tanto positivos quanto negativos no processamento do material e do fluxo do mesmo no interior da máquina. Ele é responsável por receber a planta cortada em um curto espaço de tempo e, além de trilhar e separar o grão da palha, define o caminho e o destino final desse material. É através de côncavo que os grãos são direcionados para o sistema de limpeza e daí para o armazenamento, já a palha

é direcionada para fora da máquina pelo sistema de separação.

É fundamental que na trilha haja condições de que no mínimo 90% dos grãos trilhados tenham acesso ao sistema de limpeza através do côncavo e no máximo 10% de palha. Já no sistema de separação nas convencionais saca-palhas, no máximo 10% de grãos e no mínimo 90% da palha, caso contrário, as perdas pelas peneiras tornam-se inevitáveis. Há, ainda, excesso de retrilha (quebra de grãos) e a máquina pode ficar sobrecarregada (PINHEIRO, 2014).

Com relação a regulagens, os melhores resultados se dão quando a colhedora trabalha com a menor rotação necessária do cilindro para as condições da cultura e que permita a trilha sem triturar a palha graúda.

Já o côncavo deve ser o mais afastado possível em relação ao cilindro e sempre com abertura maior na parte dianteira, como ajuste básico, regula-se nos tirantes laterais com medidas específicas. Uma alternativa é trabalhar com o côncavo todo solto (para baixo), buscando, além da trilha, mais separação de grãos através do côncavo, mantendo a palha mais graúda possível e assim não sobrecarregando as peneiras.

O ideal é quando a colheitadeira trabalha com saca-palhas carregado e peneiras vazias, e não o contrário, o que só é possível nas condições acima mencionadas. Nesse caso, em culturas como a soja, por exemplo, a vagem não deve ser retirada da planta; apenas os grãos. Isso contribui na redução de perdas por peneiras e na qualidade do grão pela redução de retrilha. Sempre que a trilha não esteja satisfatória busca-se a melhoria através da maior rotação do cilindro e nunca com aproximação do côncavo ao mesmo. Qualquer aproximação do côncavo ao cilindro provoca atrito (quebra do material), equivalente a algumas centenas de RPM a mais do cilindro.

### 3.2 colheitadeiras axiais

A *International Harvester Company*, fabricante que iniciou a produção em série (em 1978) de uma colhedora de ‘fluxo axial’ para todo os tipos de grãos e sementes (MARQUEZ, 2016). Para chegar ao mercado, este tipo de máquina percorreu um longo caminho, desde a patente na Alemanha de uma máquina acionada por manivela em 1886, passando pelas experiências realizadas ao longo das décadas de 60 e 70, que puderam comprovar que este sistema poderia conseguir bons resultados com qualquer tipo de grão. Os objetivos que se pretendiam com estes desenvolvimentos eram: incrementar a capacidade de trabalho das máquinas, sem aumentar suas dimensões, conseguir ajustes mais fáceis de serem realizados e menos sensíveis às variações da colheita, melhorando a qualidade do grão colhido.

A colhedora axial cujo sistema é composto por rotor e côncavo longitudinal em relação à máquina, tem como característica principal o menor tempo de permanência do material na sessão de trilha, reduzindo danos mecânicos, na qual o material se desloca paralelo ao eixo do rotor, com maior tempo de separação do grão da palha,

reduzindo perdas (PINHEIRO, 2014).

No sistema axial, a trilha e a separação acontecem concomitantemente por um único sistema, indicado na figura 10, objetivando primordialmente a qualidade do grão e a redução de perdas. Esse sistema apresenta maior eficácia na colheita de sementes e de culturas mais exigentes em qualidade na trilha como arroz, feijão, soja, milho, entre outras.

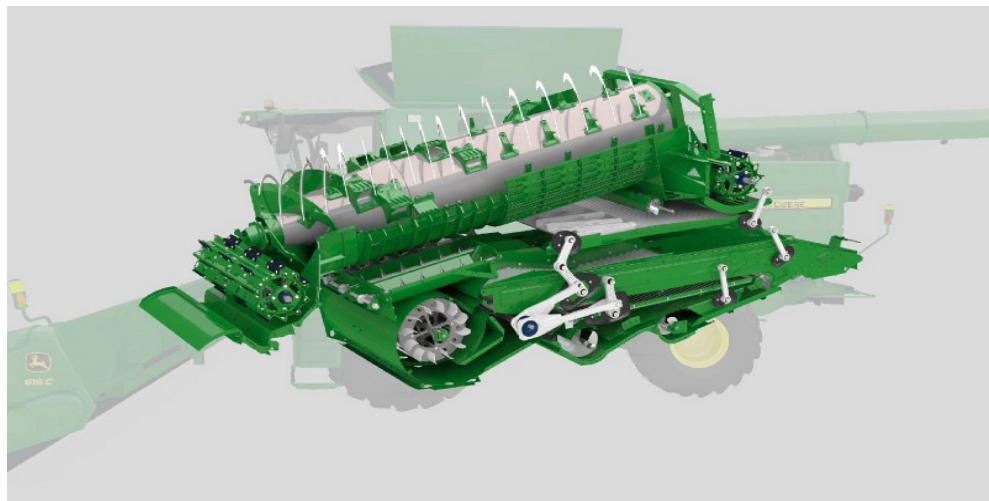


Figura 10: sistema axial.

Fonte: Farias, 2015.

O sistema axial, pelo fato de que o rotor e o côncavo estão situados no sentido longitudinal da colheitadeira, acelera a saída dos grãos do sistema, minimizando o atrito e diminuindo as quebras e a separação acontece gradativamente ao longo do côncavo até o sistema de limpeza.

Os rotores axiais, compostos por pequenas barras de trilhas intercaladas na parte dianteira da circunferência dos mesmos, causam menos atrito e melhora a separação. Na parte posterior do rotor são distribuídos dedos (grampos) em toda circunferência, que além de proporcionar a separação, provoca limpeza do côncavo permitindo a descida dos grãos para o sistema de limpeza e contribuindo também no acabamento da trilha de grãos que ainda possam estar presos na planta. Paralelamente ao rotor está o côncavo com maior área de separação dos demais sistemas e que possui seções de grelhas diferentes tanto na abertura quanto na disposição, sessões essas de fácil remoção e reposição, podendo também ser usadas grelhas específicas para cada cultura fornecidas pelo fabricante.

### 3.3 axiais x radiais

Parâmetros	Colheitadeira axial	Colheitadeira radial
Tempo de saída da palha	4 a 5 segundos	10 a 12 segundos
Velocidade cilindro	4 a 10 m/s	5 a 6 m/s

Velocidade vibradores	5 a 11 m/s	0,4 a 1,0 m/s
Velocidade do rotor	10 a 30 m/s	

Tabela 1: Comparação entre colheitadeiras.

Fonte: Marquez, 2016.

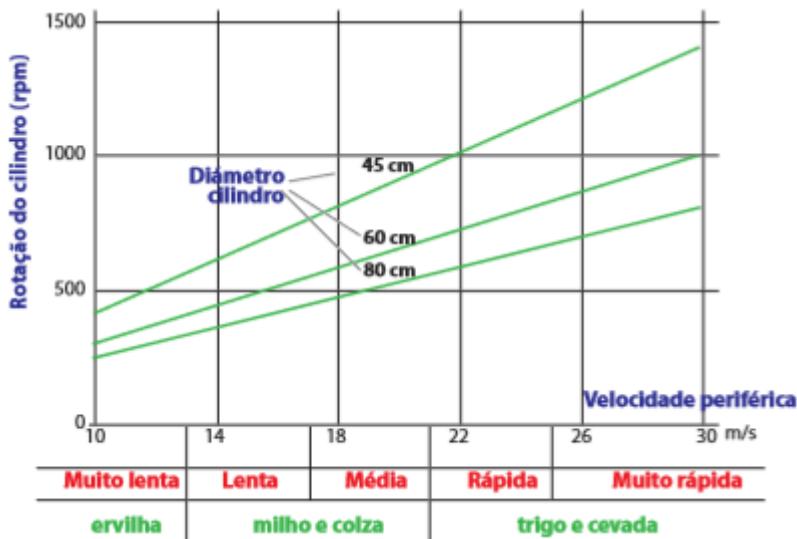


Figura 11: Regime de giro do cilindro debulhador, nas colheitadeiras radiais.

Fonte: Marquez, 2016.

Pode-se perceber que com a implantação do fluxo axial nas colheitadeiras, consegue-se uma rentabilidade maior do serviço da máquina, com ganhos na operação, na produção e no tempo gasto da colheita. Antes de sair da máquina, a palha passa na parte traseira do rotor que atua como um lança-palha situado em cima da caixa de peneiras, cuja intensidade de ação é ajustável e que ajuda na expulsão da palha (MARQUEZ, 2016).

O rotor é acionado na parte de trás, utilizando um variador de velocidade e uma caixa de duas velocidades com a qual se pode modificar a velocidade de rotação entre 280 e 650 rpm e 530 e 1.260 rpm. As velocidades lentas se recomendam para grãos mais frágeis, enquanto as mais rápidas para os produtos difíceis de trilhar. Em resumo, o rotor substitui 16 elementos em movimento de uma máquina com fluxo radial (MARQUEZ, 2016).

Analizando os dados da tabela 1 e da figura 11, percebe-se que nas colheitadeiras axiais, obtém-se, velocidade nos cilindros variando entre 10 a 30 m/s, mesma velocidade dos rotores das axiais, porém a rotação é bem superior. Nas axiais tem-se os rotores variando entre 200 a 1000 rpm, enquanto nas radiais, 200 a 1500 rpm.

O avanço da colheita depende da velocidade axial que gera ondulações no produto colhido. O tempo de resposta da colheita para percorrer o caminho até chegar ao rotor, em uma colhedora de debulha axial, é de 4 a 5 segundos, praticamente a metade do tempo empregado desde que chega ao cilindro debulhador até que sai dos sacudidores em uma colhedora convencional (MARQUEZ, 2016).

Em cilindros com um comprimento entre 3 e 4 m, se o produto colhido percorre essa distância em 4 a 5 segundos, isto significa que a velocidade axial média se encontra ao redor de 1 m/s. Quando apareceram as primeiras ‘axial-flow’ indicavam que as velocidades de avanço do produto colhido variavam entre 1,3 e 2,0 m/s, na primeira parte (região de debulha), para baixar até a metade na zona de separação (MARQUEZ, 2016).

## 4 | RECURSOS TECNOLÓGICOS

Alguns recursos tecnológicos, são utilizados pelas principais montadoras de colheitadeiras do Brasil e do mundo. O sistema *AFS Pro 700*, avalia e monitora o funcionamento da colhedora e, além de gerar mapas de produtividade, possui um display *touch screen* com entrada USB e de vídeo, com acesso facilitado ao operador. A máquina conta ainda com piloto automático *AFS Guide*, ligado a uma antena AFS 372. Esta antena possui uma ampla cobertura de satélites, além de sinais RTK e RTX, que melhoraram a precisão dos sinais obtidos pelo GPS.

Outras montadoras, utilizam piloto automático *AutoTrac™*, dispositivo que, via satélite, guia a colhedora por uma linha planejada, restando ao operador realizar apenas as manobras de cabeceira. Além do piloto automático, dispõe de um controle automático de alimentação *HarvestSmart™*, que permite controlar a velocidade de colheita, ajustando as perdas de colheita, a carga no motor e a pressão de material no rotor. Assim, os sistemas funcionam de forma integrada. Para a colheita de milho, a máquina conta com o sistema *AutoTrac™ RowSense™*, tecnologia que relaciona os dados de posição com os dados do sensor de linha. Dotada de sensores ligados a um receptor de sinal GPS.

Sistemas *Fieldstar II*, responsável pelo monitoramento das funções e desempenho da colhedora também são utilizados. As informações obtidas instantaneamente pelos sensores são enviadas, gravadas e visualizadas no terminal C2100, de display LCD *touch screen*. Além disso, os dados obtidos podem ser coletados por meio de uma entrada USB. As máquinas possuem em sua versão *standard* piloto automático *Auto-Guide 3000* e o sistema de telemetria *AGCOMmand™*, que monitora a posição e algumas funções da colhedora, 24 horas por dia. Algumas colheitadeiras, são equipadas com *IntelliView™*, localizado junto ao console lateral, que permite o operador verificar as funções de desempenho da colhedora, sendo capaz de receber imagens de três câmeras. O piloto automático *IntelliSteer™* conta com um pacote de orientação, que utiliza DGPS ou RTK, garantindo uma margem de erro de até 2,5cm.

## 5 | METODOLOGIA

Trata-se de uma pesquisa descritiva com objetivo de levantar, analisar e

correlacionar dados obtidos na pesquisa, estabelecendo relações entre variáveis. Assim construiu-se uma pesquisa qualitativa, ou seja, qualificou-se dados, permitindo elaborar comparações e análises.

Para sustentar a pesquisa, foi realizada uma revisão bibliográfica buscando discutir como a literatura percebe essa tecnologia que foi empregada, facilitando a operação e ajudando no desenvolvimento. Mostrando assim as diferenças empregadas nas máquinas, e como ajuda no desenvolvimento da mecanização e para o produtor.

## 6 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando os dados fornecidos, e comparando uma colheitadeira STS 9570, de fluxo axial, e uma 1450, de fluxo radial. Pode-se perceber que as colheitadeiras axiais, possuem vantagens sobre as radiais. Num determinado período de colheita de milho, com umidade da lavoura entre 15 a 20 graus, obtém-se com uma colheitadeira axial, uma produção de 3000 sacas por dia, frente a 1500 sacas em fluxo radial, em velocidade média de 4,5 km/h, colhendo uma área de 20 a 22 hectares ao dia, e cerca de 10 a 12 hectares por dia na radial.

Pode-se destacar também, no fluxo axial, obtemos maior número de regulagens de colheita, podendo utilizar a máquina, em diversos cultivos. Donde, com a troca de alguns componentes, pode-se efetuar a colheita de vários produtos, obedecendo as especificações de cada fabricante, e agredindo menos o produto colhido. Já no fluxo radial, estas regulagens e trocas de componentes, são limitados, aumentando possíveis perdas de produção.

Com esses dados, pode-se avaliar que as colheitadeiras, são capazes de fornecer alimentos em tempo reduzido, comparado ao modo de colheita antigo, e contribui para a lucratividade do produtor.

Porém, as colhedoras de fluxo axial, ainda apresentam um custo muito maior, e manutenção mais cara do que as de fluxo radial, por isso as colheitadeiras tangenciais, são mais utilizadas por pequenos e médios produtores, pois atendem muito bem a demanda da produção, e o custo é bem menor e mais fácil de manter. Já um grande produtor, possui maior tempo para investir na máquina e o custo de manutenção é reduzido.

Com relação a tecnologia que vem embarcada, nas colheitadeiras podemos ressaltar que com o auxílio do piloto automático garanta para a colheitadeira manter uma carga de colheita consistente alterando automaticamente a velocidade da colheitadeira para compensar as variações na colheita que não são facilmente visíveis para o operador.

Durante o curso de um longo dia de colheita, os operadores são desafiados a manter a colheitadeira no desempenho máximo devido às condições de colheita variáveis que afetam a carga da colheita. Com os sistemas automatizados a colheitadeira, se ajusta às condições de mudança mais rapidamente do que um operador médio, mantendo

uma carga de colheita consistente na colheitadeira. Como o sistema de controle mantém automaticamente a máquina na capacidade máxima de carga, conforme definido pelo operador, a fadiga e o estresse são reduzidos e a produtividade geral da colheita é aumentada, mantendo a qualidade de grãos consistente e grãos mais limpos, devido a carga de colheita mais consistentes.

Com toda essa tecnologia foi possível reduzir as lacunas e sobreposições, de modo que os custos de insumos e o consumo de combustível fossem reduzidos, enquanto que a taxa de trabalho é aumentada. Dependendo da aplicação, pode-se esperar uma economia de até 8%, e um aumento em produtividade de até 14%. Pois a precisão é assegurada, as tarefas podem ser concluídas em um período de tempo mais curto e, sempre, com o mesmo nível de precisão. O operador, aliviado do estresse e fadiga por dirigir, pode concentrar-se na gestão e no desempenho do implemento, o que é uma boa notícia para a produtividade das suas operações. Também permite que os operadores executem linhas espaçadas uniformemente mesmo após o pôr-do-sol, bem como em condições adversas como poeira ou nevoeiro.

Foi possível otimizar o número de passes e reduzir a compactação do solo. Limitando o tráfego entre determinadas linhas e utilizar as mesmas linhas de tráfego ano após ano, sacrificando uma pequena porção do campo. Restringir o tráfego para rotas específicas também fornece uma superfície de solo firme para uma operação mais eficiente da máquina agrícola.

## 7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de trilha de fluxo longitudinal mostrou-se mais eficiente quando comparado ao sistema de trilha de fluxo radial, elevando a qualidade dos grãos e reduzindo as taxas de perda.

A tecnologia abrangente nas colheitadeiras de grãos, facilita o trabalho na colheita, conforme todo o estudo efetuado. Mas também trouxe para a atualidade, muitos ganhos, tanto para quem trabalha no equipamento, como para quem depende dos produtos colhidos, no caso a população em geral.

Antigamente para colher uma área de cultura se levava dias, semanas e até mesmo meses, podemos perceber no cenário atual, que essa diferença é maior, pois consegue-se colher essa área em algumas horas de serviço, respeitando as especificações da máquina, e operando corretamente sem danificá-la.

Já o sistema de piloto automático, facilitou a operação da colheitadeira, e com esse sistema, a máquina é operada sem erros, que possa danifica-la, e reduz o custo de mão de obra, para o produtor rural.

Pode-se destacar também que com a implantação do fluxo axial nas colhedoras, obtivemos um índice menor de perdas de produtos, perdas mecânicas e um aumento do índice de produto oferecido para o consumidor final.

Mas vale ressaltar que as colhedoras tangenciais, exercem um papel muito importante tanto quanto as de fluxo axial. Para um produtor de pequeno porte por exemplo, essas máquinas são muito utilizadas, seja pelo custo, como pela disponibilidade, pois exerce muito bem o seu papel. E que tanto para as colheitadeiras axiais como para as radiais, deve-se tomar alguns cuidados com o equipamento, na sua utilização, sempre mantendo as revisões, e obedecendo o que vem descrito no manual.

## REFERÊNCIAS

AGROLINK. John Deere comemora os 50 anos da primeira colheitadeira do Brasil. Disponível em: <[https://www.agrolink.com.br/noticias/john-deere-comemora-os-50-anos-da-primeira-colheitadeira-do-brasil\\_218138.html](https://www.agrolink.com.br/noticias/john-deere-comemora-os-50-anos-da-primeira-colheitadeira-do-brasil_218138.html)>. Acesso em: 27/08/2018.

AMATO NETO, João. **A indústria de máquinas agrícolas no brasil – origens e evolução**. Rio de Janeiro, 2014.

BISOGNIN, Bruno et al. Trilha Trocada. **Cultivar máquinas**, ano 12, nº 142, p. 26-29, jul. 2014.

FAGANELLO, Antônio et al. **Colheita**, 2018. Disponível em <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitsstream/item/128608/1/1D-43072-2015-trigo-do-plantio-a-colheita-cap11.pdf>>. Acesso em 04/10/2018.

FARIAS, Marcelo Silveira et al. As maiores. **Cultivar máquinas**, ano 13, nº 153, p. 20-29, jul. 2015.

John Deere: 175 anos de história. Disponível em: <[https://www.deere.com.br/pt\\_BR/our\\_company/news/press\\_releases/2012/may/175\\_years\\_of\\_history/175\\_years\\_of\\_history.page](https://www.deere.com.br/pt_BR/our_company/news/press_releases/2012/may/175_years_of_history/175_years_of_history.page)>. Acesso em: 02/04/2018.

John Deere comemora os 50 anos da primeira colheitadeira no Brasil. Disponível em: <[https://www.deere.com.br/pt\\_BR/products/equipment/grain\\_harvesters/50-years.page](https://www.deere.com.br/pt_BR/products/equipment/grain_harvesters/50-years.page)>. Acesso em: 04/04/2018.

LEXICAR BRASIL. SLC, 2018. Disponível em: <<http://www.lexicarbrasil.com.br/slc/>>. Acesso em: 4/10/2018.

MÁRQUEZ, Luiz. Debulha e separação através de rotor de fluxo axial nas colhedoras de grãos. **Agri World**, ano 7, n. 23, p. 32-42, 2016.

NUNES, José Luiz da silva. **Tecnologia de sementes – colheita**, 2016. Disponível em: <[https://www.agrolink.com.br/sementes/tecnologia-sementes/colheita\\_361342.html](https://www.agrolink.com.br/sementes/tecnologia-sementes/colheita_361342.html)>. Acesso em: 05/10/2018.

PINHEIRO, Plinio Pacheco. Opções para colher bem. **Cultivar máquinas**, ano 12, nº 141, p. 8-13, jun. 2014.

SANTOS FILHO, Abílio Garcia dos; SANTOS, João Eduardo Guarnetti Garcia dos. **Apostila de máquinas agrícolas**. São Paulo: Unesp. 2001.

# CAPÍTULO 11

## MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLOGÍCA PARA O PROJETO DE MODELOS DE BIELAS E TIRANTES

**Jamile Maria Araujo Tavares**

Universidade Federal de Sergipe  
São Cristóvão - SE

**Rejane Martins Fernandes Canha**

Universidade Federal de Sergipe  
São Cristóvão - SE

utilizando o Método de Otimização Topológica para a obtenção de Modelos de Bielas e Tirantes viáveis para efeitos de projeto.

**PALAVRAS-CHAVE:** Otimização Topológica; Elementos Finitos; Bielas e Tirantes; Concreto Armado.

**ABSTRACT:** The safety of structures and the quality of constructions depends on the sizing method used by the designer. For regions with geometric discontinuities and/or static (D regions), the Strut and Tie Model is a tool for sizing and detailing these regions. However, there is still no consensus on the norms of concrete structures and information is incomplete in some of them, such as the definition of resistance and dimensions of the connecting rods and knots in some parts. The Strut and Tie Model, which started from the truss model of Ritter and Mörsch, through the works of Schäfer and Schlaich, provides the possibility of sizing structures without the empiricism that is sometimes used due to the inexperience of the designer and the lack of experimental results. The Topological Optimization is used to obtain a strut and tie model that is efficient in construction and economically feasible. Thus, a numerical modeling was performed using the Topological Optimization Method to obtain feasible Strut and Tie Models for design purposes.

**KEYWORDS:** Topological Optimization; Finite

**RESUMO:** A segurança das estruturas e a qualidade das construções dependem do método de dimensionamento utilizado pelo projetista. Para as regiões com descontinuidades geométricas e/ou estáticas (regiões D), o Modelo de Bielas e Tirantes apresenta-se como uma ferramenta para o dimensionamento e detalhamento dessas regiões. Entretanto, ainda não existe um consenso nas normas de estruturas de concreto e as informações são incompletas em algumas delas, como a definição da resistência e dimensões das bielas e dos nós em algumas peças. O Modelo de Bielas e Tirantes que partiu do modelo de treliças de Ritter e Mörsch, através dos trabalhos de Schäfer e Schlaich, fornece a possibilidade de dimensionar estruturas sem o empirismo que por vezes é utilizado devido a inexperiência do projetista e a falta de resultados experimentais. Já a Otimização Topológica é utilizada para se obter um modelo de bielas e tirantes eficiente na construção e economicamente viável. Assim, foi realizada uma modelagem numérica

## 1 | INTRODUÇÃO

As estruturas podem ser divididas em regiões B, o termo vem de “Beam”, onde a teoria das vigas é aplicada e em regiões D, “Descontinuous”, que são locais de descontinuidade onde a mesma teoria não é aplicada apesar de ambas as regiões serem adjacentes (WIGHT e MACGREGOR, 2012).

As regiões podem ser descontínuas devido a descontinuidades geométricas, proximidades com furos, mudanças abruptas na seção e direção, ou por descontinuidades estáticas como a aplicação de cargas concentradas, reações e presença de articulações. Essas regiões eram dimensionadas pelo conhecimento empírico e pelas “boas práticas”, até os estudos de Schlaich (WIGHT e MACGREGOR, 2012). A Figura 1 apresenta essas regiões.

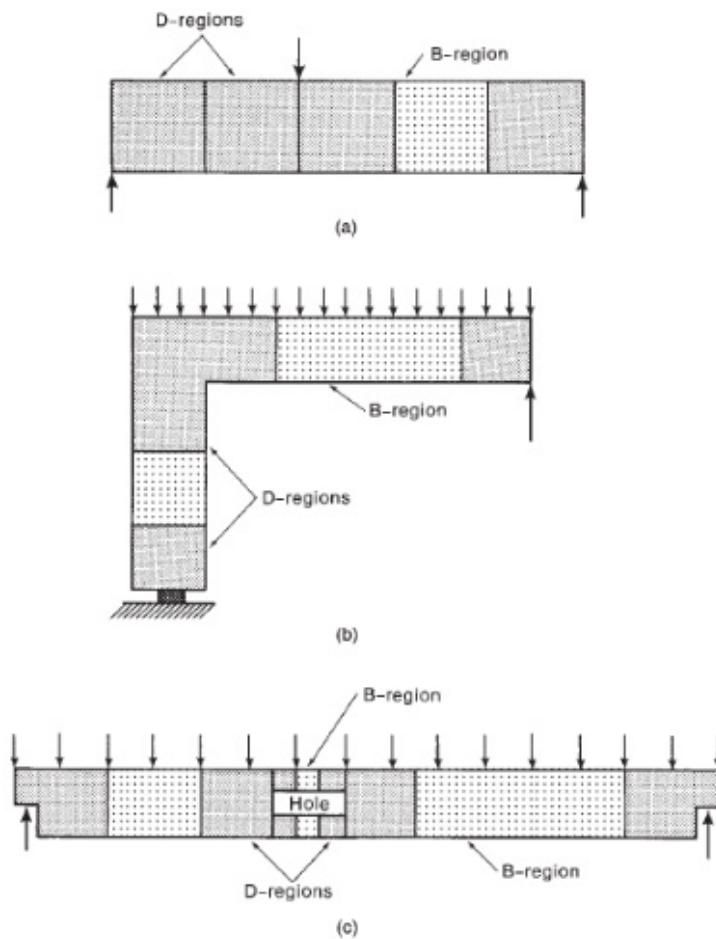


Figura 1. Regiões-B e regiões-D

Fonte: (Wight e MacGregor, 2012)

Na engenharia os problemas de difíceis soluções, como os das regiões D, podem ser resolvidos através do Método dos Elementos Finitos (MEF). Esse método consiste basicamente em substituir um problema difícil por diversos problemas

menores, que podem ser resolvidos para então obter uma resolução aproximada de tal. Cada elemento de pequena dimensão na qual o problema inicial foi discretizado é denominado de Elemento Finito. Esses elementos estão interconectados por nós onde é possível obter soluções aproximadas e onde as equações de equilíbrio podem ser estabelecidas. Dentro do elemento finito são feitas interpolações por funções simples, que possibilitam resultados aproximados a partir das soluções dos nós que contornam cada elemento (Souza, 2004).

Algumas Normas estrangeiras recomendam o MEF para a análise das estruturas, são exemplos o CEB-FIP Model Code (1993), nos seus itens 5.5, 5.6 e 5.7, a norma canadense CSA (1994), EUROCODE 2 (1999), a norma espanhola EHE (1999) de modo implícito. Enquanto a norma brasileira NBR 6118 (2003) recomenda o MEF de modo explícito para elementos especiais do tipo paredes com furo na alma, e de modo implícito para consoles, dentes gerber e vigas-parede, mas não fornece meios para o desenvolvimento de projetos com o uso da metodologia (Souza, 2004).

Atualmente a norma brasileira NBR 6118 (2014) no seu item 14 - Análise estrutural, recomenda que a análise estrutural linear ou não-linear seja realizada por algum método numérico como os métodos das diferenças finitas, elementos finitos ou elementos de contorno. O mesmo acontece no item 22 – Elementos especiais, onde a norma aborda brevemente o Método de Bielas e Tirantes e recomenda o uso do Método dos Elementos Finitos para o cálculo de vigas paredes.

Ainda de acordo com Souza (2004), para a análise de estruturas de concreto, o MEF pode ser visto como um rival do Método das Bielas e Tirantes, porém são as análises elásticas do MEF que possibilitam o encaminhamento das forças no interior da estrutura para a construção dos modelos de bielas e tirantes sem empirismo.

O Modelo das Bielas e Tirantes partiu da analogia da treliça de Ritter e Mörsch. Nesse modelo admite-se que os tirantes estejam escoados antes do concreto chegar a ruptura, por isso é fundamentado no Teorema do Limite Inferior da Teoria da Plasticidade (Souza, 2004).

Foi com os trabalhos de Schäfer e Schlaich que o Modelo das Bielas ganhou impulso, segundo Souza (2004). Eles propuseram simplificações para a resistência das escoras e das regiões nodais, de modo que critérios para o dimensionamento de estruturas de concreto com descontinuidades estáticas ou geométricas puderam ser possíveis.

Para esse modelo, as bielas são os elementos comprimidos do concreto enquanto os tirantes são os elementos tracionados que possuem armaduras localizadas na direção da sua tração. Eventualmente, podem surgir tirantes no concreto para possibilitar o equilíbrio nos nós do modelo. A determinação das tensões é realizada através de fluxos no processo do caminho de carga (Silva, 1991).

Ainda de acordo com Silva (1991), a geometria do modelo depende dos tipos de ações atuantes, ângulos entre bielas e tirantes, área de aplicação das ações e reações, número de camadas da armadura e cobrimento da armadura.

Na aplicação do modelo são definidas as regiões B e D. As regiões contínuas onde as hipóteses de Bernoulli são válidas são chamadas de “B”, enquanto as descontínuas onde as hipóteses de Bernoulli não são válidas de “D”. Nas regiões D a distribuição de tensões é não-linear e são produzidas por descontinuidades estáticas e/ou geométrica, nelas o fluxo interno de tensões é representado pelo modelo de bielas e tirantes (Silva, 1991).

Em projetos deve-se primeiramente, realizar a análise estrutural para dividir a estrutura em regiões B e D. As regiões B podem ser projetadas por modelos de treliça e as regiões D a partir dos esforços solicitantes no seu contorno. Os modelos são geralmente bidimensionais, para isso pode-se subdividir as estruturas em seus planos individuais (Silva, 1991).

O fluxo de cargas, através do processo do caminho de carga, sistematiza o modelo de bielas e tirantes. A região a ser modelada deve estar em equilíbrio externo, caso haja ação distribuída esta deve ser substituída por forças equivalentes concentradas, o caminho de carga é construído entre a ligação das cargas externas com as reações e são feitos pelo menor percurso possível sem se interceptarem. Em seguida o caminho de carga deve ser substituído por linhas de um polígono, essas linhas serão as bielas e os tirantes, também são adicionadas linhas para equilibrar os nós (Silva, 1991). A Figura 2 apresenta essas etapas do modelo.

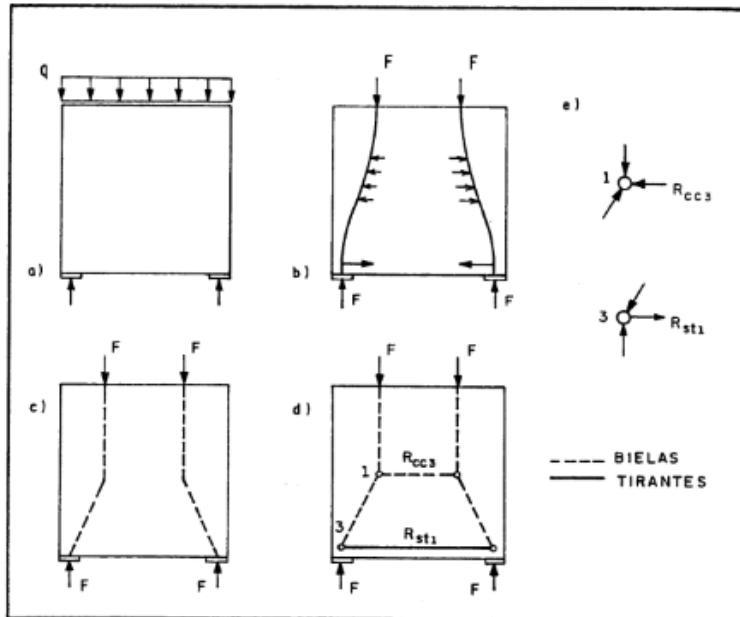


Figura 2. Aplicação do processo de caminho de carga

Fonte: (Silva, 1991)

Apesar da atual aceitação do Modelo de Bielas e Tirantes, existem problemas que impedem sua aplicação e automatização. Problemas como a influência do projetista estrutural para tornar o modelo aplicável, a dificuldade de avaliar se uma topologia representa o fluxo de tensões de modo realista e de qualificar o desempenho de cada

modelo possível, podem ser resolvidos através da Otimização Topológica (Pantoja et al., 2010).

Segundo Souza (2004), a otimização topológica ainda é pouco difundida na engenharia civil e na engenharia estrutural o seu uso ainda está no início. A otimização topológica produz treliças, logo é natural que se pense em representá-la no modelo de bielas e tirantes. Para obter esse modelo o material da estrutura a ser otimizada é distribuído de modo que leve a obtenção da máxima rigidez.

Um inconveniente que pode ocorre ao obter a otimização pela máxima rigidez é que as armaduras são dispostas aleatoriamente o que dificulta a sua aplicação em obras. Mas esse problema pode ser resolvido com o emprego do uso de um padrão discreto na forma de reticulado (Souza, 2004).

Uma das alternativas para a otimização topológica é o modelo de elasticidade plana com otimização evolutiva, consiste em realizar sucessivas análises elásticas através do MEF, a cada iteração os elementos menos carregados são eliminados a partir de uma comparação entre a máxima tensão de Von Mises e a tensão atuante no elemento, a iteração segue até que todos os elementos superem o critério. O fundamento desse modelo está na eliminação das zonas com menores tensões, logo menos aproveitadas, até que a estrutura esteja em um estado ótimo (Souza, 2004).

De acordo com Bendsøe e Sigmund (2003), a otimização topológica tem por objetivo encontrar um layout ótimo para uma estrutura dentro de uma região especificada. Para isso são conhecidas as cargas aplicadas, as condições de apoio, o volume e possíveis restrições na geometria como vazios, seu tamanho e localização. A estrutura é definida por funções com parâmetros que representam a matriz de rigidez do contínuo, então para alcançar o layout ótimo são escolhidos parâmetros adequados.

Ainda em Bendsøe e Sigmund (2003), é apresentado como determinar um desenho na sua forma ideal, isso é feito a partir de um problema de distribuição de material no desenho. Seja um elemento mecânico cujo domínio é  $\Omega_{mat}$ , pertencente ao domínio maior  $\Omega$  em  $R^2$  ou  $R^3$ , em que  $\Omega$  é o domínio de referência também chamado de *ground structure* onde as cargas aplicadas ao corpo e suas condições de contorno são definidas. Sobre  $\Omega$  é definido o problema ótimo como um problema de encontrar a escolha ideal do tensor de rigidez, uma variável sobre o domínio.

## 2 | OBJETIVOS

- Ampliar os conhecimentos referentes aos métodos de análise estrutural das regiões D, como o Método dos Elementos Finitos (MEF), o Modelo de Bie-  
las e Tirantes (MBT), e o mais recente, o Método de Otimização Topológica (MOT);
- Desenvolver e Implementar a Otimização Topológica de Modelos de Bie-  
las e Tirantes das regiões D;
- Comparar os resultados de Otimização Topológica com os obtidos pelo tra-

dicional Modelo de Bielas e Tirantes para algumas regiões D selecionadas, possibilitando também o refinamento dos modelos de treliça já existentes. Nesse sentido, pretende-se propor uma modernização para os tradicionais Modelos de Bielas e Tirantes.

### 3 | METODOLOGIA

Para o presente artigo, foram feitas modelagens numéricas utilizando o Método de Otimização Topológica com a formulação em que o domínio a ser otimizado é discretizado por uma malha de barras interconectadas, o que na literatura internacional é chamado de Método do *Ground Structure*. O programa utilizado foi desenvolvido em linguagem MATLAB por Sanders et al. (2017), e adaptado para considerar o custo nodal ( $L_n$ ), que está relacionado com um volume fictício para os nós que permite simplificar a topologia final da estrutura.

### 4 | FORMULAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO TOPOLOGICA UTILIZADA

A formulação de Otimização Topológica utilizada foi a desenvolvida por Sanders et al. (2017). Essa formulação utiliza o Método do *Ground Structure*, com a aplicação de um filtro máximo para garantir o equilíbrio da estrutura treliçada otimizada. A restrição utilizada foi a de volume, onde o volume da estrutura otimizada deve atender a um volume prescrito inicial. Na Eq. (1), está a formulação que anula as barras quando a fração da sua área em relação a área máxima é inferior ao valor do filtro durante o processo de otimização (Sanders et al., 2017).

$$x_i = \text{Filtro}(x, \alpha_f) = \begin{cases} 0, & \text{se } \frac{x_i}{\max(x)} < \alpha_f \\ x_i, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

Onde as áreas das barras da treliça são denominadas de  $x$  e  $\alpha_f$  é o valor do filtro.

A formulação com a otimização imposta está disposta na Eq. (2).

$$\begin{aligned} \min_x C(x) &= F^T u(x) \\ \text{tal que } L^T x &\leq V^{\max} \\ 0 \leq x_i &\leq x_i^{\max} \\ \text{com } x_i &= \text{Filtro}(x, \alpha_f) \\ \text{e } \min_u &\prod(u(x)) + \frac{\lambda}{2} u(x)^T u(x) \end{aligned} \quad (2)$$

Onde a função objetivo  $C$  é o trabalho das forças externas ( $F$ ),  $u$  são os

deslocamentos nodais,  $L$  é o comprimento das barras,  $V^{\max}$  é o volume máximo após a otimização do volume total,  $x^{\max}$  é a área máxima da seção transversal das barras e  $\prod(u(x))$  é a energia potencial (Sanders et al., 2017).

Utilizou-se o algoritmo para o filtro máximo desenvolvido por Sanders et al. (2017):

Iniciar:

Filtre o limite inferior,  $\alpha_f^- = 0,0$

Filtre o limite superior,  $\alpha_f^+ = 1,0$

Valor do filtro atual,  $\alpha_f = (\alpha_f^- + \alpha_f^+)/2$

Valor do filtro equilibrado,  $\alpha_f^{eq} = 0,0$

Mudança de valor no filtro equilibrado,  $\Delta\alpha_f^{eq} = 1,0$

Aplicar o filtro atual:  $x_i = \text{Filtro}(x, \alpha_f)$

Enquanto  $\Delta\alpha_f^{eq} > 1 \times 10^{-4}$ , faça

Se  $R \leq \rho$  e  $\Delta C < C_{tol}$ , então

Calcule a mudança no valor do filtro de equilíbrio:

$$\Delta\alpha_f^{eq} = |\alpha_f^{eq} - \alpha_f|$$

Armazene o valor do filtro de equilíbrio:  $\alpha_f^{eq} = \alpha_f$

Redefina o limite do filtro inferior:  $\alpha_f^- = \alpha_f$

Aumente o valor do filtro atual:  $\alpha_f = (\alpha_f^- + \alpha_f^+)/2$

Senão

Redefina o limite do filtro superior:  $\alpha_f^+ = \alpha_f$

Diminua o valor do filtro atual:  $\alpha_f = (\alpha_f^- + \alpha_f^+)/2$

Fim se

Aplicar o filtro atual:  $x_i = \text{Filtro}(x, \alpha_f)$

Fim enquanto

## 5 | RESULTADOS

Foram modeladas estruturas que apresentavam regiões D, para comparar esses modelos de bielas e tirantes que foram gerados a partir do Método dos Elementos Finitos e da otimização topológica com os modelos tradicionais de bielas e tirantes encontrados na literatura.

Esses modelos tradicionais são realizados a partir da experiência do projetista e de resultados obtidos em ensaios sem qualquer análise numérica, como por exemplo o Método dos Elementos Finitos que foi empregado na malha utilizada nas modelagens.

### 5.1 Processo de Otimização

No programa estudado foi criado o domínio de uma viga parede hiperestática, 3 apoios com 4 restrições, e duas cargas pontuais para comparação do processo

interativo para a mesma estrutura apresentada pela Federação Internacional de Concreto - Fédération Internationale du Béton (FIB). A Figura 3 foi apresentada pela FIB.

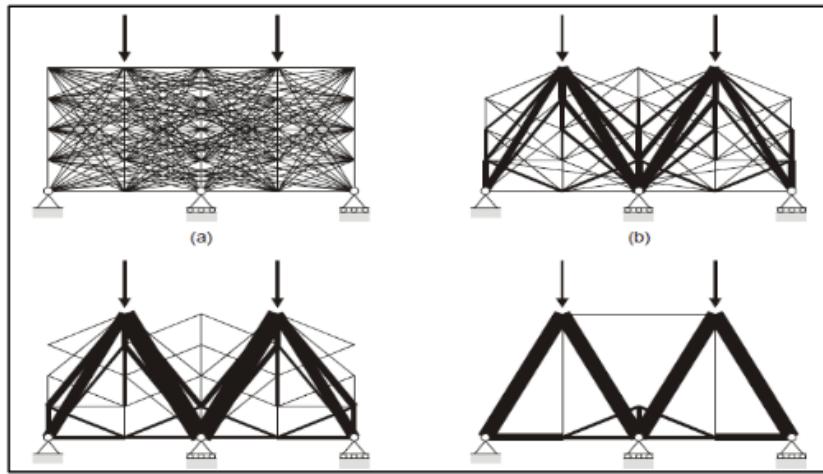


Figura 3. Viga 3 apoios e 2 cargas concentradas - Processo de otimização.

Fonte: (FIB, 2008)

A Figura 4 demonstra o processo de otimização realizado pelos programas estudados, desde a criação da malha treliçada, conhecida como *ground structure*, com o máximo grau de conectividade entre os elementos até a topologia final.

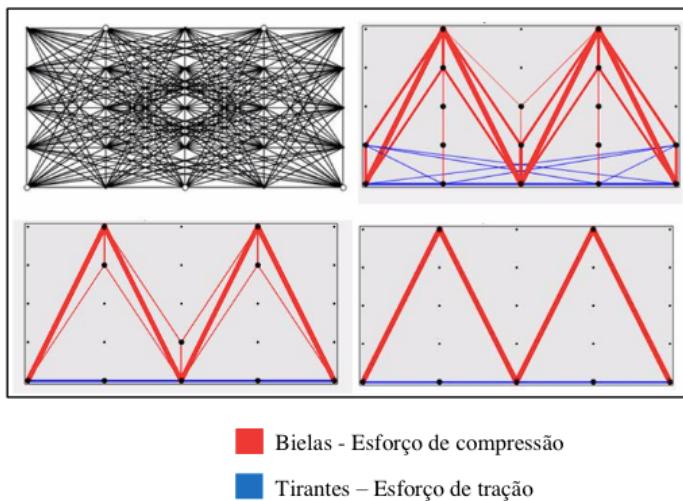


Figura 4. Processo de Otimização

Fonte: (Autores, 2018)

## 5.2 Modelos de Bielas e Tirantes com uso da Otimização Topológica

Para comparação dos modelos gerados com a otimização topológica foram utilizados os resultados de Kuchma et al. (2008) onde há três estruturas com regiões D que foram experimentadas e validadas pelo tradicional modelo de bielas e tirantes. Para cada um desses modelos são apresentadas quatro modelagens com a consideração

do custo nodal, representado pelo parâmetro ( $L_n$ ), variado de modo que se obtivesse diferentes modelos para uma mesma estrutura. A restrição de volume das estruturas foi de 20%.

### 5.2.1 Viga L

A Figura 5 ilustra a primeira estrutura representada uma viga bi apoiada em formato de L com carregamento pontual e um vazio, caracterizando uma região D.

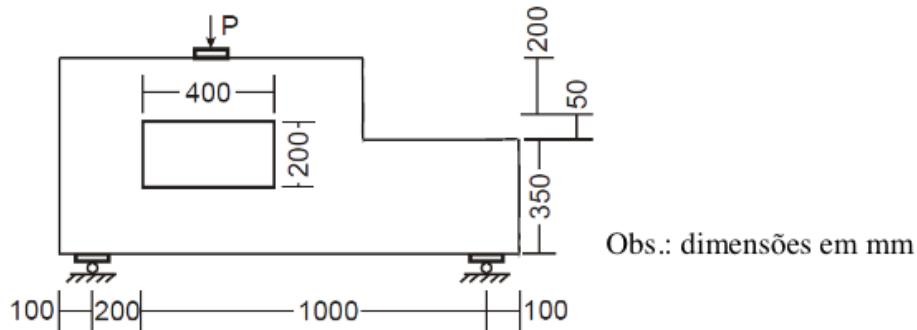


Figura 5. Viga L

Fonte: (Kuchma, 2008)

Na Figura 6, são apresentados os modelos de bielas e tirantes fornecidos por Kuchma (2008) para essa estrutura.

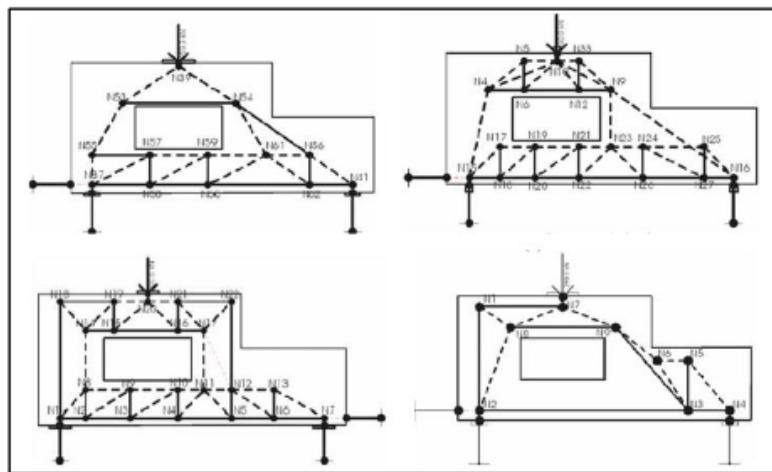
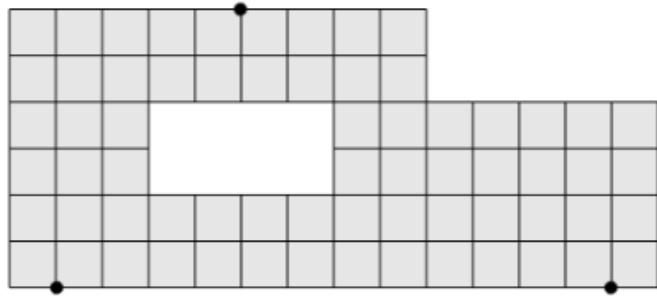


Figura 6. Modelos - Viga L

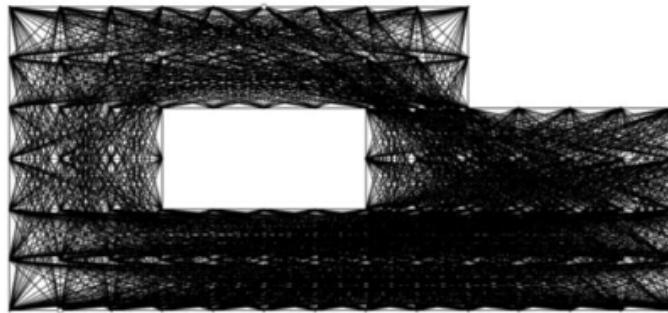
Fonte: (Kuchma, 2008)

O domínio dessa estrutura com os elementos de base é ilustrado na Figura 7 e na Figura 8 é apresentada a malha treliçada, conhecida como *Ground Structure*, essa malha foi construída no modo *full* onde todos os elementos da malha de base estão conectados.



**Figura 7. Malha de base para a malha treliçada (*Ground Structure*) - Viga L**

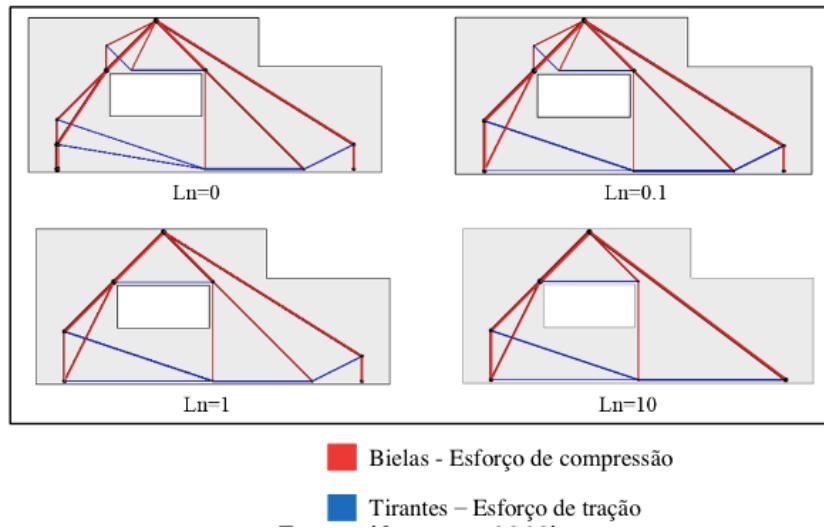
Fonte: (Autores, 2018)



**Figura 8: Malha treliçada (*Ground Structure*) - Viga L**

Fonte: (Autores, 2018)

As modelagens realizadas para essa estrutura com a variação do custo nodal são apresentadas na Figura 9.



**Figura 9. Topologia final - Viga L**

Fonte: (Autores, 2018)

### 5.2.2 Viga engastada com vazio

Na Figura 10 é exposta mais uma estrutura semelhante a primeira e fornecida

por Kuchma et al. (2008), mas diferente pelo apoio engastado a direita. Na Figura 11 encontram-se seus modelos de bielas e tirantes apresentados em Kuchma et al. (2008).

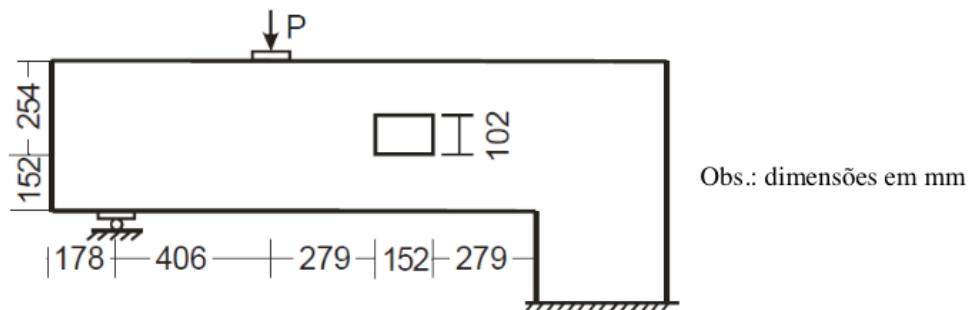


Figura 10. Viga engastada com vazio

Fonte: (Kuchma, 2008)

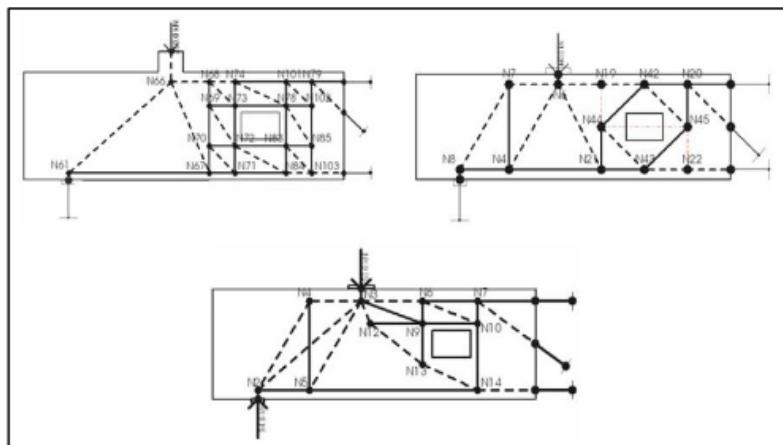
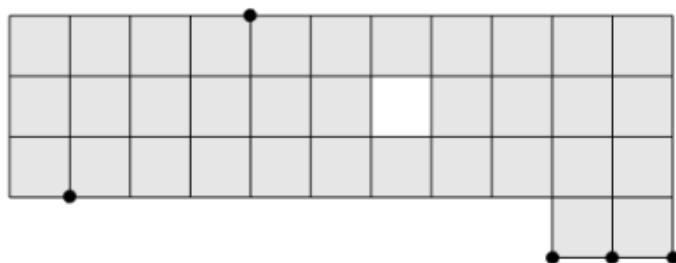


Figura 11. Modelos - Viga engastada com vazio

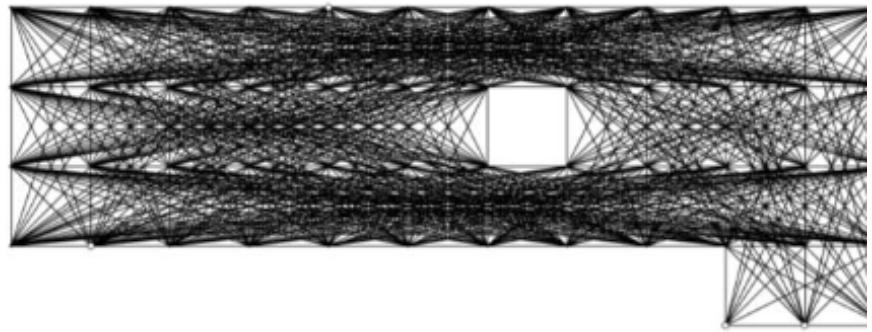
Fonte: (Kuchma, 2008)

Na Figura 12, ilustra-se o domínio dessa estrutura e os elementos de base para a geração da estrutura do *Ground Structure* apresentada na Figura 13. Na Figura 14, são apresentados os resultados obtidos com a variação do custo nodal.



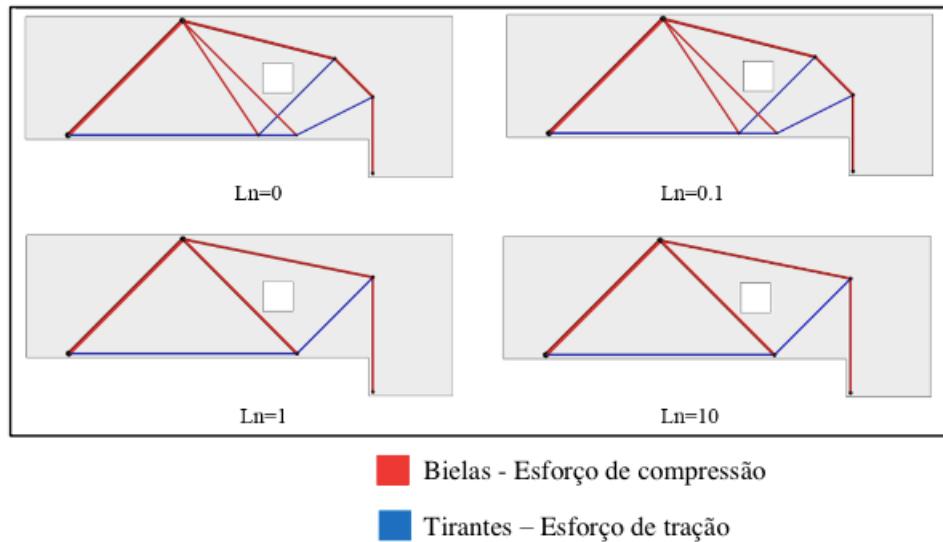
**Figura 12. Malha de base para a malha treliçada (*Ground Structure*) - Viga engastada com vazio**

Fonte: (Autores, 2018)



**Figura 13: Malha treliçada (*Ground Structure*) - Viga engastada com vazio**

Fonte: (Autores, 2018)

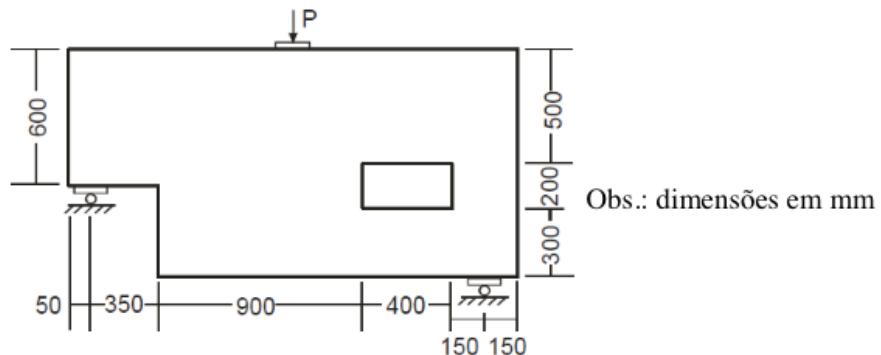


**Figura 14. Topologia final - Viga engastada com vazio**

Fonte: (Autores, 2018)

### 5.2.3 Viga com dente e vazio

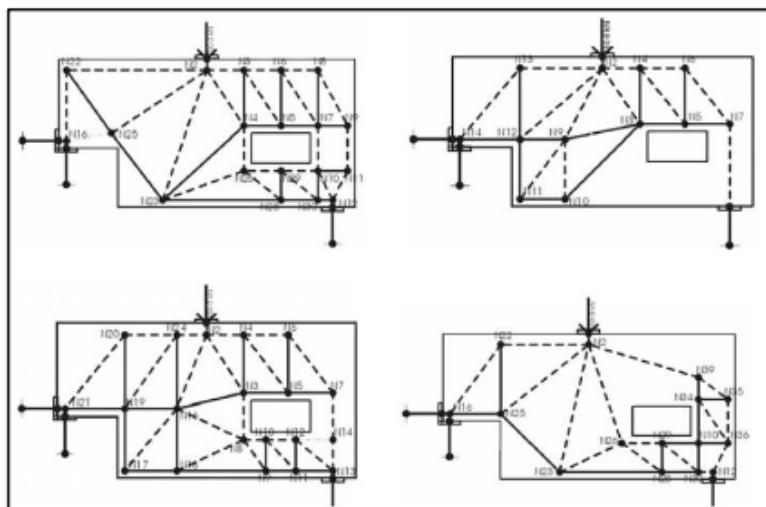
A estrutura da Figura 15 representa uma viga gerber com vazio, dente e apoio, caracterizando uma região D.



**Figura 15. Viga com dente e vazio**

Fonte: Kuchma (2008)

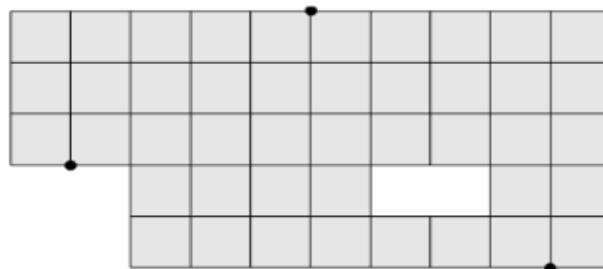
Para essa estrutura, Kuchma et al. (2008) disponibilizou alguns modelos de bielas e tirantes, os quais são apresentados na Figura 16.



**Figura 16. Modelos - Viga com dente e vazio**

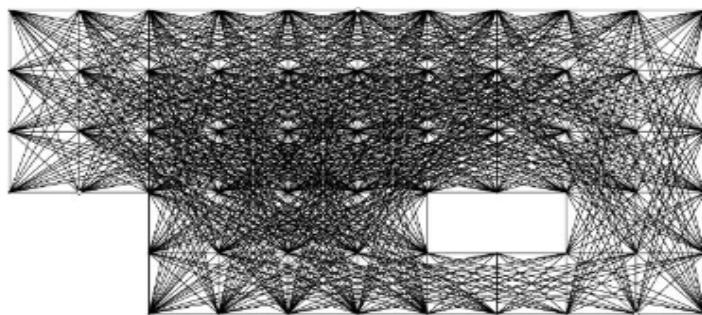
Fonte: Kuchma (2008)

Na Figura 17, apresenta-se o domínio e os elementos de base para a geração da malha do *Ground Structure* dessa estrutura em seguida a Figura 18 apresenta a malha gerada. Os resultados considerando a variação do custo nodal são ilustrados na Figura 19.



**Figura 17. Malha de base para a malha treliçada (*Ground Structure*) - Viga com dente e vazio**

Fonte: (Autores, 2018)



**Figura 18: Malha treliçada (*Ground Structure*) - Viga com dente e vazio**

Fonte: (Autores, 2018)

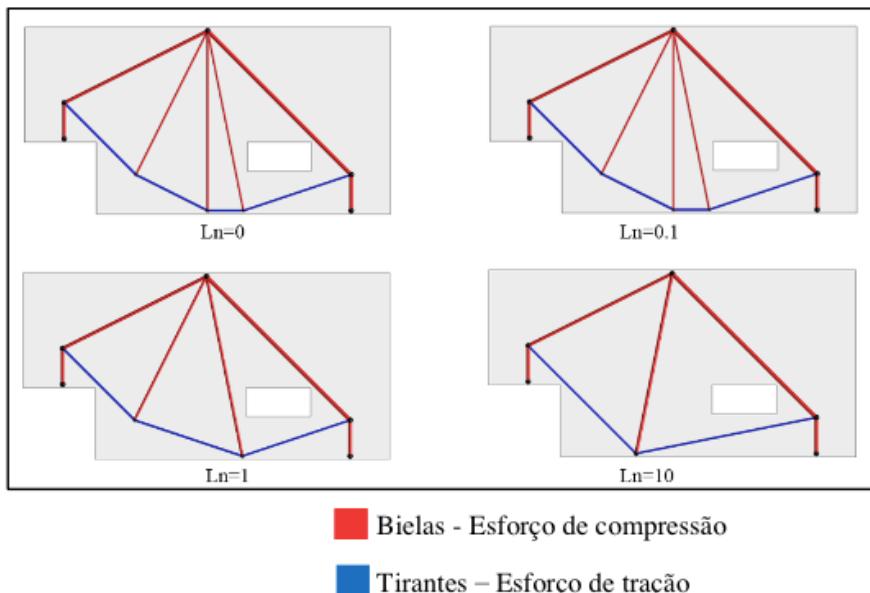


Figura 19. Topologia final - Viga com dente e vazio

Fonte: (Autores, 2018)

## 6 | CONCLUSÃO

O Método de Otimização Topológica, apesar de ainda ser pouco explorado na engenharia estrutural, possui aplicações úteis nessa área.

Na formulação utilizada observou-se que quanto maior o parâmetro do custo nodal ( $Ln$ ) nas modelagens, mais simples foram as topologias finais das estruturas. As estruturas simplificadas possuem 20% do volume da estrutura inicial devido à restrição de volume imposta.

As topologias finais das estruturas geradas no programa de Sanders et al. (2017) são estruturas em equilíbrio e mais simples que os tradicionais modelos de bielas e tirantes encontrados na literatura. Assim, o Método de Otimização Topológica se apresenta como uma ferramenta bastante viável para o projeto de regiões de descontinuidade do concreto estrutural, fornecendo modelos com uma certa facilidade de serem executados.

## REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2014. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**.

BENDSØE, M. P.; SIGMUND, O. **Topology optimization: theory, methods and applications**. Ed. 2. Berlim: Springer, 2003. 370p.

International Federation for Structural Concrete - Fédération Internationale du Béton (FIB). **Practitioners' guide to finite element modelling of reinforced concrete structures**. N° 45. FIB, 2008. 344p.

KUCHMA, D.; YINDEESUK, S.; NAGLE, T.; HART, J.; HWANG LEE, H. **Experimental validation of**

**the strut-and-tie method for complex regions.** In: ACI Structural Journal, 2008. 35p.

PANTOJA, J. C.; VAZ, L. E.; MARTHA, L. F.; SANTOS, S. H. C. **Projeto e avaliação do modelo de bielas e tirantes via otimização topológica e análise de confiabilidade.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, IBRACON, 52., 2010, Fortaleza.

SANDERS, E., RAMOS Jr., A., & PAULINO, G., 2017. **A maximum filter for the ground structure method: An optimization tool to harness multiple structural designs.** Elsevier, vol. 151, pp. 235 –252.

SILVA, Reginaldo Carneiro da. **Concreto Armado: Aplicações de Modelo de Bielas e Tirantes.** São Carlos: USP, 1991.197f. Tese (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos da universidade de São Paulo, 1991.

SOUZA, Rafael Alves de. **Concreto Estrutural: Análise e dimensionamento de elementos com descontinuidade.** São Paulo: USP, 2004. 379f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas – Escola Politécnica da universidade de São Paulo, 2004.

WIGHT, J. K.; MACGREGOR, J. G. **Reinforced Concrete: Mechanics & Design.** Ed. 6. Pearson, 2012. 1157p.

## ESTUDO NUMÉRICO DE UM EQUIPAMENTO DE SECAGEM

**Eduardo Dal Piva Schuch**

Universidade Feevale, ICCT

Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul

**Magaiver Gabriel Lamp**

Universidade Feevale, ICCT

Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul

**Conrado Mendes Moraes**

Universidade Feevale, ICCT

Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul

**Ângela Beatrice Dewes Moura**

Universidade Feevale, ICCT

Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul

e possibilitando estudos no comportamento do modelo real através de alterações no modelo computacional. Foram realizadas investigações no posicionamento do resistor, onde observou-se que o aumento de sua altura ocasionou temperaturas maiores no corpo de prova testado. Investigações na rotação do resistor demonstraram que o alinhamento de seu sentido longitudinal com o trajeto percorrido pelo corpo de prova resultou em aumentos de temperatura consideráveis, de cerca de 9,8%.

**PALAVRAS-CHAVE:** Radiação Térmica, Eficiência Energética, Avaliação Numérica, Engenharia Assistida por Computador.

**RESUMO:** A maioria dos equipamentos utilizados atualmente na indústria para secagem se baseiam em um mecanismo de convecção forçada. Por este processo frequentemente possuir baixa eficiência térmica, novos métodos vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos. Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo numérico, através do software COMSOL Multiphysics, em um equipamento de secagem que tem seu funcionamento baseado em um processo de irradiação infravermelha oriunda do aquecimento de um resistor metálico. Os resultados que o modelo computacional apresentou demonstraram ser muito próximos ao do modelo real, com diferença percentual máxima de 3,26%, validando o modelo simulado

### NUMERICAL STUDY OF A DRYING EQUIPMENT

**ABSTRACT:** Most drying equipment utilized in industrial applications nowadays are based in a forced convection mechanism. Due to the low thermal efficiency often related to this process, new methods have been in development throughout the years. This study is designed to perform a numerical analysis through COMSOL Multiphysics software in a drying equipment whose functioning is based in an infrared irradiation process that comes from the heating of a metallic resistor. The results obtained from the computational model were found to be very

close to the real model, with a percentage difference of 3.26%, validating the simulated model and allowing for studies in the behavior of the real model through changes in the computational model. Changes in the positioning of the resistor were investigated, where it was noticed that increasing its height would result in greater temperatures in the analyzed proof body. Further investigations in the rotation of the resistor demonstrated that the alignment of its longitudinal direction with the path followed by the proof body resulted in substantial temperature increases of about 9.8%.

**KEYWORDS:** Thermal Radiation, Energy Efficiency, Numerical Evaluation, Computer-Aided Engineering.

## 1 | INTRODUÇÃO

Equipamentos de secagem de produtos por meio de radiação existem como uma alternativa ao método de transferência de calor por convecção quando este possui baixa eficiência energética. As principais tecnologias se baseiam em radiação ultravioleta, infravermelha, micro-ondas, ondas de rádio e feixes de elétrons, sendo que cada um destes tem suas aplicações específicas, vantagens e desvantagens.

Paralelamente, softwares de simulação computacional vêm ganhando espaço dentro de ambientes industriais e acadêmicos pela capacidade de fornecerem dados sobre o funcionamento de máquinas, equipamentos e processos, diminuindo o número de testes empíricos necessários para a obtenção de resultados satisfatórios e, por consequência, o investimento necessário em projetos. Isso possibilita a executivos desenvolverem novos produtos a um preço mais baixo e a pesquisadores estudarem técnicas que contribuem ao avanço tecnológico sem a necessidade de um alto investimento por parte da instituição em que atuam.

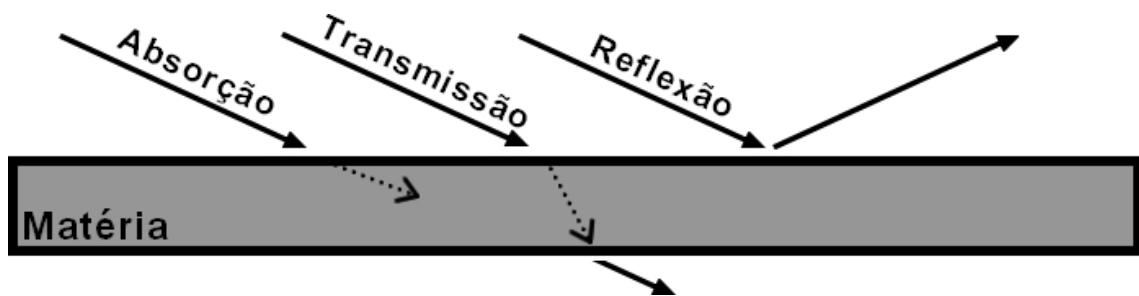
Dentro deste contexto, o objetivo principal deste trabalho é mostrar uma avaliação numérica computacional em um equipamento em desenvolvimento, que se baseia na irradiação de ondas infravermelhas para secagem e aquecimento de peças utilizadas em processos industriais. A partir da validação de um modelo computacional, podem ser propostas alterações nas configurações do equipamento de forma a prover melhorias de processo.

## 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Algumas fundamentações sobre radiação térmica, vitais para o entendimento dos temas abordados, não são tão difundidas entre engenheiros mecânicos como conhecimentos de termodinâmica e transferência de calor, portanto serão apresentadas informações que facilitam o entendimento da metodologia aplicada e dos resultados obtidos.

## 2.1 Interações da radiação com a matéria e fluxos radiativos

A radiação eletromagnética pode ser vista como resultado da propagação de ondas eletromagnéticas. Estas ondas carregam energia e, portanto, permitem que exista troca energética entre corpos através das ondas, possibilitando a transferência de calor por radiação. A partir do momento em que a radiação entra em contato com matéria, três fenômenos diferentes podem ocorrer: ela pode ser absorvida, refletida ou transmitida. Na absorção, a energia da onda eletromagnética é absorvida, permitindo o aumento da temperatura e consequentemente da energia do sistema. Na reflexão, a energia não contribui para o sistema material em contato e é redirecionada para outro local através do contato com a superfície. Já na transmissão, a energia atravessa o material, mas não é absorvida, não contribuindo para o sistema material. A Figura 1 demonstra visualmente as possibilidades de interação da radiação incidente com a matéria em contato (INCROPERA et al., 2014).



**FIGURA 1.** Absorção, reflexão e transmissão de radiação térmica.

Fonte: Autor (2018).

A reflexão se divide em dois tipos de reflexão ideais, onde pode ser completamente especular ou completamente difusa. Na reflexão difusa, a radiação é refletida igualmente em todas as direções, enquanto a reflexão especular gera um feixe direcional em que o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência do feixe, tendo como exemplo um espelho. Em superfícies reais, a reflexão ocorre de forma irregular, apresentando uma mistura dos dois tipos, porém não há dados detalhados para estas reflexões reais, já que adicionam mais complicações para a análise (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Com base nestas três possibilidades de interação da radiação térmica com a matéria, surgem quatro conceitos amplamente utilizados em modelos que envolvem radiação: absorvidade ( $\alpha$ ), refletividade ( $\rho$ ) e transmissividade ( $\tau$ ), que determinam qual percentual da radiação incidente em um corpo é absorvido, refletido e transmitido, respectivamente, e irradiação ( $G$ ), o primeiro dos quatro fluxos radiativos importantes na transferência de calor por radiação, que representa toda a radiação que é incidente em uma superfície.. Corpos que não transmitem radiação são ditos opacos, onde a irradiação será apenas absorvida ou refletida, como demonstrado na Equação 1, onde “ $\alpha$ ” representa a absorvidade, “ $\rho$ ” representa a refletividade e “ $G$ ” representa a

irradiação (CENGEL; GHAJAR, 2012).

$$\alpha G + \rho G = G \quad (1)$$

O segundo fluxo radiativo a ser tratado é a emissão ( $E$ ), que se trata da radiação emitida por um corpo em função de sua temperatura. Corpos com a mesma temperatura podem emitir quantidades de radiação diferentes, originando o conceito de corpo negro, aquele em que a emissão é a máxima possível para uma determinada temperatura. Corpos cinzas emitirão um percentual desta máxima radiação possível, chamado de emissividade ( $\epsilon$ ). Assim, para corpos negros a emissividade será sempre igual à 1. A Equação 2 apresenta o cálculo da emissão de um corpo cinza, onde “ $E$ ” é a emissão, “ $\epsilon$ ” é a emissividade, “ $T$ ” a temperatura e “ $\sigma$ ” a constante de Stefan-Boltzmann, cujo valor aproxima-se de  $5,67 \times 10^{-8}$  (INCROPERA et al., 2014).

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

Com os dois fluxos apresentados até então, é possível perceber que uma superfície opaca emanará energia tanto pela emissão em função da temperatura do corpo quanto pela reflexão de quaisquer irradiações aplicadas nela. Este entendimento leva ao terceiro fluxo radiativo, chamado de radiosidade ( $J$ ), que representa toda a radiação que deixa uma superfície. A Equação 3 governa a radiosidade de uma superfície opaca, onde “ $J$ ” representa a radiosidade, “ $E$ ” a emissão, “ $G$ ” a irradiação e “ $\rho$ ” a refletividade (INCROPERA et al., 2014).

$$J = E + \rho G \quad (3)$$

Todos os três fluxos apresentados até o momento resultam em energia sendo transportada por radiação de um local até outro, porém nenhum destes representa a quantidade líquida de energia que é trocada, ou seja, o balanço entre a energia que sai e que entra por uma superfície ou corpo. Isto leva ao quarto e último fluxo, o fluxo radiativo líquido ( $q''_r$ ), igual à diferença entre a radiação que sai e entra de uma superfície, conforme demonstrado na Equação 4, válida para corpos opacos, onde “ $q_r$ ” representa o fluxo radiativo líquido, “ $J$ ” a radiosidade, “ $G$ ” a irradiação, “ $E$ ” a emissão e “ $\alpha$ ” a absorção (INCROPERA et al., 2014).

$$q_r'' = J - G = E - \alpha G \quad (4)$$

## 2.2 Dependência espectral e direcional

Todas as propriedades descritas foram explicadas desconsiderando o comprimento de onda, porém a maioria delas são dependentes desta característica das ondas. Tinta branca, por exemplo, parecerá refletir quase toda a energia incidente para um observador humano, porém será altamente absorvente para radiação infravermelha. Isso ocorre porque sua absorbividade espectral ( $\alpha_\lambda$ ) é maior para o comprimento de onda ( $\lambda$ ) infravermelho enquanto a refletividade espectral ( $p_\lambda$ ) é menor (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Além da dependência espectral, também existe a dependência direcional. A radiação que sai de uma superfície plana e opaca é transmitida em todas as direções do hemisfério acima da superfície e sai de todas as partes do corpo, assim como a irradiação aplicada em uma superfície pode vir de várias direções diferentes. Não só a forma como a superfície se comportará no contato com a irradiação depende desta direção, como também a distribuição direcional da radiação emitida não é uniforme. Isto resulta em quantidades de absorbividades, refletividades, transmissividades e emissividades diferentes em um mesmo modelo, que podem influenciar os fluxos radiativos. Além disto, a determinação dos diferentes valores destas propriedades é na maioria das vezes inviável, sendo comum que estas dependências sejam desconsideradas em estudos (HOWELL; SIEGEL; MENGÜÇ, 2011).

Uma superfície difusa irá absorver, refletir, transmitir e emitir radiação sem depender da direcionalidade, resultando em fluxos hemisféricos. Já uma superfície cinza, irá absorver, refletir, transmitir e emitir radiação sem depender do comprimento de onda, resultando em fluxos totais. Sendo assim, a idealização de superfícies como difusas e cinzas remove todas as dependências de direcionalidade e comprimento de onda da emissividade, absorbividade, refletividade e transmissividade, facilitando expressivamente os cálculos envolvendo a transferência de calor por radiação ao tornar todos os fluxos hemisféricos e totais (HOWELL; SIEGEL; MENGÜÇ, 2011).

## 2.3 Lei de Kirchhoff

Se um elemento é colocado dentro de um invólucro negro, ambos com a mesma temperatura, o invólucro irá irradiar o elemento de todas as direções. Como ambos possuem a mesma temperatura, não ocorrerá transferência de calor, conforme impõe a segunda lei da termodinâmica. Para que isso aconteça, o elemento deve absorver e emitir energia radiativa em quantidades iguais, exigindo, portanto, que a emissividade e a absorbividade tenham o mesmo valor, validando a Equação 5, intitulada Lei de Kirchhoff, onde “ $\alpha$ ” representa a absorbividade e “ $\varepsilon$ ” representa a emissividade (HOWELL; SIEGEL; MENGÜÇ, 2011).

$$\alpha = \varepsilon \quad (5)$$

A emissividade sempre será igual à absorvividade para um mesmo comprimento de onda, em uma mesma direção e com uma mesma temperatura entre o corpo que emite e o que absorve, onde não haverá fluxo de calor. Sempre que houver fluxo de calor, a absorvividade e emissividade poderão ter valores diferentes, porém a equivalência pode ser mantida para simplificar os cálculos, obtendo-se assim uma aproximação. Para corpos opacos sob esta condição, a refletividade pode ser calculada conforme a Equação 6, onde “ $\rho$ ” representa a refletividade, “ $\alpha$ ” a absorvividade e “ $\varepsilon$ ” a emissividade (HOWELL; SIEGEL; MENGÜÇ, 2011).

$$\rho = 1 - \alpha = 1 - \varepsilon \quad (6)$$

Conforme demonstrado na Equação 6, quando a Lei de Kirchhoff é imposta em um modelo de corpos opacos, o conhecimento de uma única propriedade é suficiente para determinar as outras duas. Por este motivo que tabelas de emissividades são amplamente difundidas, enquanto absorvividades e refletividades geralmente não são investigadas – a Lei de Kirchhoff é uma imposição na grande maioria dos modelos que tratam de radiação.

## 2.4 Métodos numéricos

Os métodos numéricos são métodos de aproximação numérica aplicados em equações diferenciais, onde estas são substituídas por equações algébricas. Resultam, junto com os métodos analíticos, nas ferramentas teóricas que um engenheiro tem em sua disposição para lidar com as equações diferenciais e resolver problemas físicos na teoria. A outra forma de lidar com problemas de engenharia é a utilização da experimentação em laboratórios, porém estas podem ser custosas e muitas vezes não podem ser realizadas por questões de segurança, como por exemplo na obtenção de informações sobre transferência de calor em reatores nucleares. As limitações dos métodos analíticos e das experimentações reais são um dos motivos para a utilização de métodos numéricos, já que estes praticamente não apresentam restrições; problemas de alta complexidade podem ser trabalhados com a segurança e praticidade de computadores (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Soluções analíticas possuem várias limitações para problemas reais, sendo necessária a utilização de modelos altamente simplificados, tanto em geometria quanto em considerações iniciais de resolução. Quando pequenas considerações são feitas em relação à geometria na transferência de calor, como zonas de heterogeneidade, ou quando parâmetros utilizados nos cálculos perdem a simplificação, como passar a considerar que os coeficientes de transferência de calor sofrem variações de acordo com a temperatura, por exemplo, as soluções analíticas podem se tornar impossíveis.

Dessa forma, métodos analíticos acabam entregando soluções exatas de modelos ideais, mas soluções grosseiras de problemas reais, o que acaba tendo precisão inferior a uma solução aproximada de um modelo real (MALISKA, 2004).

A resolução numérica de problemas de transferência de calor por radiação entre superfícies opacas é realizada através do método da radiosidade, onde as superfícies são todas consideradas difusas. Dessa forma, a transferência depende apenas da localização de superfícies relativas a outras e suas orientações, para todas as superfícies dos domínios onde a transferência de energia radiativa se aplica. Esta condição cria identidades geométricas chamadas de fatores de forma, representados pela fração da energia emitida por um elemento de superfície e interceptado por outro (REY, 2016).

### 3 | METODOLOGIA

O modelo de aquecimento simulado consiste em um aquecedor posicionado sobre uma linha de produção contínua, onde as peças são aquecidas ao percorrerem um trajeto em seu interior. Neste equipamento, instalado em uma indústria, foram medidas temperaturas de saída de um corpo de prova (CP) em três diferentes tempos de passagem, com a utilização de um pirômetro FLIR, que também foi usado para medir as temperaturas da esteira no interior e exterior do equipamento. Com um termopar tipo K, mediu-se a temperatura do ar no interior do equipamento e com um multímetro Minipa foram medidas a corrente e a tensão no resistor elétrico, utilizadas para cálculo da potência.

A avaliação numérica foi realizada através do *software* COMSOL *Multiphysics*, de posse da Universidade Feevale. O *software* utiliza a discretização por elementos finitos e calcula a troca de energia térmica radiativa entre superfícies através do método da radiosidade.

Para realizar as simulações, foram utilizadas as seguintes condições de contorno:

- Fluxos convectivos no interior e no exterior do forno, para também considerar a troca de calor com o ar;
- Temperatura inicial na carcaça do forno igual à temperatura do ar em seu interior, de forma a simular um equipamento já aquecido, enquanto a temperatura inicial no CP manteve-se igual à temperatura ambiente no instante dos ensaios experimentais;
- Radiosidade prescrita na superfície do resistor, calculada pela razão entre potência medida no equipamento e a área desta superfície;
- Fluxo convectivo fixo aplicado no CP, com temperatura igual à medida no interior do aquecedor;
- Temperaturas fixas nas partes da esteira que ficam dentro e fora do equipamento, com base nos valores medidos experimentalmente;

- Três velocidades de deslocamento do CP diferentes, sendo estas as velocidades necessárias para que o trajeto pelo interior do equipamento seja completado nos três tempos: 30, 60 e 90 segundos.

O método da radiosidade estabelece que todas as superfícies são difusas, desprezando a dependência direcional. A construção do software impõe a Lei de Kirchhoff, desconsiderando possíveis diferenças entre absorvidade e emissividade. Como a maior fonte de radiação térmica é o resistor elétrico, que possui um pico de comprimento de onda específico, as superfícies foram consideradas como cinzas, desprezando a dependência espectral.

A validação do modelo numérico se deu através da comparação entre as temperaturas simuladas em um CP para cada um dos tempos considerados com as temperaturas medidas experimentalmente. Utilizou-se como base para o modelo simulado um protótipo de aquecedor com paredes de aço carbono SAE 1020, mesmo material aplicado na esteira. O exterior do equipamento e a esteira são revestidos com uma camada de tinta. O CP utilizado é feito de PVC.

Após a validação do modelo numérico, foram efetuados três estudos com diferentes posicionamentos do resistor. Em dois dos estudos foi alterada sua altura dentro do equipamento, que originalmente é de 70 milímetros em relação ao topo do CP, enquanto em um terceiro o resistor foi rotacionado em 90°, conforme ilustrado na Figura 2, onde o posicionamento original é representado na posição A e a rotação de 90° representada na posição B.

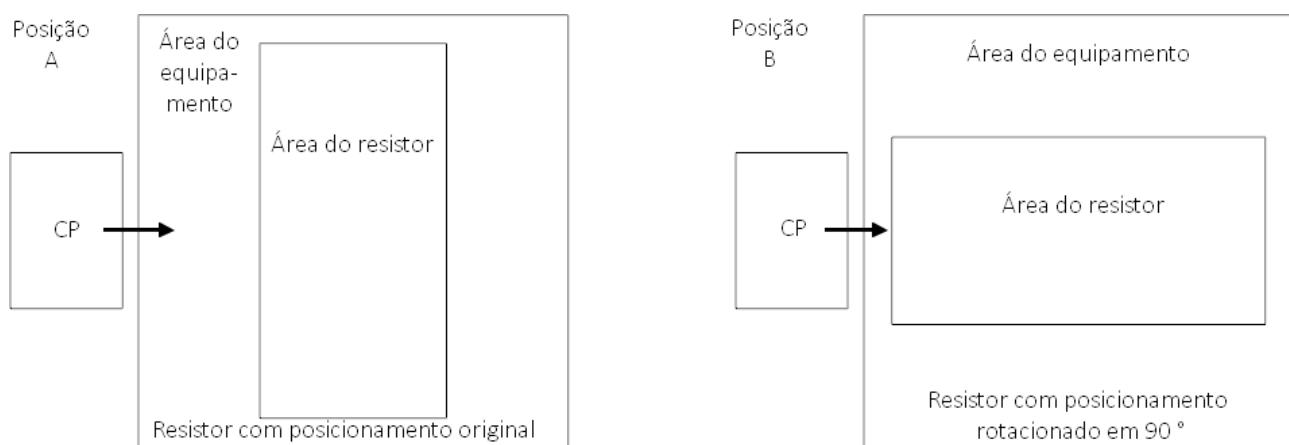


FIGURA 2. Resistor nas posições A (esquerda) e B (direita). Fonte: Autor (2018).

Foram também testadas diferentes configurações de qualidade de malha até que posteriores refinamentos não mais causassem mudanças significativas nas temperaturas resultantes. Com isso, foi selecionada a malha mais adequada.

## 4 | RESULTADOS E ANÁLISES

A temperatura ambiente de 26,3 °C foi medida no momento dos ensaios

experimentais. A potência do equipamento foi calculada em 980 W, através das medições de corrente e tensão elétrica de 7 A e 140 V, respectivamente. Sendo a área da superfície do resistor de 0,18 m<sup>2</sup> a radiosidade prescrita no resistor foi calculada, resultando em um fluxo de 5450 W/m<sup>2</sup>.

A temperatura do ar no interior do aquecedor foi medida em 135 °C, enquanto a temperatura da parte interna da esteira foi medida em 140 °C e da parte externa em um ponto próximo à saída em 90 °C.

Estes valores foram utilizados em todas as simulações realizadas.

No estudo de malha, foi selecionada uma configuração com 2639 tetraedros. A simulação computacional do processamento do corpo de prova (CP) pelo equipamento com a malha escolhida resultou nos resultados apresentados na Tabela 1.

Tempo (s)	Temperaturas medidas (médias) (°C)	Temperaturas simuladas (°C)	Diferença percentual
30	93	89.97	-3.26%
60	116	119.46	2.98%
90	135	136.95	1.44%

TABELA 1. Temperaturas no centro do CP na saída do aquecedor.

Fonte: Autor (2018).

Como demonstrado na Tabela 1, as temperaturas simuladas apresentaram boa proximidade com as medidas experimentalmente, validando o modelo de simulação. Com este resultado, foram iniciados os estudos com diferentes posicionamentos do resistor.

A primeira alteração no posicionamento testada foi a altura de todo o conjunto do resistor em duas situações: 105 e 20 milímetros de altura em relação ao topo do CP. Os resultados são apresentados na Tabela 2 e comparados com os obtidos considerando a altura original de 70 milímetros.

Período (s)	Altura de 70 mm (°C)	Altura de 105 mm (°C)	Altura de 20 mm (°C)
30	89.97	91,89	89,71
60	119.46	123,12	119,0
90	136.95	136,97	133,08

TABELA 2. Temperaturas simuladas no centro do CP na saída do aquecedor, para diferentes alturas de resistor.

Fonte: Autor (2018).

Como pode ser visualizado na Tabela 2, a elevação da altura ocasionou temperaturas no CP maiores enquanto a diminuição resultou em temperaturas

menores. O que se percebe é que maiores distâncias entre a fonte e o CP facilitam a transferência de calor, uma vez que as ondas eletromagnéticas têm mais espaço de reflexão.

A investigação realizada posteriormente foi a alteração no posicionamento do resistor, que foi rotacionado em 90° (posição B). A simulação foi executada para uma altura do resistor de 105 milímetros, que no estudo anterior resultou em temperaturas maiores. Os resultados são mostrados na Tabela 3.

Período (s)	Temperaturas na Posição A (°C)	Temperaturas na Posição B (°C)
30	91,89	101,33
60	123,12	135,36
90	136,97	149,52

TABELA 3. Temperaturas simuladas no centro do CP na saída do aquecedor, para a altura do resistor de 105 mm.

Fonte: Autor (2018).

Observa-se, com os resultados demonstrados na Tabela 3, que com a posição B obtiveram-se aumentos de temperatura no CP em todos os tempos testados, com uma média de aumento de 9,8%. Isto se deve à maior irradiação sobre o CP de energia emitida diretamente do resistor, já que o CP se posicionou logo abaixo do resistor em quase todo o trajeto pelo interior do aquecedor.

## 5 | CONCLUSÕES

O trabalho mostrou a validação de um modelo numérico de um secador. As simulações apresentaram bons resultados com um desvio máximo de 3,26%, possibilitando, portanto, investigações no equipamento através de modificações no modelo computacional.

As alterações realizadas na altura demonstraram que sua elevação aumenta a quantidade de energia radiativa recebida pelo CP que passa através do equipamento. Esta conclusão é sustentada pelas temperaturas superiores encontradas no corpo de prova do cenário de altura do resistor elevada, na Tabela 2, para o fluxo convectivo considerado.

A rotação realizada no resistor ocasionou aumentos na temperatura do CP em todos os tempos, resultando em uma média de aumento de 9,8%. Nota-se que, com este posicionamento, um corpo de prova que percorre o meio da esteira recebe uma quantidade de irradiação maior.

## REFERÊNCIAS

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J.. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática.** 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. 904 p.

HOWELL, John R.; SIEGEL, Robert; MENGÜÇ, M. Pinar. **Thermal Radiation Heat Transfer.** 5. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2011. 957 p.

INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer.** 7. ed. Jefferson City: John Wiley & Sons, 2014. 1048 p.

MALISKA, Clovis Raimundo. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional.** 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2004. 460 p.

REY, Guillem Colomer. **Numerical methods for radiative heat transfer.** 2006. 164 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Físicas, Departamento de Máquinas e Motores Térmicos, Universidade Politécnica de Catalunha, Terrassa, 2006.

# CAPÍTULO 13

## SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA A COMBUSTÃO DE GASOLINA

**Felipe Michael Grein**

UNC - Universidade do Contestado Campus Acadêmico do Curso de Engenharia Civil, Mafra. SC

**Jean Lucas Pereira**

UNC - Universidade do Contestado Campus Acadêmico do Curso de Engenharia Civil, Mafra. SC

**Luiz Felipe Weck**

UNC - Universidade do Contestado Campus Acadêmico do Curso de Engenharia Civil, Mafra. SC

**Olaf Graupmann**

UNC - Universidade do Contestado. Professor Mestre do Curso de Engenharia Civil, Campus Canoinhas e Mafra. SC.

de energia ou para eventualidades, podendo abastecer residências ou pequenos comércios com energia elétrica e aquecimentos de água.

**PALAVRAS-CHAVE:** Gasolina. Aquecimento. Energia

**ABSTRACT:** The main source of energy in the world is electric energy, produced by an electric potential with two points of a conductor, most of which is produced by hydroelectric, solar, wind, thermoelectric and nuclear power plants. It aims to compare the different water heating systems using the gasoline power source. Being this bibliographic search with search of printed and online sources to compare results already searched. It can be observed that several mechanisms from the combustion of gasoline, generate significant amounts of energy, collaborating when there is a lack of energy or for eventualities, being able to supply residences or small trades with electricity and water heating.

**KEYWORDS:** Gasoline. Heating. Energy

### INTRODUÇÃO

No século VI, o grande filósofo Tales de Mileto descobriu a eletricidade, esfregando uma resina vegetal petrificada (âmbar) juntamente com lã e pele de animais, observando a

**RESUMO:** A principal fonte de energia do mundo é a energia elétrica, produzida por um potencial elétrico com dois pontos de um condutor, sendo a maior parte da produção de energia elétrica feita por usinas hidrelétricas, solares, eólicas, termoelétricas e nucleares. Objetiva-se comparar os diferentes sistemas de aquecimento de água utilizando a fonte de energia gasolina. Sendo esta pesquisa bibliográfica com busca de fontes impressas e online para comparar resultados já pesquisados. Pode-se observar que vários mecanismos provenientes da combustão a gasolina, geram quantidades significativas de energia, colaborando quando ocorre a falta

atração de alguns objetos leves ao seu redor como penas, farpas e palhas. A partir disso, a palavra eletricidade vem sendo muito utilizada, ocorrendo aprimorações de sua descoberta no decorrer dos anos como condutores e isolantes elétricos (1730), positivo e negativo na eletricidade (1750) entre outros. (BURATTI, 2008). A principal fonte de energia do mundo é a energia elétrica, produzida por um potencial elétrico com dois pontos de um condutor, sendo a maior parte da produção de energia elétrica feita por usinas hidrelétricas, solares, eólicas, termoelétricas e nucleares. Dentre algumas fontes de energia, analisaremos a energia termoelétrica, destacando seu uso em atividades de aquecimento da água através da gasolina. Objetiva-se comparar os diferentes sistemas de aquecimento de água utilizando a fonte de energia gasolina.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Na década de 90, o consumo exagerado de energia elétrica causada por chuveiros nos horários de picos, consumiria um gasto de 7000 Megawatts (MWt), o que corresponde à execução de 10 dos 20 geradores de energia da Hidrelétrica de Itaipu. Com o alto consumo de energia destinado para o aquecimento da água, a queima de um combustível é empregado para produção de calor, luz ou energia, ocorrendo uma reação química entre o material com o oxigênio do ar. As classificações dos combustíveis são sólido, líquido, gasoso, artificiais e naturais, sendo que os líquidos e sólidos contém mais de 50% das industriais utilizando destes combustíveis, principalmente os derivados do petróleo, pois são mais eficientes na produção de energia.

A gasolina é extraída pelo refinamento do petróleo, constituída por hidrocarbonetos e uma pequena quantidade de oxigênio, além de compostos de enxofre, nitrogênio e metálicos, todos em baixos acúmulos. Muitos dispositivos utilizam do combustível gasolina, exemplo dos geradores de energia, que são dispositivos muito utilizados para a conversão de força, vindo da combustão, transformando em energia elétrica. Geradores a gasolina são os mais comuns, usados em residências, empresas de pequeno porte e em eventualidades pelo fato de serem mais baratos e mais silenciosos em relação aos outros, contudo, o ponto negativo desta máquina é o preço da gasolina.

Outro dispositivo é a serpentina de cobre ou inox, forçando a circulação de água dentro da tubulação fazendo que ocorra a transferência de calor por meio de convecção. A análise de transferência de calor é feita a partir das equações de conservação de massa e energia, da segunda lei da termodinâmica e de uma lei fenomenológica que descreve a taxa de transferência de energia em convecção. (KNIGHT, 2008).

Com o crescimento da produção industrial, empresas vêm utilizando vários mecanismos para diferentes atividades, exemplo das caldeiras flamotubulares. Estas podem ser verticais ou horizontais, sendo também conhecidas como tubo-de-fogo, pois transformam água em vapor. Isso ocorre pela combustão de líquidos que envia gases para dentro dos tubos que circulam no interior, isolando a água para não

penetrar nesses tubos, isto é, o fogo proveniente da combustão de gasolina ou outro tipo de líquido, são enviados as caldeiras cercada por água, transformando-as em vapor. (GAUTO, et al, 2013).

As caldeiras são rotuladas como compartilhadoras de calor, pois trabalha com pressão superior à da atmosfera. A utilização das caldeiras é de simples manuseio, muito comum em navios e locomotivas, usadas também para aquecimentos e esterilização em geral, não apenas em indústrias do ramo mais pesado, mas distintas empresas se utilizam desse processo como hotéis, frigoríficos e principalmente hospitais. (INDÚSTRIAS MILL, 2017). Caldeiras flamotubulares geram em torno de 100 a 30 mil quilogramas por hora (Kg/h) de vapor, obtendo pressão de até 30 quilogramas-força por centímetros quadrados (Kgf/cm<sup>2</sup>).

## RESULTADOS

Cada processo oriundo da queima da gasolina apresenta rendimentos diferentes, dependendo da combustão realizada, torna-se muito caro a realização constante desse processo, sendo inviável para muitos consumidores, por isso é usada ocasionalmente, mas de muita utilidade quando colocada em prática.

## CONCLUSÕES

Pode-se observar que vários mecanismos provenientes da combustão a gasolina, geram quantidades significativas de energia, colaborando quando ocorre a falta de energia ou para eventualidades, podendo abastecer residências ou pequenos comércios com energia elétrica e aquecimentos de água.

## REFERÊNCIAS

A GERADORA. **O que é energia Termelétrica**. . Acesso em: 29 set. 2017.

AGROTAMA. **Geradores de energia**. Acesso em: 29 set. 2017.

BURATTI, Maria Paula T. de Castro. **Energia**: uma abordagem multidisciplinar. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2008.

GAUTO, Marcelo; ROSA, Gilber. **Química industrial**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

KNIGHT, Randall D. **Physics for Scientists and Engineers**: A strategic approach with modern physics. London: Published Pearson Education, Inc, 2008.

JMS INDUSTRIAL LTDA. **Geradoras de água quente**. . Acesso em: 03 out. 2017.

PORTAL METÁLICA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Sistema de aquecimento de água**. Acesso em: 03 out. 2017.

INDÚSTRIAS MILL. **Saiba mais sobre as caldeiras flamotubulares**. Acesso em: 05 out. 2017.

## MODELAGEM DE PID PARA SISTEMA DE CONTROLE DE RAMPAS DE TEMPERATURA EM BRASSAGEM

**Gabriel Queiroz**

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica  
Uberlândia - MG

**Marcelo Barros de Almeida**

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica  
Uberlândia - MG

**Márcio Jose da Cunha**

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica  
Uberlândia - MG

**ABSTRACT:** The aim of this paper is to present a strategy for modeling a heating process where it is necessary to follow specific temperature slopes with focus on mashing tuns for nano brewers. In this situation, the heating element is generally represented by electric heaters or gas, both on/off, demanding a specific strategy for delivering the amount of power calculated by the PID controller, also described and analyzed in this work. For creating the model, data were empirically obtained by heating proportional volumes of water using an electric boiler.

**KEYWORDS:** Brewing controller, modeling, PID

**RESUMO:** O objetivo deste artigo é apresentar uma estratégia capaz de realizar a modelagem de um processo de aquecimento e manutenção de rampas de temperatura com foco em tinas de brassagem de nanocervejarias. Nessas situações, o elemento de aquecimento é geralmente representado por resistências elétricas ou chamas a gás, ambos do tipo ligado/desligado, demandando também uma estratégia específica para entrega da potência calculada pelo controlador PID, descrita e analisada neste trabalho. Foram empregados dados obtidos empiricamente através do aquecimento de volumes proporcionais de água e ebulidores elétricos para a criação do modelo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Controlador de brassagem, modelagem, PID

### 1 | INTRODUÇÃO

Durante o processo de brassagens, realizados em cervejarias de qualquer porte, é preciso executar uma série crescente de rampas controladas de temperatura, atuando nas diversas fases do processo de extração da maltose [1]. Ações enzimáticas bem controladas, em determinadas temperaturas e faixas de pH, promovem uma boa sacarificação do mostro, aumentando a eficiência do processo [2]. Assim, é importante a precisão no controle das rampas de temperaturas nas diversas fases, sendo uma aplicação adequada para controle automatizado.

A proposta deste trabalho é apresentar o

processo de modelagem de um controlador PID digital [3] assim como uma proposta de discretização da saída do PID para acionamento de um elemento de aquecimento do tipo liga- do/desligado (ou *on/off*, em Inglês) visando o controle das rampas de temperatura em processo cervejeiros.

Trabalhos similares podem ser encontrados na literatura. Por exemplo, em [4], é discutido um controlador microprocessador de baixo custo, também empregando estratégias com PID. No entanto, este trabalho não menciona formas de modelagem, como a descrita aqui, além de possuir uma estratégia de acionamento do elemento de aquecimento baseado em bandas de erro, mantendo, no fundo um controle puramente *on/off*.

Discussão parecida é apresentada em [5], onde são propostos três algoritmos de controle PID e o uso de um processador digital de sinal (DSP). Não são discutidas formas de aplicação da saída de controle no elemento de aquecimento, sendo apresentados apenas dados de simulação, o que sai do escopo deste presente trabalho.

Finalmente, trabalhos com maior corpo podem ser encontrados nas referências [6], [7], com um resultado bastante aplicado na execução de múltiplas rampas de temperatura. Um controle do tipo *Bang-Bang*, onde o sistema deve sair de um ponto de operação (*set point*) para outro com a menor resposta temporal possível é apresentado. A este modelo é acoplado um modelo preditivo de controle, gerando uma estratégia denominada pelos autores de *Compound Optimal Control*, com promessas de menor *overshoot* e tempo de acomodação curto. Este artigo, apesar de não discutir também a forma de entrega de potência, apresenta-se como uma referência futura importante para este trabalho.

## 2 | MODELO EMPÍRICO DE TINA DE BRASSAGEM

Para o desenvolvimento do modelo, será usada uma tina pequena com água e com volume de quatro litros, aquecida por uma resistência elétrica com potência de 1kW. Equipamentos comerciais apresentam relações de volume/potência (4L/1kW) similares, sendo essa a razão da escolha destes valores.

É sabido que, no processo real, a existência de grãos embebidos na água (mostura) muda a dinâmica do processo por apresentar uma capacidade térmica diferente. Também é possível que a forma de aquecimento utilizada seja diferente, podendo ser um controle automatizado de gás do tipo liga/desliga ou uma caldeira. No entanto, isto não invalida a estratégia proposta, uma vez que basta refazer o experimento de aquisição de valores para posterior modelagem do PID e talvez realizar pequenas mudanças na forma proposta de entrega de potência.

Um ponto importante nessa modelagem é a uniformização da temperatura da mistura. Durante todo o ensaio, o líquido é misturado, deixando sempre a temperatura uniforme e evitando aquecimentos exagerados para volumes próximos do elemento

de aquecimento. Em processos reais isso também é sempre feito, evitando que o malte perto do elemento de aquecimento seja queimado [2]. Neste modelo, a agitação será feita de forma manual.

O sistema usado para coleta de dados é apresentado na Figura 1, composto de um elemento de aquecimento representado por uma resistência elétrica de 1kW de potência controlada por um relé. Um sensor de temperatura DS18B20 [8], da Maxim, também foi empregado, com  $\pm 0.5^\circ \text{C}$  de precisão na faixa de  $-10^\circ \text{C}$  to  $+85^\circ \text{C}$ . Tanto o sensor quanto o relé foram interligados em um microcontrolador ATmega328P, via uma placa Arduino Uno [9].

Foi escolhida a rampa de  $62^\circ \text{C}$  para a análise e modelagem do sistema. A escolha foi baseada no processo cervejeiro, onde é comum o emprego de rampas por volta de  $62^\circ \text{C}$  para a ação da proteína beta amilase, assim com rampas de  $68^\circ \text{C}$  (proteína alfa amilase) e  $50^\circ \text{C}$  (parada proteica) [2].

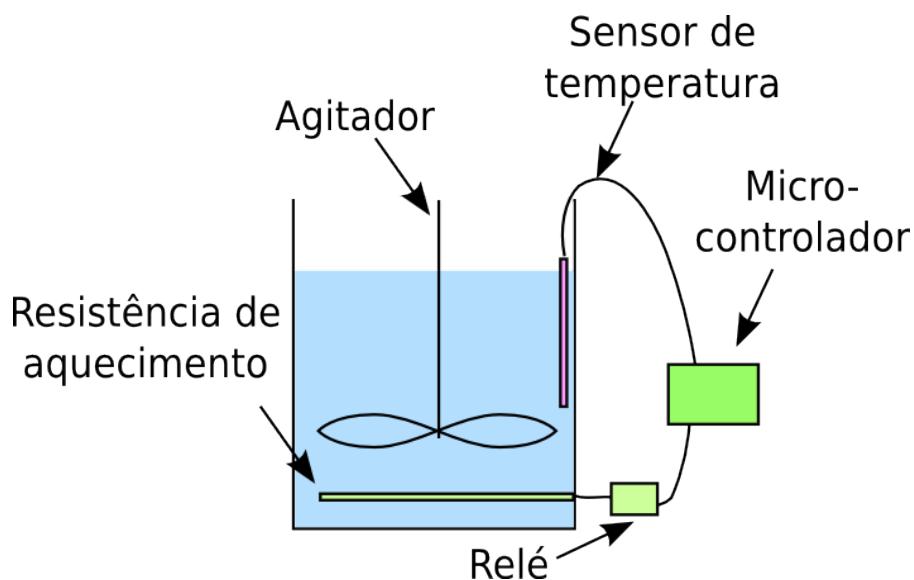


Fig. 1: Protótipo para coleta de dados.

Nesse sistema, foi definida uma taxa de amostragem de temperatura de um segundo, adequada para a dinâmica do processo. O microcontrolador realizava então a programação da rampa, ligando a resistência através do relé até que a temperatura fosse superior ao valor da rampa. Nesse momento, o relé era desligado, criando uma curva de temperatura em resposta ao degrau de aquecimento (Figura 2).

Os dados provenientes da temperatura amostrada e do estado do relé (ligado ou não) eram então registrados, sendo a base para a identificação e modelagem posterior do PID. No ensaio realizado foram coletadas 364 amostras.

### 3 | MODELAGEM PID

Apartir dos resultados recolhidos na amostragem da rampa de  $62^\circ \text{C}$ , foi empregada a ferramenta Matlab para auxiliar na extração do modelo do sistema representativo da

rampa de temperatura e no posterior cálculo do controlador PID.

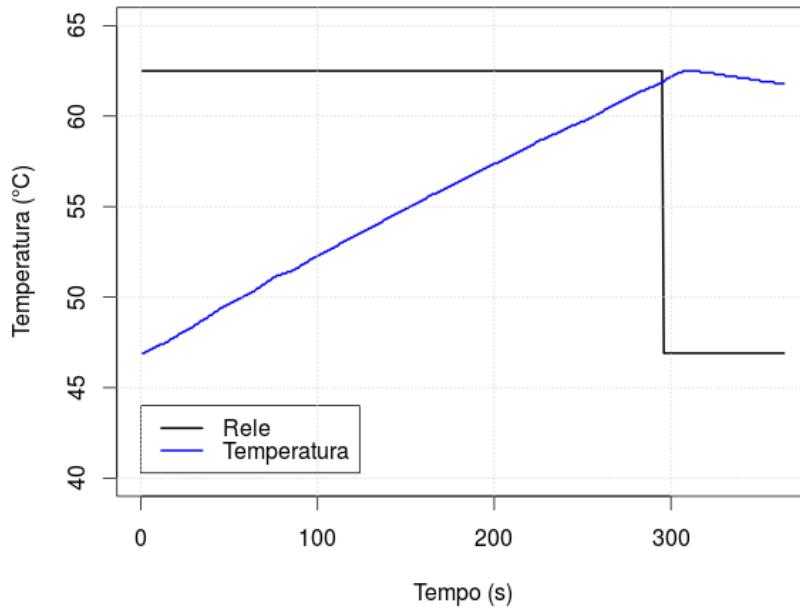


Fig. 2: Dados obtidos (azul) em resposta ao acionamento do relé (preto)

Os dados foram armazenados em um arquivo texto com duas colunas, onde a primeira coluna é o estado do relé (0 ou 1, para ligado ou desligado, respectivamente) e a segunda é o valor da temperatura. Essas colunas são separadas por ponto e vírgula.

É possível obter um modelo do sistema (Listagem 1), cuja função de transferência é dada na Equação 1. No caso, foi estimada uma função com dois pólos e um zero após verificação empírica de que ordens maiores não necessariamente geravam resultados melhores.

O resultado obtido pode ser contrastado com os dados originais (Figura 3), evidenciando um ajuste de 94,66% da função gerada aos dados amostrados.

```

dados = dlmread('dados.txt',';');
x = dados(:,1)
y = dados(:,2)
sysdata = iddata(y,x,1)
sys = tfest(sysdata,2,1,nan)
compare(sysdata,sys)

```

Listagem 1: Estimação da função de transferência

$$sys(s) = e^{-12s} \frac{-0,2559s + 0,04376}{s^2 + 0,5326s + 0,0002843} \quad (1)$$

A Equação 1 pode ser simplificada, evitando o termo exponencial e gerando apenas uma expressão com dois polinômios para numerador e denominador. Isso

facilita a discretização do sistema através da transformada Z [3] e também criação de equações diferenças. Vale lembrar que essa exponencial é geralmente a representação de um tempo morto existente no sistema.

A simplificação pode ser realizada através da aplicação do “Método dos aproximantes de Padé” [10], como apresentado na Listagem 2. A Equação 2 é o resultado desta operação e o valor do novo ajuste, entre os dados e o sistema aproximado por Padé, é de 95,24% (ver Figura 4). Esta nova expressão será a utilizada deste ponto em diante.

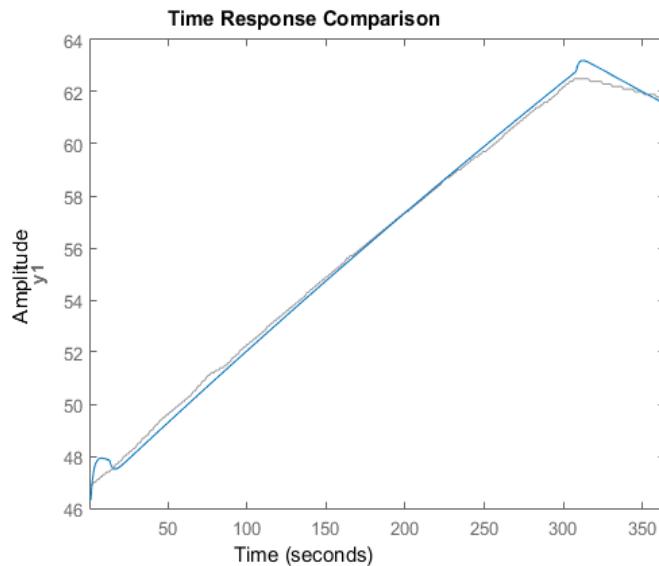


Fig. 3: Função de transferência estimada pelo Matlab em azul e dados originais, em vermelho

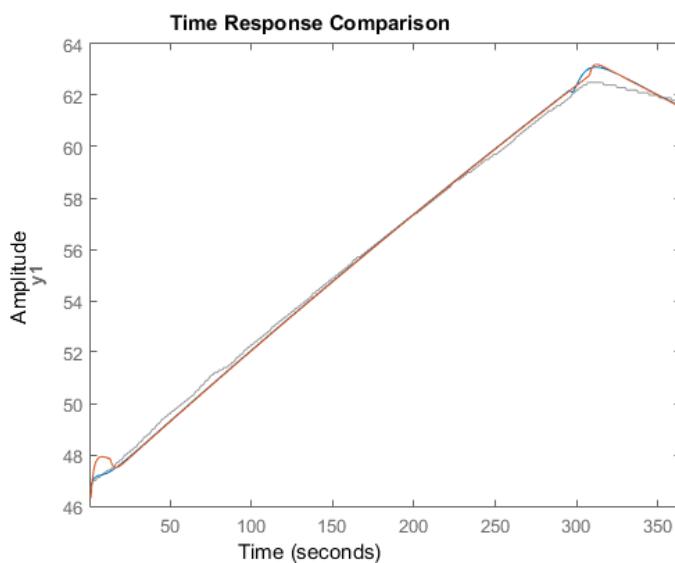


Fig. 4: Comparação entre o sistema modelado com e sem aproximação por Padé

```
sys_pade = pade(tf(sys), 1)
compare (sysdata, sys_pade, sys)
```

Listagem 2: Aproximação por Padé

$$sys_p(s) = \frac{0,2559s^2 - 0,08642s + 0,007294}{s^3 + 0,6992s^2 + 0,08904s + 0,00004738} \quad (2)$$

Com o sistema devidamente representado, é possível realizar a definição dos valores do PID. O Matlab possui uma ferramenta denominada “pidtool” capaz de gerar as constantes proporcionais ( $k_p$ ), derivativas ( $k_d$ ) e integrais ( $k_i$ ). O resultado do emprego dessa ferramenta é apresentado na resposta ao degrau presente na Figura 5, com valores  $k_p = 0,0561$ ,  $k_i = 0,0000568$  e  $k_d = 0$ . Esta resposta apresenta como inconveniente um tempo demasiadamente longo para acomodação do valor. Por esta razão, decidiu-se realizar uma sintonia manual, com o emprego da ferramenta “PID Tune”, também presente no Matlab. Com a ferramenta PID Tune é possível alterar manualmente as configurações do sistema, como o tempo de subida, tempo de acomodação, overshoot, etc.

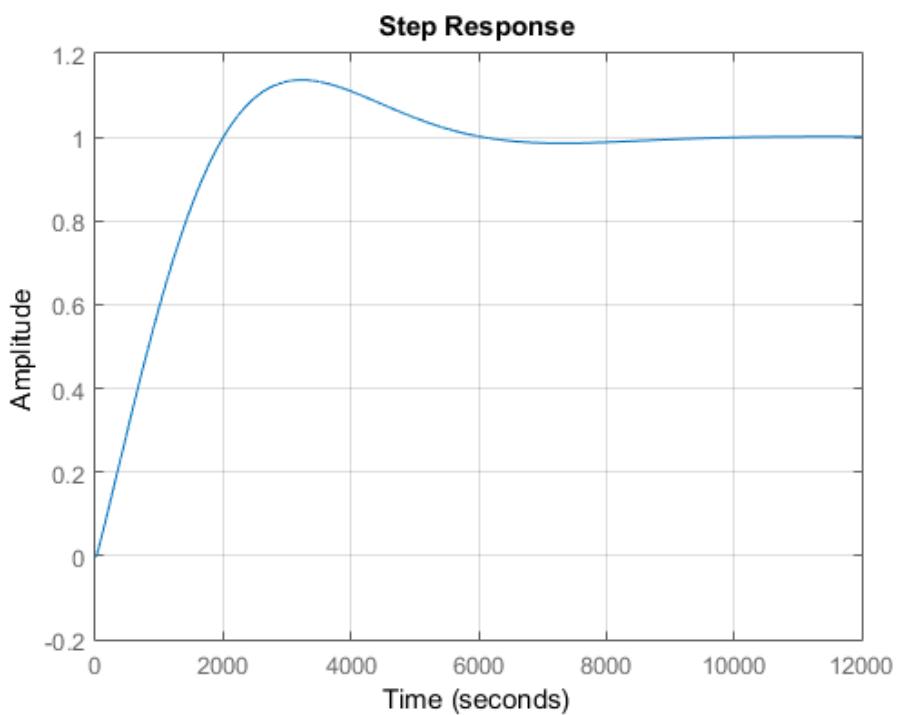


Fig. 5: Resposta ao degrau para o PID estimado automaticamente pelo Matlab

Por tentativas sucessivas foi obtido um conjunto mais adequado para o sistema a ser controlado, com as constantes  $K_p = 0,4K_i = 0,001$  e  $k_d$  tempo de amostragem de um segundo ( $T_s = 1$ ). Como resultado, a nova resposta ao degrau pode ser observada na Figura 6, com um tempo de acomodação menor. A Equação 3 representa esse PID, já em Z. Com o PID projetado, obtê-lo em Z é um processo simples no Matlab, através do emprego da expressão `c2d(tf(pid), 1)`, sendo “pid” o PID projetado e 1 a taxa de amostragem.

$$PID(z) = 0,4 + \frac{0,001}{z - 1} \quad (3)$$

Apenas para referência, as Figuras 5 e 6 podem ser levantadas com o emprego das Listagens 3 e 4.

```
ctrl = pid(0.0561,5.68e-05)
pid_fb = feedback(ctrl*sys_pade,1)
opt = stepDataOptions('StepAmplitude',65);
step(pid_fb,opt)
```

Listagem 3: Resposta ao degrau para PID obtido automaticamente

```
ctrl = pid(0.4,0.001)
pid_fb = feedback(ctrl*sys_pade,1)
opt = stepDataOptions('StepAmplitude',65);
step(pid_fb,opt)
```

Listagem 4: Resposta ao degrau para PID manualmente

Com o controlador definido, é preciso transformar o seu valor de saída, um número real, em um modo de acionamento do elemento de aquecimento (no caso, a resistência *on/off*). O uso de modulação por largura de pulso (PWM) é relativamente comum em situações similares [3]. No entanto, a natureza eletromecânica do relé impede que exista um chaveamento em taxa elevada, o que levaria a um desgaste prematuro desse elemento.

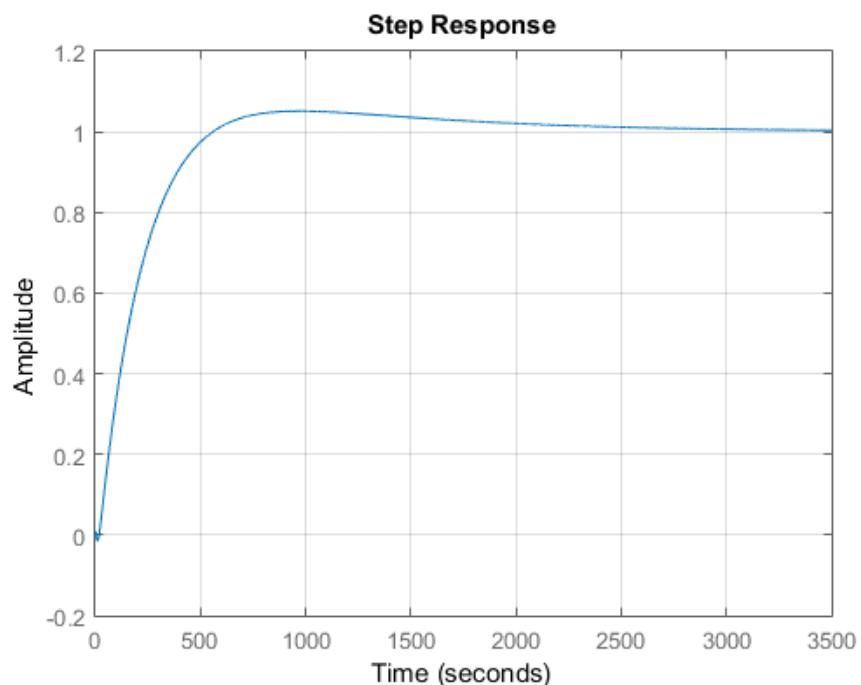


Fig. 6: Resposta ao degrau para o PID estimado manualmente

Para contornar esse problema, foi criado um sistema de entrega de 10 níveis de potência por meio de um PWM lento, com ciclos de 10 segundos. Também foi utilizado um relé de estado sólido, evitando mecanismos eletromecânicos, ambos descritos na próxima seção.

## 4 | MODELAGEM PWM

O sistema proposto para implementação do PWM possui 10 níveis de potência, com um ciclo de 10 segundos. É empregado também um relé de estado sólido da Fotek [11] com chaveamento programado apenas para pontos de tensão igual a zero, resultando em maior proteção e vida útil dos elementos envolvidos.

Os níveis de potência estão apresentados na Figura 7. Estes níveis foram criados para permitir um aumento gradual da potência entregue, em incrementos de décimos de unidade, sempre aproximando o valor do nível para o múltiplo inteiro mais próximo de estados em 1 (ligado) ou 0 (desligado). Por exemplo, uma saída do controlador entre 0 e 0,1 ativa o nível um de potência, gerando um segundo de acionamento da resistência contra nove segundos com a resistência desligada. No nível 9, com saída do controlador entre 0,9 e 1, por sua vez, a resistência ficaria ligada 90% do tempo (nove segundos), com apenas um segundo desligada.

Um aspecto interessante que precisa ser evidenciado é que, exceto quando a saída do controlador é negativa, não existe nenhum nível onde o sistema fica o tempo inteiro desligado. Isso se deve ao fato de que o sistema perde calor para o meio, sendo necessário um nível mínimo de aquecimento. Dessa forma, a discretização da saída do controlador se torna possível.

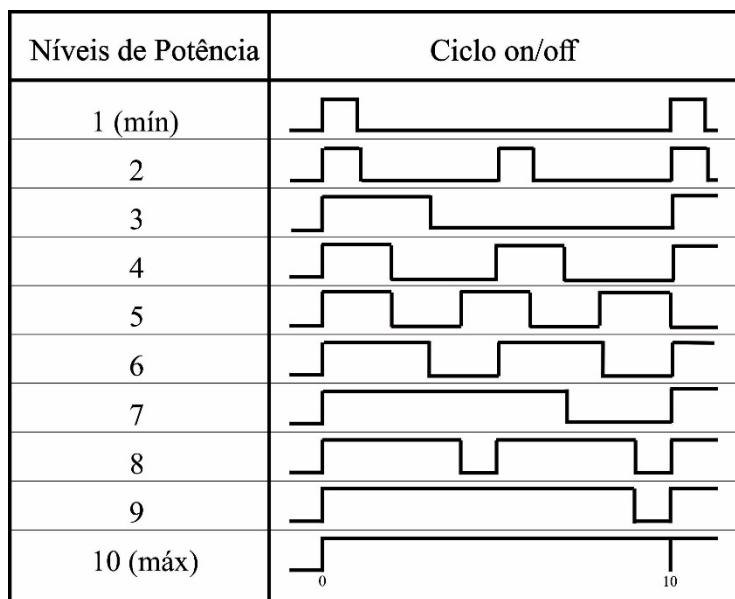


Fig. 7: Níveis de potência usados para o PWM

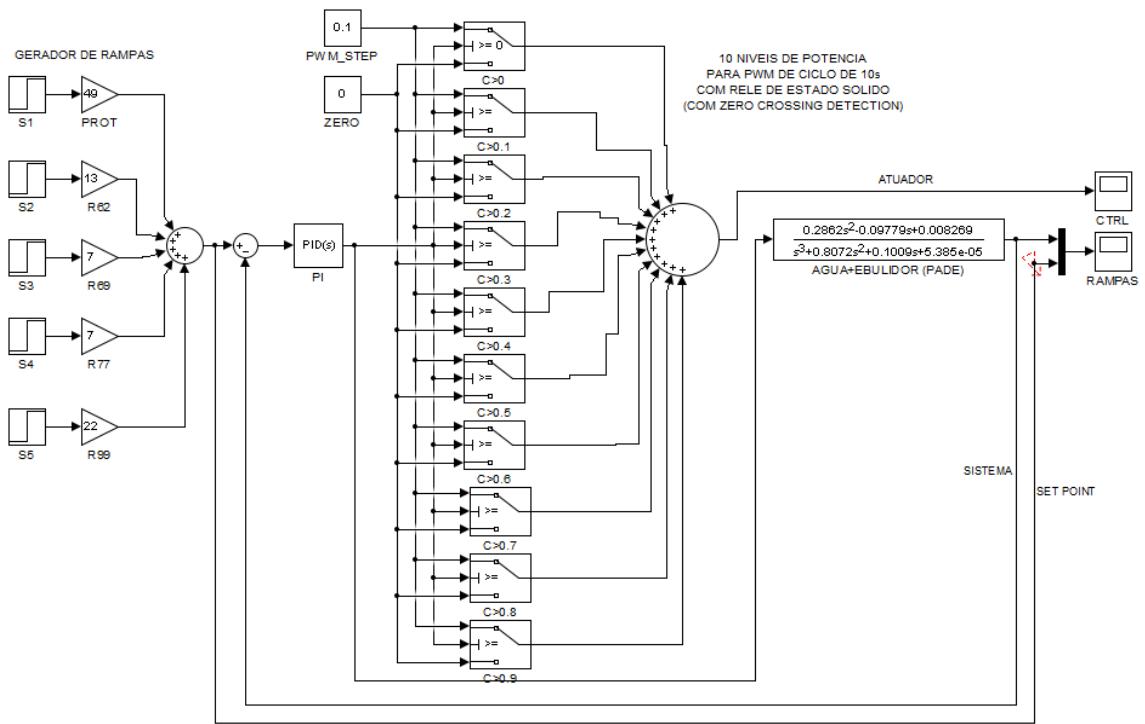


Fig. 8: Simulação do esquema empregado para PWM no Simulink

Como o sistema controlado tem inércia suficiente, é aceitável a alteração do ciclo a cada 10 segundos.

## 5 | SIMULAÇÃO DE SISTEMA NO SIMULINK

Para a análise e melhor entendimento de todo o processo desenvolvido, foi realizada também uma simulação do modelo do sistema mais controlador e PWM através do Simulink, com a estratégia utilizada apresentada via Figura 8. Os resultados de controle, mesmo em rampas diferentes da originalmente utilizada, foram satisfatórios, como pode ser observado nas Figuras 9 e 10.

No caso, foram criadas cinco rampas de temperatura ( $49^\circ\text{C}$ ,  $62^\circ\text{C}$ ,  $69^\circ\text{C}$ ,  $77^\circ\text{C}$  e  $98^\circ\text{C}$ ) para validação do controlador, indicadas em rosa na Figura 9. A resposta do sistema controlado é dada pela curva em amarelo. É possível notar que o sistema responde melhor perto da temperatura da modelagem, com menor *overshoot* e acomodação mais rápida. Isto sugere que o sistema pode ser melhorado ou parametrizado de forma diferente para operar em outras rampas de temperatura com a mesma eficácia.

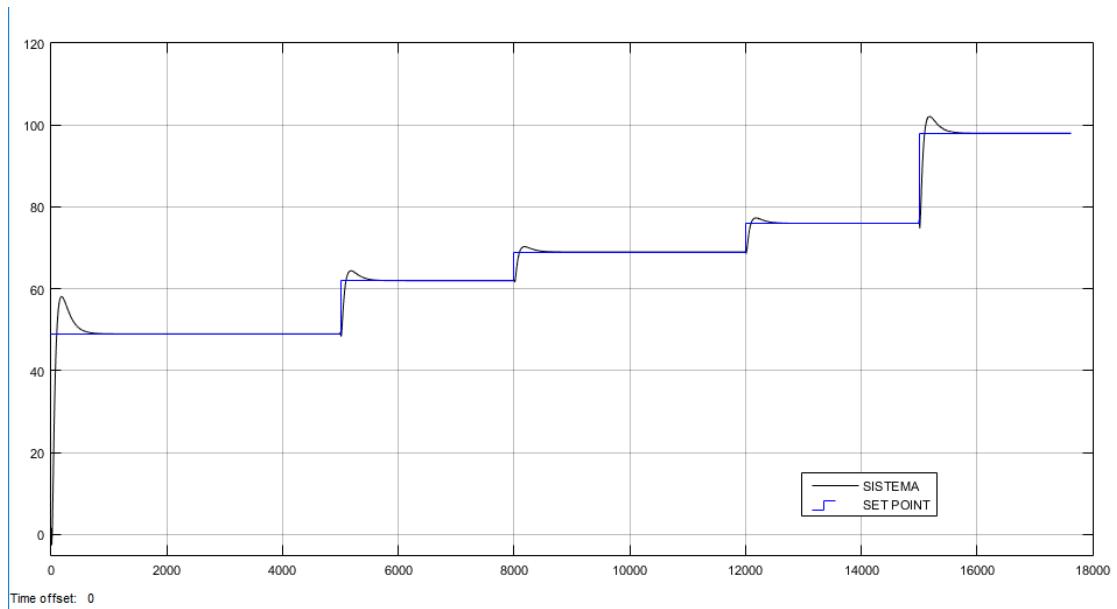


Fig. 9: Set points das cinco rampas (em amarelo) testadas e as respectivas reações do sistema aos novos set points (em rosa)

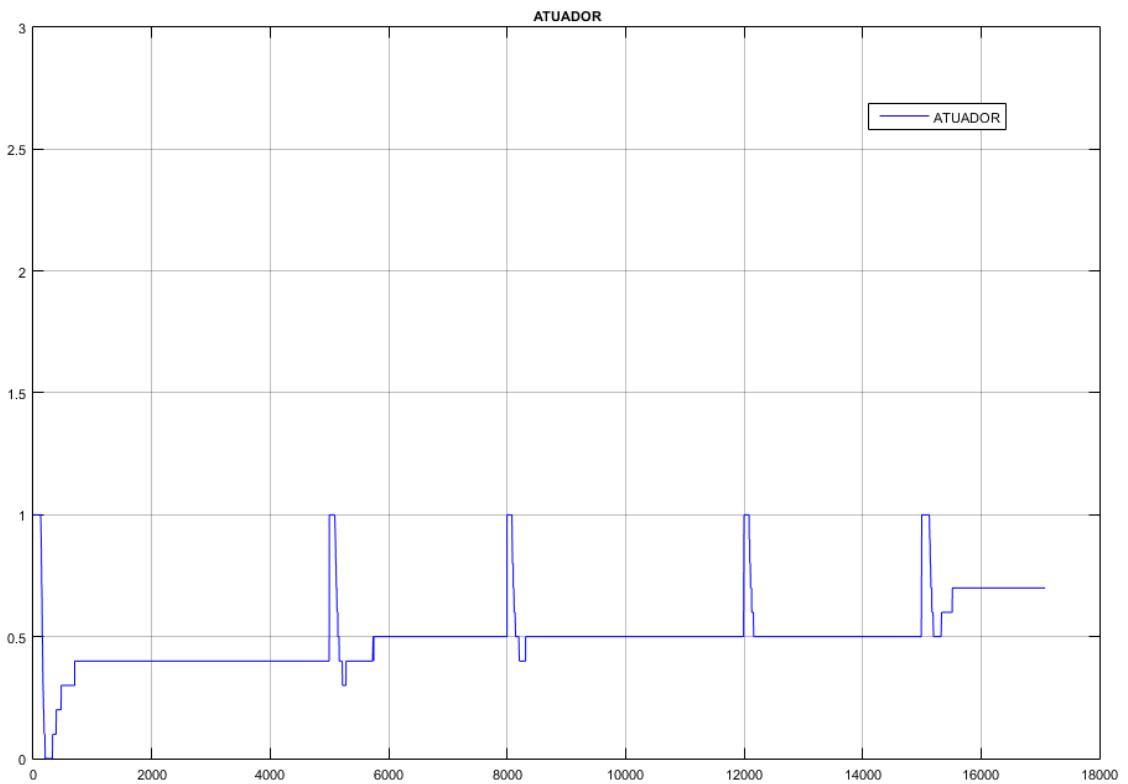


Fig. 10: Gráfico do atuador no tempo, ligando e desligando conforme as mudanças do sistema

A entrega de potência, nos seus níveis discretizados, pode ser visualizada através da Figura 10. Em toda mudança de rampa o sistema reage com a abertura total da ação de controle (resistência o tempo toda ligada) por algumas dezenas de segundos, permitindo a rápida elevação da temperatura. A aproximação do valor da rampa gera uma diminuição da potência entregue, como previsto para um sistema baseado em realimentação do erro.

## 6 | CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma estratégia de modelagem de dispositivo para controle de rampas de temperatura, tipicamente encontradas em tinas de brassagem de nano- cervejarias. Após a modelagem do sistema e da criação de uma estratégia de entrega de potência de dez níveis para um elemento de aquecimento, o sistema foi simulado. Os resultados obtidos demonstram a capacidade de controle do sistema proposto, com pequeno *overshoot* e baixo tempo de acomodação.

## 7 | AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à UFU que, através do programa de Jovens Talentos, permitiu a realização desse trabalho. Também é importante agradecer ao time do LASEC (Laboratório de Sistemas Eletrônicos e Controle), parte do curso de Controle e Automação.

## REFERÊNCIAS

BRIGGS, D. E.; BOULTON, C. A.; BROOKES, P. A. Cap 1 ao 6. in: BRIGGS, D. E.; BOULTON, C. A.; BROOKES, P. A., **Brewing: Science and Practice**. Cambridge, England, 2004. p. 1-225.

MAXIM INTEGRATED. **DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer**. [folha de dados]. 19-7487. 5. rev., San Jose (EUA): Maxim Integrated Products Inc., set. 2018. Disponível em: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>>. Acesso em: 20 abril 2016.

FOTEK. **SSR Series DC to AC Solid State Relay**. [folha de dados]. China: FOTEK Produtcs Inc., 2019. Disponível em: <<http://www.fotek.com.hk/solid/SSR-1.htm>>. Acesso em: 20 abril 2016.

YANLI, Gao; DI, Liu; HAIYING, Zhang. Beer fermentation temperature control system based on DSP. **Ieee 2011 10th International Conference On Electronic Measurement & Instruments**, Chengdu (China), v. 1, p.274-277, ago. 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ICEMI.2011.6037730>>. Acesso em: 20 abril 2016.

SHANG, Ji-liang; DOU, Xiu-hua; WEI, Yu. Application study of optimal control for beer saccharification temperature. **2008 Ieee International Conference On Automation And Logistics**, Qingdao (China), v. 1, p.1750-1753, set. 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ICAL.2008.4636439>>. Acesso em: 20 abril 2016.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Tradução por Heloísa Coimbra de Souza. 5<sup>a</sup> Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

WEEKS, M. **Arduino controlled brewing**, in Southeast Com. 2015. p. 1–5.

**Projeto arduino**. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/>

BARTH, R. **The Chemistry of Beer**: the science in the suds. 1<sup>a</sup> Ed. New Jersey (EUA): Wiley, 2013. 352 p.

BOCK R, K.; KRISCHER, W. **The Data Analysis Briefbook**. 2<sup>a</sup> Ed. Berlim: Springer, 1998. 181 p.

JILIANG, Shang; WEI, Yu; DEXIN, Gao. Study of Compound Optimal Control for Beer Saccharification Temperature. **2007 Chinese Control Conference**, Hunan (China), v. 1, p.356-359, jul. 2006.  
Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/chicc.2006.4346790>>. Acesso em: 20 abril 2016.

## MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS DINÂMICOS: UMA ABORDAGEM DIDÁTICA

**Lucas Divino Alves**

Centro Universitário de Formiga – UNIFOR-MG  
Formiga-MG

**Neylor Makalister Ribeiro Vieira**

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)  
Belo Horizonte-MG

**Emerson Paulino dos Reis**

Centro Universitário de Formiga – UNIFOR-MG  
Formiga-MG

ferramentas de integração, como a regra da substituição e o método do fator integrante. Sendo assim, os exercícios tiveram como foco a prática educativa de ensino-aprendizagem, e possibilitou aos leitores assimilar o mecanismo que consiste em modelar.

**PALAVRAS-CHAVE:** modelagem, investigar, ensino-aprendizagem

### MATHEMATICAL MODELING OF DYNAMIC

#### SYSTEMS: A DIDACTIC APPROACH

**ABSTRACT:** In this article we propose a study of examples related to mathematical models. There are four models that show the reader the phenomenon seen through a different physiognomy, a more mathematical look. Through the study of each question, an analysis was made regarding what was requested and the method to arrive at a certain answer. Through the resolution of the exercises we sought to investigate the variables that affect the problem in question, and from the interpreted conditions an equation that represents the described situation was found. Based on its conditions and with a ready-made model, it was concluded that the problem would be solved using resources such as derivatives and integrals. The resolution of the exercises required previous knowledge in some integration tools, such as the substitution

**RESUMO:** Neste artigo é proposto, um estudo de exemplos relacionados a modelos matemáticos. São quatro modelos que mostram ao leitor o fenômeno visto através de uma fisionomia diferente, uma essência matemática que visa aguçar o interesse do estudante. Por meio do estudo de cada questão, foi feita uma análise referente ao que era solicitado e o método para se chegar à determinada resposta. Através da resolução dos exercícios buscou-se investigar as variáveis que afetam o problema em questão, e a partir das condições interpretadas foi encontrada uma equação que represente a situação descrita. Com base em suas condições e com um modelo já pronto, concluiu-se que se chegaria à resolução do problema utilizando recursos como a derivada e a integral. A resolução dos exercícios necessitou-se de conhecimentos prévios em algumas

rule and the integral factor method. Thus, the exercises focused on the educational practice of teaching and learning, and enabled the readers to assimilate the mechanism that consists of modeling.

**KEYWORDS:** modeling, investigating, teaching-learning.

## 1 | INTRODUÇÃO

O termo modelagem matemática surgiu há muito tempo e que ao passar dos anos tornou-se extremamente importante para que os fenômenos possam ser compreendidos. Analisar os mecanismos que interferem a vida humana sempre foi um aspecto de grande relevância para a ciência, com isso a modelagem matemática surge como um método numérico para explicar os diversos processos físicos, químicos e biológicos que cercam a humanidade.

Modelagem matemática é o processo que envolve a obtenção de um modelo. Este, sob certa óptica, pode ser considerado um processo artístico, visto que, para se elaborar um modelo, além de conhecimento de matemática, o modelador precisa ter uma base significativa de intuição e criatividade para interpretar o contexto, saber discernir que conteúdo matemático melhor se adapta e também ter senso lúdico para jogar com as variáveis envolvidas. [...] A modelagem matemática é, assim, uma arte, ao formular, resolver e elaborar expressões que valham não apenas para uma solução particular, mas que também sirvam, posteriormente, como suporte para outras aplicações e teorias. (BIEMBENGUT, 2000, p.12-13).

Para que se possa entender o conteúdo de modelagem o estudo de equações diferenciais é fundamental. Segundo Zill (2011, p. 2) “Uma equação que contém as derivadas ou diferenciais de uma ou mais variáveis dependentes, em relação a uma ou mais variáveis independentes, é chamada de equação diferencial (ED).” Elas podem ser classificadas pelo tipo, ordem e linearidade. Em sala de aula forma comum de ensinar isso se dá através de uma forma repetitiva e mecanicista.

De acordo com Laudares e Miranda (2007), a construção de conceitos relacionados às áreas nas ciências físicas, químicas, biológicas, econômicas e sociais obtém-se através de uma quantitativa e qualitativa, beneficiando-se da matemática como ferramenta. Uma possível estratégia que busque despertar o interesse do discente é a incessante busca pela interdisciplinaridade e contextualização como mecanismo de resolução de problemas.

O desenvolvimento de novas teorias matemáticas e suas apresentações como algo acabado e completo acabaram conduzindo seu ensino nas escolas de maneira desvinculada da realidade, e mesmo do processo histórico de construção da matemática. Assim é que um teorema é ensinado, seguindo o seguinte esquema: “enunciado → demonstração → aplicação”, quando de fato o que poderia ser feito é sua construção na ordem inversa (a mesma que deu origem ao teorema), isto é, sua motivação (externa ou não à matemática), a formulação de hipóteses, a validação das hipóteses e novos questionamentos, e finalmente seu enunciado (BASSANEZI, 2002, p. 36).

Conforme defendido por Alves (2006), o ensino das equações diferenciais pode contribuir para o entendimento do conceito de derivada com base no estudo

dos fenômenos científicos, e utilizando-se da taxa de variação para verificar o comportamento destes processos em relação à variável tempo.

Para alguns estudantes, o interesse intrínseco do assunto é motivação suficiente, mas para a maioria, as possíveis aplicações importantes em outros campos é o que faz com que tal assunto valha a pena. Muitos dos princípios, ou leis que regem o comportamento do mundo físico são proposições, ou relações, envolvendo a taxa segundo a qual as coisas acontecem (BOYCE, DIPRIMA 2006, p.1).

O seguinte trabalho tem por finalidade auxiliar os leitores na compreensão e resolução de exercícios introduzindo o conceito de modelagem matemática e reforçando a relevância do entendimento e solução de problemas principalmente no ramo das engenharias. Visa proporcioná-los, através da análise de problemas, uma forma didática de investigar as variáveis que interferem no sistema e chegar a uma conclusão referente ao que o problema propõe.

Para Bassanezi (2002), a modelagem se inicia com a fase da experimentação, que equivale à obtenção dos dados do problema, para que ela fique bem executada, recomenda-se que o modelador se baseie em um desenho que represente o fenômeno. A segunda fase trata-se da abstração, etapa em que há a seleção de variáveis, verificando quais os elementos que atuam diretamente no problema em questão, logo depois vem a problematização do modelo seguindo uma linguagem matemática, tem-se também a formulação de hipóteses em que permite ao pesquisador inferir deduções e finalmente a simplificação que visa simplificar ao máximo o modelo criado, deixando-o o mais simples possível. A quarta etapa é a validação, ou seja, verificar se determinado modelo descreve aquela situação real em questão, caso haja algumas discrepâncias há necessidade de modificá-lo. Logo a modelagem matemática é um mecanismo complexo porém de extrema importância para que se analisem os fenômenos que ocorrem na natureza e possam assim ser entendidos. A Figura 1 exemplifica o processo.

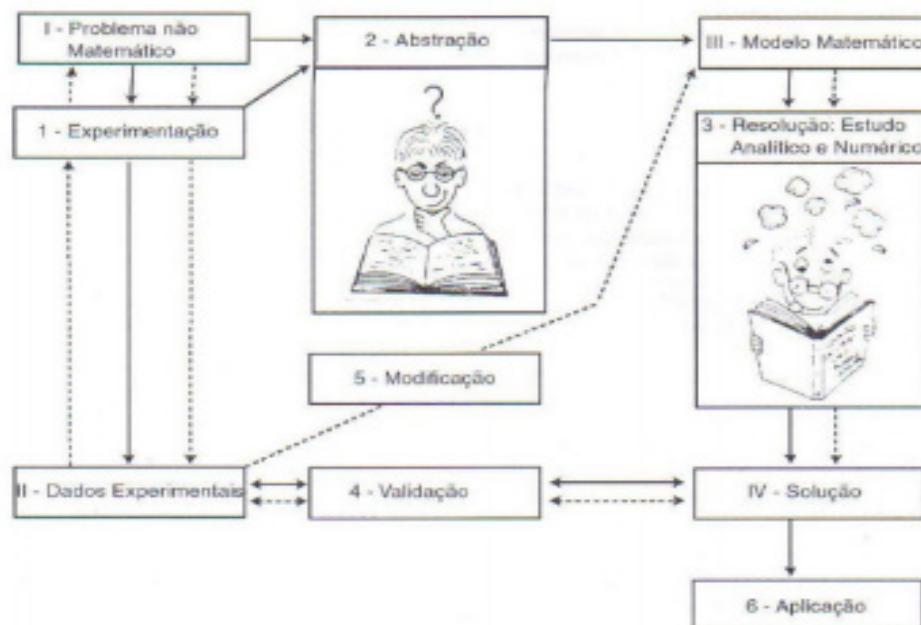


Figura 1 - Processo de Modelagem

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

O método utilizado para elaborar o estudo foi a resolução de exercícios que descrevem modelos matemáticos. Trata-se de quatro exemplos que permitem ao leitor ter uma introdução sobre o conteúdo de modelagem matemática. O primeiro exemplo retrata a variação de temperatura sofrida por um termômetro, quando colocado em ambientes diferentes. O segundo exemplo relata o crescimento de uma cidade qualquer, em que, à medida que o tempo vai transcorrendo o número de habitantes cresce. No terceiro exemplo verifica-se o caso de uma mistura de salmoura presente em um tanque e no quarto exemplo verificam-se as forças atuantes no corpo de um paraquedista. Como já se tinha o modelo dos quatro exemplos, somente foi preciso separar as variáveis e realizar o procedimento de integração. Para resolver a integral dos exercícios utilizou-se a regra da substituição e do fator integrante. Como são problemas de valor inicial, por meio das condições que o problema ofereceu foi descoberta uma equação que regia o modelo. Porém no último problema foi feita uma investigação sobre as variáveis que atuam sobre o corpo do paraquedista, logo depois um diagrama de forças representou as forças que atuam sobre o mesmo. A partir disso, encontrou uma equação diferencial de segunda ordem que representa a situação descrita.

## 3 | RESULTADOS

Propuseram-se a estudar e solucionar quatro exercícios exemplos para que o leitor possa analisar as variáveis que afetam o sistema e entender como ocorre o processo de modelagem.

### 3.1 Modelo Matemático de Aquecimento e Resfriamento de Newton

Este modelo é definido como: A taxa segundo a qual a temperatura de um corpo varia é proporcional à diferença entre a temperatura do corpo e a temperatura do meio que o rodeia. Logo, obtém-se a expressão.

$$\frac{dT}{dt} \propto T - T_M \quad \text{ou} \quad \frac{dT}{dt} = k(T - T_M) \quad (1)$$

Como se trata de taxa deve-se recorrer ao uso da derivada. Sendo assim, empregando o método de separação de variáveis e integrando-a, encontrou-se a equação característica do modelo descrito.

$$\frac{dT}{(T - T_M)} = kdt \quad (2)$$

$$\int \frac{dT}{(T - T_M)} = \int kdt \quad (3)$$

$$\ln |T - T_M| + c_1 = kt + c_2 \quad (4)$$

$$\ln |T - T_M| = kt + c_3 \quad (5)$$

Utilizando as propriedades do logaritmo natural, estabeleceu a seguinte equação.

$$\left\{ \begin{array}{l} \ln b = k \\ b = e^k \end{array} \right. \quad (6)$$

$$T = e^{kt} \cdot c + T_M \quad (7)$$

Na Eq. (7), T, e, k, t, c e TM, são respectivamente, temperatura do corpo, número de Euler, constante de proporcionalidade, tempo, constante e temperatura do meio.

Em vista disso, para demonstrar sua utilização será mostrado um exercício que relaciona o modelo matemático de aquecimento e resfriamento de Newton.

Situação Problema: Um termômetro é removido de uma sala onde a temperatura ambiente é de 70°F e levado para fora, onde a temperatura é de 10°F. Após meio minuto o termômetro indica 50°F. Qual a leitura do termômetro em t = 1 min? Quanto tempo levará para o termômetro atingir 15°F? (ZILL, D.G. Equações diferenciais: com aplicações em modelagem. 9.ed. Cengage Learning, São Paulo, BRA,93p.,2014.)

Visando utilizar o Sistema Internacional de Unidades (SI), recorreremos a uma fórmula que converta a temperatura de Fahrenheit para Kelvin, de acordo com a Eq. (8). A unidade de medida de tempo no exercício está em minutos, porém será utilizado o segundo para resolução do problema. Para os cálculos considerou-se uma aproximação de quatro casas decimais, após a vírgula.

$$\frac{T_K - 273}{5} = \frac{(T_F - 32)}{9} \quad (8)$$

Na Eq.(8), os termos TK e TF referem-se respectivamente à temperatura em Kelvin e graus Fahrenheit. Como o exercício relata temperaturas de 70°F, 10°F, 50°F e 15°F, fazendo o uso da fórmula, elas correspondem respectivamente a 294,1111K, 260,7778K, 283K e 263,5556K. Através da interpretação do problema obtêm-se as seguintes informações:

$$\begin{cases} T_M = 260,7778K \\ T(0) = 294,1111K \\ T(30) = 283K \end{cases} \quad (9)$$

Quando  $t = 0$ ;  $T = 294,1111K$ . Substituindo em (7)

$$294,1111 = e^{k_0} \cdot c + 260,7778 \quad (10)$$

$$c = 33,3334 \quad (11)$$

Quando  $t = 30s$ ;  $T = 283K$ . Substituindo em (7) e usando o valor de  $c$ , obtido em (11) tem-se:

$$283 = e^{30k} \cdot 33,3334 + 260,7778 \quad (12)$$

$$\frac{22,2223}{33,3334} = e^{30k} \quad (13)$$

Para descobrir o valor da constante  $k$ , deve utilizar as propriedades do logaritmo natural.

$$\ln |22,2223| - \ln |33,3334| = 30k \quad (14)$$

$$3,1011 - 3,5066 = 30k \quad (15)$$

$$k = -0,0135 \quad (16)$$

A expressão que representa este modelo ficaria a seguinte:

$$T(t) = 33,3334e^{-0,0135t} + 260,7778 \quad (17)$$

O exercício em questão deseja saber:

$$\begin{cases} T(60) = ? \\ T(?) = 263,5556 F \end{cases} \quad (18)$$

Utilizando a equação (17), e substituindo os valores:

$$T(60) = 33,3334 \cdot e^{-0,0135 \cdot 60} + 260,7778 \quad (19)$$

$$T(60) = 275,6064 \quad (20)$$

Como o tempo equivale a 60 segundos, obtém-se uma temperatura de 275,6064K. Agora para descobrir sua segunda condição, basta substituir os dados na equação (17). Assim:

$$263,5556 = 33,3334e^{-0,0135t} + 260,7778 \quad (21)$$

$$\frac{2,7778}{33,3334} = e^{-0,0135t} \quad (22)$$

Utilizando as propriedades do logaritmo natural:

$$\ln|2,7778| - \ln|33,3334| = -0,0135t \quad (23)$$

$$t = 184,0667 \quad (24)$$

Então, para termômetro atingir 263,5556K são necessários 184,0667 segundos.

### 3.2 Modelo Matemático de Crescimento e Decaimento

O modelo é definido como, a taxa segundo a qual a população cresce ou decresce em determinado instante é proporcional à população total naquele instante. Logo, obtém-se a seguinte expressão:

$$\frac{dP}{dt} \propto P \quad \text{ou} \quad \frac{dP}{dt} = kP \quad (25)$$

Como a definição do modelo menciona taxa, há necessidade de uso da derivada. Utilizando o método da separação de variáveis e integrando-a, a equação ficará da seguinte forma:

$$\frac{dP}{P} = kdt \quad (26)$$

$$\int \frac{dP}{P} = \int kdt \quad (27)$$

$$\ln|P| + c_1 = kt + c_2 \quad (28)$$

$$P = e^{kt+c} \quad (29)$$

Na Eq. (29) os termos  $P$ ,  $e$ ,  $k$ ,  $t$  e  $c$  são respectivamente, população em determinado instante de tempo, número de Euler, constante de proporcionalidade, tempo e constante. Assim sendo, para demonstrar sua utilização será resolvido um exercício que relaciona o modelo matemático de crescimento e decaimento.

Situação Problema: A população de uma cidade cresce a uma taxa proporcional à população no instante  $t$ . A população inicial de 500 indivíduos cresce 15% em 10 anos. Qual será a população em 30 anos? Qual o crescimento populacional em  $t=30$ ? (ZILL, D.G. Equações diferenciais: com aplicações em modelagem. 9.ed. Cengage Learning, São Paulo, BRA, 91p.,2014) Através da interpretação do problema obtém-se as seguintes informações:

$$\begin{cases} P(0) = 500 \\ P(10) = 500 + (500 \cdot 15\%) \\ P(10) = 575 \end{cases} \quad (30)$$

Quando  $P = 500$ ;  $t = 0$ . Substituindo-se em (29).

$$500 = e^{k \cdot 0} \cdot c \quad (31)$$

$$c = 500 \quad (32)$$

A partir dessa condição encontra-se a constante  $c$ , e quando  $P = 575$ ;  $t = 10$ . Substituindo-se em (29).

$$575 = e^{10k} \cdot 500 \quad (33)$$

$$\frac{575}{500} = e^{10k} \quad (34)$$

$$1.15 = e^{10k} \quad (35)$$

Para descobrir o valor da constante  $k$  utiliza-se as propriedades do logaritmo natural, conforme Eq. (6). Considerando uma aproximação de quatro casas decimais após a vírgula.

$$\ln|1.15| = 10k \quad (36)$$

$$k = 0.0140 \quad (37)$$

A expressão que representa este modelo ficará da seguinte forma:

$$P(t) = 500 \cdot e^{0.0140t} \quad (38)$$

O exercício em questão deseja saber:

$$\left\{ \begin{array}{l} P(30) = ? \\ \text{Crescimento em } (t = 30) = P(30) - P(29) \end{array} \right. \quad (39)$$

Fazendo o uso da equação (38) e substituindo os dados:

$$P(30) = 500 \cdot e^{0.0140 \cdot 30} \quad (40)$$

$$P(30) = 760.9808 \quad (41)$$

Logo, a população dessa cidade daqui a 30 anos será de 760.9808 indivíduos. Agora o exercício deseja encontrar qual foi o crescimento em  $t=30$ , ou seja, o crescimento que essa cidade teve no ano 30. Assim, utilizará a segunda condição descrita acima.

$$P(29) = 500 \cdot e^{0.0140 \cdot 29} \quad (42)$$

$$P(29) = 750.4013 \quad (43)$$

Como se tem que o crescimento é  $P(30) - P(29)$ , logo:

$$\text{Crescimento em } (t = 30) = P(30) - P(29) \quad (44)$$

$$\text{Crescimento em } (t = 30) = 760.9808 - 750.4013 \quad (45)$$

Então, houve um crescimento de 10.5795 indivíduos ao longo do ano 30.

### 3.3 Modelo Matemático de Misturas

Determinado modelo trata-se da análise de duas misturas que se encontram em um tanque. Para que se investigue a concentração das misturas é necessário verificar que existe uma relação descrita pela seguinte fórmula.

$$\frac{dA}{dt} = \text{TAXA DE ENTRADA DE SAL} - \text{TAXA DE SAÍDA DE SAL} \quad (46)$$

Através da fórmula descrita, depreende-se que existe uma taxa, logo, a aplicação da derivada buscará estabelecer as concentrações das misturas analisadas. Situação problema: Um grande tanque é enchido completamente com 500 galões de água pura. Uma salmoura contendo 2 libras por galão é bombeada para dentro do tanque a uma taxa de 5 gal/min. A solução bem misturada é bombeada para fora à mesma taxa. Ache a quantidade  $A(t)$  de libras de sal no tanque no instante  $t$ . (ZILL, D.G. Equações

diferenciais: com aplicações em modelagem. 9. ed. Cengage Learning, São Paulo, BRA, 93p., 2014) Como o exercício estabelece medidas fora do Sistema Internacional de Unidades (SI), iremos modifica-las. Libra é uma unidade de massa utilizada no sistema inglês de pesos e medidas, e equivale a 0,4536 kg (HALLIDAY, RESNIK, WALKER, 2002). Na resolução do exercício utilizaremos segundos.

Por meio da interpretação do problema às seguintes conclusões.

$$\begin{cases} \text{ENTRADA} = \frac{5 \text{ GALÕES}}{\text{MINUTO}} \cdot \frac{2 \text{ LIBRAS}}{\text{GALÃO}} = \frac{0,0833 \text{ GALÃO}}{\text{SEGUNDO}} \cdot \frac{0,9072 \text{ Kg}}{\text{GALÃO}} \\ \text{SAÍDA} = \frac{5 \text{ GALÕES}}{\text{MINUTO}} \cdot \frac{A}{500 \text{ GALÕES}} = \frac{0,0833 \text{ GALÃO}}{\text{SEGUNDO}} \cdot \frac{A}{500 \text{ GALÕES}} \end{cases} \quad (47)$$

Então se obtêm as seguintes taxas de concentração:

$$\begin{cases} \text{ENTRADA} = \frac{10 \text{ LIBRAS}}{\text{MINUTO}} = \frac{0,0756}{\text{SEGUNDO}} \\ \text{SAÍDA} = \frac{0,0833 \text{ GALÃO}}{\text{SEGUNDO}} \cdot \frac{A}{500 \text{ GALÕES}} = \frac{A}{5000 \text{ SEGUNDOS}} \end{cases} \quad (48)$$

Assim tem-se que:

$$\frac{dA}{dt} = \text{TAXA DE ENTRADA} - \text{TAXA DE SAÍDA} \quad (49)$$

A partir disso obtém-se a expressão que descreve a situação.

$$\frac{dA}{dt} = 0,0756 - \frac{A}{5000} \quad (50)$$

$$\frac{dA}{dt} + \frac{A}{5000} = 0,0756 \quad (51)$$

Para resolver tal expressão deve-se utilizar o fator de integração cuja fórmula é a seguinte.

$$\mu = e^{\int P(t)dt} \quad (52)$$

Então o fator de integração ficará da seguinte forma:

$$\mu = e^{\int \frac{1}{5000} dt} \quad (53)$$

$$\mu = e^{\frac{t}{5000}} \quad (54)$$

Com isso pode utilizar a seguinte relação:

$$\frac{d}{dt} [ e^{\int P(t)dt} \cdot y ] = e^{\int P(t)dt} \cdot f(x) \quad (55)$$

Logo:

$$\frac{d}{dt} \left[ A \cdot e^{\frac{t}{5000}} \right] = 0,0756 \cdot e^{\frac{t}{5000}} \quad (56)$$

Sendo assim, agora integramos os dois lados da expressão descrita:

$$\int \frac{d}{dt} \left[ A \cdot e^{\frac{t}{5000}} \right] dt = \int 0,0756 \cdot e^{\frac{t}{5000}} dt \quad (57)$$

A partir de agora se tem duas integrais, sendo que uma é a derivada da integral, diante disso o resultado dessa integração é o próprio termo, já a outra terá de ser resolvida pelo método da substituição.

$$\int 0,0756 e^{\frac{t}{5000}} dt \quad (58)$$

Considerando:

$$u = \frac{t}{5000} \quad e \quad \frac{du}{dt} = \frac{1}{5000} \quad \text{logo} \quad dt = 5000 du \quad (59)$$

Agora fazendo as devidas substituições encontra-se:

$$\int 0,0756 e^u \cdot 5000 du = 0,0756 \cdot 5000 \int e^u du \quad (60)$$

Sendo assim:

$$378e^{\frac{t}{5000}} + c \quad (61)$$

Então, como já se têm as devidas integrais, obtém-se:

$$A \cdot e^{\frac{t}{5000}} = 378e^{\frac{t}{5000}} + c \quad (62)$$

$$A = \frac{378e^{\frac{t}{5000}}}{e^{\frac{t}{5000}}} + \frac{c}{e^{\frac{t}{5000}}} \quad (63)$$

$$A(t) = 378 + ce^{-\frac{t}{5000}} \quad (64)$$

Na Eq.(64) os termos A, c, e, e t, são respectivamente, concentração em função de um determinado tempo, constante, número de Euler e tempo. Como taxa que entra é a mesma que sai, logo não possui diferença nas concentrações. Com isso no tempo zero, tem-se a seguinte condição  $A(0) = 0$ , a partir dessa relação encontra-se o valor da constante c. Substituindo a relação descrita em (64) obtém-se:

$$0 = 378 + ce^{-\frac{0}{5000}} \quad (65)$$

$$c = -378 \quad (66)$$

Logo a equação que representa a situação descrita é a seguinte:

$$A(t) = 378 - 378e^{-\frac{t}{5000}} \quad (67)$$

### 3.4 Modelo Matemático Queda-livre

Um corpo em queda livre sofre influência da gravidade e da resistência do ar, mediante a isso tais fatores vão interferir na velocidade do objeto. Para que se possa compreender tal situação torna-se necessário desenhar o diagrama de corpo livre para saber quais as forças que atuam sobre o objeto. Para entender determinada situação, analisa-se o seguinte exemplo físico.

Situação Problema: Em certas circunstâncias, um corpo B de massa m em queda como o páraquedista mostrado na figura (Figura 2), encontra resistência do ar proporcional à sua velocidade v. Use a segunda lei de Newton para encontrar a equação diferencial para a velocidade v do corpo em qualquer instante. Lembre-se de que a aceleração é  $a = dv/dt$ . Suponha neste caso que a direção positiva é para baixo. (CULLEN, M.R.; ZILL, D.G. Equações diferenciais. 3.ed. Person Makron Books, São

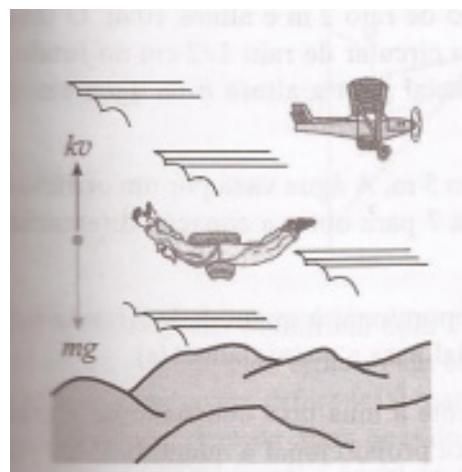


Figura 2 - Paraquedista em queda.

Fonte: Cullen e Zill (2001)

Como a resistência do ar é proporcional à velocidade, então:

$$k \propto V \quad \text{logo} \quad kv \quad (68)$$

Assim, quanto maior é a velocidade( $V$ ), maior será a resistência do ar( $k$ ). Através da segunda lei de Newton, conhecida como princípio fundamental da Dinâmica, verifica-se que a força resultante que atua sobre um corpo é resultado da multiplicação da massa do corpo por sua aceleração.

$$\vec{F}_R = m \cdot \vec{a} \quad (69)$$

$$\vec{a} = \frac{dV}{dt} \quad (70)$$

Na Eq. (70), a aceleração é representada como a derivada da velocidade em um determinado intervalo de tempo. A figura (figura 3) representa a análise das forças atuantes no paraquedista.

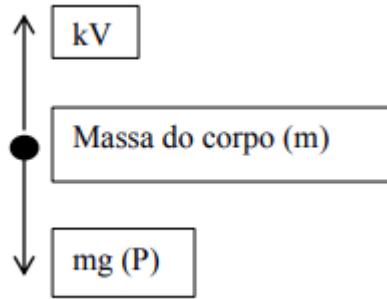


Figura3 – Diagrama de Forças

Fonte: Próprio autor (2018)

$$F_R = mg - kV \quad (71)$$

$$ma = mg - kV \quad (72)$$

$$ma + kV = mg \quad (73)$$

Por meio da análise dos vetores do Diagrama de forças da Figura 3, apresenta-se uma equação que caracteriza a situação referida. A Eq. (71) retrata a Força resultante como sendo a diferença entre o produto da massa e gravidade, pelo produto da resistência do ar e velocidade. Na Eq. (73) há uma substituição da termo  $F_R$ , pois se sabe que força resultante equivale ao produto da massa pela aceleração. Conforme a  $a = dV/dt$ , substituindo:

$$m \frac{dV}{dt} + kV = mg \quad (74)$$

$$g = \frac{m \frac{dV}{dt}}{m} + \frac{kV}{m} \quad (75)$$

Portanto a equação diferencial que descreve a situação problema é a seguinte:

$$g = \frac{dV}{dt} + \frac{kV}{m} \quad (76)$$

Na Eq. (76) os termos  $g$ ,  $dV/dt$ ,  $k$ ,  $V$  e  $m$ , equivalem a respectivamente, gravidade, derivada da velocidade em função do tempo (que representa a aceleração), resistência do ar, velocidade e massa.

## 4 I CONCLUSÃO

Através dos problemas propostos percebe-se que a modelagem matemática

é essencial para que os processos possam ser compreendidos. É uma ferramenta numérica que busca auxiliar, por intermédio de cálculos, a solução do sistema em questão. Através disso, a resolução dos exercícios feita de forma passo a passo objetiva propiciar um melhor entendimento, facilitando assim o aprendizado. Foram selecionados exercícios referentes à questão de transferência de calor (análise da temperatura do corpo), crescimento populacional, um exemplo químico relacionado com o fator de misturas e por fim foi feita uma investigação em relação às variáveis que atuam em um corpo em queda. Muitos alunos possuem a dificuldade em entender o que está ocorrendo no sistema, visto que a metodologia empregada em sala de aula é feita de maneira mecanicista e repetitiva. Então, determinado artigo teve o objetivo de explicar como reproduzir um modelo e resolvê-lo, de forma simples e abordando todos os passos ao longo de sua resolução. Portanto é muito importante entender os fatores que afetam o sistema e buscar métodos para solucioná-lo, assim o estudo da modelagem deseja despertar o gosto investigativo pelo modo como ocorrem os fenômenos.

## 5 | AUTORIZAÇÃO/RECONHECIMENTO

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo das informações contidas neste artigo.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, M.B. **Equações diferenciais ordinárias em cursos de licenciatura de matemática: formulação, resolução de problemas e introdução à modelagem matemática.** 2008. 90p. Mestrado Profissional (Pós Graduação em Ensino de Ciências e Matemática)-Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte,2008. Disponível em:, Acesso em: 6 mai. 2017.
- BASSANEZI, C.R. **Ensino-aprendizagem com modelagem matemática: uma nova estratégia.** Contexto, São Paulo, BRA, 2002.
- BIEMBENGUT, M.S. **Modelagem matemática no ensino.** Contexto, São Paulo, BRA, 2000
- BOYCE, W.E.; DIPRIMA. R.C. **Equações diferenciais elementares e problemas de valores de contorno.** 8.ed. LTC, Rio de Janeiro, BRA, 2006.
- CULLEN, M.R.; ZILL, D.G. **Equações diferenciais.** 3.ed. Person Makron Books, São Paulo, BRA, 2001.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física.** 6.ed. LTC, Rio de Janeiro, BRA, 2002.
- LAUDARES, J.B; MIRANDA, D.F. **Investigando a iniciação à modelagem matemática nas ciências com equações diferenciais.** Educação Matemática Pesquisa, São Paulo, v.9, n.1, p.103-120, 2007. Disponível em: ,Acesso em: 23 ago. 2018.
- ZILL, D.G. **Equações diferenciais: com aplicações em modelagem.** 9.ed. Cengage Learning, São Paulo,BRA, 2017.

## APLICAÇÃO E ANÁLISE VIA MEC EM PROBLEMAS DE TERMOELASTICIDADE 2D

**Luis Vinicius Pereira Silva**

Universidade de Brasília, Brasília - DF

**Gilberto Gomes**

Universidade de Brasília, Brasília – DF

**João Carlos Barleta Uchôa**

Instituto Federal de Brasília, Brasília – DF

forma mais clara a participação dos efeitos das tensões térmicas sobre as diversas patologias, as quais as estruturas de revestimento cerâmico estão submetidas.

**PALAVRAS CHAVES:** revestimento cerâmico; modelagem térmica; elementos de contorno; BEMLAB2D.

**RESUMO:** Os materiais constituintes das fachadas, especificamente da estrutura de revestimento cerâmico, estão sujeitos a diferentes intempéries que se traduzem em ações solicitantes vindas da variação da temperatura ou choques térmicos. Tais ações, associadas com as diferentes propriedades físicas e mecânicas dos materiais empregados nos revestimentos, produzem estados de tensões e deformações nas fachadas. Neste trabalho, propõe-se uma modelagem numérica pelo Método dos Elementos de Contorno (MEC) para problemas de Potencial, considerando a estrutura de revestimento sob ação cíclica de temperatura na cidade de Brasília, avaliando seu efeito sob a estrutura de revestimento. A metodologia consiste em modelar perfis constituídos de emboço, argamassa colante e cerâmica, utilizando-se um pacote de software acadêmico baseado no MEC, visando determinar a distribuição de temperatura e, posteriormente, as tensões térmicas. De posse dos resultados, espera-se compreender de

**ABSTRACT:** The materials that constitute the building facades, specifically the ceramic coating structure, are subject to different weather conditions. In fact, those adverse circumstances translate into loads, mainly generated by changes in temperature or thermal shocks, associated with the different physical and mechanical materials properties used in the coatings, produce stresses and strain states in the facades. Here, is proposes a numerical modeling via Boundary Elements Method (BEM) for Potential Problems, considering the coating structure under cyclic temperature action in the city of Brasilia, evaluating its effectiveness in the coating structure. The methodology consists in modelling profiles composed of plaster, bonding mortar and ceramic, using an academic software package based on the BEM, to determine the temperature distribution and, sequentially, the thermal stresses. With the results, it is expected to understand more clearly the contribution of the thermal stresses on the several pathologies which the ceramic coating structures are

subjected to.

**KEYWORDS:** ceramic coating; thermal modeling; boundary elements; BEMLAB2D.

## 1 | INTRODUÇÃO

Segundo Silva (2000), os sistemas de revestimentos cerâmicos são empregados na grande maioria das fachadas dos empreendimentos, sendo necessário compreender e analisar o comportamento desse conjunto, uma vez que se trata de estruturas sujeitas a diversos esforços. Fiorito (2009) enfatiza que o sistema cerâmico é uma estrutura por ser constituído de diversas camadas com propriedades diferentes e por possuir suas deformações particulares. Consequentemente, tais estruturas estão sujeitas a diversas patologias, com destaque para o desplacamento, onde segundo Segat (2005) são oriundas, por exemplo, dos carregamentos térmicos.

Segundo Barbosa (2013), os carregamentos térmicos são caracterizados por variações de temperaturas naturais ao longo do dia ou até mesmo por variações bruscas em um certo período, como por exemplo, as provocadas por chuvas, pois submetem a estrutura de revestimento cerâmico a um choque térmico. Conforme sustenta Silva (2000), a variação de temperatura entre as diversas camadas que compõem a estrutura de revestimento, causa uma diferença de tensões e consequentemente diferentes deformações. Bauer *et al.* (2012), relata que devido as tensões de origem térmicas, atuarem sobre o sistema de revestimento cerâmico de forma cíclica, o mesmo é levado a um processo de fadiga, perdendo sua resistência de forma progressiva à medida que é submetida a um novo carregamento, levando por sua vez ao descolamento, não só apenas das peças cerâmicas, mas das demais camadas como um todo.

Na compreensão dos fenômenos térmicos sobre tais estruturas, o Método dos Elementos de Contorno (MEC), têm ganhado cada vez mais força neste campo de pesquisa devido à inexistência de ensaios específicos e não destrutivos para realização *in loco* e, segundo Brebbia e Dominguez (1992) tem-se apresentado como uma forma alternativa de análise ao Método dos Elementos Finitos (MEF). Guimarães (2017), lançando mão das técnicas disponíveis no MEC para problemas de Potencial, buscou analisar a influência da profundidade das fissuras presentes nos revestimentos de fachadas, por meio de uma modelagem de fluxo de calor.

Portanto, o presente trabalho busca enfatizar a distribuição de temperatura dentro da estrutura de revestimento cerâmico, por meio de uma modelagem numérica via MEC, uma vez que a compreensão do gradiente térmico se apresenta intrinsecamente ligado ao melhor entendimento do processo de fadiga da estrutura. Por questões de simplificação, a obtenção das tensões térmicas e a avaliação do processo de fadiga na estrutura de revestimento não serão discutidas aqui.

## 2 | O SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO

Dentre as possíveis funções atribuídas ao sistema de revestimento, Carasek (2007) apresenta algumas das quais considera mais relevante, como: a função de proteger a estrutura contra as ações externas, contribuição com o isolamento térmico, acústico e estanqueidade, além de propor regularização à superfície propondo melhor condições para o acabamento decorativo.

A estrutura de revestimento cerâmico pelo fato de ser largamente utilizada no Brasil e por estar sujeita a diversas ações do meio externo, apresenta diversos tipos de patologias, que de acordo com Campante *et al.* (2003), pode estar relacionada a inúmeros fatores, desde a elevada rigidez dos componentes até na falta de controle na execução.

Todos os tipos de ações de cunho intrínseco e extrínseco contribuem para o surgimento de anomalias, entretanto, segundo Saraiva (1999), a estrutura de revestimento é menos propício ao surgimento de bolores, trincas fora dos rejantes e bolores, os quais são frequentemente observados em outros tipos de sistemas de revestimentos menos elaborados.

Uchôa (2007) salienta que um dos fatores que contribui de forma preponderante sobre a degradação da estrutura de revestimento cerâmico é o fator climático, pois as variações térmicas e a umidade provocam deformações ocasionando tensões no revestimento. Segundo Fiorito (2009), o surgimento das tensões em toda estrutura do revestimento cerâmico, deve-se também ao fato das camadas estarem ligadas entre si e por possuírem características físicas e mecânicas diferentes, portanto, qualquer deformação que atue em uma dessas camadas resultará no aparecimento de tensões em todo o conjunto. A Figura 1 mostra a composição da estrutura do revestimento cerâmico.

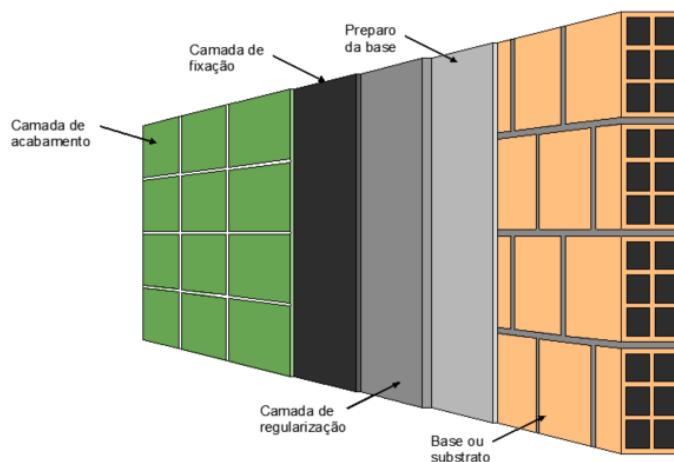


Figura 1 - Estrutura de sistema de revestimento cerâmico

Fonte: Junginger (2013).

Chew (1992), em sua pesquisa experimental procurou avaliar a durabilidade da argamassa colante utilizada no processo construtivo do sistema de revestimento cerâmico envolvendo o efeito das tensões térmicas. Nos ensaios experimentais foram usados dois tipos de substratos e dois tipos de adesivos B e D, para construção de painéis, os quais foram submetidos a 100 ciclos de aquecimento com lâmpadas de infravermelho e um processo de resfriamento por meio de ventiladores. A temperatura registrada nas placas foi de 38°C. Ao finalizar a aplicação dos ciclos, realizaram-se ensaios de arrancamento das placas cerâmicas. Após os testes de arrancamento, realizados para os dois tipos de adesivos B e D, constatou-se uma redução de 18% e 21%, respectivamente, na resistência de aderência das placas ao se comprar com outros painéis que não sofreram ação térmica.

A aderência, por sua vez, possui a capacidade de absorver as tensões normais e tangenciais à superfície de interface do sistema de revestimento e, observa-se que as fissuras em argamassas de revestimento provocadas por movimentações térmicas das paredes dependem do módulo de elasticidade sendo desejável que a capacidade de deformação do revestimento supere com folga a capacidade de deformação da parede, o que vale ainda destacar que a redução da aderência devido aos ciclos de tensões possui outros fatores agravantes no aumento da intensidade das forças, como, cor da placa cerâmica e o coeficiente de dilatação térmica da placa cerâmica (THOMAZ, 1989; FIORITO, 2009).

Saraiva (1999), analisou o efeito das tensões e deformações do sistema de revestimento, discretizando por sua vez um modelo bidimensional em elementos finitos, aplicando um regime estacionário. De posse dos parâmetros ensaiados, avaliou cinco casos, variando dentre eles, a espessura das camadas. Assim, as tensões oriundas das movimentações entre as camadas do sistema de revestimento podem levar na redução da resistência, acarretando em falhas no sistema devido às fissuras nos substratos ou por falhas no rejunte.

Para compreender melhor o efeito das tensões nas estruturas de revestimento, inicialmente à temperatura ambiente, observa-se que as tensões de tração sobre o sistema de revestimento cerâmico (Figura 2a), são causadas por um aumento gradativo da temperatura do sistema ( $T_1 > T_0$ ) (Figura 2b), que causa o afastamento das placas umas das outras, fazendo com que as juntas se abram (FIORITO, 2009). O surgimento das tensões de tração entre as camadas de materiais diferentes dá origem ao aparecimento de tensões de cisalhamento entre a base das peças (tardoz) e a argamassa colante. A Figura 2b ilustra a distribuição simétrica da tensão de cisalhamento. Se a resistência de aderência da interface da argamassa colante e cerâmica for inferior ao cisalhamento atuante, as placas da base se soltarão da camada regularizada. Em seguida, a queda gradual de temperatura ( $T_2 < T$ ), causa o encurtamento da base que no caso da perda da resistência de aderência na interface argamassa colante e cerâmica, provoca o destacamento das peças cerâmicas, fazendo as peças soltas assumirem a forma de um “V” invertido (Figura 2c) e, posteriormente

com a ciclagem do carregamento térmico o seu total descolamento, como podemos observar na Figura 2d (FIORITO, 2009).

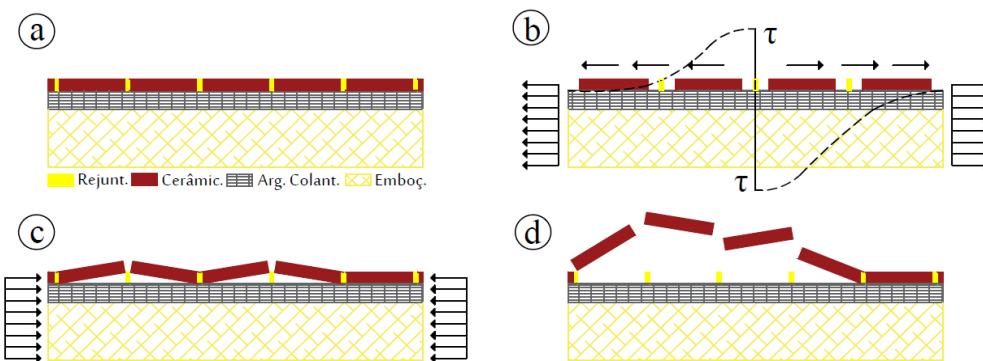


Figura 2 - (a) Sistema à temperatura ambiente ( $T$ ); (b) Cerâmica sob tensão de tração e cisalhamento ( $T_1 > T$ ) e (c) peças soltas devido à compressão ( $T_2 < T$ ), formando o “V” invertido; (d) Descolamento completo devido a ciclagem do carregamento.

Fonte: (Fiorito, 2009)

### 3 | MÉTODO DOS ELEMENTOS DE CONTORNO (MEC)

A ideia central do MEC é utilizar equações integrais de contorno, oriundas das equações diferenciais que governam o problema e suas incógnitas, relacionando apenas os valores de contorno, visando uma solução numérica. O cálculo de suas variáveis (potencial/fluxo ou tensões/deslocamentos) na região interna do problema é feito a partir dos dados encontrados inicialmente no contorno do corpo. Uma vez que todas as aproximações numéricas se dão apenas no contorno, a dimensionalidade do problema é reduzida em um, o que permite trabalhar com um sistema de equações reduzido do que aqueles obtidos com o método dos elementos finitos (GOMES, 2006).

#### 3.1 Equação Integral de Contorno

A equação de Laplace serve como base para o progresso inicial do MEC aplicado a problemas de potencial. Assim, o primeiro passo para a dedução da integral de contorno é a escolha do método que vai ser empregado, portanto, dentre esses métodos podem ser citados o método dos resíduos ponderados, o teorema de Betti, a identidade de Green e os princípios dos trabalhos virtuais (PIRES, 2018), que levam a seguinte equação integral:

$$cu_i(x) + \int_{\Gamma} u q^* d\Gamma = \int_{\Gamma} q u^* d\Gamma \quad (1)$$

A solução numérica da equação integral de contorno (equação (1)) é obtida por meio da discretização do contorno  $\Gamma$  em elementos que sejam capazes de proporcionar uma boa aproximação para a geometria e para as variáveis  $u$  e  $q$ , com ajuda de funções de interpolação, conhecidas também como funções de forma.

### 3.2 Discretização dos Elementos

Para se obter a solução numérica da equação integral de contorno é necessário que o contorno ( $\Gamma$ ) seja discretizado em elementos que sejam capazes de proporcionar uma boa aproximação para a geometria e para as variáveis  $u$  e  $q$ , com a ajuda de funções de interpolação, conhecidas também como funções de forma. Estas, por sua vez, estão associadas aos valores da função solução em pontos específicos sobre o elemento, chamados de valores onde o nó físico é o ponto em que se definem as incógnitas “ $u$ ” e “ $q$ ”, e a extremidade dos elementos são os pontos que definem a sua geometria, também chamados de nós geométricos, a Figura 3 traz os diferentes tipos de elementos (GUIMARÃES, 2017).

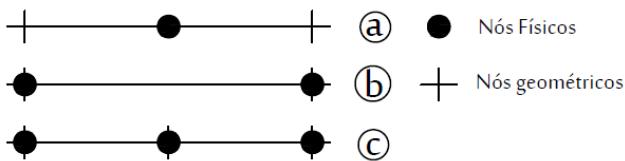


Figura 3 - Diferentes tipos de elementos de contorno: a) Constante; b) Linear; c) Quadrático.

Fonte: (Guimarães, 2017)

### 3.3 Sub-regiões

A técnica de sub-regiões é utilizada quando os problemas em análise via MEC envolvem meios heterogêneos. A técnica consiste em separar o domínio em regiões distintas, utilizando interfaces. Através delas, seu domínio é dividido de tal forma que cada face da interface pertença a uma sub-região e sua implementação numérica é feita separadamente para cada sub-região. Seu contorno externo ( $\Gamma^1$  e  $\Gamma^2$ ) é discretizado individualmente enquanto a interface (linha interna de fechamento da sub-região é feita igualmente para ambas as sub-regiões, por nós coincidentes aos domínios, como demonstrado na Figura 4 (GUIMARÃES, 2017).

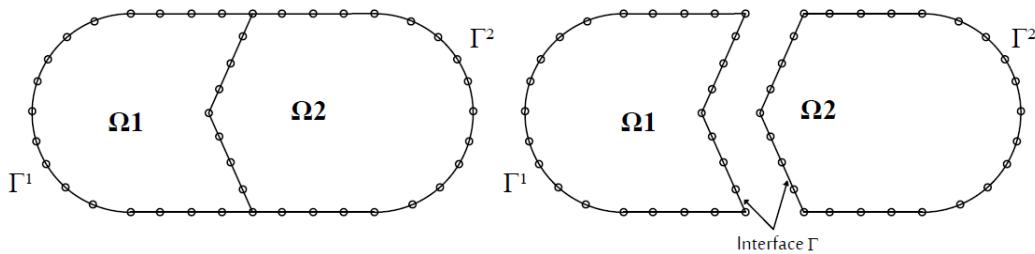


Figura 4 - Domínio dividido em duas sub-regiões.

## 4 | MODELAGEM NÚMERICA

Um modelo numérico em elementos de contorno foi elaborado com o objetivo de analisar e avaliar a distribuição de temperatura nas camadas da estrutura de

revestimento cerâmico provenientes de um transiente térmico. Assim, pretende-se ter um melhor esclarecimento sobre o mapeamento térmico, bem como entender quais camadas estão mais propícias a uma maior magnitude de tensões.

No desenvolvimento do modelo, utilizou-se da interface gráfica (GUI) BEMLAB2D (Delgado Neto, 2016) para a concepção, visualização dos modelos, geração da malha via MEC e obtenção do arquivo de dados de entrada *input* e, posteriormente a utilização do programa *SubRegPotencial.m* (desenvolvido pelo programa de pós-graduação em integridade de materiais em engenharia (PGINTEGRIDADE na UnB/GAMA), para o processamento da análise e obtenção dos resultados e ambos os programas foram implementados em MATLAB.

Para a definição das propriedades físicas e mecânicas de cada material da estrutura de revestimento cerâmico foram extraídos os dados da pesquisa realizada por Saraiva (1999), Uchôa (2007) e Chagas (2009). A Figura 5 mostra a estrutura geométrica adotada no modelo em estudo e a Tabela 1 apresenta o resumo das propriedades atribuídas ao modelo numérico adotada.

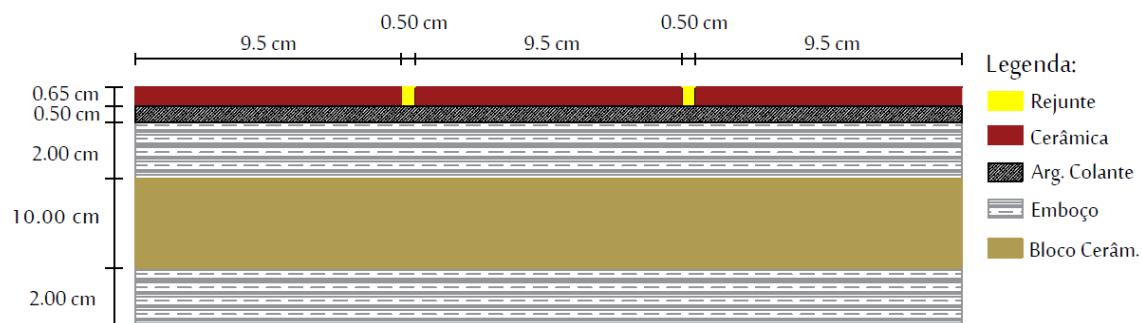


Figura 5 - Modelo geométrico reduzido da estrutura

Material	Conduvidade Térmica (w/m°C)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Calor Específico (J/kg °C)	Coef. de Dilat. Térmica (°C⁻¹)
Cerâmica	2,00	41,600	920	$6,8 \times 10^{-6}$
Arg. Colante	0,84	3,562	1000	$8,7 \times 10^{-6}$
Emboço	1,4	5,499	1000	$11,5 \times 10^{-6}$

Tabela 1 - Propriedades atribuída ao modelo

Na análise serão adotadas duas situações para a avaliação do comportamento da estrutura do revestimento cerâmico com relação à distribuição das temperaturas atuantes nesse sistema. As duas situações se baseiam na tonalidade da cerâmica da estrutura (Thomaz, 1989) empregando uma cerâmica clara e uma cerâmica escura, cujo coeficiente de absorção térmica adotado vale 0,45 e 0,95 para a cerâmica de cor clara e de cor escura, respectivamente. E ainda, a distribuição da temperatura interna ( $T_i$ ) dentro do ambiente de 25°C, valor utilizado por Uchôa (2007). Os casos utilizados no estudo estão resumidos na Tabela 2.

Caso	Cor da cerâmica	Temperatura interna ( $T_i$ )
1	Clara	25 °C
2	Escura	25 °C

Tabela 2 - Casos avaliados na análise

O transiente térmico aplicado à estrutura foi fornecido pelo INMET e é referente ao dia 12/10/1963 da cidade de Brasília. O transiente foi adotado por apresentar a maior temperatura registrada entre 1961 a 2013, no valor de 34,60°C às 16:00, sendo apresentado na Tabela 3.

Hora	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00
T(°C)	24,49	23,46	22,48	22,55	22,71	22,41	22,14	23,20	25,32	28,96	31,38	32,51
Hora	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
T(°C)	32,84	33,67	33,98	34,21	34,60	34,42	34,34	32,79	28,46	26,48	25,94	24,71

Tabela 3 - Transiente de Temperatura de Brasília

Utilizando os conceitos de temperatura equivalente apresentados por Rivero (1985) e utilizando o coeficiente de absorção térmica para superfície de cor clara e escura, obtém-se o valor da temperatura externa ( $T_e$ ) atribuída a peça cerâmica para cada hora do dia. De posse dos valores, os mesmos são atribuindo ao modelo numérico (Figura 7) via MEC para determinar as temperaturas ( $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$ ,  $t_5$ ) entre camadas da estrutura do revestimento, como pode ser visto na Figura 6.

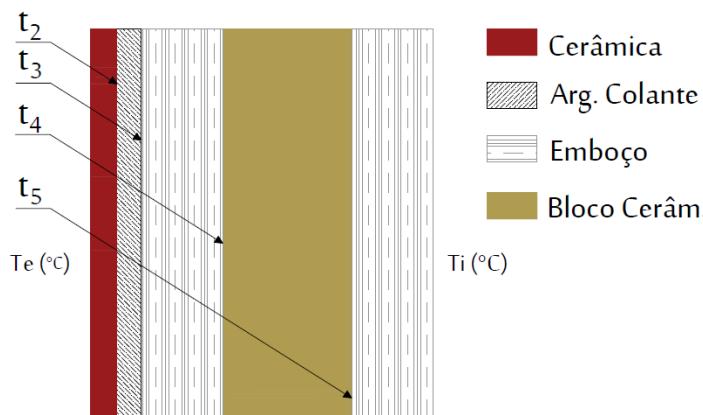


Figura 6 - Leitura da temperatura nas interfaces da estrutura

O modelo físico geométrico discretezado é composto por 5 sub-regiões, representando por meio delas a camada de cerâmica, argamassa colante, emboço interno, bloco cerâmico e emboço externo, respectivamente, como pode ser observado nas Figuras 6 e 7. A escolha da quantidade de elementos constantes para discretização de cada linha do contorno de cada sub-região foi realizada de forma aleatória inicialmente, sendo refinada particularmente para cada trecho de acordo com

o seu comprimento, ficando em média um espaçamento de 1cm entre cada elemento, resultando em um total de 102 de elementos constantes.

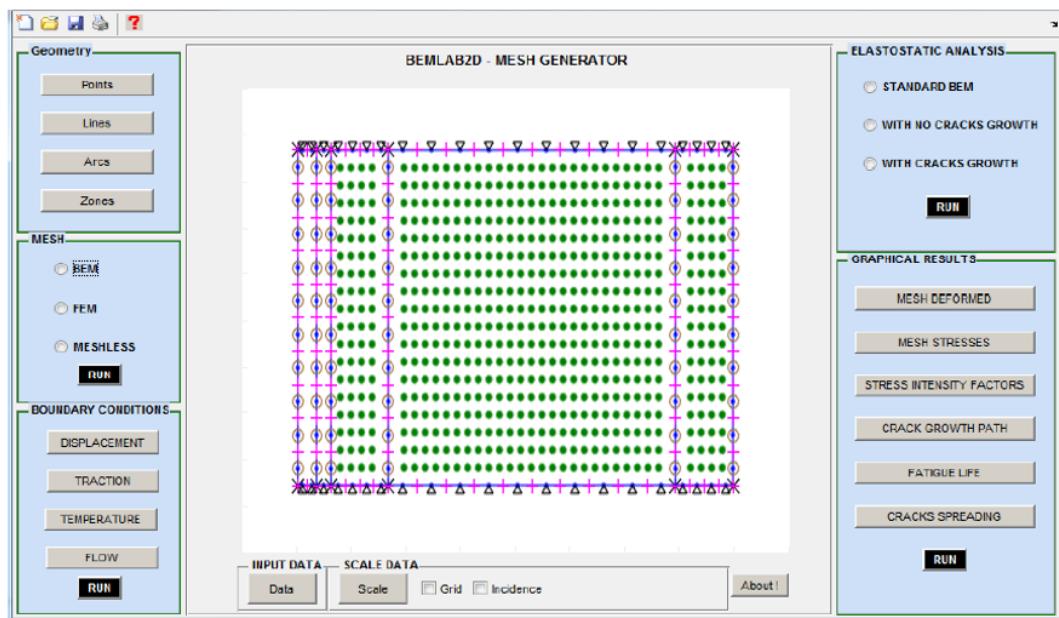


Figura 7 - Modelo numérico gerado por meio do BEMLAB2D

A quantidade de pontos interno atribuídas ocorreu por meio de testes até obter valores refinados, resultando em um total de 720 pontos internos, os quais foram distribuídos dentro das camadas que possuem espessuras maiores que 1cm.

## 5 | RESULTADOS

As análises numéricas descritas abaixo retratam a distribuição de temperatura entre as camadas/interfaces dos elementos que compõem o conjunto da estrutura. Os modelos analisados abaixo retratam as situações em que o estudo possuiu seus menores e maiores picos de temperaturas, registrados às 6:00 e 16:00 horas. Os horários analisados possuem influência direta dos efeitos da radiação solar sobre a estrutura de revestimento cerâmico.

### 5.1 Caso 1

O modelo retrata a estrutura de revestimento com cerâmica clara e temperatura interna de 25°C. As Figuras 8 e 9 representam a distribuição de temperaturas nas camadas da estrutura do revestimento.

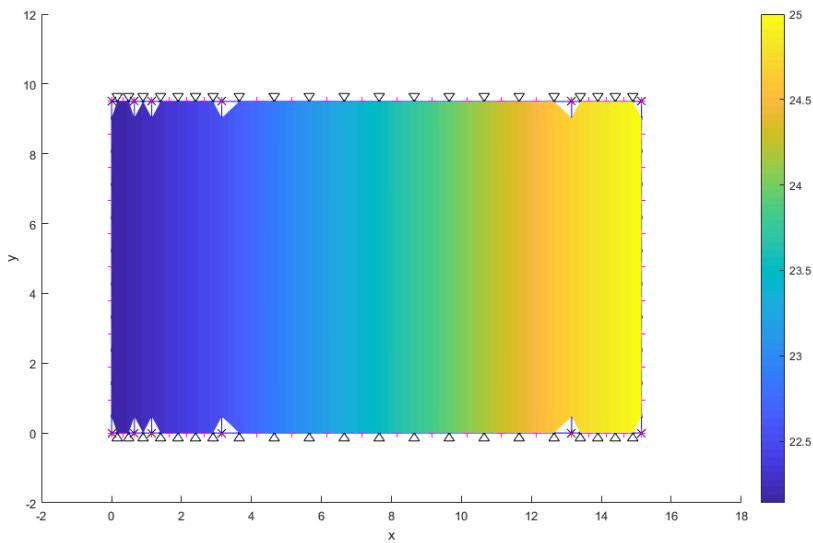


Figura 8 - Distribuição de temperatura nas camadas às 6:00h, com  $T_i = 25^{\circ}\text{C}$

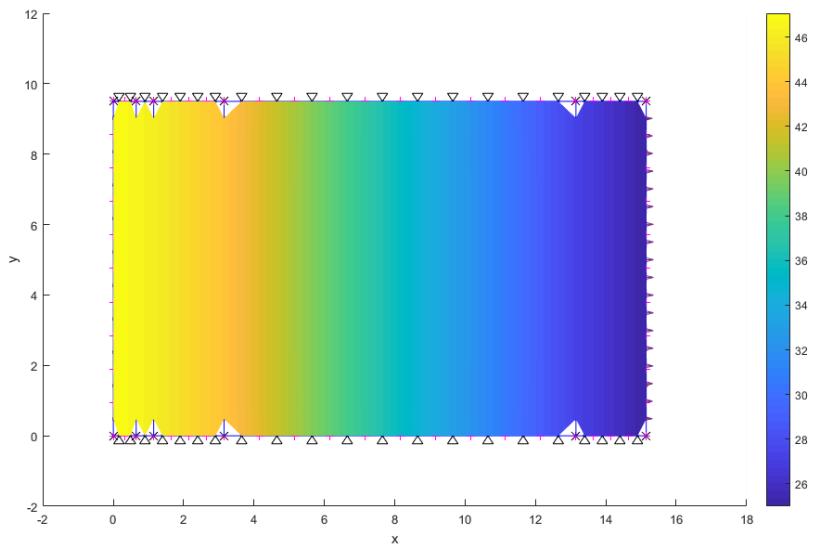


Figura 9 - Distribuição de temperatura nas camadas às 16:00h, com  $T_i = 25^{\circ}\text{C}$

A temperatura atribuída a camada da cerâmica às 6:00h no modelo numérico, após aplicação da teoria de temperatura equivalente foi de  $22,14^{\circ}\text{C}$ , sendo, portanto, menor que a temperatura interna ( $25^{\circ}\text{C}$ ) atribuída. Ao prosseguir com os cálculos, a temperatura atribuída às 16:00h, foi de  $47,06^{\circ}\text{C}$ . O cenário retratado pela análise mostra um ambiente interno com temperatura superior ao meio externo em certos horários do dia, fazendo com que as camadas e interfaces possuem oscilações de temperaturas mais adversas.

Na Figura 10 tem-se a distribuição da temperatura na estrutura ao longo das 24 horas. Ao observar as variações de temperaturas que as camadas estão sujeitas ao longo do dia, verifica-se que os maiores picos ocorrem na interface entre a camada da cerâmica e argamassa colante (representado por  $t_2$ ), registando um valor de  $23,91^{\circ}\text{C}$ , enquanto que a variação entre a interface da argamassa colante e o emboço (representado por  $t_3$ ) entre o maior e o menor pico de temperatura, registra um valor  $23,91^{\circ}\text{C}$ .

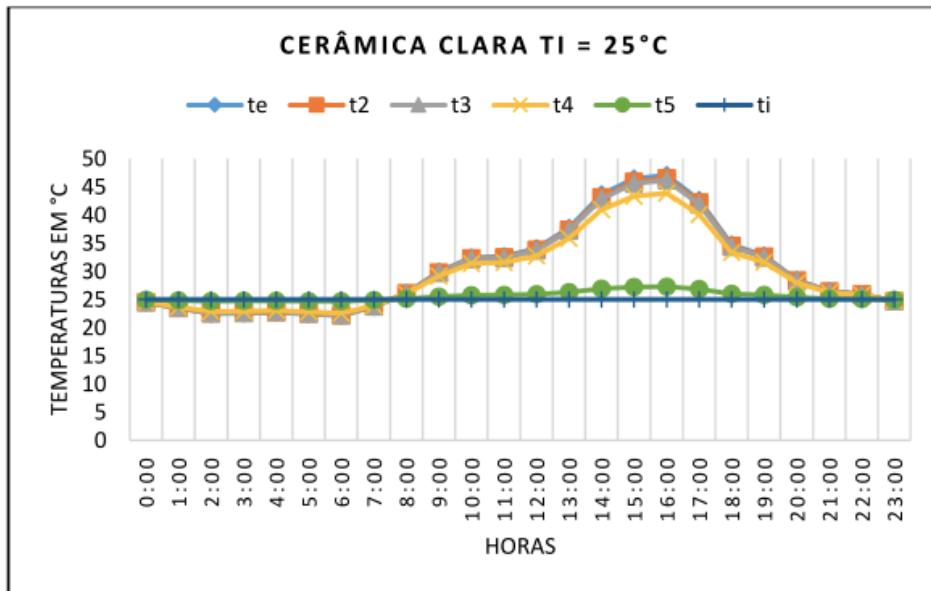


Figura 10 - Distribuição de temperatura nas camadas da estrutura ao longo das 24 horas

## 5.2 Caso 2

O último caso trabalha com a estrutura de revestimento com cerâmica escura e temperatura interna de 25°C. As Figuras 11 e 12 representam a distribuição de temperaturas nas camadas da estrutura do revestimento.

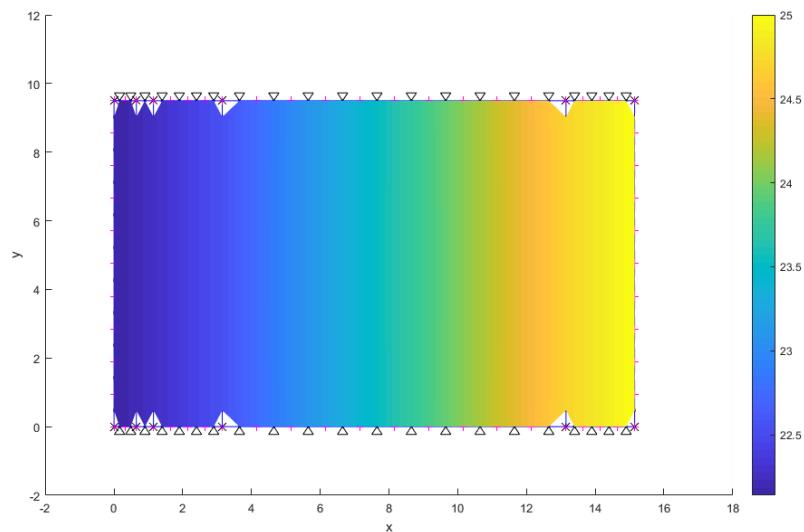


Figura 11 - Distribuição de temperatura nas camadas às 6:00h, com  $T_i = 25^\circ\text{C}$

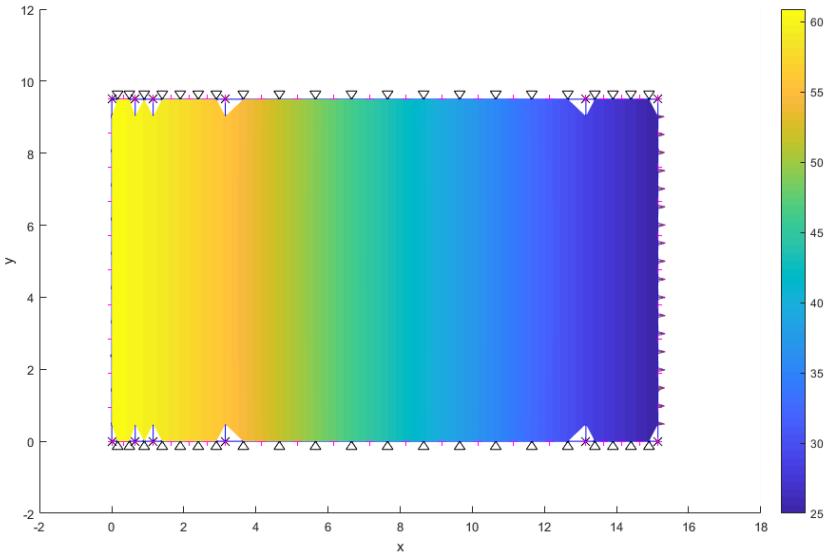


Figura 12 - Distribuição de temperatura nas camadas às 16:00h, com  $T_i = 25^{\circ}\text{C}$

A temperatura atribuída a camada da cerâmica às 6:00h no modelo, após aplicação da teoria de temperatura equivalente foi de  $22,14^{\circ}\text{C}$ , sendo, portanto, menor que a temperatura interna ( $25^{\circ}\text{C}$ ). Ao prosseguir com os cálculos, a temperatura atribuída às 16:00h, foi de  $61,00^{\circ}\text{C}$ . O cenário retratado nesse caso apresenta grandes variações térmicas em determinados horários do dia, como pode ser observado na Figura 13.

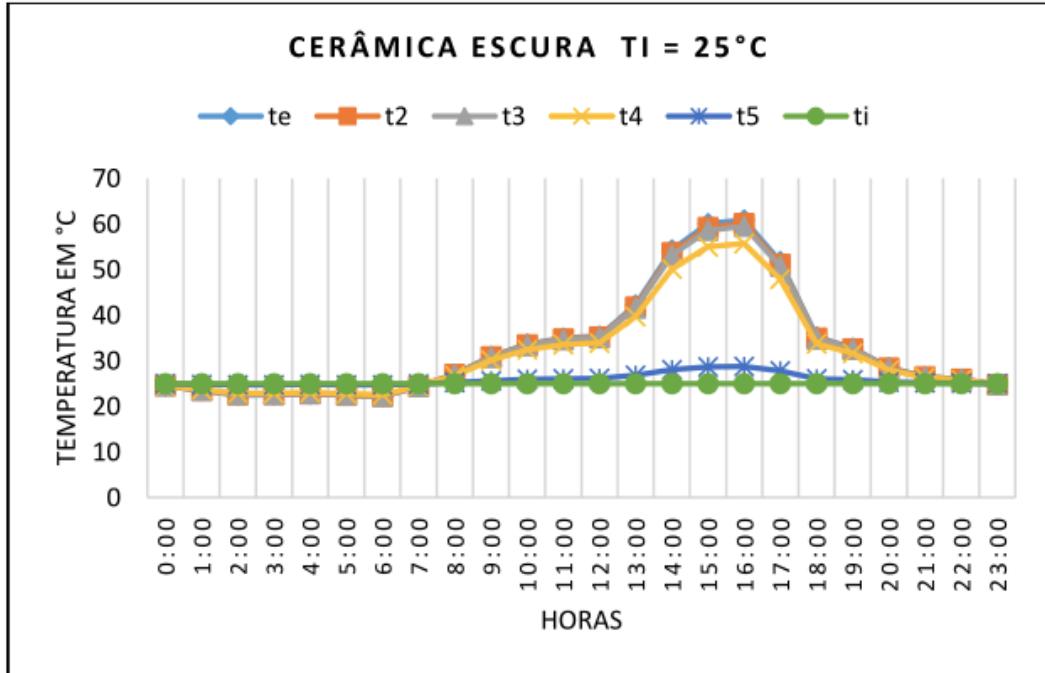


Figura 13 - Distribuição de temperatura nas camadas da estrutura ao longo das 24 horas

Ao observar as variações de temperaturas que as camadas e interfaces estão sujeitas ao longo do dia, verifica-se que os maiores picos ocorreram na interface entre a camada da cerâmica e argamassa colante (representado por  $t_2$ ), registando um valor de  $37,84^{\circ}\text{C}$ , enquanto, que a variação entre argamassa colante e o emboço

(representado por  $t_3$ ), após o maior e o menor pico de temperatura, registra um valor 37,20 °C.

### 5.3 Validação

Para tornar os dados mais confiáveis, os valores obtidos pelo método numérico foram comparados com os valores obtidos no trabalho do Uchôa (2007), o qual modelou uma estrutura semelhante via Métodos dos Elementos Finitos (MEF) por meio do ANSYS, obtendo assim, os valores das temperaturas nas interfaces das camadas para um caso semelhante ao caso 1, a Figura 14 mostra a comparação entre os valores obtidos por meio dos dois métodos numéricos.

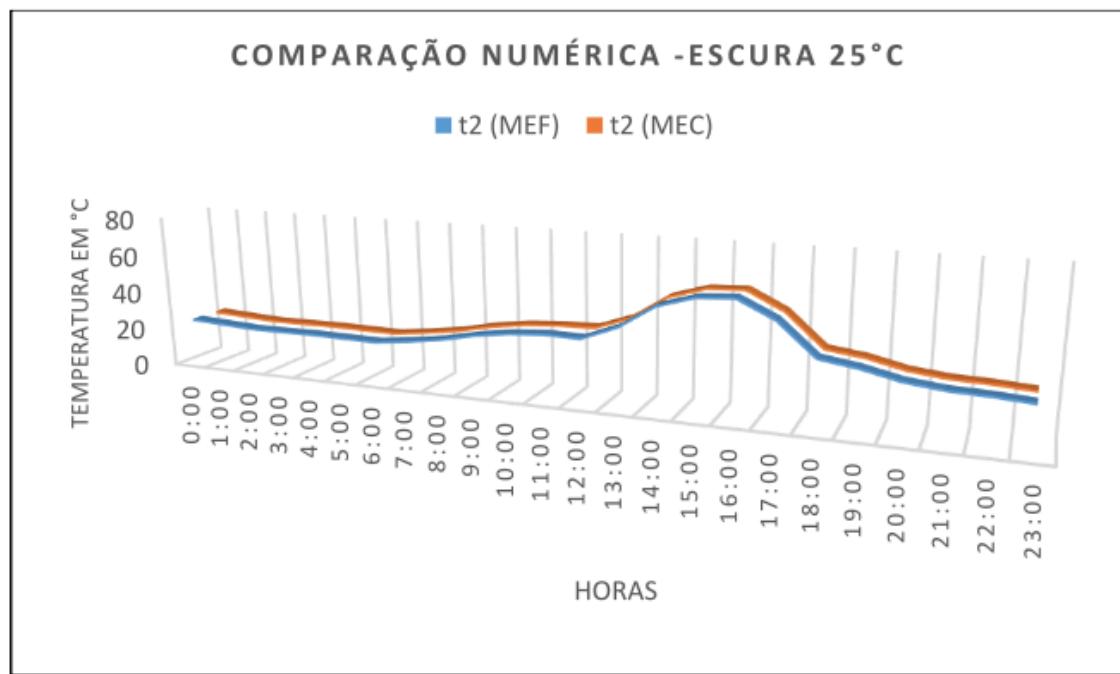


Figura 14 - Comparação numérica entre MEC e MEF

A comparação entre os dados obtidos por ambos os métodos representa a temperatura encontrada na interface entre cerâmica e a argamassa colante (representado por  $t_2$ ), assim, podemos perceber que ambos os métodos chegaram a valores praticamente iguais.

## 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista que o modelo em estudo ocorreu por meio de uma simplificação, atuando em um regime quase transiente, uma vez que, as análises foram realizadas para cada hora do dia, obtivemos resultados satisfatórios.

Nas interpretações dos resultados realizados por meio da análise numérica, observa-se que a cerâmica escura por possuir um coeficiente de absorção térmico

maior do que a da cerâmica clara, a mesma absorve mais temperatura externa do ambiente do que a cerâmica clara, assim, conclui-se que estruturas construídas com elementos com tonalidades escuras são mais propícias a sofrerem o processo de descolamento das cerâmicas, por estarem sujeitas a variações térmicas mais severas, portanto, estando também a variações de tensões. Entretanto, no modelo numérico utilizando tonalidades mais claras na estrutura do revestimento, espera-se que o efeito do descolamento seja de forma mais lenta, prolongando por sua vez, a vida útil da estrutura, devido as variações térmicas encontradas entre as camadas da estrutura serem razoáveis, quando comparadas as estruturas com cerâmicas escuras.

Observa-se também que as maiores variações ocorreram nas interfaces entre as camadas da cerâmica com argamassa colante e, entre a argamassa colante e o emboço, que segundo Fiorito (2009), o descolamento das partes da estrutura do revestimento cerâmico surge principalmente entre essas camadas, tornando, assim, mais evidente o efeito da temperatura sobre tal conjunto.

O Método dos Elementos de Contorno mostrou-se extremamente eficiente para problemas de potencial, pois ao comparar os seus resultados com MEF, os valores obtidos via contorno são satisfatórios, mostrando ainda mais a eficiência do MEC no meio acadêmico e para análises rápidas em determinados diagnósticos de campo.

Por fim, de posse do mapa de temperatura, visamos obter as tensões térmicas nas camadas/interfaces, bem como determinar a vida útil da estrutura de revestimento cerâmico, por meio de um acompanhamento na redução da aderência entre as camadas, mediante uma ciclagem de carregamentos térmicos.

## REFERÊNCIAS

- BAUER, Elton et al. **Estudo do comportamento à fadiga das argamassas e sua relação com as patologias e danos nas fachadas.** In: Patorreb 2012: 4º Congreso de patología y rehabilitación de edificios: 12-14 de abril de 2012, Santiago de Compostela. Colexio Oficial de Arquitectos de Galicia, 2012. p. 63.
- BARBOSA, A. DA S. (2013). **Estudo Numérico-Computacional e Analítico do Choque Térmico em Fachadas de Edificações**, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.
- BREBBIA, C. A. e DOMINGUEZ J., **Boundary Elements: An introductory Course**. Second Edition. Computational Mechanics publications. Southampton Boston – Mc Graw-Hill Book Company, 1992.
- CAMPANTE, E. F. & BAÍA, L. L. M. **Projeto e Execução de revestimento Cerâmico CTE, Primeiros Passos da qualidade no Canteiro de Obra**, O Nome da Rosa, São Paulo, SP, 2003.
- CARASEK, H.. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo, IBRACON, 2007.
- CHAGAS, S. V. M. (2009). **Estudo e proposta de um modelo de resistência à fadiga de argamassa de revestimento em estado plano e tridimensional de tensões**, Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, DF.

CHEW, M. Y. L. (1992). **The Study of Adhesion Failure of Wall Tiles.** Building and Environment, v 27, n° 4, pp 493-499.

DELGADO NETO, A. M.; GOMES, G. ; GUIMARÃES, D.C. . BEMLAB2D: **Graphical Interface For Modeling, Viewling And Analysis With Boundary Element - An Application In Elastostatic Problems.** In: XXXVII Iberian Latin American Congress On Computational Methods In Engineering, 2016, Brasília. XXXVII Iberian Latin American Congress On Computational Methods In Engineering, 2016.

FIORITO, A J. S. I. (2009).., “**Manual de Argamassas e Revestimentos – Estudos e Procedimentos de Execução**”, 2º Ed. Editora Pini. São Paulo, SP.

GOMES, G., “**Aplicação dos Métodos de Elementos de Contorno e Reciprocidade Dual em Problemas de Plasticidade 2d Orientada a Objeto**”. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD – 002A/06 Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 168p., 2006.

GUIMARÃES, D. C. (2017). **Correlação Numérico - Experimental entre o Método dos Elementos de Contorno e Termografia Aplicados a Placas de Argamassa**, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

JUNGINGER, MAX (2003). **Rejuntamento de Revestimento Cerâmico: Influência das Juntas de Assentamento na Estabilidade de painéis.** Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 141p.

PIRES, É. G. **Implementação e aplicação do método dos elementos de contorno com reciprocidade dual em problemas de potencial.** Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

RIVERO, R. **Acondicionamento Térmico Natural - Arquitetura e Clima**, Editora da Universidade, Rio Grande do Sul, 1985.

SARAIVA, A. G. **Contribuição ao Estudo de Tensões de Natureza Térmica em Sistema de Revestimento Cerâmico de Fachada.** Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1999.

SEGAT, G.T. **Manifestações patológicas observadas em revestimentos de argamassa: estudo de caso em conjunto habitacional popular na cidade de Caxias do Sul (RS).** Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

SILVA, M. N. B. (2000). **Avaliação Numérica com o Método dos Elementos Finitos das Tensões Termo-Mecânica em Sistema de Revestimento de Fachadas.** Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, DF.

THOMAZ, E. “**Trincas em Edifícios - causas, prevenção e recuperação.**” Co-edição IPT/EPUSP/ PINI. São Paulo, SP, 1989.

UCHÔA, J. C. B. (2007). “**Procedimento numérico e experimental para a avaliação da resistência à fadiga de sistemas de revestimento**”, Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, DF.

## SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INJEÇÃO DE ÁGUA EM RESERVATÓRIO DE PETRÓLEO HETEROGENEO

**Raquel Oliveira Lima**

Universidade Federal de Pernambuco;  
Recife - Pernambuco

**José Arthur Oliveira Santos**

Universidade Federal de Sergipe;  
São Cristóvão - Sergipe

**Antônio Jorge Vasconcellos Garcia**

Universidade Federal de Sergipe;  
São Cristóvão - Sergipe

**Felipe Barreiros Gomes**

Universidade Federal de Sergipe;  
São Cristóvão – Sergipe

elevada. A seleção adequada do arranjo de poços de acordo com a distribuição permnoporosa do reservatório pode retardar a produção da água injetada em alguns anos e aumentar a fração de óleo recuperada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Simulação de fluxo; Injeção de água; Locação dos poços.

### NUMERICAL SIMULATION OF WATER INJECTION IN HETEROGENEOUS PETROLEUM RESERVOIR

**ABSTRACT:** Nowadays practically all aspects of reservoir engineering problems are solved through numerical simulations, since they allow the construction of dynamic models to predict the behavior of fluids in the reservoir and to determine production and depletion scenarios based on different variables. The use of water injection as a recovery method for heterogeneous or low continuity reservoirs should be previously evaluated through simulation studies, since the effect of water injection may not extend to the producing well and cause the water to flow through fractures or preferred pathways causing high water production; Proper selection of the well arrangement according to the permnoporous distribution of the reservoir may delay the production of the injected water in a few years and increase the fraction of recovered oil.

**RESUMO:** Nos dias atuais praticamente todos os aspectos dos problemas de engenharia de reservatórios são resolvidos através de simulações numéricas, uma vez que permitem a construção de modelos dinâmicos para prever o comportamento dos fluidos no reservatório e determinar cenários de produção e depleção baseados em diferentes variáveis. O emprego da injeção de água como método de recuperação para reservatórios heterogêneos ou que apresentam pouca continuidade deve ser avaliado previamente através de estudos de simulação, pois o efeito da injeção de água pode não se estender ao poço produtor e fazer com que a água escoe por fraturas ou caminhos preferenciais causando uma produção de água

## 1 | INTRODUÇÃO

As acumulações de petróleo possuem uma certa quantidade de energia quando são descobertas, denominada de energia primária. Durante o processo de produção em um reservatório de petróleo ocorre a dissipação dessa energia primária, causada pela descompressão dos fluidos do reservatório e pelas resistências encontradas pelos mesmos ao fluírem em direção aos poços de produção. O consumo da energia primária reflete-se principalmente no decréscimo da pressão do reservatório durante a sua vida produtiva (Rosa, 2006).

A energia primária do reservatório pode ser suplementada através da injeção de certos fluidos em poços selecionados. Em muitos casos, o esquema de produção é inicialmente previsto com implantação de algum método de recuperação suplementar, já que na maioria dos reservatórios, a manutenção da pressão é essencial para manter a vazão de produção. A estratégia inicial para desenvolver um projeto de recuperação suplementar é selecionar o fluido de injeção e a disposição dos poços mais adequada para o reservatório de acordo com as suas características geológicas e as propriedades dos fluidos que o saturam.

A injeção de água tem uma ampla história de aplicação na indústria do petróleo, sendo um método de recuperação secundária comum em todo mundo, uma vez que em muitas áreas produtoras a oferta de água é abundante e barata. Assim, água é injetada para suplementar a energia natural do reservatório, deslocar o óleo em direção aos poços produtores e manter as taxas de produção. Os trabalhos desenvolvidos por (Prasad *et al.*, 2000), (Silva, 2012), (Chandrashegaran, 2015), (Liu *et al.*, 2016) e (Clemes *et al.*, 2017), tratam da injeção de água em reservatórios de petróleo.

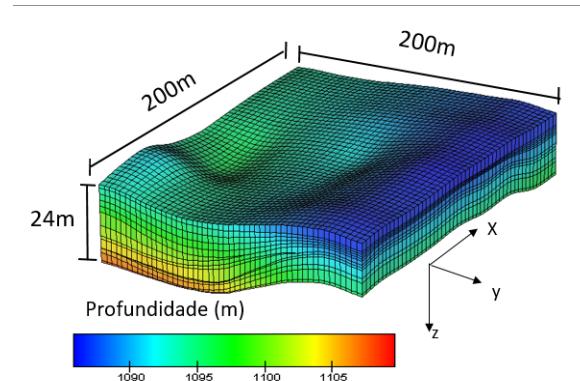
Em geral, devido à complexidade dos reservatórios e das equações diferenciais parciais que governam o fluxo em meios porosos, os modelos matemáticos são convertidos em formulações numéricas que são resolvidas para um conjunto discreto de pontos no reservatório através de algoritmos. Nos dias atuais praticamente todos os aspectos dos problemas de engenharia de reservatório são resolvidos através de simuladores de reservatórios, uma vez que permite que os engenheiros construam modelos dinâmicos para prever o movimento dos fluidos no reservatório e sejam capazes de determinar cenários de produção e depleção baseados em diferentes variáveis (ISLAM *et al.*, 2010).

O objetivo deste estudo é avaliar a locação de poços produtores e injetores para um reservatório de petróleo heterogêneo submetido a injeção de água, através de modelos de simulação numérica.

## 2 | METODOLOGIA

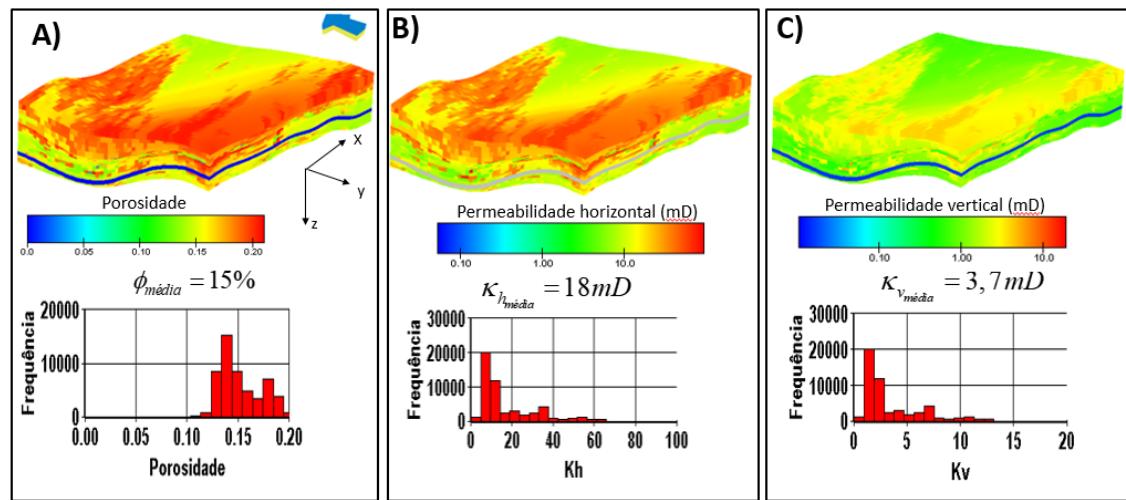
Os modelos de simulação foram executados no simulador de fluxo comercial *TEMPEST MORE* (*versão 7.1*) da ROXAR® com modelagem do tipo *Black-oil*. O sistema de discretização utilizado pelo simulador é o de volumes finitos. Mais informações sobre a formulação matemática empregada nesse *software* pode ser encontrada em (Roxar, 2012).

O modelo geológico foi construído no *software RMS®* (*versão 2013.1*) a partir de dados multiescalares coletados na pedreira Tatu, localizada no município de Japoatã/SE. O afloramento estudado tem sua gênese relacionada aos depósitos flúvio-deltaicos da Formação Feliz Deserto (Campos Neto *et al.*, 2007), representando intercalações de barras de desembocadura, canais distributários e baías interdistributárias, sendo considerado análogo a uma zona produtora da Bacia Sergipe-Alagoas (Borba, 2009). A discretização do domínio em estudo é ilustrada na **Fig.1**.



**Figura 1** - Características do grid de simulação. O grid é do tipo corner point e apresenta um total de 70000 células, sendo 50 células na direção x, 50 células na direção y e 28 células na direção z.

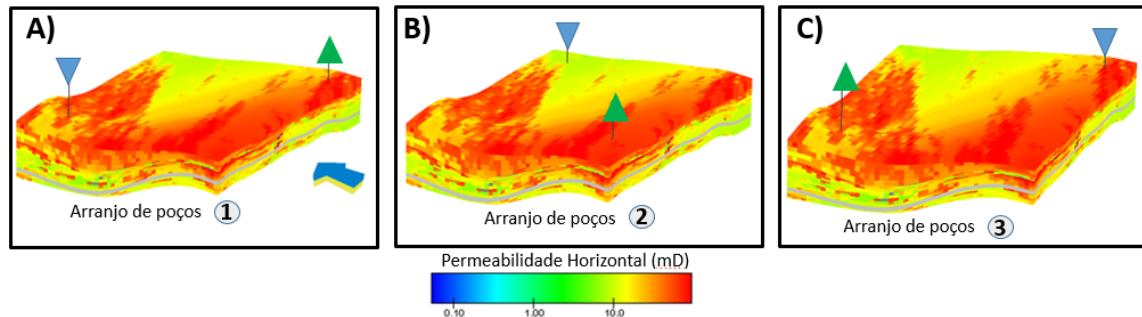
A **Fig.2** ilustra a distribuição da porosidade e das permeabilidades do modelo de simulação. Observa-se uma distribuição heterogênea da porosidade com os valores de porosidade, variando entre 0,0% e 20%, enquanto a distribuição de permeabilidade segue o mesmo padrão da distribuição da porosidade.



**Figura 2** - Distribuição espacial da porosidade (A), permeabilidade horizontal (B) e permeabilidade vertical (C) do modelo de simulação.

A pressão estática inicial foi de 110,2 kgf/cm<sup>2</sup>, a uma profundidade de referência de 1102 metros, a qual encontra-se acima da pressão de saturação (70 kgf/cm<sup>2</sup>). O óleo que satura o reservatório é um óleo leve (40° API). O reservatório é preferencialmente molhável à água e a saturação residual de óleo foi de 20%.

A localização dos poços produtor e injetor é ilustrada na **Fig.3**. Todos os poços são verticais e foram abertos ao mesmo tempo.



**Figura 3** - Localização dos 3 arranjos de poços do tipo 1/4 de *five spot*. O poço produtor é ilustrado em verde, enquanto o injetor é ilustrado em azul.

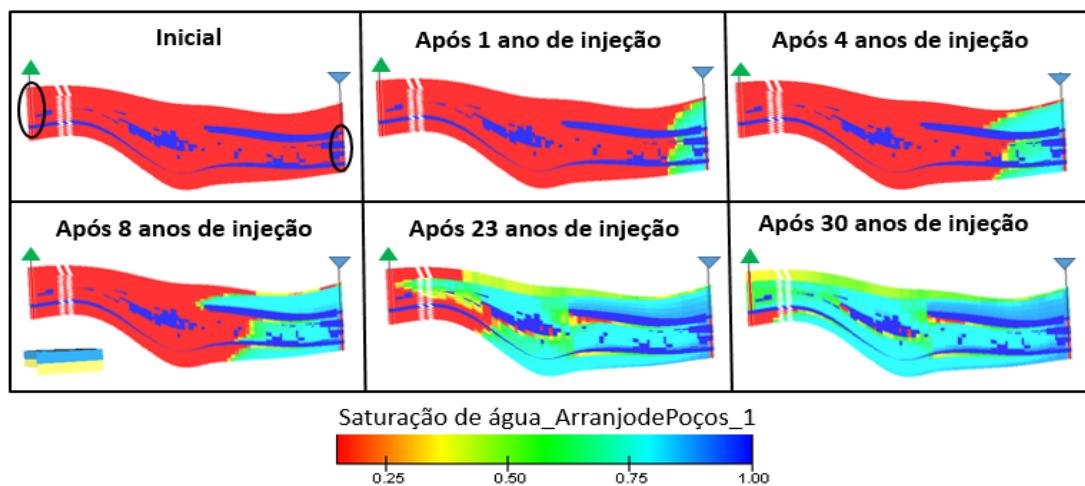
Os casos de simulação consistem da injeção contínua de água para os arranjos de poços ilustrados na **Fig.3**. Foi definida a mesma vazão de injeção para os três casos analisados, igual a 3 sm<sup>3</sup>/dia, assim como também foi definida a mesma pressão de fundo para o poço produtor (90 kgf/cm<sup>2</sup>). O comportamento do reservatório foi avaliado para um período de produção igual a 30 anos (2017 a 2047).

Os parâmetros usados para a comparação dos casos estudados foram o corte de água, a pressão de injeção e a fração de óleo recuperada.

## 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

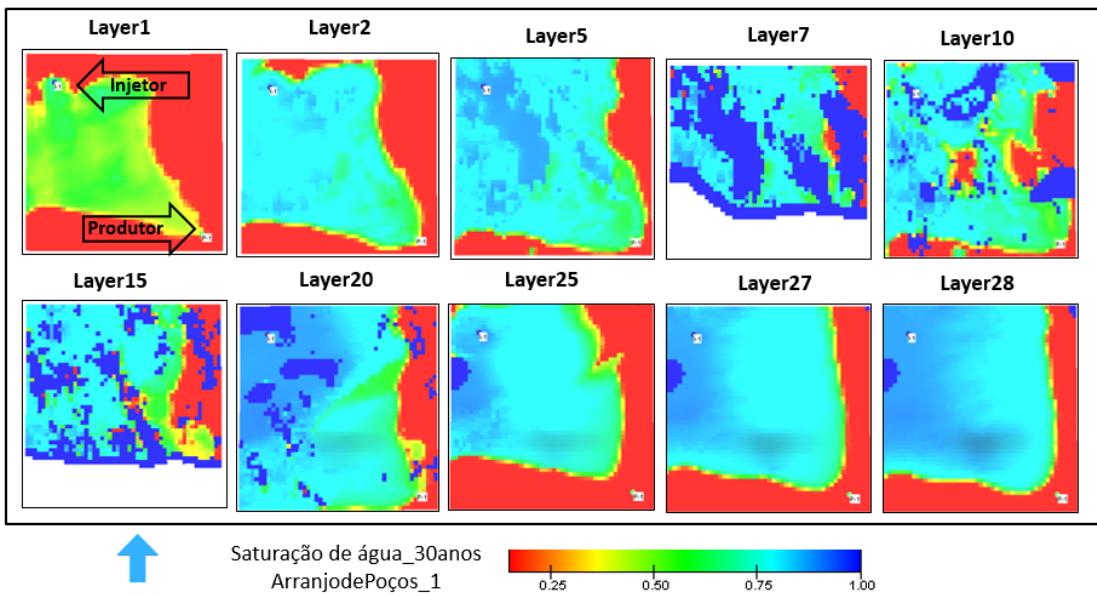
### 3.1 Arranjo de poços 1

A saturação de água ao longo de um plano é ilustrada na **Fig.4**. A frente de avanço de água não é uniforme, uma vez que o meio poroso estudado é heterogêneo. Além disso, por gravidade, a água tenderia a se deslocar em direção às regiões mais profundas do reservatório. Entretanto, a água injetada se desloca verticalmente para o topo do reservatório devido aos maiores valores de permeabilidade dessa região, conforme ilustrado na **Fig.2**. Para este arranjo, a água injetada atinge o poço de produção aproximadamente após 23 anos de produção.



**Figura 4** - Saturação de água ao longo do tempo para um plano vertical passando pelos poços produtor e injetor. O intervalo de completação é ilustrado em preto. Arranjo de poços 1.

A saturação de água final ao longo de algumas camadas do modelo é ilustrada na Fig.5. É possível perceber que após os 30 anos de produção, a água injetada atinge o poço de produção nas camadas superiores, o que não é observado nas camadas inferiores. Esse comportamento é resultado da distribuição da permeabilidade heterogênea do reservatório.

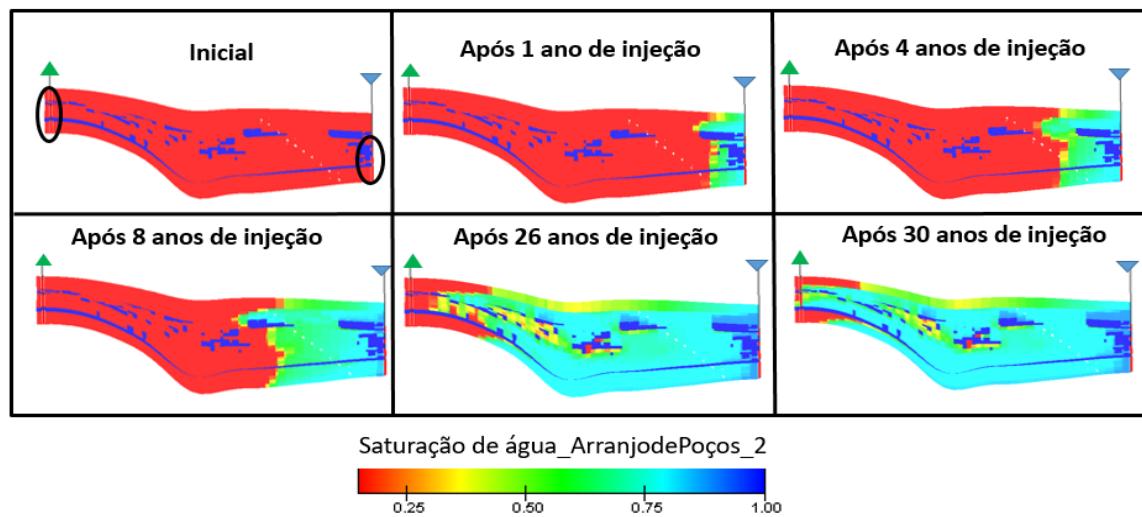


**Figura 5** - Frente de avanço de água após 30 anos de injeção/produção-Arranjo de poços 1.

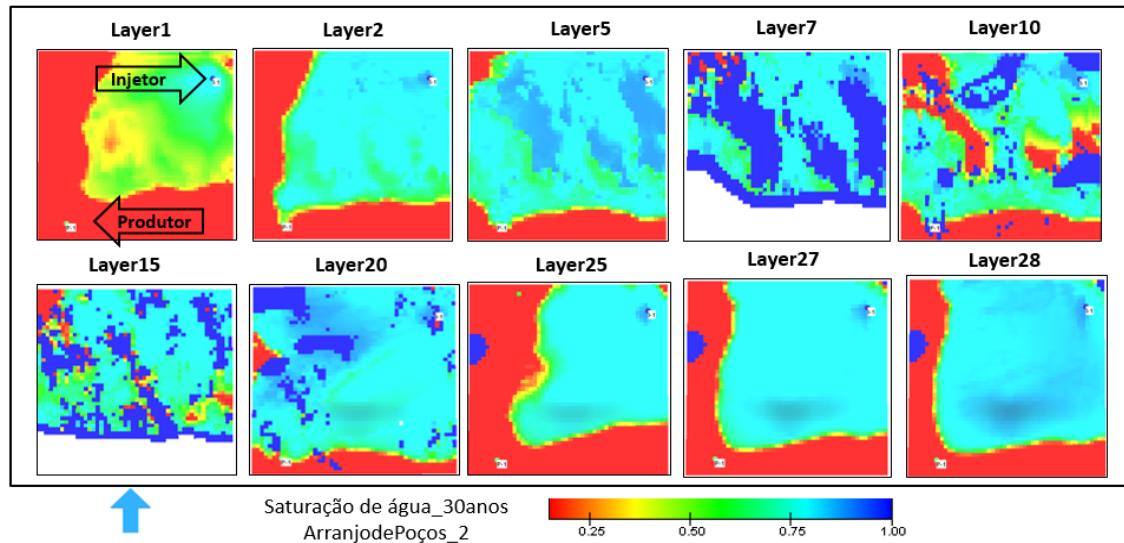
### 3.2 Arranjo de poços 2

A saturação de água ao longo de um plano é ilustrada na **Fig.6**. Para esse arranjo de poços, a frente de avanço de água é mais homogênea quando comparada à frente de avanço do arranjo de poços 1 (**Fig.4**), resultando no retardamento da produção de água injetada.

A saturação de água final ao longo de algumas camadas do modelo é ilustrada na **Fig.7**. Foi observado o mesmo comportamento do arranjo de poços 1 (**Fig.5**), a água injetada não atinge o poço produtor nas camadas inferiores.



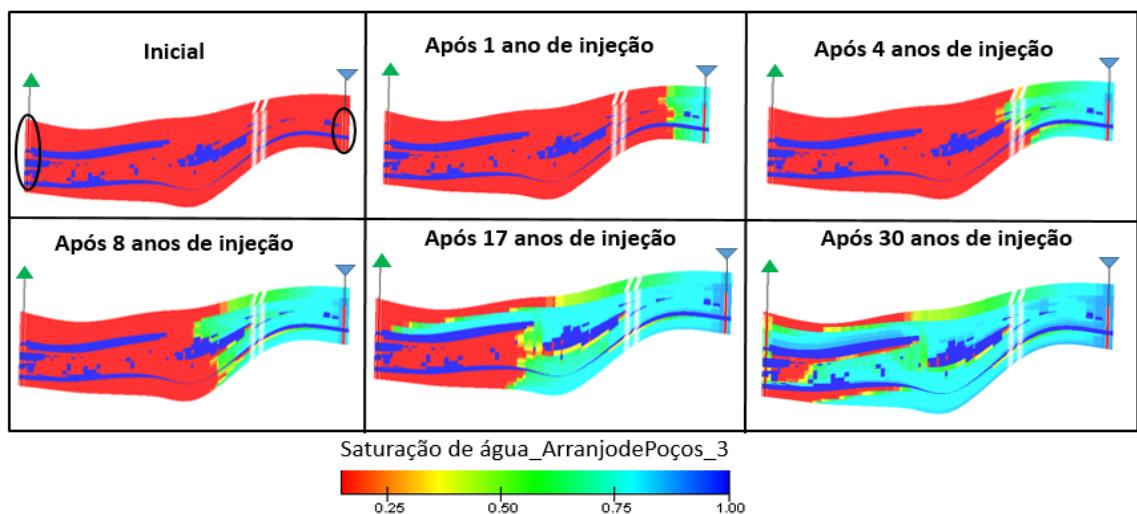
**Figura 6** - Saturação de água ao longo do tempo para um plano vertical passando pelos poços produtor e injetor-Arranjo de poços 2.



**Figura 7 - Frente de avanço de água após 30 anos de injeção/produção-Arranjo de poços 2.**

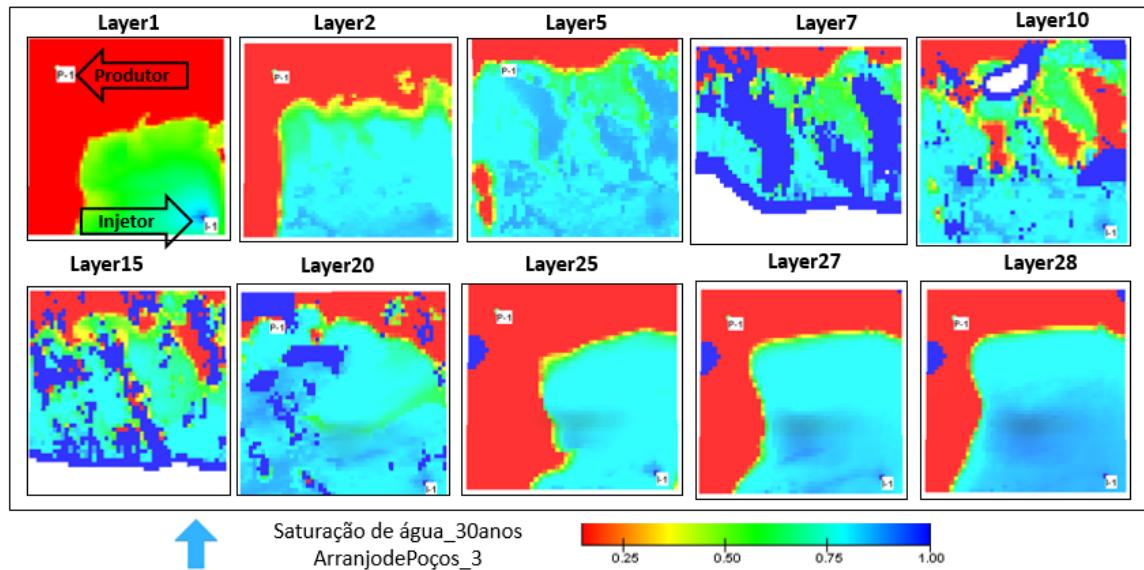
### 3.3 Arranjo de poços 3

A saturação de água ao longo de um plano é ilustrada na **Fig.8**. É possível observar que a água injetada se desloca em direção ao poço produtor por caminhos preferenciais de maior permeabilidade no topo do reservatório. Assim, devido a formação desses caminhos preferenciais, a água injetada começou a ser produzida sem efetivamente promover o deslocamento do óleo em todas as camadas do reservatório.



**Figura 8 - Saturação de água ao longo do tempo para um plano vertical passando pelos poços produtor e injetor-Arranjo de poços 3.**

A saturação de água final ao longo de algumas camadas do modelo é ilustrada na **Fig.9**. Esse arranjo de poços apresenta comportamento similar aos arranjos anteriores.



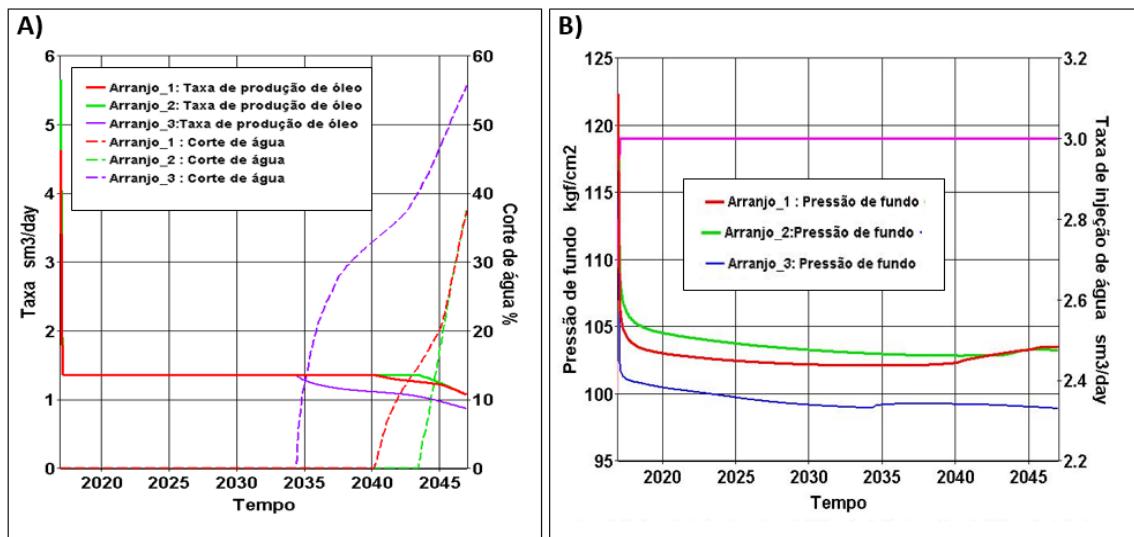
**Figura 9** - Frente de avanço de água após 30 anos de injeção/produção-Arranjo de poços 3.

### 3.4 Comparação dos casos estudados

Os parâmetros de controle dos poços injetores são ilustrados na **Fig. 10 B).** Conforme mencionado anteriormente, a vazão de injeção foi a mesma para todos, enquanto a pressão de injeção foi ligeiramente diferente, devido a profundidade em que os poços foram locados.

Os 3 arranjos de poços analisados apresentaram uma taxa de produção de óleo estável por alguns anos, conforme ilustrado na **Fig. 10 A),** entretanto essa taxa começa a cair logo após à ocorrência do *breakthrough* da água injetada. A água começa a ser produzida sem efetivamente deslocar o óleo do reservatório, ocasionando o aumento do corte de água, o qual representa quase 60% da produção para o arranjo de poços 3.

O volume de óleo recuperado em relação ao volume de óleo inicial *in place* para os arranjos de poços 1, 2 e 3 foram de 50,6 %, 51,0% e 47,4%, respectivamente.



**Figura 10** - Comportamento da razão taxa de óleo e do corte de água (A); pressão de injeção (B) para os casos estudados

## 4 | CONCLUSÕES

O emprego da injeção de água como método de recuperação suplementar para reservatórios heterogêneos ou que apresentam pouca continuidade deve ser avaliado previamente através de estudos de simulação, pois o efeito da injeção de água pode não se estender ao poço produtor e fazer com que a água escoe por fraturas ou caminhos preferenciais causando uma produção de água elevada.

A seleção adequada do arranjo de poços de acordo com a distribuição permeável do reservatório pode retardar a produção da água injetada em alguns anos e aumentar a fração de óleo recuperada. Dentre os casos analisados, o arranjo de poços 2 foi o que apresentou os melhores resultados.

## REFERÊNCIAS

- Borba, C. **Estratigrafia de Alta Resolução aplicada à Modelagem de Reservatórios do Início do Rifte da Bacia de Sergipe-Alagoas**. Tese de Doutorado. Universidade do Vale do Rio Sinos. 2009. 206 p.
- Campos Neto, O.P.; Souza-Lima, W.; Cruz, F.E. 2007. **Bacia Sergipe-Alagoas**. Boletim de Geociências da Petrobras. Rio de Janeiro. 15(2):405-415.
- Chandrashegaran, P. **Low Salinity Water Injection for EOR**. (SPE 178414 MS) SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. Lagos, Nigeria. 21 p. 2015.
- Clemes, T.; Kienberger, G. Persaud, M. Suri, A.; Sharma, M. M.; Boschi, M.; Overland, A. M. **Optimizing Water-Injection Design in a Shallow Offshore Reservoir**. (SPE 180143). SPE Europec 78th EAGE Conference and Exhibition, Vienna, Austria. 13 p. 2017.
- Islam, M. R.; Moussavizadegan, S.H.; Mustafiz, S.; Abou-Kassem, J.H. **Advanced Petroleum Reservoir Simulation**. Canada: Scrivener Publishing LLC, 2010.
- Liu, L.; Zheng, X.; He, E. Liu Fang; Luo, H. **Findings and Challenges of High Permeability Zone on Water Injection Pilots in Iraqui Carbonate Reservoirs**. (SPE 183485 MS) Abu Dabhi International Petroleum Exhibition & Conference. Abu Dabhi. 12 p. 2016.
- Prasad, R. P.; Lake, L. W.; Jennings, J. W. Lucia, F. J. **Improving Economics of Production in Heterogeneous Reservoirs by Redirecting Water Injection Patterns**. (SPE 59692) SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference. Midland, Texas. 15 p. 2000.
- Rosa, A. J.; Carvalho, R. S.; Xavier, J. A. D. **Engenharia de Reservatórios de Petróleo**. Rio de Janeiro, Intercência: Petrobras, 2006.
- Roxar. (2012). **TEMPEST MORE Technical References-Formulation**. Emerson Process Management. TEMPEST® vs. 7.1. 2012.
- Silva, C. R. S. **Estudo comparativo entre a injeção de água e de gás em um reservatório com óleo leve**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 56 p. 2012.

## TANQUES FLASH: DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE CUSTOS NO SOFTWARE DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO EMSO

**Erich Potrich**

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

São Carlos – SP

**Sérgio Correia da Silva**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

(UTFPR)

Campo Mourão - PR

**Larissa Souza Amaral**

Universidade de São Paulo (USP)

São Carlos – SP

do equipamento por meio da regra dos seis décimos. A metodologia aqui utilizada mostrou-se de fácil implementação e fácil convergência na simulação, facilitando o dimensionamento e a análise econômica de diferentes tanques flash.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tanque flash, Dimensionamento, Custo de equipamentos, Regra dos seis décimos, EMSO.

**ABSTRACT:** Industrial equipment is the basis of engineering, because in order to function properly they need the correct sizing, as well as a cost analysis to verify the economic viability of the process. The flash tank is one of the most used equipment in the industry, as well as one of the most complex. This work has the objective of proposing a sequence of design and costing equations that are easy to implement in modeling and simulation software. The software used for this purpose was the EMSO, which contains among its equipment models the flash equipment, but without presenting equations of dimensioning and cost analysis. In this work, the diameter, height and volume of the flash tank were calculated from correlations, and if using the latter value, the cost of the equipment by means of the six tenths rule. The methodology used here was easy to implement and easy convergence in the simulation, facilitating the economical design and analysis of different

**RESUMO:** Equipamentos industriais são a base da engenharia, pois para funcionarem corretamente precisam do dimensionamento correto, além de uma análise de custos para verificar a viabilidade econômica do processo. O tanque flash é um dos equipamentos mais utilizados na indústria, como também um dos mais complexos. Esse trabalho tem o objetivo de propor uma sequência de equações de dimensionamento e de cálculo de custos, que sejam de fácil implementação em softwares de modelagem e simulação. O software usado para esse fim foi o EMSO, que contém entre os seus modelos de equipamentos o equipamento flash, mas sem apresentar equações de dimensionamento e de análise de custos. Nesse trabalho foi calculado, a partir de correlações, o diâmetro, a altura e o volume do tanque flash e, se utilizando desse último valor, o custo

flash tanks.

**KEYWORDS:** Flash tank, Sizing, Cost of equipment, Rule of six tenths, EMSO.

## INTRODUÇÃO

A destilação é um processo de separação amplamente utilizado na indústria. Ela se baseia na separação dos componentes de uma mistura pela diferença de volatilidade entre eles. Durante esse processo, uma fase vapor entra em contato com uma fase líquida, havendo transferência de massa e de energia entre essas fases, aumentando a concentração do componente mais volátil no vapor e aumentando a concentração do componente menos volátil no líquido (GAUTO e ROSA, 2011).

O tanque flash é um equipamento de destilação de um único estágio. Nesse equipamento uma corrente líquida, composta por diferentes componentes de diferentes pontos de ebulação, tem parte de seus componentes mais voláteis evaporados por aquecimento e/ou por queda de pressão

O simulador de processos orientado a equações EMSO (Environment for Modeling, Simulation and Optimization) apresenta uma ampla gama de modelos de equipamentos dos principais processos da indústria química e petroquímica, sendo o tanque flash um desses equipamentos.

O EMSO foi criado em 2003 para simular processos estacionários e transientes da indústria, sendo gratuito para fins acadêmicos. O software é multitarefas e é baseado em equações, ou seja, para a obtenção da solução o simulador agrupa as equações de todas as unidades do processo em um único sistema. (SOARES, 2003; SOARES e SECCHI, 2003).

Se há o conhecimento do custo de um equipamento, mas numa configuração diferente, esse valor pode ser ajustado para a configuração desejada por meio da regra dos seis décimos. Essa regra heurística foi criada por Williams (1947) e se apresenta satisfatória quando um custo de cerca de 35% de precisão é requerido.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O tanque flash geralmente se encontra na posição vertical, conforme a Figura 1, mas dependendo do cálculo de dimensionamento pode ficar na posição horizontal. Os cálculos são realizados primeiramente considerando um tanque vertical (Equações 1 a 7 e a Equação 10), contudo se não respeitar todos os parâmetros estabelecidos o reator deverá ser horizontal (Equações 1 a 3 e as Equações 8 a 10).

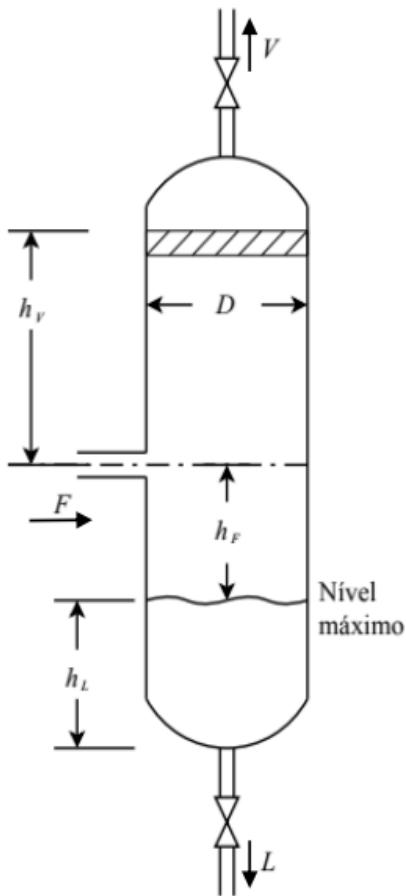


Figura 1. Tanque flash vertical com os seus principais componentes.

Fonte: Adaptado de Wankat (2012).

Em que:

D = diâmetro do tanque flash, em m;

F = vazão de entrada, em unidades de massa por segundo;

L = vazão líquida de saída, em unidades de massa por segundo;

V = vazão gasosa de saída, em unidades de massa por hora;

$h_v$  = altura do volume do líquido de compensação, em m;

$h_f$  = altura do nível de líquido até a linha de carga, em m;

$h_L$  = altura da linha de carga até o demister, em m.

No processo industrial é necessário conhecer a vazão e a composição de entrada, como também a composição de interesse após o processo de flash. Após ter-se determinado as composições e as vazões das correntes de saída do vapor e do líquido, usa-se fórmulas empíricas para determinar-se o tamanho do tanque flash. Primeiramente calcula-se a velocidade de vapor permitida pela Equação 1 (Wankat, 2012):

$$u_{perm} = K_{tanque} \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V}} \quad (1)$$

Em que:

$u_{perm}$  = velocidade de vapor máxima permitida na área máxima da seção

transversal (m/s);

$\rho_L$  = densidade da corrente líquida;

$\rho_V$  = densidade da corrente vapor;

$K_{tanque}$  = constante empírica que depende do tipo do tanque (m/s).

O valor do  $K_{tanque}$  foi primeiramente correlacionado graficamente por Watkins (1967), considerando 85% de inundação sem demister. Nessa configuração, aproximadamente 5% de líquido é arrastado com o vapor. O uso do mesmo projeto com um demister reduz o arrastamento para menos de 1%. Blackwell (1984) ajustou a correlação de Watkins por meio das Equações 2 e 3. Geralmente o valor de  $K_{tanque}$  varia entre 0,03048 m/s e 0,10668 m/s (Wankat, 2012).

$$K_{tanque} = (\text{Const.}) \exp[A + B \cdot \ln F_{lv} + C(\ln F_{lv})^2 + D(\ln F_{lv})^3 + E(\ln F_{lv})^4] \quad (2)$$

$$F_{lv} = \frac{L}{V} \sqrt{\frac{\rho_V}{\rho_L}} \quad (3)$$

Em que Const.; A; B; C; D; e E são constantes cujos valores são, respectivamente:

Const. = 0,3048 m/s;

A = -1,877478097;

B = -0,8145804597;

C = -0,1870744085;

D = -0,0145228667;

E = -0,0010148518.

Wankat (2012) fornece que o cálculo da área da seção transversal ( $A_c$ ) é dado pela Equação 4, enquanto o diâmetro (D) é dado pela Equação 5. A Equação 4 fornece a área da seção transversal horizontal.

$$A_c = \frac{V}{\mu_{perm} \cdot \rho_V} \quad (4)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A_c}{\pi}} \quad (5)$$

A altura total da coluna ( $h_{total}$ ) é calculado por meio das Equações 6 e 7 (SILLA, 2003). Ambas as equações das alturas são dimensões verticais.

$$h_{total} = h_L + 1,5 \cdot D + 0,4572m \quad (6)$$

$$h_L = \frac{L \cdot t_s}{A_c \cdot \rho_L} \quad (7)$$

O menor valor de  $h_L$  deve ser de 0,6096 m, caso a Equação 7 dê um valor menor, deve ser ajustado para 0,6096 m.  $t_s$  é uma constante de tempo, seu valor para tanques

flashes verticais é de 180 e 300 s, geralmente se usa o valor de 240 s (SILLA, 2003). O valor de  $h_L$  deve ser entre 3 a 5 vezes o valor do diâmetro, ou seja,  $h_L/D$  deve estar entre 3 e 5. Caso o valor de  $h_L$  seja menor que 3 vezes o diâmetro, o valor de  $h_L$  deve ser ajustado para ser 3 vezes o diâmetro. Caso o valor do  $h_L$  seja maior que 5 vezes o valor do diâmetro, um tanque flash horizontal deve ser utilizado no lugar de um tanque horizontal. (WALKAT, 2012).

No caso de um tanque flash horizontal, a sequência das Equações 4 a 7 são substituídas, respectivamente, pelas Equações 8 e 9:

$$A_C = \frac{V}{0,625 \cdot \mu_{perm} \cdot \rho_V} \quad (8)$$

$$h_{total} = \frac{L \cdot t_s^*}{0,5 \cdot A_C \cdot \rho_L} \quad (9)$$

A Equação 8 fornece a área da seção transversal vertical.  $t_s^*$  é uma constante de tempo e seu valor para tanques flashes horizontais é em torno de 525 s. A Equação 9 fornece uma altura horizontal, ou seja, pode ser chamado de comprimento do tanque flash horizontal. O cálculo do volume do tanque flash é o mesmo tanto para tanque vertical e horizontal e é dado pela Equação 10.

$$Volume = A_C \cdot h_{total} \quad (10)$$

Após o cálculo do volume, e conhecendo o custo ( $C_1$ ) de um determinado equipamento a um dado volume, é possível calcular o custo ( $C_2$ ) para qualquer volume por meio da regra dos seis décimos, dada pela Equação 11.

$$C_2 = C_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{0,6} \quad (11)$$

A razão adimensional  $P_2/P_1$  é definida como um “fator de tamanho” e pode ser expresso em termos de área, potência, vazão e, nesse caso, volume. Um valor de preço de tanque flash levantado com fornecedores é de US\$ 21.695,00 para um tanque flash de 11,3 m<sup>3</sup>.

Todas essas equações foram inseridas no software EMSO academic beta version 0.10.9, utilizando o sistema operacional Windows 10 de 64 bits. Como componentes da simulação foi utilizado óleo de soja, ácido graxo livre, etanol e água. Os componentes óleo de soja e ácido graxo são pseudocomponentes constituídos da mistura molar de outros componentes, cujas composições e propriedades termodinâmicas foram estimadas pela metodologia de Potrich *et al.* (2019).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para testar e validar as equações aqui mencionadas, foi escolhido o processo de desacificação do óleo de soja por etanol de uma indústria de porte padrão. O processo tradicional de fabricação de óleo de soja processa 125 t/h, produzindo 25 t/h de óleo bruto com uma acidez de 1%. Esse óleo, para estar apto ao consumo humano, precisa passar pelo processo de desacidificação, ou seja, eliminar os ácidos graxos livres. Meirelles *et al.* (2001) propõe um processo de desacificação desse óleo por etanol hidratado de 90% em massa, sendo os outros 10% de água. Para essa vazão de óleo bruto de soja é necessário 22,2 t/h de etanol. Essas correntes entram em contracorrente em um desacidificador de pratos produzindo duas correntes, uma corrente de rafinado e outra de extrato.

A vazão de rafinado vai para o tanque flash 1 que, segundo a metodologia aqui apresentada, tem uma configuração horizontal, uma área de seção transversal vertical de 0,28 m<sup>2</sup> e um comprimento horizontal de 28,47 m. Totalizando um volume de 8,04 m<sup>3</sup> e um custo de US\$ 17.698,5.

A vazão de extrato vai para o tanque flash 2 que apresenta configuração vertical, uma área de seção transversal horizontal de 16,37 m<sup>2</sup> e uma altura vertical de 13,70 m. Com isso, o volume total é de 224,28 m<sup>3</sup> e o custo é de US\$ 130.312. Apesar de ter uma vazão de entrada menor, a vazão de vapor do flash 2 é muito maior que o do flash 1 dada a quantidade de etanol sendo vaporizada, necessitando um volume de reator muito maior.

A simulação teve ao total 761 variáveis, 691 equações e 445 especificações, zerando o número de graus de liberdade. A Figura 2 ilustra o fluxograma simplificado do processo, enquanto a Tabela 1 ilustra os principais dados obtidos do processo simulado.

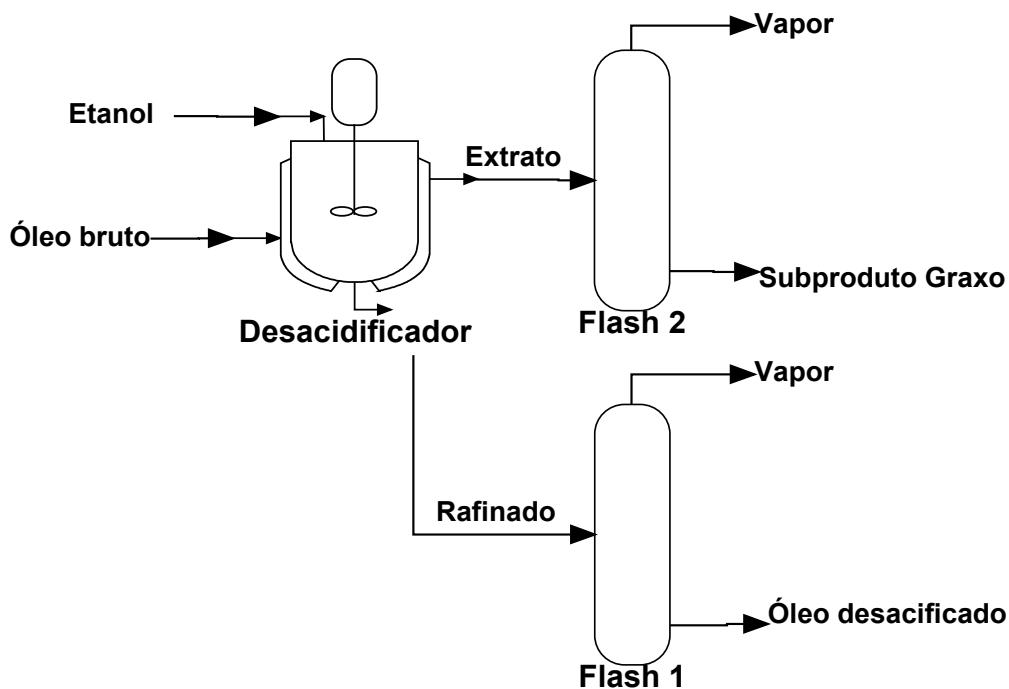


Figura 2. Fluxograma do processo de desacidação do óleo de soja por etanol.

	Desacidificador		Flash 1		Flash 2	
	Extrato 20,3 kg/h	Rafinado 26,9 kg/h	Vapor 2,3 kg/h	Líquido (Óleo desacidificado) 24,6 kg/h	Vapor 20,2 kg/h	Líquido (Subproduto graxo) 0,1 kg/h
Água (%)	10,65	0,41	4,77	0,00	10,70	0
Etanol (%)	87,00	7,91	92,43	0,03	88,40	0
Óleo (%)	0,52	91,38	0,02	99,90	0,07	100
Acidez (%)	0,83	0,30	2,78	0,07	0,83	0

Tabela 1. Valores das correntes mássicas dos principais equipamentos do processo simulado.

## CONCLUSÕES

As equações utilizadas se mostraram de fácil implementação e não acarretaram diferenças na demanda computacional, já que a velocidade de convergência do EMSO se manteve a mesma. O dimensionamento do tanque flash pode ser feita por equações mais complicadas, mas que não acarretariam em grande ganho de precisão, essas equações podem ser vistas nas referências utilizadas nesse trabalho. O conhecimento das dimensões e do custo de tanques flashes é de enorme importância para o setor industrial.

## REFERÊNCIAS

BLACKWELL, W. W. **Chemical Process Design on a Programmable Calculator**. McGraw-Hill, New York, 1984.

MEIRELLES, A. J. A.; RODRIGUES, C. E. C.; GONÇALVES, C. B.; BATISTA, E. A. C.; KATEKAWA, M. E. **Processo de desacidificação de óleos e gordura por extração líquido-líquido de processo de purificação de biodiesel e de tratamento do reagente alcoólico.** Patente PI0900869-1 A2, 2011.

POTRICH, E.; CHAMAS, B. E. S.; CRUZ, A. J. G.; GIORDANO, R. C. **Produção de Biodiesel pela Transesterificação Supercrítica Etanólica: Modelagem e Simulação.** Impactos das Tecnologias na Engenharia Química 3, 1<sup>a</sup> ed, Atena Editora, p. 123-128, 2019.

SILLA, H. **Chemical process engineering: design and economics.** New York: Marcel Dekker, 2003.

SOARES, R. P.; SECCHI, A. R. **EMSO: A new environment for modelling, simulation and optimization.** Computer Aided Chemical Engineering, v. 14, p. 947-952, 2003.

SOARES, R. P. Desenvolvimento de um Simulador Genérico de Processos Dinâmicos. 2003. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

WANKAT, P. C. **Separation process engineering: includes mass transfer analysis.** 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2012.

WATKINS, R. N. **Sizing Separators and Accumulators.** Hydrocarbon Processing, v. 46 (1), p. 253, 1967.

WILIANS, R. **Six-tenths Factor Aids in Approximating Costs.** Chemical Engineering magazine, dez. 1947.

## AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE DEPOSIÇÃO ORGÂNICA EM OPERAÇÕES DE MISTURA DE PETRÓLEOS NO TANQUE DE ESTOCAGEM EM REFINARIAS DE PETRÓLEO

**Rosberguer de Almeida Camargo**

Universidade Federal de Pelotas, Centro de  
Desenvolvimento Tecnológico  
Pelotas - RS

**Mauren Costa da Silva**

Universidade Federal do Rio Grande, Escola de  
Engenharia  
Rio Grande – RS

**Rafael Beltrame**

Universidade Federal de Pelotas, Centro de  
Desenvolvimento Tecnológico  
Pelotas - RS

**Darci Alberto Gatto**

Universidade Federal de Pelotas, Centro de  
Desenvolvimento Tecnológico  
Pelotas - RS

**Antônio Carlos da Silva Ramos**

Universidade Federal de Pelotas, Centro de  
Engenharias  
Pelotas - RS

do fenômeno a fim de sustentar futuras medidas operacionais de mitigação da deposição orgânica que atinge toda a cadeia produtiva do petróleo. Como principal resultado, o estudo permitiu concluir que as operações de misturas de cargas com petróleos com baixo parâmetro de solubilidade contribuem substancialmente para formação e aumento das quantidades de borras no tanque pela precipitação de frações pesadas de petróleos. Através das análises experimentais realizadas na borra oriunda de tanque de estocagem de petróleo foi possível um melhor conhecimento da sua composição e de identificar frações que provocam a sua formação. Foi exposto que o principal conteúdo sólido da borra são sedimentos de origem inorgânica indicando contaminação do petróleo com fases aquosas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Deposição Orgânica, Parâmetro de Solubilidade, Borra.

**ABSTRACT:** Given the numerous economic and political factors that have negatively affected the financial capacity in the oil sector in recent years, seeking to neutralize uncertainties and optimize processes is necessary. Therefore, the present work aims to evaluate the potential of organic deposition in the oil blending operations in Refineries, building a better understanding of the phenomenon in order to sustain future operational measures to mitigate the organic

**RESUMO:** Frente aos inúmeros fatores econômicos e políticos que afetaram negativamente a capacidade financeira no setor petrolífero nos últimos anos, buscar neutralizar incertezas e otimizar processos se faz necessário. Portanto o presente trabalho visa avaliar o potencial de deposição orgânica nas operações de misturas de petróleos em Refinarias, construindo um melhor entendimento

deposition that affects the entire petroleum production chain. As a main result, the study concluded that the operations of mixtures of cargo with oils with low solubility parameter contribute substantially to the formation and increase of the quantities of sludge of petroleum in the tank by the precipitation of heavy fractions of oils. Through the experimental analyzes carried out on the sludge from oil storage tank, it was possible to obtain a better knowledge of its composition and to identify fractions that provoke its formation. It has been shown that the main solid content of the sludge is sediments of inorganic origin indicating contamination of the oil with aqueous phases.

**KEYWORDS:** Organic Deposition, Solubility Parameter, Sludge.

## 1 | INTRODUÇÃO

O petróleo é uma mistura de diferentes frações de hidrocarbonetos, como saturados e insaturados, aromáticos e poliaromáticos. Ocorrendo ainda em menor quantidade compostos sulfurados, oxigenados, nitrogenados e metais como níquel, vanádio, ferro, etc. É bem conhecido que esses elementos diferentes se concentram na estrutura química de frações pesadas poliaromáticas conhecidas como asfaltenos e resinas.

Esses componentes de alta massa molar denominado de frações asfalténicas são causadores de sérios problemas de precipitação, desde sua produção até o refino (CARVALHO *et al.*, 2003). NADKARNI (2017) identificou os asfaltenos na ASTM D7060 como componentes que ocorrem naturalmente no petróleo bruto e produtos petrolíferos que contêm material residual e se encontram normalmente presentes em suspensões coloidais, com capacidade de aglomerar-se e flocular-se devido perturbações que venham a alterar sua estabilidade.

Segundo KELLAND (2014), durante as operações de produção os fluidos experimentam uma queda significativa de pressão, mudança de temperatura e agitação considerável implicando em modificações previsíveis e imprevisíveis do seu estado que podem atingir negativamente a eficiência da operação global, em geral problemas físico-químicos de produção, que vão desde incrustações (deposição de qualquer matéria), problemas causados pelas propriedades físicas do fluido (emulsões e fluxos viscosos), problemas que afetam a integridade estrutural das instalações e a segurança e problemas de cunho ambiental ou econômico.

RAMOS *et al.*, 2013 avaliaram o potencial de precipitação de asfaltenos em petróleos brasileiros devido as operações de mistura e concluíram que essa é uma análise crucial para o planejamento de petróleos a serem misturados, bem como sua ordem de mistura. Nesse trabalho foi desenvolvido um modelo teórico para predição da compatibilidade de petróleos.

Portanto com base em todo o esforço teórico e técnico evidenciado por pesquisadores acerca do tema neste exposto, comprehende-se a importância do desenvolvimento de modelos preditivos relacionados à deposição orgânica, ajudando

consequentemente em formas de prevenção ou ainda, solução da problemática. A compreensão das estruturas químicas presentes é de suma importância para auxiliar no entendimento de mecanismos capazes de explicar as interações que originam os problemas, para assim evita-los e/ou minimiza-los.

## 2 | METODOLOGIA

Para desenvolvimento do trabalho foram utilizados duas amostras de petróleos distintos (identificados como Petróleo “A” e Petróleo “B”) utilizados em operações na Refinaria de Petróleo. Ambos os petróleos foram fornecidos pela Refinaria e solicitado sigilo quanto a sua origem e caracterização. Amostra do Petróleo oriundo do fundo do tanque, que se encontra na fase sólida (borra). Solventes n-heptano e Tolueno ambos com grau de pureza analítica.

### 2.1 Metodologia do Início da Precipitação de Asfalteno por Microscopia Óptica

A técnica utilizada consiste na observação do início de precipitação, utilizando o microscópio óptico, determinando se a quantidade acrescida de floculante causa a precipitação do asfalteno (formação de partículas de asfaltenos) nas amostras de petróleo utilizada. A cada adição do solvente a amostra é inserida numa lâmina e analisada no microscópio óptico até a constatação do início de precipitação.

O peso inicial de petróleo a ser analisado e a quantidade de floculante inserida no sistema é registrado para ser realizado o cálculo de início de precipitação (IP), conforme Equação 1.

$$IP = \text{volume do floculante (mL)} / \text{massa de Petróleo(g)} \quad (1)$$

### 2.2 Metodologia para Determinação do Parâmetro de Solubilidade dos Petróleos

O parâmetro de solubilidade de Hildebrand dos petróleos foi determinado de acordo com o trabalho de RAMOS *et al.* (2013) a partir dos índices de início de precipitação, anteriormente calculados, conforme a Equação 2.

$$\delta f = \delta p \cdot V_p + \delta s \cdot V_s \quad (2)$$

Em que,  $\delta f$  é o parâmetro de floculação dos asfaltenos;  $\delta p$ , o parâmetro de solubilidade do petróleo;  $V_p$ , é a fração volumétrica de petróleo utilizado para início de precipitação;  $\delta s$ , o parâmetro de solubilidade do solvente; e  $V_s$ , é a fração volumétrica de solvente utilizado para início de precipitação. Adotando como referência o valor de  $16,2 \text{ Mpa}^{1/2}$  para o parâmetro de floculação dos asfaltenos e o valor de  $15,3 \text{ Mpa}^{1/2}$  para parâmetro de solubilidade do solvente utilizado, neste caso o n-heptano.

## **2.3 Metodologia de Caracterização da Natureza Cristalina ou Amorfa do Material Particulado (Borra)**

As amostras de borras foram sempre utilizadas conforme coletadas, ou seja, sem qualquer tratamento prévio. Um procedimento de centrifugação é aplicado à amostra de petróleo do fundo do tanque no intuito de promover a separação de fases com densidades distintas em substâncias líquidas. De forma a inferir sobre a natureza das partículas da amostra de borra oleosa se submete a mesma a uma lente polarizadora através de um microscópio ótico, onde o filtro polarizador auxilia na identificação do fenômeno de birrefringência característico da presença de estruturas cristalinas. O filtro polarizador promove apenas a seleção de um plano de direção de vibração de ondas luminosas, resultando no plano da luz polarizada com os componentes macromoleculares birrefringentes, os quais apresentam brilho e os não birrefringentes apresentam fundo escuro.

## **2.4 Teor de Asfaltenos na Borra**

Conforme norma IP143/84 (1989) asfaltenos é definido em função da sua solubilidade em tolueno. Essa é uma definição operacional e que foi aplicada nesse trabalho para determinação da quantidade de asfaltenos na borra.

## **2.5 Teor de Sedimentos na Borra**

Para determinação do teor de sedimentos (impurezas) na borra foi desenvolvida metodologia de acordo com a norma ABNT NBR 9482/2009.

# **3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO**

## **3.1 Resultados das Analises realizadas no Petróleo “A” e no Petróleo “B”**

O aparecimento de regiões escuras com a forma de fractais é referente à precipitação dos asfaltenos, conforme visualizado na Figura 1.

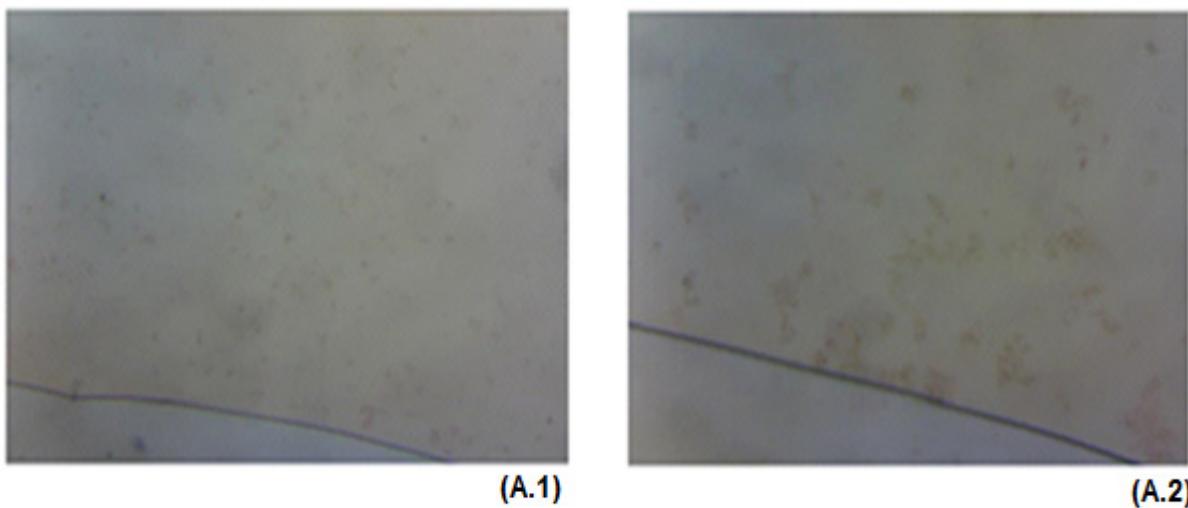


Figura 1 - Imagens do Petróleo A do início da Precipitação. Temperatura 20°C. Ampliação de 40x (A.1). Ampliação de 100x (A.2).

Para o petróleo A o início de precipitação em 4,7 mL/g, o que representa a média de três experimentos, conforme mostrado na Tabela 1. De posse dos dados experimentais obtidos no início de precipitação se determina o valor do parâmetro de solubilidade. Sendo que no Petróleo A o valor médio do Parâmetro de Solubilidade ficou em  $19,8 \text{ Mpa}^{1/2}$ .

	PETRÓLEO A	
	Início de Precipitação (mL/g)	Parâmetro de Solubilidade ( $\text{Mpa}^{1/2}$ )
<b>Experimento 1</b>	4,74	19,88
<b>Experimento 2</b>	4,58	19,75
<b>Experimento 3</b>	4,71	19,85
<b>Média</b>	$4,67 \pm 0,09$	$19,83 \pm 0,07$

Tabela 1 - Início de Precipitação (IP) dos asfaltenos do Petróleo A. Valores de Parâmetro de Solubilidade Petróleo A. Temperatura 20°C

Semelhantemente para o petróleo B foi determinado o início de precipitação e os resultados constam na Tabela 2. Foi calculado o valor de  $16,2 \text{ Mpa}^{1/2}$  do Parâmetro de Solubilidade do Petróleo B, idêntico ao do parâmetro de floculação ( $16,2 \text{ Mpa}^{1/2}$ ). Esse resultado implica que os asfaltenos no petróleo B encontram-se numa condição limite entre a precipitação e a manutenção na fase líquida.

	PETRÓLEO B	
	Início de Precipitação (mL/g)	Parâmetro de Solubilidade (Mpa <sup>1/2</sup> )
<b>Experimento 1</b>	2,34	16,13
<b>Experimento 2</b>	2,34	16,13
<b>Experimento 3</b>	2,39	16,2
<b>Média</b>	$2,36 \pm 0,03$	$16,15 \pm 0,04$

Tabela 2 - Início de Precipitação (IP) dos asfaltenos do Petróleo B. Valores de Parâmetro de Solubilidade Petróleo B. Temperatura 20°C

Os resultados acima implicam que em função da quantidade de mistura (carga) inserida ao petróleo do tanque pode ocorrer a precipitação de asfaltenos e que esse possa ser um dos fatores para o acúmulo de borras com o tempo.

A fim de avaliar a relação entre a precipitação de asfaltenos e as borras pesquisas foram conduzidas de forma a caracterizar o teor de asfaltenos nas borras.

### 3.2 Resultados das Análises do Petróleo do Fundo do Tanque

Nas partículas em suspensão submetidas a uma lente polarizadora, visualizado Figura 2, nota-se a ocorrência de regiões mais escuras em tom preto que ocupa a maior parte da lama, o que se admite como sendo asfaltene. Podem-se observar pontos brilhantes consistente de material cristalino nas borras. Esse material em princípio foi interpretado como parafinas que podem ter precipitada dos petróleos.

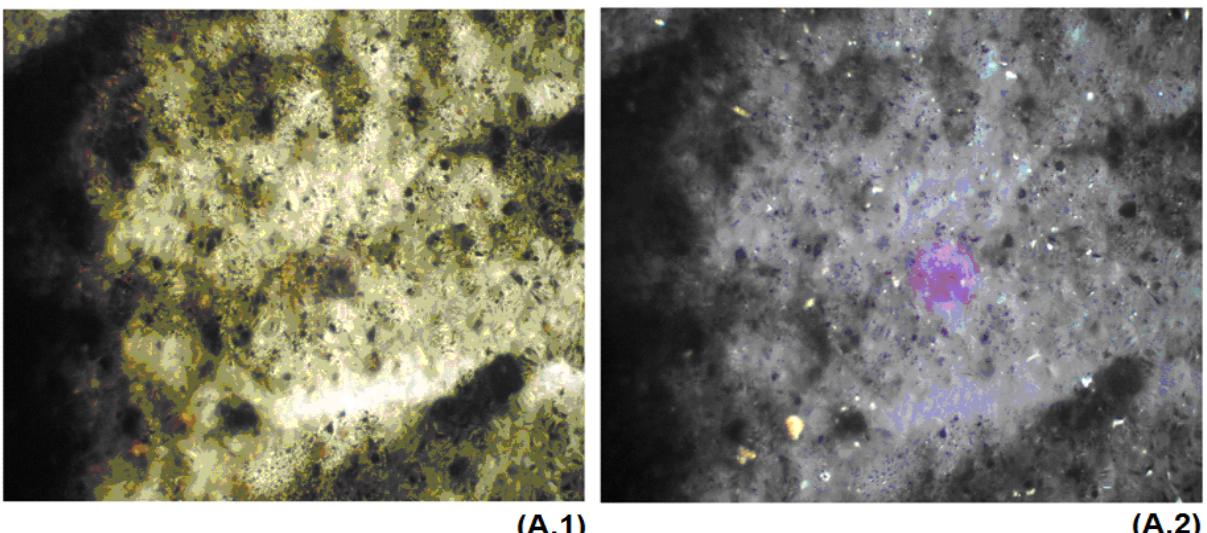


Figura 2 - Analise microscópica da borra do Petróleo oriunda dos tanques de armazenamento. Analise microscópica sem lente polarizadora (A.1). Analise microscópica com lente polarizadora (A.2). Ampliação 100x

Um balanço de massa revelou um teor de 8% de asfaltenos e/ou resinas e que, portanto, a maior parte da borra consiste de um material amorfo oriundo do petróleo e, até então de natureza desconhecida.

Já a massa queimada na mufla, que corresponde à matéria orgânica, foi de 48,4%. Este resultado indica que cerca de 50% da borra seca corresponde a um material de origem inorgânica, o que sugere uma contaminação dos tanques a partir de contatos com fases aquosas ao longo do tempo, provavelmente devido a materiais particulados arrastados pela água, tais como, argilas, areia, etc.

A amostra de borra utilizada nas análises verificou-se 85% de umidade (água e componentes voláteis) e os 15% restantes se dividem entre metade sedimentos e a outra metade material orgânico. Para melhor apresentar esses resultados foi assumido um balanço material com base em 100 g de borra. Para essa quantidade, 85 % seriam de água e/ou voláteis o que indica uma possível infiltração e/ou qualquer outra operação que coloque o óleo em contato com uma fase aquosa, e 15 % de borra seca, das quais 7,74 % são de sedimentos e 7,26 % são de matéria orgânica em que 1,26 % correspondem a frações asfalténicas.

## 4 | CONCLUSÕES

Concluiu-se que em função das operações de misturas cargas de petróleos com baixo parâmetro de solubilidade, como o petróleo B podem contribuir substancialmente para formação e aumento das quantidades de borras no tanque. Verificou-se uma relação entre a precipitação dos asfaltenos e a ocorrência na borra.

Constatou-se ainda que a borra oriunda dos tanques de estocagem de petróleos estão associadas a uma fase aquosa, materiais inorgânicos e componentes orgânicos do próprio petróleo e considerando uma amostra de 100g esses componentes correspondem respectivamente a 85 %, 7,74 % e 7,26 %. Também foi constatado que o material orgânico não é predominantemente composto por asfaltenos.

## REFERÊNCIAS

ABNT NBR 9842: **Produtos de Petróleo - Determinação do teor de cinzas.** Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2009.

CARVALHO, C. C. V.; MOREIRA, L. C.; PEREIRA, A.; CHRISMAN, E. C.A. N.; SEIDL, P. R. **Influência de Métodos de Extração na Estrutura de Asfaltenos.** 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Rio de Janeiro, 2003.

INSTITUTE OF PETROLEUM. IP143/84. “**Standard methods for analysis and testing of petroleum and related products**”. Ed John Wiley & Sons. London, 1989.

KELLAND, M. A. **Production Chemicals for the Oil and Gas Industry.** 2nd Edition. ISBN: 13: 978-1-4398-7381-6. Boca Raton, United Statedof America, 2014.

NADKARNI, R. A. K. ASTM D7060 Standard Test Method for **Determination of the Maximum Flocculation Ratio and Peptizing Power in Residual and Heavy Fuel Oils (Optical Detection Method).** Guide to ASTM Test Methods for the Analysis of Petroleum Products and Lubricants. 2nd Edition. ISBN 978-0-8031-4274-9. United Stated of America, 2017.

RAMOS, A. C. S.; ROLEMBERG, M. P.; MOURA, L. G. M.; ZILIO, E. L.; SANTOS, M. F. P.; GONZALEZ, G. **Determination of solubility parameters of oils and prediction of oil compatibility.** Journal of Petroleum Science and Engineering. Volume 102, February 2013, Pages 36–40. Brazil, 2013.

## AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA MENSURAR A ILUMINÂNCIA EM UM AVIÁRIO EXPERIMENTAL

### Giovanni Polette Dalla Libera

Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (FZEA-USP)

Pirassununga, SP, Brasil.

USP)

Pirassununga, SP, Brasil.

Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP)

São Carlos, SP, Brasil.

### Victor Moreira Leão

Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (FZEA-USP)

Pirassununga, SP, Brasil.

### Vitor Augusto de Sousa

Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (FZEA-USP)

Pirassununga, SP, Brasil.

### Matheus Fernando Lima Zuccherelli de Souza

Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (FZEA-USP)

Pirassununga, SP, Brasil.

### Renata Lima Zuccherelli de Oliveira

Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP)

São Carlos, SP, Brasil.

### Marcelo Eduardo de Oliveira

Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP)

São Carlos, SP, Brasil.

### Adriano Rogério Bruno Tech

Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo (FZEA-USP)

**RESUMO:** A luz é um fator importante no controle e na regulação da saúde e comportamento da maioria dos animais. É de suma importância que as instalações produtivas assegurem a temperatura e iluminação necessária para manter o conforto térmico e garantir o bem-estar animal. O experimento foi realizado em um aviário experimental, localizado na área da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP), nas coordenadas 21°57'37" S e 47°27'07" W, com as dimensões 29,70 x 8,03 m, com cortinas de lona retráteis. Para a coleta dos dados de iluminância (lx) interna do ambiente foi implementado um módulo sensor wifi, que se conecta a internet por meio de um roteador que é responsável por enviar as leituras coletadas do local para um banco de dados em tempo real. O experimento foi realizado em dois dias consecutivos, no primeiro dia com cortinas abertas e no segundo dia com cortinas fechadas, ambos realizados entre as 6h e 18h. A maior leitura de iluminância foi observada às 12h do primeiro dia, coerente ao período de alta irradiação solar do dia. Em

geral, pode ser verificado a diferença de iluminância quando há maior incidência de iluminação natural (cortinas abertas) em relação a iluminação natural restrita (cortinas fechadas). De acordo, com os resultados obtidos ao final do experimento, pode-se concluir que o sistema implementado foi capaz de coletar os dados de iluminância no interior do ambiente, bem como de enviá-los para um servidor web, que pode ser acessado remotamente em tempo real.

**PALAVRAS-CHAVE:** Comunicação sem fio, Monitoramento de Ambientes Produtivos, Frango de corte, Bem-estar animal.

## EVALUATION OF A EMBEDDED SYSTEM TO MEASURE LUMINANCE IN A EXPERIMENTAL AVIARY

**ABSTRACT:** Light is an important factor in controlling and regulating the health and behavior of most animals. It is extremely important that production facilities ensure the temperature and lighting necessary to maintain thermal comfort and ensure animal welfare for broiler chickens. The experiment was located in Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA/USP) at coordinates 21°57'37 "S and 47°27'07"W and carried out in an experimental aviary with dimensions of 29.70 x 8.03 m with retractable canvas curtains. To collect the internal illuminance (lx) data of the environment a wireless sensor module was implemented which connects to the Internet through a router that is responsible for sending the readings collected from the site to a real-time database. The experiment was performed on two consecutive days. On the first day with open curtains and on the second day with closed curtains both performed between 6am and 6pm. The highest illuminance reading was observed at noon on the first day consistent with the period of high solar irradiation of the day. In general the difference of illuminance could be verified when there is a greater incidence of natural light (curtains open) comparing to restricted natural light (curtains closed). According to the obtained results it can be concluded that the implemented system was able to collect the illuminance data inside the environment, as well as to send them to a web server which can be accessed remotely through the internet.

**KEYWORDS:** Wireless communication; Environment monitoring; Broiler Chickens; Animal welfare;

## 1 | INTRODUÇÃO

Na produção e bem-estar de aves, um assunto que deve ser levado em consideração é a iluminação adequada, seja na avicultura de corte ou de postura, sendo necessários investimentos em programas de iluminação, que proporcionem luz na demanda adequada durante períodos controlados para aumentar o desempenho dos animais. Segundo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada, a produção brasileira de carne de frango em 2018 deve alcançar 13 milhões de toneladas, crescimento de 3,34% na comparação com 2017, buscando cada vez mais espaço no

mercado externo. Para que isso ocorra o setor deve atender exigências de qualidade, entre elas sanitárias e bem-estar animal.

O Brasil é um país de clima tropical com temperaturas e níveis de radiação solar elevadas em grande parte do ano. Desta forma, é de extrema importância que as instalações produtivas assegurem a homeotermia do animal assim como seu bem-estar (Aerts, Wathes e Berckmans, 2003; Welker, Rosa e Moura., 2008; Santos, Baeta, Albino, Tinoco e Secon, 2009). Existem ainda outros fatores que influenciam o bem-estar e o conforto térmico em aves, como: temperatura, umidade, radiação e ventilação, e se não forem manejados corretamente podem influenciar negativamente na produção, diminuindo a taxa de conversão alimentar e consequentemente o potencial genético das aves.

A luz, por exemplo, é um fator importante no controle e na regulação da saúde e comportamento da maioria dos animais; a iluminação ambiente afeta as aves nas interações entre respostas comportamentais e fisiológicas segundo Kristensen, Prescott e Perry (2006). Com o avanço nos estudos sobre programas de luz, o melhor desempenho e bem-estar das aves poderiam ser alcançados com fotoperíodos moderados, que possibilitariam aumento nas horas de sono, menor estresse fisiológico, melhora na resposta imunológica e, possivelmente, melhora no metabolismo ósseo (Rutz e Bermudez, 2004).

O objetivo deste trabalho foi implementar um sensor embarcado para mensurar as variações de iluminância natural na parte interna de um aviário experimental, em condições de cortinas abertas e fechadas em um período de dois dias seguidos.

## 2 | METODOLOGIA

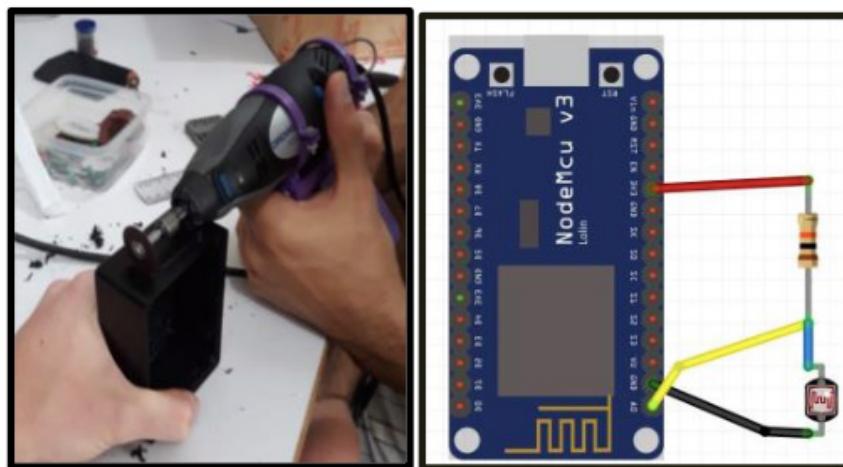
O sistema de sensor embarcado foi implementado para coletar os dados de iluminância em um aviário experimental, localizado no Campus da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, da Universidade de São Paulo (FZEA/USP), em Pirassununga, São Paulo, onde o clima da região é caracterizado como Cwa, na classificação Koppen-Geiger. Foi aferida luminosidade interna de um aviário experimental (FIGURA 1) nas dependências do Departamento de Zootecnia (ZAZ), localizado nas coordenadas 21°57'37"S e 47°27'07"W, possuindo dimensões de 29,70 x 8,03 metros, 4 metros de pé direito e janelas de ventilação de 1,50 x 2,30 metros com cortinas de lona retráteis. Os dados de iluminância foram coletados na altura média da idade de abate, aproximadamente 30 cm do chão, no dia 18 de dezembro de 2018, com as cortinas abertas, e com as cortinas fechadas no dia 19 de dezembro de 2018, no período entre as 6:00h e as 18:00h de cada dia.



**Figura 1:** Pirassununga (SP): Aviário utilizado nos experimentos.

Fonte: Própria autoria (2018).

O sistema coleta e envia as informações para um banco de dados implementado em MySQL, possibilitando o acesso em tempo real por meio de uma página Web desenvolvida em PHP. Para mensurar iluminância no interior do aviário foi desenvolvido um módulo sensor sem fio, composto por um fotoresistor LDR (Light Dependent Resistor), que varia sua resistência elétrica conforme variações de luminosidade no ambiente, bem como altera a tensão elétrica sobre ele, formando assim, um circuito divisor de tensão (FIGURA 2); Uma placa microcontroladora com interface wifi denominada ESP NodeMCU, responsável por receber e enviar as variações de tensão provenientes do sensor LDR, convertendo os dados analógicos em digitais por meio de sua interface I/O. O código gravado na memória do módulo embarcado processa as informações e as envia em forma de iluminância para o banco de dados MySQL. Foi usado no local um roteador que disponibiliza conexão com a internet para o módulo sensor. O servidor implementado em PHP permite o acesso aos dados de iluminância remotamente e em tempo real em uma página da web. O módulo foi alimentado por uma fonte chaveada genérica 127/220V – 5VDC. O protótipo foi encapsulado em caixas patola de plástico com tampa removível para manutenção (FIGURA 2).



**Figura 2:** Pirassununga (SP): A direita o diagrama esquemático do circuito do o módulo sensor.  
A esquerda, confecção do invólucro em caixa patola.

Fonte: Própria autoria (2018).

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os resultados das coletas de iluminância natural, em lux (lx), aferida pelo módulo sensor em intervalos de três em três horas, das 6h às 18h, do dia 18 de dezembro de 2018, com as cortinas abertas.

Horário	Iluminância (lx)
6:00	77
9:00	159
12:00	614
15:00	545
18:00	369

Tabela 1: Pirassununga (SP): Coleta de dados no dia 18/12/2018 com cortinas abertas.

Fonte: Própria autoria (2018).

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos das medições de iluminância com cortinas fechadas, mostrados também em intervalos de três em três horas entre às 6h e às 18h, registrados no dia 19 de dezembro de 2018. O maior valor de iluminância registrada no período de leitura foram as 12h. As menores leituras foram verificadas às 6h e 18h, nascer e pôr do sol, ou seja, momentos de menor incidência de luz solar.

Horário	Iluminância (lx)
6:00	44
9:00	99
12:00	183
15:00	200
18:00	129

Tabela 2: Coleta de dados no dia 24/03/2018 com cortinas abertas.

Fonte: Própria autoria (2018).

Comparando os resultados das Tabelas 1 e 2, nota-se em geral um decréscimo considerável nas leituras de iluminância apresentadas na Tabela 2, denotando a diferença em termos de iluminância, quando há maior incidência de iluminação natural (cortinas abertas), em relação a iluminação natural restrita (cortinas fechadas). As menores leituras, nos dois dias, foram observadas as 6h e 18h, horários de menor incidência de luz natural externa proveniente do sol. A maior leitura de iluminância, segundo a Tabela 1 (cortinas abertas) foi obtido as 12h, coerente ao período de alta irradiação solar do dia.

De acordo com a Tabela 3, criada pela FACTA (2014), os parâmetros ideais para a criação de aves em ambientes controlados são de 30-40 lux até o sétimo dia de vida e de 5-10 lux até o abate. Com os resultados obtidos pode-se observar que a

iluminância aferida no aviário está fora do parâmetro ideal para o bem-estar das aves, sendo necessário o produtor intervir no ambiente e, adequá-lo para atingir os níveis mínimos aceitáveis de iluminância. Denotando, a importância do monitoramento do aviário (iluminação) com a utilização do protótipo módulo sensor, assegurando ao produtor, que a sua instalação esteja seguindo os parâmetros corretos de conforto aos animais alocados no ambiente.

Peso vivo ao abate	Idade em dias	Intensidade luminosa	Fotoperíodo (Horas)
Menos de 2,5 Kg	0 a 7	30 – 40 Lux	23 de luz / 1 de escuro
	8 até 3 dias antes do abate	5 – 10 Lux	20 de luz / 4 de escuro
Mais de 2,5 Kg	0 a 7	30- 40 Lux	23 de luz / 1 de escuro
	8 até 3 dias antes do abate	5 – 10 Lux	18 de luz / 6 de escuro

**Tabela 3:** Programa de iluminação ideal para aviários com ambiente controlado.

Fonte dos dados: Livro Produção de frangos de corte – FACTA, 2014.

## 4 | CONCLUSÃO

De acordo, com os resultados obtidos ao final do experimento, pode-se concluir que o sistema implementado foi capaz de coletar as leituras de iluminância no interior do aviário experimental, bem como de enviá-los para um servidor web, que pode ser acessado remotamente pela internet, contribuindo assim, para o manejo de aves de corte, por meio do monitoramento das variáveis de ambiente que influenciam no conforto térmico das aves.

## 5 | AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e também do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) Processo nº 140013/2017-2.

## REFERÊNCIAS

AERTS, M.; WATHES, C. M.; BERCKMANS, D. Dynamic databased modeling of heat production and growth of broiler chickens: development of an integrated management system. **Biosystems Engineering**, v.84, 2003, p.257-66.

USP/ESALQ/CEPEA. **Frango/PERSPEC 2018:** com excedente, setor dependerá de bom desempenho das exportações. Piracicaba: USP/ESALQ/CEPEA, 2018. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/releases/frango-perspec-2018-com-excedente-setor-dependera-de-bom-desempenho-das-exportacoes.aspx>. Acesso em: 03 set. 2018.

KRISTENSEN, H.; PRESCOTT, N.; PERRY, G.; et al. The behavior of broiler chickens in different light sources and illuminances. **Applied Animal Behavior Science**, v.103, 2007, p.75-89.

RUTZ, F.; BERMUDEZ, V.L. Fundamentos de um programa de luz para frangos de corte. In: MENDES, A.A.; NAAS, I.A.; MACARI,M. (Eds). **Produção de frangos de corte**, Campinas: Ed. FACTA, 2004. p.157-168.

SANTOS, P. A.; BAÉTA, F. C; TINOCO, I. F. F.; ALBINO, L. F. T.; CECON, P. R. Ventilação em modos túnel e lateral em galpões avícolas e seus efeitos no conforto térmico, na qualidade do ar e no desempenho das aves. **Revista CERES**, v.56, p.172-180, 2009.

WELKER, J.S.; ROSA, A.P.; MOURA, D.J. et al. Temperatura corporal de frangos de corte em diferentes sistemas de climatização. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.37, n.8, p.1463-1467, 2008.

## CONTROLADOR FUZZY SINTONIZADO POR ALGORITMO GENÉTICO EM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

**Lenon Diniz Seixas**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Ponta Grossa – Paraná

**Diego Solak Castanho**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Ponta Grossa – Paraná

**Hugo Valadares Siqueira**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Ponta Grossa – Paraná

**Fernanda Cristina Corrêa**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Ponta Grossa – Paraná

complexos. Para lidar com isso, é proposta uma sintonia dos parâmetros Fuzzy utilizando uma meta-heurística evolutiva chamada algoritmo genético. O algoritmo genético é um método probabilístico, e será utilizado na otimização das regras de inferência e funções de pertinência do controlador Fuzzy, retirando o empirismo deste. Sabendo-se do atual grande crescimento dos veículos elétricos, um grande desafio se apresenta: a autonomia das baterias entre uma carga e outra. O presente trabalho traz a implementação de um controlador Fuzzy sintonizado por algoritmo genético aplicado em um sistema de armazenamento de energia baseado em bateria e supercapacitor. Percebe-se a crucial atuação do genético e conforme melhor sintonizado o controlador, maior a economia do estado de carga da bateria.

**PALAVRAS-CHAVE:** controle fuzzy; algoritmo genético; sistema de armazenamento de energia; veículos elétricos.

**ABSTRACT:** In industrial control systems it is very common PID (Proportional Integral Derivative) controller systems, due to the easy implementation, maintenance and low cost, but it has always wanted more robustness and better response time. The Fuzzy logic comes to allow no quantified states can be also evaluated by control devices, so that can be made an interpretation of ambiguous and imprecise

**RESUMO:** Em sistemas de controles industriais é muito comum o uso de controladores PID (Proporcional Integral Derivativo), devido à facilidade de implementação, manutenção e baixo custo, porém, sempre se anseia por mais robustez e melhor tempo de resposta. A lógica Fuzzy vem com o intuito de permitir que estados não quantificáveis possam também ser avaliados por dispositivos de controle, podendo ser feita interpretação de expressões ambíguas e imprecisas, e relacionar o conhecimento humano de um especialista as reações de uma máquina por meio de um conjunto de regras. Esses conjuntos de regras baseadas em condicionais se-então, são difíceis de serem examinadas perfeitamente em sistemas mais

expressions, and to relate the specialist human knowledge with the machines reactions by a rule structure. These rule structure based on if-then conditional, are hard to be perfectly examined in systems that are more complex. To deal with that, it is proposed a tuning of the fuzzy parameters using an evolutionary meta-heuristic called genetic algorithm. The genetic algorithm is a probabilistic method, and will be used on the optimization of the inference rules and pertinence functions of the fuzzy controller, removing its empiricism. Knowing the recent huge developing of the electrics vehicles, a great challenge is shown: the autonomy of the battery bank between a charge and other. This paper brings the implementation of a fuzzy controller tuned by a genetic algorithm applied to a battery and supercapacitor based energy storage system. It has seen the crucial actuation of the genetic algorithm and as better the controller is tuned, greater is the economy of the battery charge state.

**KEYWORDS:** Fuzzy control; Genetic Algorithm; energy storage system; electric vehicles.

## 1 | INTRODUÇÃO

Sabendo-se da expansão do mercado de veículos elétricos (VEs) e veículos elétricos híbridos (VEH) dos últimos anos, vários desafios são levantados para a engenharia, sendo um deles a autonomia da bateria. A autonomia é um dos mais importantes fatores que pode levar o veículo elétrico ao sucesso ou ao fracasso, pois está ligada diretamente com o rendimento e custo-benefício da transição combustão-elétrico, e, com o conhecimento disso, empresas investem fortemente nessa área almejando a máxima eficiência.

Uma opção para melhorar a gestão da bateria é associar um supercapacitor que, segundo Eckert et al (2017) irá fornecer ou receber picos de potência, obtendo benefícios como reduzir estresse na bateria, custo e tamanho, e aumentar a sua vida útil. Possuindo então duas fontes de energia, a gestão do uso da energia torna-se além de mais eficiente, mais complexa.

Para este trabalho é feito uma simulação de um sistema de armazenamento de energia, baseado em supercapacitor e bateria, utilizando conversores CC-CC e um controlador Fuzzy, que, conforme Koshiyama et al (2013), se mostra cada vez mais uma alternativa viável para manipular sistemas complexos. Conversores CC-CC são sistemas amplamente utilizados formados por semicondutores de potência e elementos passivos (indutores e capacitores) que controlam o fluxo de potência de uma fonte de entrada para uma fonte de saída, como explica muito bem Barbi e Martins (2000).

Desta forma, deseja-se, por meio da comparação de testes no sistema de armazenamento sem controle algum e testes com controle Fuzzy empírico, provar a eficiência da otimização por algoritmo genético do controlador Fuzzy no sistema de armazenamento.

A lógica Fuzzy foi criada pela necessidade de um método capaz de expressar de uma maneira sistemática quantidades imprecisas ou mal definidas, como dito por Shaw e Simões (1999). Em vez de utilizar modelos estritamente matemáticos, os controladores fuzzy podem ser investidos com o conhecimento experimental de operadores humanos treinados, sendo a ação de controle sempre consistente. Ela também pode ser útil em tarefas de tomadas de decisão, onde as variáveis linguísticas não são definidas em termos exatos (Shaw e Simões, 1999). Diz-se ainda que a lógica fuzzy é uma lógica multivalente, pois possui graduação. Uma lógica binária limitaria ao verdadeiro e falso, preto ou branco. O objetivo da lógica fuzzy é de manipular graus de verdade, níveis de cinza, e assim, fazer com que computadores possam raciocinar conforme humanos. A manipulação dos níveis é feito com o que é chamado de funções de pertinência, e a lógica baseada em regras se-então.

Neste trabalho a lógica Fuzzy é utilizada no controle do sistema de armazenamento de energia objetivando controlar o momento mais adequado para utilizar a energia provida pela bateria, e pelo supercapacitor. Por meio de testes empíricos, um especialista avaliaria como gerir as funções de pertinência e regras lógicas de forma que possa obter o melhor desempenho do controlador, tornando o sistema mais eficaz. Porém, neste trabalho é proposto que, tomando como base um princípio empírico da análise humana do fuzzy, a definição exata das regras e funções sejam otimizadas ao seu máximo utilizando um algoritmo meta-heurístico, assim como fez Leite (2009).

Heurísticas de otimizações vêm sendo muito utilizadas em sistemas complexos, principalmente em técnicas de controle moderno. Sua forma de busca pelo ótimo se dá por aproximações avaliadas. O método utilizado neste trabalho é uma heurística bio-inspirada chamada algoritmo genético (AG). O algoritmo genético, datado do início dos anos 70 (Holland, 1975), baseia-se na teoria evolutiva de Charles Darwin, onde aquele mais adaptado tem maiores chances de sobrevivência. Dessa forma, por meio de uma população inicial, geração selecionada de novos indivíduos filhos, obtidos por meio de crossover, e fazendo uso de mutação para maior variedade, o algoritmo faz sua busca pelo ótimo, atingindo-o com bastante robustez.

O principal objetivo é, otimizando o controlador Fuzzy por meio do AG, suprir a demanda de potência obtendo um transitório mais próximo do ideal de forma a consumir o mínimo possível do banco de baterias. O trabalho apresenta os resultados de uma metodologia semi-automatizada pelo AG e totalmente automatizada, baseada em Andrade (2014).

## 2 | METODOLOGIA

Será apresentada a metodologia aplicada no trabalho em sequência de desenvolvimento: planta, controlador, heurística.

## 2.1 Planta

Para realizar a simulação foi implementado em simulink (MATLAB) um sistema de armazenamento previamente elaborado por Pierre Clement Blaud, L.-A. Dessaint (2012), disponível na biblioteca do programa.

Neste trabalho utiliza-se um conversor Boost, que possui característica de elevador de tensão, e um conversor Buck-Boost, que pode ser utilizado tanto como abaixador como elevador de tensão, sendo este comportamento definido pelo valor da razão cíclica da frequência de chaveamento.

O conversor Boost é usado para a bateria, pois esta, atuando como fonte de tensão de entrada, exige-se elevação de tensão na saída.

O conversor Buck-Boost é então utilizado para o supercapacitor, pois atuando como elevador ele o descarrega, e como abaixador o carrega. Ou seja, neste caso, não será considerado o carregamento da bateria, somente descarga.

## 2.2 Controlador Fuzzy

Para configurar o controlador fuzzy baseou-se no trabalho feito por Trudes et al (2017), onde almejando controlar também um sistema de armazenamento, os autores montam um fuzzy empiricamente. Neste trabalho são apresentadas duas propostas: manter as regras relativas ao supercapacitor partindo do trabalho empírico e automatizar somente a busca pelas regras da bateria, como forma de ganho de processamento; e utilizar o algoritmo genético para buscar ambas saídas.

A primeira proposta é feita pois tratando pelo genético apenas uma das regras diminui consideravelmente o número de variáveis, e então é possível analisar o custo-benefício de se tratar todas as variáveis do problema.

Para a segunda proposta, como apenas as regras serão tratadas diferentes, otimiza-se diminuindo o espaço de busca das funções de pertinência tendo como base os resultados da primeira proposta.

Foram inseridas três variáveis de entrada: Potência Requerida, Derivada da Potência Requerida, Tensão do Supercapacitor. A primeira refere-se a curva da potência solicitada do conjunto de armazenamento, a segunda prevê o comportamento da curva, e a última tem por objetivo controlar a tensão do supercapacitor para não saturar. As variáveis de saída são: potência exigida do supercapacitor e potência exigida da bateria. O método de defuzzificação empregado foi centroide. Na figura 1 visualiza-se as variáveis de entrada, de saída e o método de defuzzificação empregado.

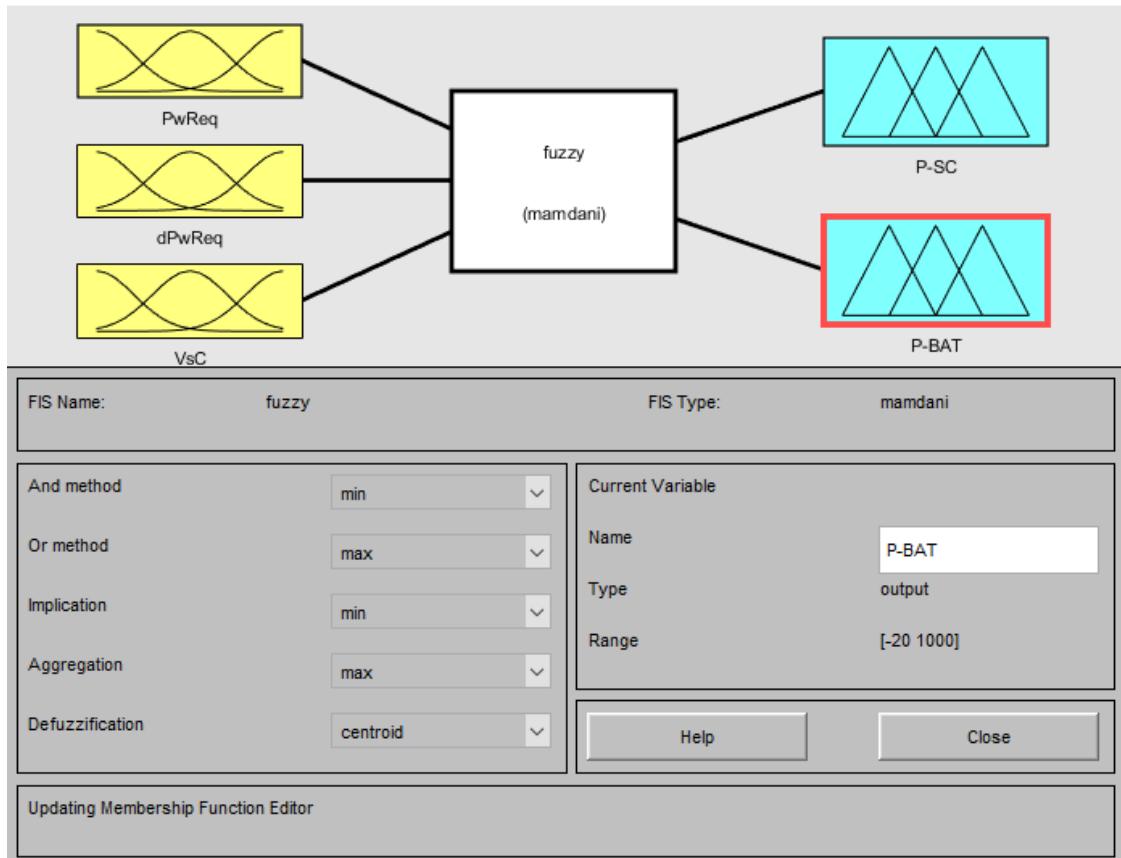


Figura 1 – Controlador Fuzzy

Fonte: (Autor, 2018)

Dentro da primeira variável, Potência Requerida, são dispostos em sequência 7 funções de pertinência do tipo gaussiana: Potência Super Baixa (PSB), Potência Baixa (PB), Potência Pouco Baixa (PPB), Potência Média (PM), Potência Pouco Alta (PPA), Potência Alta (PA), Potência Super Alta (PSA). A figura 2 mostra uma possibilidade de disposição.

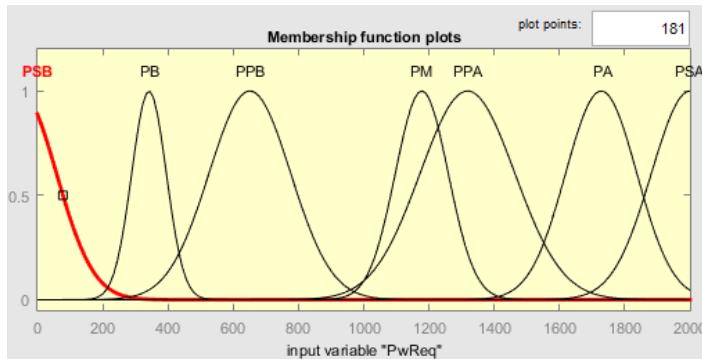


Figura 2 – Funções de pertinência da Potência Requerida

Fonte: (Autor, 2018)

Na segunda e na terceira variável de entrada, utilizaram-se três triangulares entrelaçadas, de forma que o centro de uma indica o zero da mais próxima. As funções de pertinência da derivada da Potência Requerida são em sequência: Negativo, Zero,

Positivo; e as funções para o controle de tensão do capacitor: Baixo, Médio, Alto.

As variáveis de saída, Potência Requerida do Supercapacitor e Potência Requerida da Bateria, possuem respectivamente 8 e 7 funções de pertinência, sendo para a segunda: Potência Super Baixa (PSB), Potência Baixa (PB), Potência Pouco Baixa (PPB), Potência Média (PM), Potência Pouco Alta (PPA), Potência Alta (PA), Potência Super Alta (PSA). Para a primeira, acrescenta-se uma função de pertinência no início da sequência na região do negativo, chamada N. A figura 3 apresenta um exemplo das saídas.

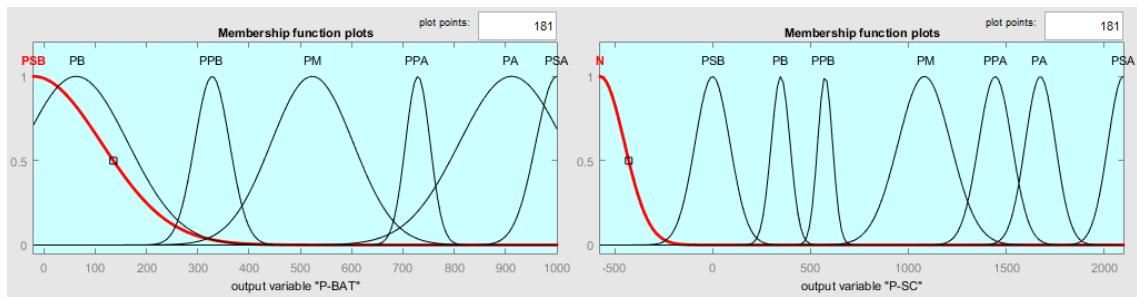


Figura 3 – Funções de pertinência de saída

Fonte: (Autor, 2018)

As funções de pertinência têm seus parâmetros como variáveis a serem otimizados pelo AG, totalizando 49 variáveis. Dessa forma, elas não são fixas, elas terão um grau de liberdade para moverem seu centro ou ponto de zero dentro de um limite, aproximando-se umas das outras. Tanto para a entrada da potência requerida como para as potências requeridas de saída, foram escolhidas funções de pertinência do tipo gaussiana, pois esta possui uma transição suavizada, evitando picos. As funções triangulares foram entrelaçadas entre si e utilizadas por simplificação, pois dessa forma transportam-se menos variáveis ao AG, ganhando em tempo de processamento (Andrade, 2014).

Para obter as regras de inferência, todas as variáveis linguísticas de entrada têm suas funções combinadas entre si de forma que toda entrada possível possa ser avaliada. São sete funções para a primeira, três para a segunda, três para a terceira, totalizando 63 possibilidades de entrada, ou seja, 63 regras. Como são duas saídas, onde a primeira há 8 funções, e a segunda 7, as possibilidades de combinações possíveis até encontrar a regra ótima seriam gigantescas.

Desta forma, neste trabalho foi proposto inicialmente, tratar como variável somente a regra que definiria a saída da bateria, e assim, fixando a saída em um valor próximo do definido no trabalho de Trudes et al (2017) onde um especialista encontrou a sua melhor possibilidade.

Na segunda proposta uma simulação é feita incluindo a saída do supercapacitor como variável, porém para isso mais 63 variáveis foram adicionadas ao problema, o que totalizou 175 variáveis.

O Fuzzy foi implementado via código utilizando bibliotecas do MATLAB como proposto por Andrade (2014), onde um vetor, que será o cromossomo a ser trabalhado no AG, possuirá seus parâmetros Fuzzy como variáveis. Estas variáveis serão geradas aleatoriamente por meio da definição de limites de atuação, seu universo de discurso.

### 2.3 Algoritmo Genético

O algoritmo genético tenta replicar a evolução natural darwinista, e para isso, cada candidato a resposta de um problema é um indivíduo que possui um cromossomo - um vetor com suas características - e um fenótipo, que é seu valor de fitness. Quanto maior o valor de fitness, mais apto está o indivíduo.

O processo de otimização parte de uma população inicial aleatória de candidatos a resposta. Todos esses indivíduos são então avaliados e selecionados para o crossover, o processo relativo ao cruzamento. Para o crossover, dois indivíduos pais são selecionados, e - por meio de métodos como, por exemplo, Crossover de Ponto, Crossover Binário ou Crossover SBX - têm suas características (seus genes) recombinadas.

Ocasionalmente, ocorre a mutação, que é a alteração de um gene aleatoriamente. Isto é importante para obter informações não contidas nos genes da geração atual. Esse processo todo é repetido até que um critério de parada seja atendido, seja ele número de gerações, tempo de execução, ou fitness atingido. Um diagrama simplificado desse processo é apresentado na figura 4.

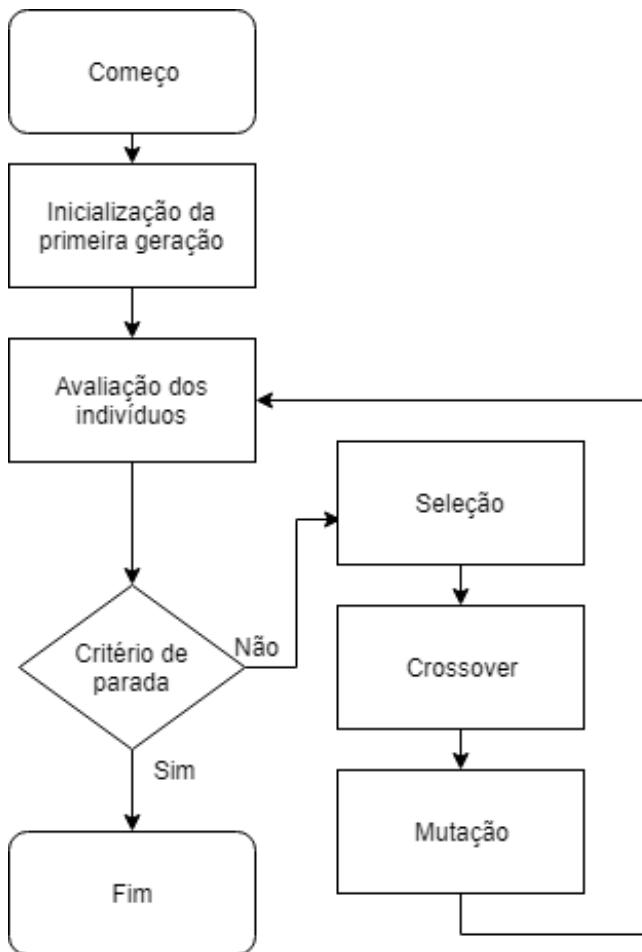


Figura 4 – Diagrama do algoritmo genético

Fonte: (Autor, 2018)

Após testes, definiram-se as configurações básicas do algoritmo genético sendo: indivíduos com representação por um vetor de números reais e inteiros, a obtenção do fitness feita pela Integral do Erro Absoluto, a seleção de indivíduos baseada no método do torneio, recombinação por crossover, e mutação.

A representação dos indivíduos foi feita por números reais até onde se diz respeito aos parâmetros das funções de pertinência do Fuzzy, e em sequência, quando são definidos os valores referentes às regras, limita-se a apenas números inteiros.

Na avaliação usou-se a Integral do Erro Absoluto apresentada na equação 1, comumente utilizada em controle PID, que é a integral do valor absoluto de sinal de erro no tempo, ou seja, o equivalente a soma das áreas acima e abaixo do valor de referência. Utilizou-se então o transitório de saída do controlador Fuzzy em um período de 10 segundos como função objetivo, e a referência utilizou o transitório de potência requerida de entrada. O transitório da potência requerida do sistema de armazenamento tratada em todas as simulações é apresentado na figura 5 e representa um transitório ideal, sem oscilações. Deseja-se com o controlador Fuzzy obter a saída mais próxima dessa.

$$I(k) = \left| \sum_{k=2}^z \frac{erro(k) + erro(k-1)}{2} * (tempo(k) - tempo(k-1)) \right| \quad (1)$$

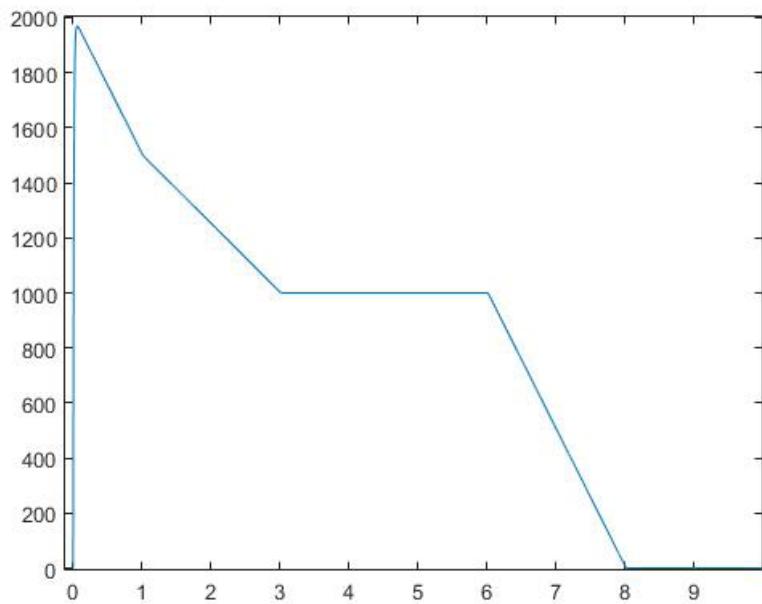


Figura 5 – Potência demandada (Potência x Tempo)

Fonte: (Autor, 2018)

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, foi realizada a simulação do sistema de armazenamento projetado por Pierre Clement Blaud e L.-A. Dessaïnt (2012) durante 60 segundos, a fim de obter uma visualização maior dos efeitos e posteriormente em nível de comparação.

Em sequência, simulando a primeira proposta, com duração de 37,25 horas, foram obtidos os resultados que seguem na figura 6. Os gráficos acima na figura representam fitness pelo número da geração, sendo o gráfico da esquerda o melhor fitness geral no eixo das ordenadas. Abaixo, é apresentado o transitório de saída do controlador. Analisando os resultados percebe-se que o controle não é eficiente ao lidar com a transição de 1000 W a 0 W, bem como mantê-la em zero.

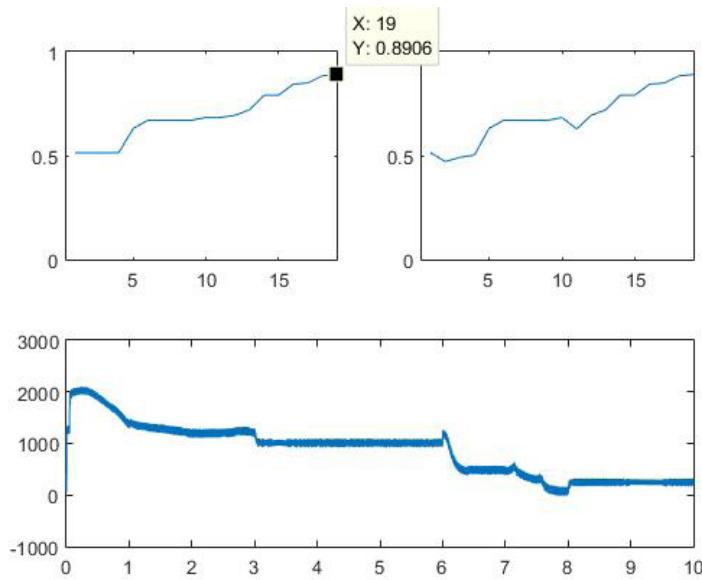


Figura 6 – Resultados do AG para primeira proposta

Fonte: (Autor, 2018)

A segunda proposta levou cerca de 100 horas de simulação, sendo parada por convergir na geração 32. Na figura 7 apresentam-se os resultados obtidos. Percebe-se melhoria em relação à primeira proposta quando estabiliza em 0 W, porém ainda falta eficiência ao ir de 1000 a 0 W. É decisivo que, para diminuir o tempo de simulação, foi restringido o range das variáveis no AG em valores próximos aos obtidos na primeira proposta, sendo limitador na busca de um resultado perfeito.

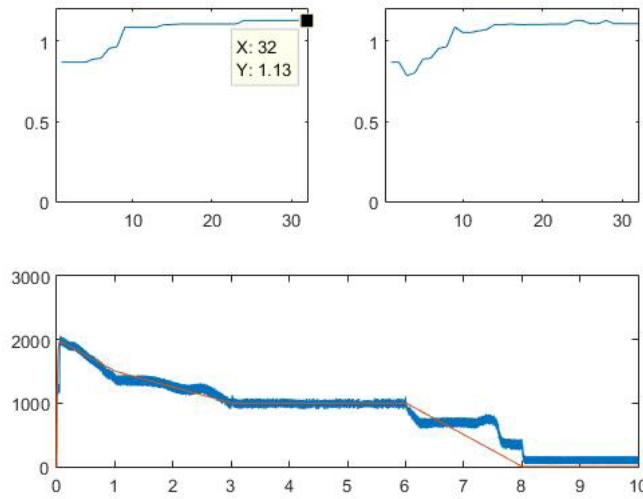


Figura 7 – Resultados do AG para segunda proposta

Fonte: (Autor, 2018)

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos relacionando o consumo percentual em 60 segundos de simulação, e o tempo de execução do AG para obter o controlador otimizado. Na figura 8 é comparado cada consumo, percebendo que em longo prazo a

economia torna-se ainda maior. No eixo das ordenadas é dado em percentual o estado de carga da bateria, e no eixo das abscissas é dado o tempo em segundos.

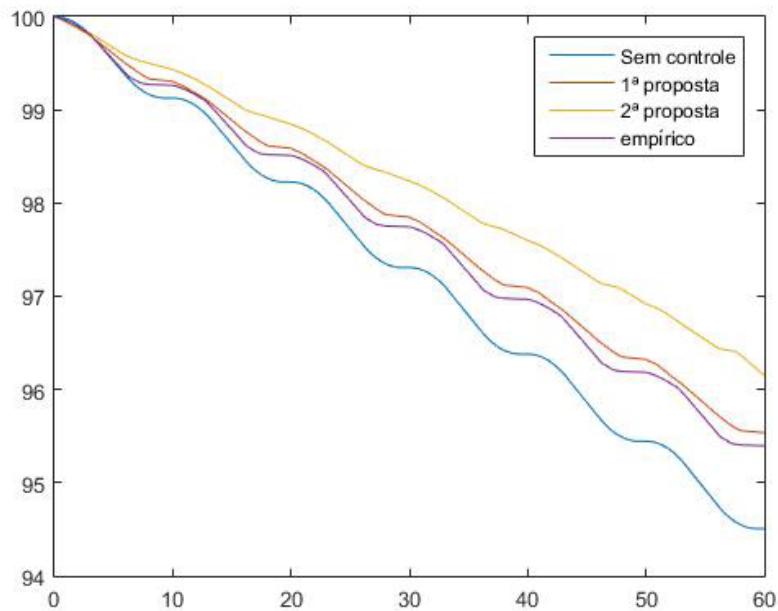


Figura 8 – Comparação de consumo

Fonte: (Autor, 2018)

Metodologia	Consumo Percentual (em 60s)	Tempo de execução AG
Sem controle	5,49%	0
Primeira proposta	4,46%	1d12h
Segunda proposta	3,85%	4d7h

Tabela 1 – Comparação de metodologia

Em 60 segundos de simulação, o sistema não controlado apresentou um consumo de 5,49%. Para o mesmo período de simulação, um sistema controlado com um *tuning* de fuzzy que demorou cerca de 4 dias e 7 horas de simulação, apresentou uma melhora de 1,64%, além de um consumo sem tanta oscilação, o que indica maior estabilidade. A longo prazo, linearizando as equações, no mesmo período em que, para a proposta sem controle, a planta consumiria totalmente a sua bateria, para a segunda proposta restaria ainda 29,86%, o que significa 42,55% mais autonomia ao sistema.

O computador utilizado para realizar as simulações possui um processador AMD3 x64 Phenom II x4 e 8 GB de RAM.

## 4 | CONCLUSÕES

Aperfeiçoar o sistema de armazenamento de um veículo elétrico é um desafio interessante, já que isto está diretamente atrelado à autonomia. Para conseguir melhor

eficiência é utilizado um sistema com bateria e supercapacitor, porém, ainda assim, é necessário um controle para melhor aproveitamento desse conjunto.

Adicionar um controlador ao sistema de armazenamento melhora bastante as respostas obtidas, e o controlador Fuzzy provou-se uma ótima alternativa para lidar com a planta em questão. Para sintonizar um controlador Fuzzy, levando em conta o conhecimento do especialista a tratar, tomam-se semanas de trabalhos e testes. Por isso, é proposto um algoritmo otimizar este processo.

Dentro das propostas, o algoritmo executado trabalhou como esperado, mostrando que a otimização é efetiva e pode ir ainda além. Percebe-se que mesmo automatizando o processo, ainda é necessário um conhecimento prévio do problema a ser tratado e da forma a se projetar o Fuzzy. Nesse sentido, o presente trabalho consegue apresentar o benefício de ter um conhecimento prévio de um especialista, mas também o quanto não se deve manter engessado a isso, visto as respostas finais: o controlador totalmente tratado pelo genético melhorou consideravelmente a economia.

O algoritmo genético trabalhado é uma heurística já consolidada e apresenta coesão e solidez nos resultados, porém demonstra lentidão, tornando muitas vezes custosa a obtenção de resultados melhores. Outras propostas mais modernas podem ser trabalhadas, como o PSO (Particle Swarm Optimization), que apresenta na maioria dos casos menor custo computacional (Hassan et al, 2004).

## AGRADECIMENTOS

Agradeço como bolsista da agência de fomento PIBIC/UTFPR todos os recursos e a oportunidade provida. Agradeço a minha orientadora pela oportunidade, atenção e suporte, bem como a UTFPR e o Departamento de Eletrônica pela disponibilização de espaço e material.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, J. F. B. de. **Sintonia de controlador fuzzy por algoritmo genético em sistema de nível de líquidos**. [S.I.], 2014.

BARBI, I.; MARTINS, D. C. **Eletrônica de Potência: Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**. [S.I.]: Ed. dos autores, 2000.

ECKERT, J. J. et al. **Energy storage and control optimization for an electric vehicle**. International Journal of Energy Research, Wiley Online Library, 2017.

HASSAN, R.; COHANIM, B.; WECK, O. de. **A comparison of particle swarm optimization and the genetic algorithm**. [S.I.], 2004.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. 1st. ed. [S.I.]: MIT Press, 1975.

KOSHUYAMA, A. S.; VELLASCO, M. M.; TANSCHEIT, R. **Gpf-control: Um modelo fuzzy**.

**genético para problemas de controle.** Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics, v. 1, p. 1–6, 2013.

**LEITE, L. d. C. M. Geração e Simplificação da Base de Conhecimento de um Sistema Híbrido Fuzzy-Genético.** [S.I.], 2009.

SHAW, I. S.; SIMÕES, M. G. **Controle e modelagem Fuzzy.** 1st. ed. [S.I.]: EDITORA EDGARD BLÜCHER LTDA, 1999.

TRUDES, G. P. et al. **Aplicação da lógica fuzzy no gerenciamento de sistemas de armazenamento de energia do veículo elétrico.** 13º Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica, 2017, Lisboa, 13º Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica, 2017.

## CONTROLADORES ROBUSTO APLICADO A CONVERSORES CC-CC

**Luiz Otávio Limurci dos Santos**

Universidade Federal de Santa Catarina,  
Departamento das Engenharias. Blumenau -  
Santa Catarina.

**Luiz Antonio Maccari Junior**

Universidade Federal de Santa Catarina,  
Departamento das Engenharias. Blumenau -  
Santa Catarina.

They are switching regulator circuits. The models of the converters are based on state-space and transfer function, which allows the implementation of different control techniques. The simulation results are also compared to theoretical values in order to validate this work.

**KEYWORDS:** DC-DC Converters, Buck, Boost, System Modeling.

**RESUMO:** No presente trabalho foi realizado o projeto de conversores CC-CC, que são circuitos capazes de entregar na carga um valor de tensão contínua maior ou menor que o aplicado na entrada. O objetivo do trabalho é apresentar o dimensionamento e modelagem de conversores elevadores e abaixadores de tensão, bem como o projeto e implementação de controladores no domínio da frequência. Por fim, realizou-se testes experimentais e simulados em *software* de modo a comparar o desempenho dos controladores projetados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Conversores CC-CC, Buck, Boost, Modelagem de Sistemas.

### ROBUST CONTROLLERS APPLIED TO DC- DC CONVERTERS

**ABSTRACT:** This work presents the modeling and parameter setting of a DC-DC converter.

## 1 I INTRODUÇÃO

### 1.1 Objetivos

O projeto tem como objetivos a construção de um protótipo de conversor CC-CC multiuso para o estudo de aplicações de controle robusto. Assim como o projeto, simulação e implementação de diferentes controladores robustos aplicados a conversores.

### 1.2 Justificativa

O crescimento da demanda energética no planeta e as preocupações com o meio ambiente tornaram a utilização de fontes renováveis de geração de energia elétrica imprescindível. Com isso, fontes alternativas como a utilização de turbinas eólicas tem ganhado destaque. Uma outra tendência são veículos elétricos, empresas como a *Tesla, Inc* [19] aparecem como uma das pioneiras nesta

área, que buscam diminuir a queima de combustíveis fósseis e consequentemente a emissão de gases poluentes na atmosfera.

Uma outra alternativa na geração de energia limpa é a através de painéis fotovoltaicos que convertem a luz do sol em eletricidade. Essa energia pode ser utilizada para carregar baterias, acionar bombas hidráulicas, e até mesmo como fonte de alimentação doméstica. Nesse último caso, a tensão gerada requer um tratamento para que possa ser utilizada nas casas, respeitando os padrões definidos nas normas de distribuição de energia elétrica.

No contexto de aplicações de energia proveniente de painéis fotovoltaicos surge a necessidade da utilização de conversores CC-CC, esses são responsáveis por elevar a tensão de saída dos painéis. A partir de uma nova conversão, desta vez DC-AC, essa energia pode ser aproveitada nas residências. Uma outra aplicação são os conversores abaixadores de tensão, utilizados em fontes de aparelhos eletrônicos, como computadores e celulares. Deste modo, devido a alta demanda de aplicações em que estes circuitos são presentes se torna de interesse o estudo e obtenção de novas técnicas de controle para garantir boa regulação de tensão e rejeição de perturbação.

### 1.3 Revisão Bibliográfica

Conversores estáticos do tipo CC-CC são circuitos eletrônicos capazes de, a partir de uma determinada tensão de entrada, entregar à carga um valor diferente. Podendo este ser maior ou menor que a alimentação. Seu funcionamento é baseado na comutação de interruptores e armazenamento de energia nos componentes do sistema, indutor e capacitor, conforme [4].

Por se tratar de um tema muito discutido e desenvolvido no meio científico, existem inúmeras aplicações que envolvem esses conversores. Desde regulação da tensão gerada por turbinas eólicas, [11], painéis fotovoltaicos, [10], onde são utilizados conversores isolados por meio de um inversor e retificador de onda completa, conectados por um transformador, a fim de suportar uma maior potência de trabalho.

Uma outra área onde aparecem é a aeroespacial [12], na qual por se tratar de um ambiente inóspito faz-se necessário um equipamento com ótimo isolamento e eficiência.

Na indústria automotiva, [9] utiliza um elevador de tensão para regular a voltagem de uma bateria presente em carros, tipicamente de 12 ou 24V, de modo a utiliza-la para alimentar os circuitos internos, entre eles o compressor de ar, bomba d'água dos retrovisores. Essas cargas variam entre 120-240V AC portanto utiliza-se em conjunto ao conversor um inversor de frequências, isolados através de transformadores, para transformar corrente contínua em alternada.

Nessa mesma indústria, veículos elétricos são uma aposta para o futuro. Com isso

são propostos vários métodos para carregar as baterias como o visto em [13]. No qual é utilizada uma configuração de duplo retificador, com filtros indutivos responsáveis pela diminuição da variação de corrente. Dois transformadores, um conectado em série no circuito principal e paralelo no secundário. Garantindo um ponto de operação mais estável e eficiente para baixas cargas.

Conversores CC-CC possuem duas topologias principais: *buck* e *boost*. A primeira é capaz de abaixar a tensão de um nível CC para outro. Enquanto a segunda eleva o valor de entrada. Suas respectivas construções são dadas pelas Figuras 1 e 2.

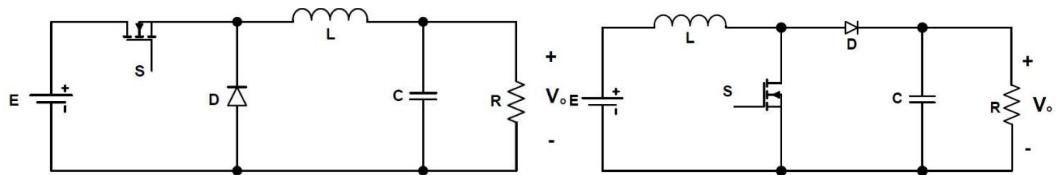


Figura 1: Circuito conversor buck.

Figura 2: Circuito conversor boost.

Nos dois casos as saídas são constantes, variam de acordo com tensão de entrada e o período em que a chave fica ativa. Deseja-se que em malha fechada o sistema seja regulado de modo a obter o controle da tensão na saída para alimentar a carga.

Tipicamente projeta-se controladores para garantir seguimento de referência com erro nulo em regime permanente, resposta rápida, pequeno sobressinal e rejeição de perturbações do tipo CC. Esses controladores podem ser calculados a partir de diferentes métodos, por exemplo, alocação de polos no espaço de estados conforme [14] e lugar das raízes no domínio da frequência [16].

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Conversor Boost

#### 2.1.1 Dimensionamento dos componentes

A partir de equações bem fundamentadas na literatura sobre conversores CC-CC,[7], pode-se determinar quais os parâmetros necessários para funcionamento adequado do circuito.

Inicialmente, calcula-se a corrente que passa pelo indutor, para determinar qual fio utilizar em sua confecção, dada por

$$i_L = \frac{V_0 \cdot I_0}{E} = \frac{P_0}{E}. \quad (1)$$

Sabendo que a potência de saída e entradas são iguais no caso ideal, definida em  $50W$ , uma tensão de entrada  $10V$  e saída  $18V$ , tem-se

$$i_L = 5,0A. \quad (2)$$

O segundo passo consiste em determinar a razão cíclica média a ser aplicada no chaveamento de forma a resultar na tensão desejada, que será:

$$D = 1 - \frac{E}{V_0} = 1 - \frac{10}{18} = 0,4444. \quad (3)$$

Pode-se então determinar a indutância que será necessária para o sistema através da expressão

$$L = \frac{V_s D}{\Delta i_L f}, \quad (4)$$

onde  $\Delta i_L$  é o *ripple* da corrente no indutor, definida em  $0,1V$ , e frequência  $15KHz$ . Sendo assim, a indutância obtida a partir de (4) é apresentada na Tabela 1.

Analogamente, pode-se determinar a capacidade utilizando a expressão

$$C = \frac{DV_0}{Rf\Delta V_0}, \quad (5)$$

onde  $\Delta V_0$  é o *ripple* de tensão na carga, definida em  $0,1V$ ,  $R$  tem resistência  $10\Omega$ , definido de modo a alcançar um valor comercial para os componentes. Assim, a partir de (5) é obtido o valor da capacidade arredondada expressa na Tabela 1.

Verificou-se que seria necessária a confecção de um indutor pela inexistência de um com a indutância necessária e que suporte a corrente requerida. Sendo assim, com um núcleo de ferrite toroidal e auxílio de um catálogo, [3], determinase a quantidade de espiras para atingir o valor da indutância. Assim, tem-se

$$N = \sqrt{\frac{L(nH)}{AL(nH)}} = 13\text{espiras}. \quad (6)$$

Onde  $AL$  é determinado a partir das dimensões do núcleo utilizado.

Por fim, os parâmetros dimensionados para os conversores são demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros conversor *boost*

Potência de Saída	Po	50W
Tensão de Saída	V <sub>o</sub>	18V
Tensão de entrada	V <sub>s</sub>	10V
Frequência de chaveamento	f	15KHz
Ripple de corrente	Δ <sub>iL</sub>	0,1
Ripple de tensão	Δ <sub>V<sub>o</sub></sub>	0,1
Resistência	R	10Ω
Capacitor	C	470μF
Indutor	L	2.5mH

### 2.1.2 Modelagem da planta

O circuito do conversor apresentado na Figura 2 possui duas etapas de operação, que se referem ao estado do transistor. Os circuitos de ambas as etapas de operação são apresentados nas Figuras 3 e 4.

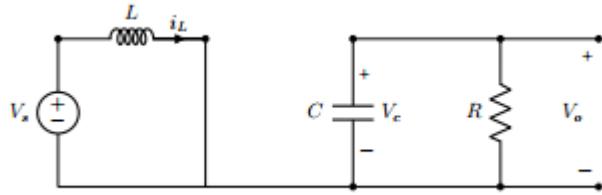


Figura 3: Conversor *boost* : transistor conduzindo

Ao observar o circuito da Figura 3, pode-se obter as equações (7) e (8).

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_s}{L}, \quad (7)$$

$$\frac{dv_c(t)}{dt} = \frac{v_c(t)}{RC}. \quad (8)$$

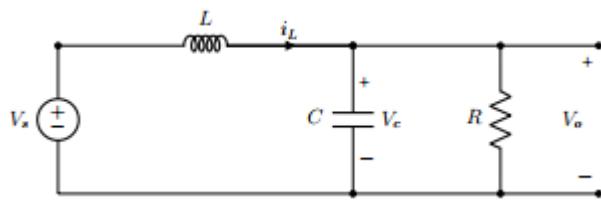


Figura 4: Conversor *boost* : transistor operando em aberto

Ao executar o mesmo procedimento para o circuito da Figura 4, obtém-se as equações (9) e (10).

$$\frac{di_L(t)}{dt} = -\frac{v_c(t)}{L} + \frac{V_s}{L}, \quad (9)$$

$$\frac{dv_c(t)}{dt} = \frac{i_L(t)}{C} - \frac{v_c(t)}{RC}. \quad (10)$$

A partir das equações (7), (8), (9) e (10) pode-se obter um modelo no espaço de estados para cada uma das etapas do circuito. A forma genérica de modelos no espaço de estados para sistemas com uma entrada e uma saída são dados por

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t)\end{aligned}$$

onde  $\mathbf{x}(t)$  corresponde ao vetor de estados,  $y(t)$  à saída do sistema e  $u(t)$  à entrada,  $\mathbf{A}$  à matriz dinâmica do sistema,  $\mathbf{B}$  ao vetor de entrada e  $\mathbf{C}$  ao vetor de saída.

Escolhe-se, então, o vetor de estados dado por

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} i_L(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix},$$

a tensão no capacitor como saída e a entrada como a tensão fornecida pela fonte ( $u(t) = Vs$ ).

Assim, o modelo no espaço de estados que descreve a etapa 1 do circuito pode ser descrito como

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_1 = [0 \ 1]. \quad (11)$$

Já a etapa 2 pode ser descrita como

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & \frac{1}{RC} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_2 = [0 \ 1]. \quad (12)$$

Até então, o conversor *boost* foi tratado como um sistema chaveado contendo dois subsistemas lineares. A partir do modelo no espaço de estados dos dois subsistemas descritos acima, encontra-se um modelo médio fazendo ponderações da etapa 1 pela razão cíclica  $d(t)$  e da etapa 2 pelo seu complemento

$(1 - d(t))$ . Tem-se

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= [A_1d(t) + A_2(1 - d(t))]x(t) + [B_1d(t) + B_2(1 - d(t))]u(t) \\ y(t) &= [C_1d(t) + C_2(1 - d(t))]x(t)\end{aligned}. \quad (13)$$

Na equação (13), pode-se observar a existência de não linearidades devido à multiplicação de variáveis. Para viabilizar o uso de técnicas de projeto de controle de sistemas lineares, será necessário obter um modelo linearizado da planta. Para isso,

a abordagem de pequenos sinais foi utilizada.

Esse método considera que o sistema (13) está operando ao redor de um ponto de equilíbrio. Assume-se, então, pequenas perturbações de forma que cada uma das variáveis possa ser decomposta em uma parte correspondente ao valor em regime permanente e uma parte à pequenas variações, conforme descrito em (14) [14].

$$\begin{aligned} x(t) &= X + \tilde{x}(t) \\ y(t) &= Y + \tilde{y}(t) \\ d(t) &= D + \tilde{d}(t) \\ u(t) &= U + \tilde{u}(t) \end{aligned} \quad (14)$$

Assumindo ainda que a tensão de entrada oriunda da fonte ( $V_s$ ) não possui variações, tem-se

$$\tilde{u}(t) = 0, \quad U = V_s. \quad (15)$$

Substituindo (14) em (15) e reordenando os termos, tem-se

$$\begin{aligned} \dot{x} + \dot{\tilde{x}}(t) &= (A_1D + A_2 - A_2D)X + (B_1D + B_2 - B_2D)E \\ &+ (A_1 - A_2)X\tilde{d}(t) + (A_1 - A_2)\tilde{x}(t)\tilde{d}(t) \\ &+ (A_1D + A_2 - A_2D)\tilde{x}(t) + (B_1 - B_2)E\tilde{d}(t) \end{aligned} \quad . \quad (16)$$

$$\begin{aligned} Y + \tilde{y}(t) &= (C_1D + C_2 - C_2D)X + (C_1D + C_2 - C_2D)\tilde{x}(t) \\ &+ (C_1 - C_2)X\tilde{d}(t) + (C_1 - C_2)\tilde{x}(t)\tilde{d}(t) \end{aligned}$$

A parcela estática (17) leva ao ponto de equilíbrio (18) e ao valor de saída (19)

$$\dot{x} = 0 = (A_1D + A_2 - A_2D)X + (B_1D + B_2 - B_2D)E, \quad (17)$$

$$X = -(A_1D + A_2 - A_2D)^{-1}(B_1D + B_2 - B_2D)E, \quad (18)$$

$$Y = (C_1D + C_2 - C_2D)X. \quad (19)$$

O modelo dinâmico será:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) &= (A_1 - A_2)X\tilde{d}(t) + (A_1 - A_2)\tilde{x}(t)\tilde{d}(t) \\ &+ (A_1D + A_2 - A_2D)\tilde{x}(t) + (B_1 - B_2)E\tilde{d}(t) \\ \tilde{y}(t) &= (C_1D + C_2 - C_2D)\tilde{x}(t) \\ &+ (C_1 - C_2)X\tilde{d}(t) + (C_1 - C_2)\tilde{x}(t)\tilde{d}(t) \end{aligned} \quad . \quad (20)$$

Esse modelo ainda não é linear devido ao produto de variáveis  $\tilde{x}(t)\tilde{d}(t)$ . Para tornar o modelo linear, sabe-se que  $C_1 = C_2$  e assume-se que o produto é suficientemente pequeno e que pode ser desprezado. Assim, obtém-se o modelo de pequenos sinais linearizado dado por

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) &= A_p\tilde{x}(t) + B_p\tilde{d}(t) \\ \tilde{y}(t) &= C_p\tilde{x}(t) \end{aligned}, \quad (21)$$

com

$$\begin{aligned} A_p &= A_1 D + A_2 D' \\ B_p &= (A_1 - A_2) X + (B_1 - B_2) E \quad , \\ C_p &= C_1 D + C_2 D' \end{aligned} \quad (22)$$

onde

$$D' = 1 - D. \quad (23)$$

Ao substituir as matrizes de cada uma das etapas em (19) e (22) tem-se que

$$X = \begin{bmatrix} i_L^* \\ v_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E}{D'^2 R} \\ \frac{E}{D'} \end{bmatrix} \quad (24)$$

e

$$A_{p1} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{D'}{L} \\ \frac{D'}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}, \quad B_{p1} = \begin{bmatrix} \frac{E}{D'E} \\ -\frac{E}{D'^2 RC} \end{bmatrix}, \quad C_{p1} = [0 \ 1]. \quad (25)$$

A partir do sistema descrito por (25) e dos valores dos componentes obtidos no item 2.1.1, pode-se obter o modelo no espaço de estados para o sistema em estudo conforme descrito abaixo

$$A_{p1} = 10^3 \cdot \begin{bmatrix} 0 & -0,1875 \\ 1,1820 & -0,2128 \end{bmatrix}, \quad B_{p1} = 10^3 \cdot \begin{bmatrix} 6,0750 \\ -6,8936 \end{bmatrix}, \quad C_{p1} = [0 \ 1]$$

### 2.1.3 Controle por Espaço de Estados

Para o projeto do controlador desse sistema serão utilizados observadores de estado, alternativas matemáticas que estimam as variáveis de estado possibilitando a realimentação dessas que não são medidas na realidade.

A presença de um observador no sistema altera seu comportamento, em específico a dinâmica do erro. Em malha fechada, os polos consistem naqueles alocados no projeto do controlador e observador. Desta forma, de acordo com o princípio da separação [15], o projeto do controlador e do observador podem ser realizados separadamente.

Inicialmente, são calculados os ganhos  $K$  de malha fechada do sistema através do *MATLAB* utilizando uma lei de controle do tipo

$$u = -K \tilde{x}. \quad (26)$$

Onde  $K$  é calculado conforme

$$K = place(A, B, [p_{mf}]). \quad (27)$$

$p_{mf}$  é escolhido de forma a garantir o tempo de assentamento e constante de amortecimento desejados para o sistema, neste caso 0,01 segundo e 1, respectivamente. São calculados da seguinte maneira

$$p_{mf} = \frac{3}{T_{assentamento}} = \frac{3}{0.01} = 300. \quad (28)$$

Para que esse seja o polo dominante do sistema, os outros dois foram determinados como 600 e 700 por possuírem dinâmica mais rápida e assim interferir pouco no assentamento desejado.

Com isso, os ganhos resultantes são

$$\mathbf{K} = [0, 2417 \ 0, 0118 \ -17, 5467].$$

Os ganhos do estimador são calculados utilizando as matrizes duais do sistema, portanto

$$\mathbf{L} = place(\mathbf{A}', \mathbf{C}', [p_o]). \quad (29)$$

Onde  $p_o$  será escolhido de forma que o estimador alcance o regime permanente de maneira muito mais rápida que a malha fechada para que as dinâmicas não influenciem uma a outra, neste caso uma acomodação 10 vezes mais rápida. Resultando num ganho  $\mathbf{L}$  com valor

$$\mathbf{L} = [8695, 5 \ 6287, 2].$$

#### 2.1.4 Controle No Domínio da Frequência

No domínio da frequência, a relação entre tensão de saída pela razão cíclica será dada pela função de transferência de malha aberta

$$\frac{V_0(s)}{D(s)} = \frac{-6893,6(s - 1042)}{s^2 + 212,8s + 2,216 \cdot 10^5} \quad (30)$$

Partindo disso, é possível realizar um novo projeto de controle de modo a atingir as mesmas especificações exigidas no espaço de estados.

Dessa forma, definindo novamente um tempo de assentamento igual a 0,01 segundo e amortecimento 1, o controlador calculado para o conversor *boost* no domínio da frequência será dado por

$$C(s) = \frac{0,007857(s + 600,7)}{s}. \quad (31)$$

Simulando ambos os controladores projetados através da ferramenta *Simulink* disponível no *MATLAB*, definindo como parâmetros do circuito os valores nominais disponíveis na Tabela 1 a tensão medida na carga e ação de controle aplicada podem ser visualizadas na Figura 5.

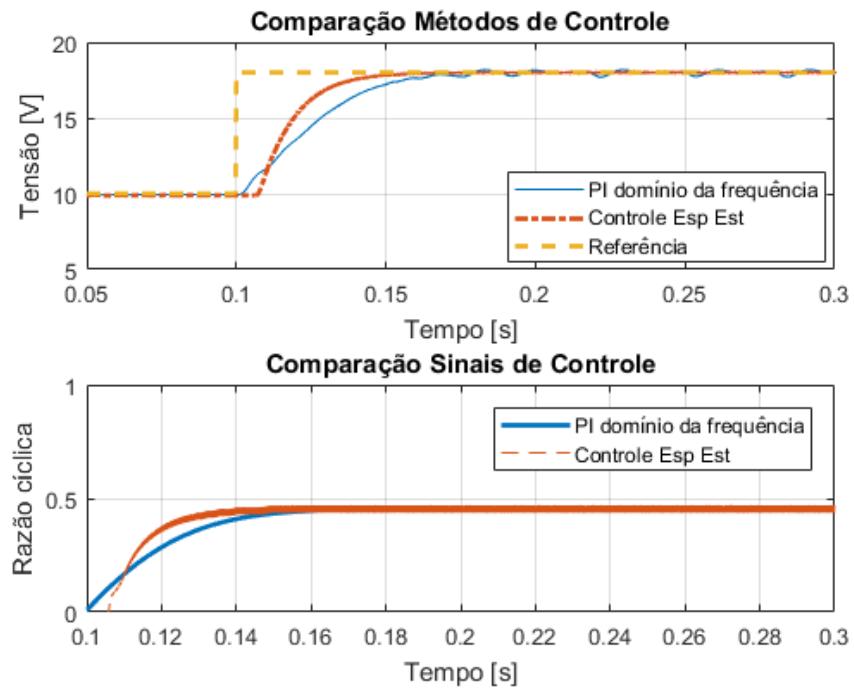


Figura 5: Circuito conversor *boost*.

Percebe-se que as técnicas de controle aplicadas garantem o seguimento de referências CC em regime permanente, mas apresentam um tempo de assentamento maior que o projetado. Isso é explicado pelas características do modelo do conversor *boost*, cuja função de transferência em malha aberta,(30), apresenta polos complexos. Nota-se também que a inexistência de um sobressinal, condizente com o amortecimento especificado.

## 2.2 Conversor *Buck*

### 2.2.1 Dimensionamento dos componentes

De maneira análoga ao que foi feito anteriormente em 2.1.1, de início será calculada a corrente no indutor dada por

$$i_L = \frac{V_o}{R}. \quad (32)$$

Definindo uma tensão de entrada  $15V$  e saída  $7.5V$ , assim como uma potência de saída  $40W$  e resistência de  $1,5\Omega$ . A corrente no indutor será

$$i_L = 5,0A. \quad (33)$$

A razão cíclica que possibilita a tensão de saída desejada em função da aplicada na entrada será

$$D = \frac{V_o}{E} = 0,5. \quad (34)$$

Determinando agora a indutância necessária do sistema, considerando novamente

o *ripple* de corrente 0,1 e frequência de chaveamento 15kHz, que será dada por

$$L = \frac{V_o(1 - D)}{\Delta_{iL}f} = 2,5mH. \quad (35)$$

Visto que o valor encontrado é próximo ao calculado em (4), o mesmo indutor previamente construído será aproveitado neste conversor. Seu valor é apresentado na Tabela 2.

E a capacidade será calculada através de

$$C = \frac{(1 - D)V_o}{8Lf^2} = 69,44\mu F. \quad (36)$$

Da mesma forma, será utilizado outro de valor comercial próximo. Este é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros conversor *buck*

Potência de Saída	P <sub>o</sub>	40W
Tensão de Saída	V <sub>o</sub>	7,5V
Tensão de entrada	V <sub>s</sub>	15V
Frequência de chaveamento	f	15KHz
Ripple de corrente	Δ <sub>iL</sub>	0,1
Ripple de tensão	Δ <sub>V<sub>o</sub></sub>	0,1
Resistência	R	1,5Ω
Capacitor	C	47μF
Indutor	L	2,5mH

### 2.2.2 Modelagem da planta

Note que o circuito do conversor apresentado na Figura 1, percebe-se que esse possui duas etapas de operação, que se referem ao estado do transistor. Os circuitos de ambas as etapas de operação são apresentados nas Figuras 6 e 7.

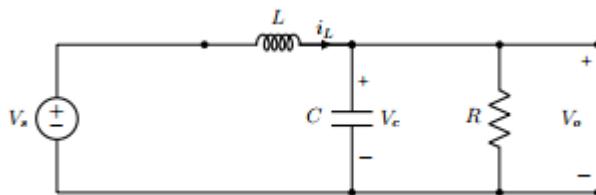


Figura 6: Conversor *buck* : transistor conduzindo

Ao observar o circuito da Figura 6, pode-se obter as equações (37) e (38).

$$\frac{di_L(t)}{dt} = -\frac{v_c(t)}{L} + \frac{V_s}{L}, \quad (37)$$

$$\frac{dv_c(t)}{dt} = \frac{i_L(t)}{C} - \frac{v_c(t)}{RC}. \quad (38)$$

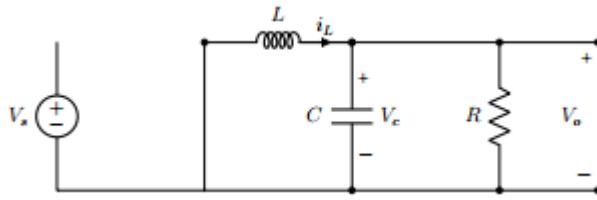


Figura 7: Conversor buck : transistor operando em aberto

Executando o mesmo procedimento para o circuito da Figura 7, obtém-se as equações (39) e (40).

$$\frac{di_L(t)}{dt} = -\frac{v_c(t)}{L}, \quad (39)$$

$$\frac{dv_c(t)}{dt} = \frac{i_L(t)}{C} - \frac{v_c(t)}{RC}. \quad (40)$$

Repetindo os mesmos passos executados em 2.1.2, o modelo em espaço de estados que descreve o circuito conversor tipo *buck* será

$$A_{p1} = 10^4 \cdot \begin{bmatrix} 0 & -0,0333 \\ 2,1277 & -1,4184 \end{bmatrix}, \quad B_{p1} = \cdot \begin{bmatrix} 5000 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_{p1} = [0 \ 1].$$

### 2.2.3 Controle Por Espaço de Estados

Com o mesmo equacionamento utilizado na seção 2.1.3 para calcular o controlador do conversor elevador de tensão, teremos para esse caso os ganhos  $K$  de malha fechada dados por

$$K = [-2,5169 \ 1,6189 \ -1,1844]$$

E ganhos do estimador de estados dados por

$$L = [160,2 \ -7684,4]$$

### 2.2.4 Controle no Domínio da Frequência

A função de transferência de malha aberta no domínio da frequência que relaciona tensão de saída pela razão cíclica será dada por

$$\frac{V_o(s)}{D(s)} = \frac{1,0638 \cdot 10^8}{(s + 1,367 \cdot 10^4)(s + 519)} \quad (41)$$

E o controlador projetado a partir da função de transferência (41) será do tipo

$$C(s) = \frac{0,094187(s + 913,6)}{s} \quad (42)$$

Simulando os controladores projetados, a tensão medida na carga e a ação de controle podem ser vistas na Figura 8. Percebe-se que os controladores são capazes de levar o sistema aos valores desejados em regime permanente.

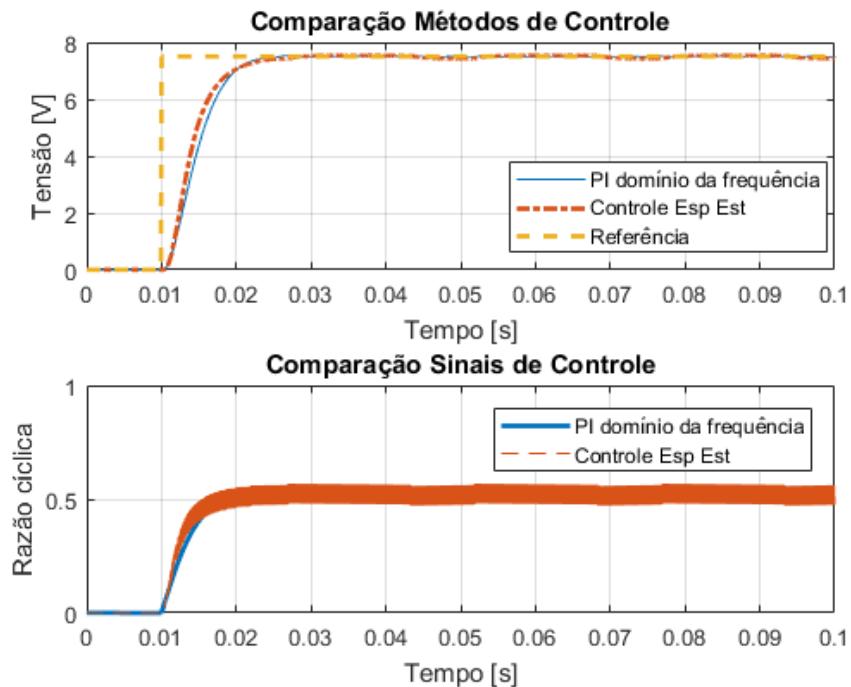


Figura 8: Circuito conversor buck.

Nota-se que as duas técnicas utilizadas conseguiram rastrear referências CC garantindo um tempo de assentamento igual a 0.01 segundo e nenhum sobressinal, que eram os requisitos de projeto.

### 3 | RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 Resultados de Malha Aberta

Com o circuito montado, fez-se um levantamento com a comparação entre as tensões de saída em função da variação da razão cíclica para os valores de entrada nominal dos conversores, 10V para o *boost* e 15V no *buck*. Os resultados obtidos estão demonstrados nas Figuras 9 e 10 respectivamente

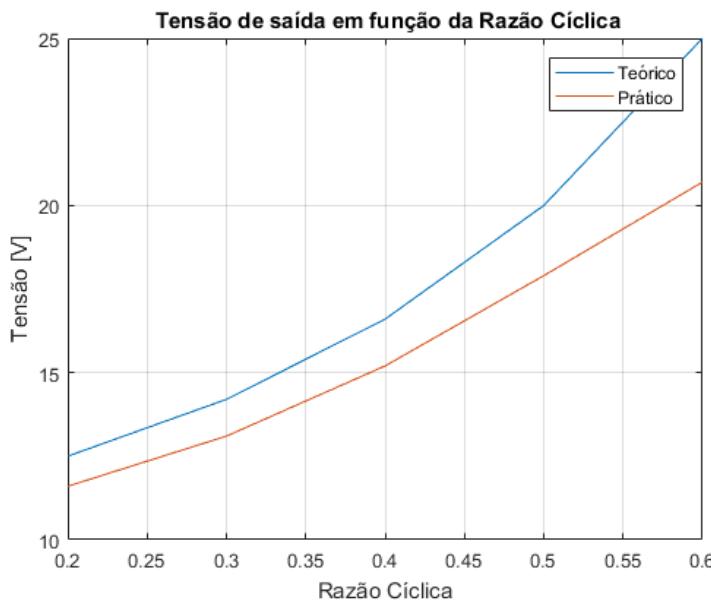


Figura 9: Circuito conversor *boost*.

Os valores teóricos foram obtidos a partir da equação de malha aberta do conversor *boost* que é dada por

$$V_o = \frac{V_s}{(1 - D)}. \quad (43)$$

Nota-se que as tensões obtidas na prática são menores que o esperado, devido as quedas de tensão nos componentes, *MOSFET* e díodo, que são tratados como ideais em teoria. Apesar disso, as duas curvas têm comportamento semelhante.

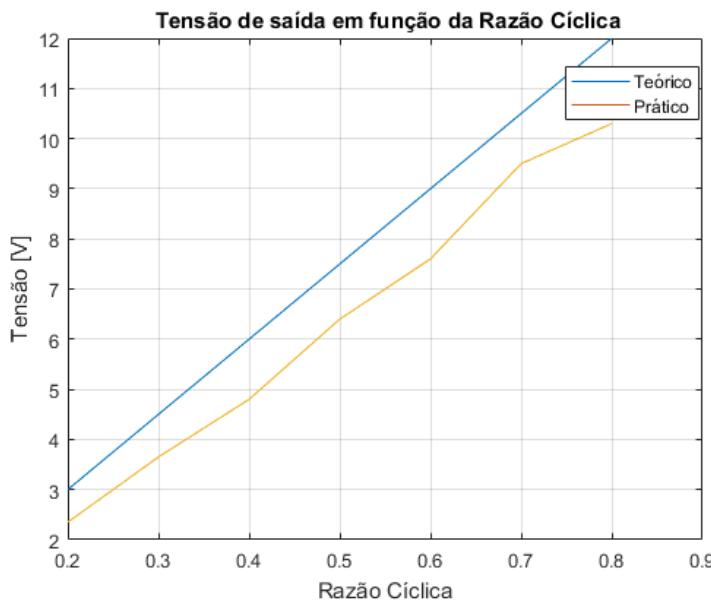


Figura 10: Circuito conversor *buck*.

A equação teórica de malha aberta do conversor *buck* é dada por

$$V_o = VsD. \quad (44)$$

Para este caso, o valor encontrado na prática está abaixo do esperado pelos mesmos motivos citados anteriormente, mas novamente apresenta comportamento semelhante.

### 3.2 Resultados de Malha Fechada

Com os controladores projetados e testados em ambiente simulado, assim como o funcionamento dos circuitos físicos validados em malha aberta, o próximo passo é o controle desses em malha fechada, de modo a cumprir com os objetivos do projeto. Para isso, será utilizado um *Arduino UNO* como atuador do sistema. Esse é digital, portanto requer que os controladores projetados anteriormente sejam discretizados. A partir de todas as alterações necessárias, aplicando o controle aos circuitos, os resultados podem ser visualizados nas Figuras 11 e 12.

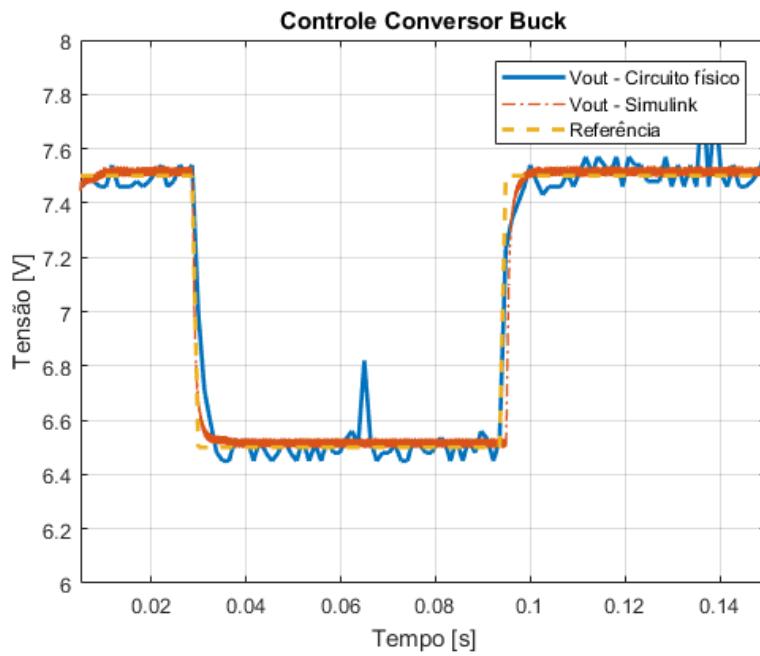


Figura 11: malha fechada conversor buck.

É possível perceber que em regime permanente o controlador projetado tem sucesso no seguimento de referência do tipo degrau com tempo de assentamento que satisfaz a especificação do projeto. Na Figura 11 foram definidas como referência níveis CC de 7.5 e 6.5V. Nota-se também uma grande semelhança entre os transitórios relativos ao sistema simulado e físico, atestando assim o sucesso do controle projetado para o sistema abaixador de tensão.

Da mesma forma, aplicando o controle no circuito elevador de tensão pode-se avaliar que esse teve sucesso em rastrear mudanças de referência do tipo degrau. Os níveis CC aplicados foram 18 e 17V e os resultados obtidos estão demonstrados

na Figura 12.

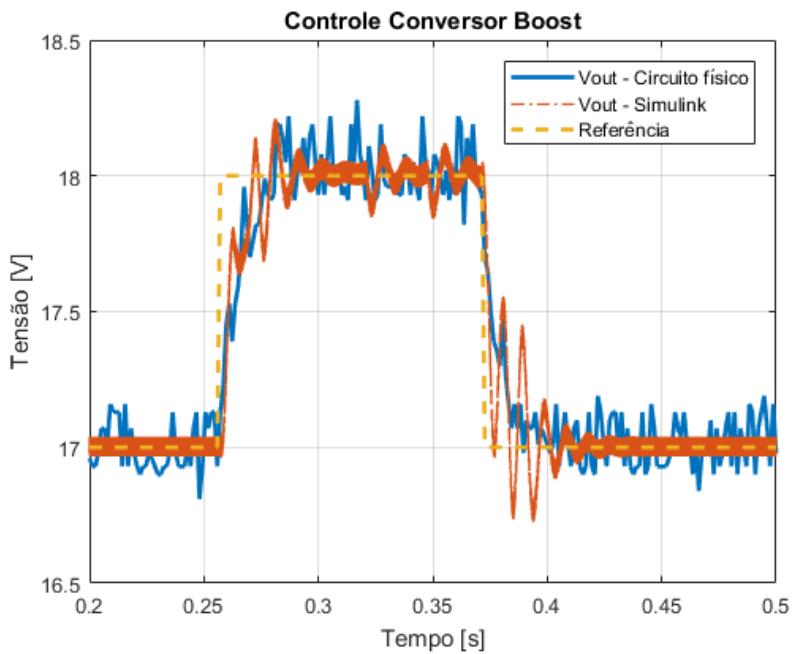


Figura 12: Malha fechada conversor *boost*.

Novamente percebe-se uma semelhança entre os regimes transitentes e permanente das simulações e do protótipo construído. Além disso, nota-se que o controlador implementado satisfaz a requisição do projeto no que diz respeito ao seguimento de referência para o caso nominal.

## 4 | CONCLUSÃO

### 4.1 Considerações Finais

Como citado na introdução e revisão bibliográfica, conversores de corrente contínua possuem aplicações diversas e são muito explorados. Sendo assim, através de técnicas de análise de circuitos juntamente com equações disponíveis na literatura, é possível o dimensionamento dos conversores elevador e abaixador de tensão de acordo com as especificações desejadas.

Neste tópico, existem algumas técnicas para o projeto de controladores, alocação de polos na frequência e por espaço de estados são dois exemplos.

Realizando os cálculos, e posteriormente simulações demonstrados durante o relatório, pode-se aplicar esse mesmo controle de modo a averiguar seu desempenho em um protótipo implementado em laboratório. Os controladores obtidos a partir da análise no domínio da frequência se mostraram satisfatórios ao atender o que foi requisitado como saída do sistema, portanto, comprehende-se que tal projeto tenha sido um sucesso.

## REFERÊNCIAS

- ABDELKRIM, T. et al. Closed loop for regulation of AC voltages of cascaded PV generator-boost converter-five levels NPC inverter. **2017 18th International Conference On Sciences And Techniques Of Automatic Control And Computer Engineering (sta)**, [s.l.], p.461- 465, dez. 2017. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/sta.2017.8314870>.
- BARBI, Ivo. **Eletro^nica de pot^ncia**. 7. ed. Florianópolis: Ed. do Autor, 2012. vi, 509 p.
- Catalogo de ferrite Thornton**, disponível em <http://www.thornton.com.br/pdf/CATALOGO%20THORNTON.pdf>. Acessado em 20/10/2017.
- CHRYSSIS, G. (1989). *High-frequency switching power supplies*. New York: McGraw-Hill.
- Datasheet mosfet IRF3710**, disponível em <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf3710.pdf>. Acessado em 15/02/2018.
- GANAPATI, Vidya; STEINER, Myles A.; YABLONOVITCH, Eli. **The voltage boost enabled by luminescence extraction in solar cells**. 2017. Ieee 44th Photovoltaic Specialist Conference (pvsc), [s.l.], p.1- 3, jun. 2017. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/pvsc.2017.8366823>.
- HART, Daniel W. **Eletro^nica de pot^ncia: an^lise e projetos e circuitos**. Porto Alegre: AMGH, 2012. xvi, 478 p.
- HWU,K.I et al. **Simple modeling of DC-DC converter**. 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering. 2011
- ISURIN,A;COOK,A. **Step-up DC-DC converter for automotive application**. 2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe). 2016.
- JUNG,Felipe,et al. **DC-DC converter for photovoltaic systems**. 2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications (IN- DUSCON). 2016.
- KAVOUSI, Ayoub et al. **Application of Boost Converter to Increase the Speed Range of Dual-stator Winding Induction Generator in Wind Power Systems**. Ieee Transactions On Power Electronics, [s.l.], p.1-1, 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- KIRAN,P.R et al. **220W DC-DC converter for aerospace applications**. 2014 International Conference on Advances in Electronics Computers and Communications. 2014.
- LI,S;NAM,K. **Design and analysis of a DC-DC converter for EVs battery charger**. Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference. 2012.
- MACCARI JUNIOR, Luiz Antonio. **Projeto e validação experimental de um controlador robusto H2 aplicado a conversores boost**. 2011. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.
- OGATA, K. **Modern control engineering**. 4. ed. Upper Saddle River, NJ : New Delhi: Prentice Hall, 2002.
- SHARMA,K;PALWALIA,D.K. **Design of digital PID controller for voltage mode control of DC-DC converters**. 2017 International conference on Microelectronic Devices, Circuits and Systems (ICMDCS).2017.
- Tabela de fios AWG**, disponível em: <http://www.novacon.com.br/audiotabawg.htm>. Acessado em 05/11/2017.

TADDY,Emmanuel;LAZARESCU,Vasile. **Modeling and simulation of buck dc-dc converter with capacitor Equivalent Series Resistance**. Proceedings of the 2014 6th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI).2014.

**Tesla, Inc** , disponível em <https://www.tesla.com/>. Acessado em 25/08/2018

## PROPOSTA DE PLATAFORMA PARA ESTUDO DE MOTOR A RELUTÂNCIA VARIÁVEL 8/6

**Marcos José de Moraes Filho**

Universidade Federal de Uberlândia (UFU),  
Faculdade de Engenharia elétrica  
Uberlândia - Minas Gerais

**Luciano Coutinho Gomes**

Universidade Federal de Uberlândia (UFU),  
Faculdade de Engenharia elétrica  
Uberlândia - Minas Gerais

**Darizon Alves de Andrade**

Universidade Federal de Uberlândia (UFU),  
Faculdade de Engenharia elétrica  
Uberlândia - Minas Gerais

**Josemar Alves dos Santos Junior**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia de Goiás (IFG)  
Itumbiara - Goiás

**Wanberton Gabriel de Souza**

Universidade Federal de Uberlândia (UFU),  
Faculdade de Engenharia elétrica  
Uberlândia - Minas Gerais

**Cássio Alves de Oliveira**

Universidade Federal de Uberlândia (UFU),  
Faculdade de Engenharia elétrica  
Uberlândia - Minas Gerais

elemento principal um conversor *half-bridge*, e o sistema de controle é fundamentado em microcontrolador, isoladores, transdutores de corrente, transdutores de tensão e encoder. A proposta é fazer com que todos os elementos citados anteriormente trabalhem de forma integrada a fim criar uma plataforma robusta, é que além do acionamento da máquina em questão propicie o estudo de diversas grandezas e aspectos da mesma, tal como o perfil de indutância, o perfil de conjugado, a potência, o efeito da sobreposição de fases, a imposição de conjugado, dentre outros.

**PALAVRAS-CHAVE:** Acionamento, conversor, DSP, motor, máquina a relutância variável 8/6.

**ABSTRACT:** In this article is presented the implementation of a drive platform and study for a switched reluctance machine 8/6, being operated as a motor. The drive system has as its main element a half-bridge converter, and the control system is based on microcontroller, insulators, current transducers, voltage transducers and encoder. The proposal is to make all the aforementioned elements work seamlessly to create a robust platform, is that in addition to drive the machine in question would encourage the study of various magnitudes and aspects of it, such as inductance profile, conjugate profile, the power, the effect of overlapping phases, the torque control, among

**RESUMO:** Neste artigo é apresentada a implementação de uma plataforma de acionamento e estudo para uma máquina a relutância variável 8/6, sendo acionada como motor. O sistema de acionamento tem como

others.

**KEYWORDS:** Converter, drive, DSP, motor, switched reluctance machine 8/6.

## 1 | INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas devido ao grande avanço de diversas áreas da engenharia elétrica, tais como a eletrônica de potência, sistemas de controle, microcontroladores, sistemas de sensoriamento, dentre outras; muitas máquinas não convencionais vêm tornando-se cada vez mais acessíveis, e dentre estas máquinas temos a máquina a relutância variável (MRV).

A MRV tem sido foco de diversos trabalhos na área de máquinas e acionamentos elétricos, em suas diversas configurações, tais como 4/4 (quatro polos no estator e quatro polos no rotor), 6/4 (seis polos no estator e quatro polos no rotor), 6/6 (seis polos no estator e seis polos no rotor), 8/6 (oito polos no estator e seis polos no rotor), dentre outras configurações, sendo a mesma acionada tanto como motor quanto como gerador.

Do ponto de vista construtivo a máquina a relutância variável apresenta polos salientes tanto no rotor quanto no estator e enrolamento concentrado, característica que torna o efeito da indutância mútua desprezível ou inexistente para máquinas com pequena quantidade de polos, com reflexos positivos no acionamento e controle de operação da mesma (MORAES FILHO et al., 2014). Na Figura 1 temos o perfil da máquina utilizada neste trabalho.

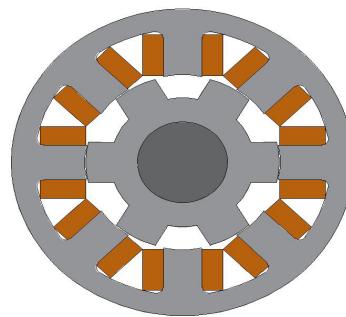


Figura 1 - Perfil transversal da máquina a relutância variável 8/6.

Fonte: Autoria própria.

Os enrolamentos são formados por pares de bobinas concentradas que envolvem os polos do estator, diametralmente opostos, e podem ser ligadas em série ou paralelo. A escolha da ligação como série ou paralelo ocorrerá de acordo com os níveis de tensão e corrente desejados, ou de acordo os limites destas grandezas por fatores elétricos ou mecânicos da máquina em questão. Abaixo temos a representação dos dois tipos de ligação para as bobinas do estator.

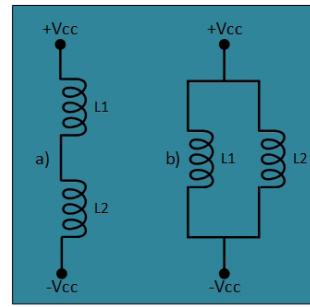


Figura 2 - a) Ligação série. b) Ligação paralelo.

Fonte: Autoria própria.

O princípio de funcionamento da MRV baseia-se na variação da indutância, grandeza a qual é função da posição do rotor em relação ao estator e também da corrente no estator. Temos o perfil da indutância não saturado para esta máquina (KRISHNAN, 2001), conforme segue abaixo.

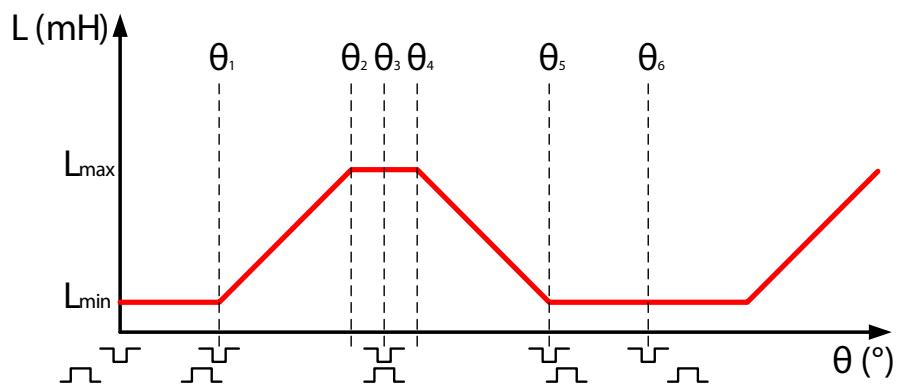


Figura 3 - Perfil de indutância para máquina a relutância variável não saturada.

Fonte: Autoria própria.

Apesar da impossibilidade prática de termos o perfil de indutância ideal devido a saturação magnética da MRV, sabemos que a saturação causa uma curvatura no perfil de indutância próximo aos pontos de alinhamento dos polos do estator e do rotor ( $L_{max}$ ), e exerce uma influência negativa no torque da máquina (KRISHNAN, 2001). Mas o perfil apresentado na Figura 3 nos traz pontos angulares que são de extrema importância na etapa de acionamento da máquina, pois, a partir dos mesmos podemos determinar os momentos de energização e desenergização de cada fase da MRV, tal que:

$\theta_1$  - Esta posição indica o ponto na qual inicia-se a sobreposição entre os polos do rotor e do estator, e também o ponto no qual deve-se iniciar a alimentação da fase, pois, no sistema apresentado propõe-se que a máquina seja acionada como motor.

$\theta_2$  - Este ponto indica a posição na qual o polo do rotor percorre toda a extensão do polo do estator, e ponto máximo na qual a fase deve ser desenergizada.

$\theta_3$  - Indica a posição na qual os polos do rotor e do estator estão completamente alinhados.

Os pontos  $\theta_4$ ,  $\theta_5$  e  $\theta_6$  não serão abordados devido a sua importância principalmente no acionamento da máquina como gerador, evento o qual não ocorre nesta etapa de nosso estudo. A partir deste perfil de indutância o sistema proposto deverá impor a energização de cada fase e o controle de corrente sobre a mesma, a fim de obter o melhor aproveitamento da MVR 8/6 acionada como motor.

## 2 | MÁQUINA UTILIZADA NO PROJETO

A máquina utilizada neste projeto é uma máquina 8/6, a qual foi inteiramente desenvolvida dentro do laboratório que dá suporte ao estudo em questão, desde as etapas referentes ao estudo elétrico e magnético, passando pelas etapas de modelagem, simulações e definição de medidas e materiais a serem utilizados (BIANCHI; ANDRADE, 2015) em sua construção e findando na construção efetiva. Abaixo temos as fotos da máquina, de seu estator e de seu rotor, respectivamente.



Figura 4 - Máquina utilizada no projeto.

Fonte: Autoria própria.

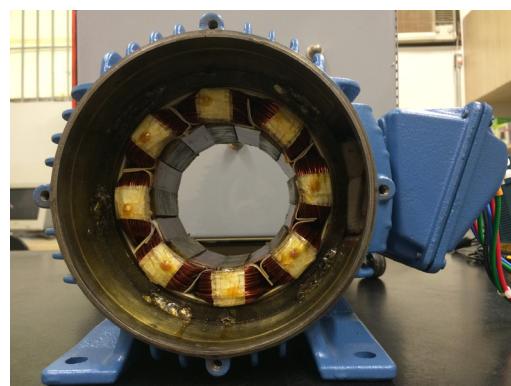


Figura 5 - Estator da máquina utilizada no projeto.

Fonte: Autoria própria.

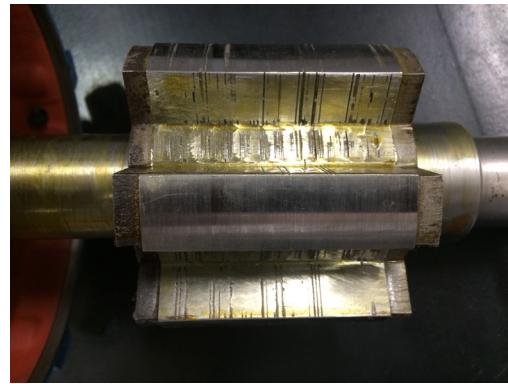


Figura 6 - Rotor da máquina utilizada no projeto.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 7 retrata a localização das grandezas de projeto apresentadas na Tabela 1 através de suas siglas.

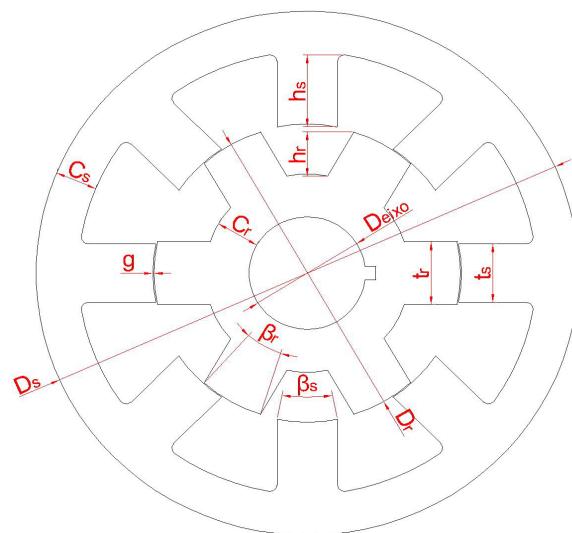


Figura 7 - Localização das grandezas de projeto.

Fonte: Autoria própria.

A tabela abaixo reúne os principais parâmetros da máquina foco deste estudo:

Parâmetro	Siglas	MRV
Quantidade de polos no estator	$N_s$	8 polos
Quantidade de polos no rotor	$N_r$	6 polos
Potência nominal	$P_n$	2,2 kW (3 cv)
Velocidade nominal	$\omega_n$	3500 rpm
Ângulo dos polos do rotor	$\beta_r$	24,5°
Ângulo dos polos do estator	$\beta_s$	22,5°
Diâmetro externo do estator	$D_s$	160 mm

Diâmetro do rotor	$D_r$	90,5 mm
Comprimento do entreferro	$g$	0,3 mm
Comprimento do rotor	$l$	63 mm
Largura dos polos do rotor	$t_r$	18,3 mm
Largura dos polos do estator	$t_s$	17,8 mm
Altura dos polos do rotor	$h_r$	15 mm
Altura dos polos do estator	$h_s$	22 mm
Culatra do rotor	$C_r$	13 mm
Culatra do estator	$C_s$	12,45 mm
Diâmetro do eixo	$D_{eixo}$	34,5 mm

Tabela 1 - Principais parâmetros da máquina foco deste estudo.

Fonte: Autoria própria.

### 3 | SIMULAÇÃO DINÂMICA DO MRV 8/6

Na etapa de projeto da máquina, na qual foram simulados o comportamento da máquina para diversos valores de correntes e posições, foram obtidas as curvas de indutância e fluxo; as quais foram utilizadas para iniciar uma simulação dinâmica através do software MATLAB/ Simulink®.

A topologia de conversor escolhida para acionar a máquina a relutância é a *half-bridge*, que caracteriza-se por possuir duas chaves controladas em série com cada fase da máquina e dois diodos, utilizados para desmagnetização da bobina de cada fase após o período de magnetização da mesma. O conversor *half-bridge* para a MRV 8/6 pode ser visualizado na Figura 8.

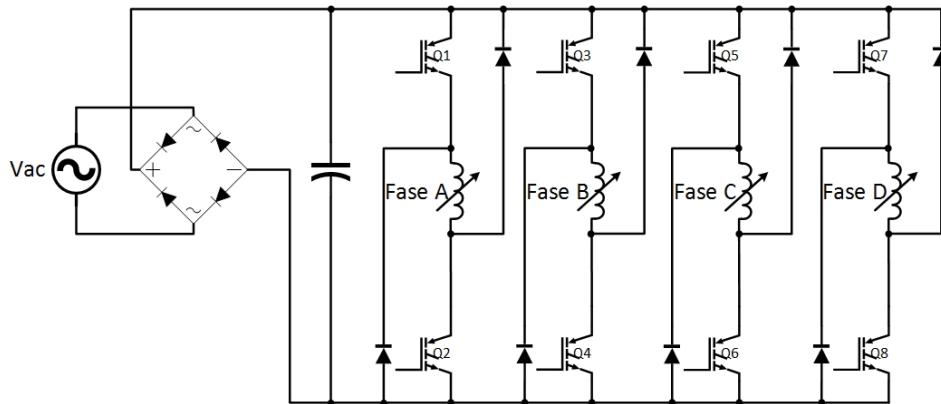


Figura 8 - Topologia do conversor *half-bridge* para a MRV 8/6.

Fonte: Autoria própria.

A partir da definição do conversor que seria utilizado, (MILLER, 2001), montou-se a simulação pautada no mesmo e o controle foi implementado, tendo como principais elementos de controle o sensor de posição do rotor em relação ao estator e o controle

de corrente por fase. A Figura 9 mostra o ambiente completo de simulação.

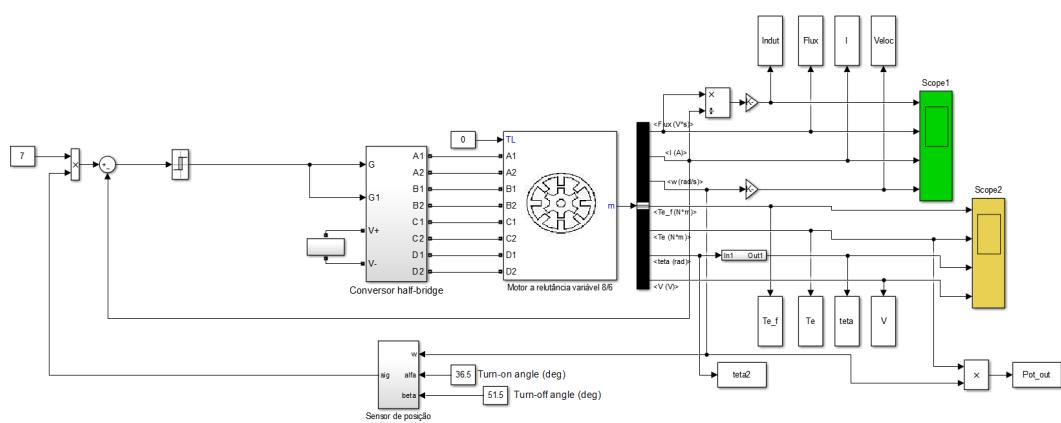


Figura 9 - Ambiente completo de simulação.

Fonte: Autoria própria.

A estratégia de acionamento implementada consiste em acionar a MRV mantendo um controle sobre a corrente, e também sobre o alinhamento dos polos do estator com os polos do rotor para cada fase. No Simulink® podemos dividir esta estratégia em 2 etapas básicas:

1 - Em uma primeira etapa é aplicada tensão positiva ao enrolamento do motor através do fechamento das duas chaves do conversor, referentes a fase sobre a qual se realiza o controle. As chaves são mantidas acionadas até que a corrente atinja o valor máximo previamente escolhido, ou até que os polos do estator e do rotor estejam fora do intervalo permitido para o acionamento de cada fase.

2 - Quando a corrente alcança seu valor máximo ou o ângulo entre o rotor e o estator está fora do intervalo escolhido para a alimentação da fase em questão, inicia-se a etapa 2; que consiste na abertura das chaves e então a corrente que circula pela fase é迫使ada a passar pelos diodos do conversor, e o enrolamento do motor fica submetido à tensão negativa (tensão reversa). Estando a fase submetida à tensão reversa, a corrente da fase decresce rapidamente.

O intervalo de histerese da corrente foi definido entre 6,5 e 7,5 A, tendo como set point 7 A. O ângulo de condução para cada fase foi estabelecido de 36,5° até 51,5°; valores os quais são obtidos respeitando-se (MILLER, 2001; KRISHNAN, 2001) e ajustados ao sistema de referências do MATLAB®. A partir dessas definições temos alguns gráficos de grandezas importantes na MRV 8/6 acionada como motor.

A Figura 10 ilustra o perfil de indutância da MRV 8/6 e o controle de corrente atuando sobre a mesma, e devido à imposição do controle não teremos sobreposição de fases neste acionamento.

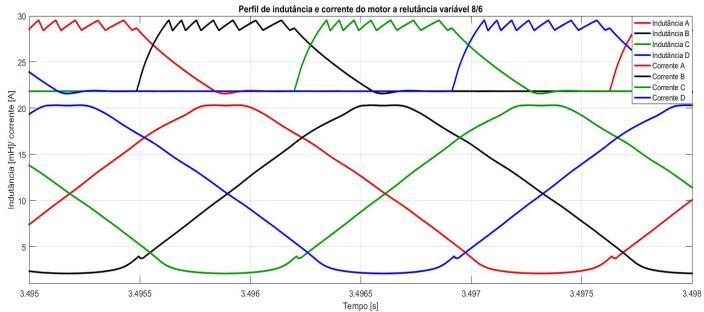


Figura 10 - Perfil da indutância e corrente no estator da MRV 8/6.

Fonte: Autoria própria.

Abaixo temos os gráficos que ilustram o comportamento do fluxo da máquina foco deste trabalho e o comportamento do conjugado eletromecânico, respectivamente.

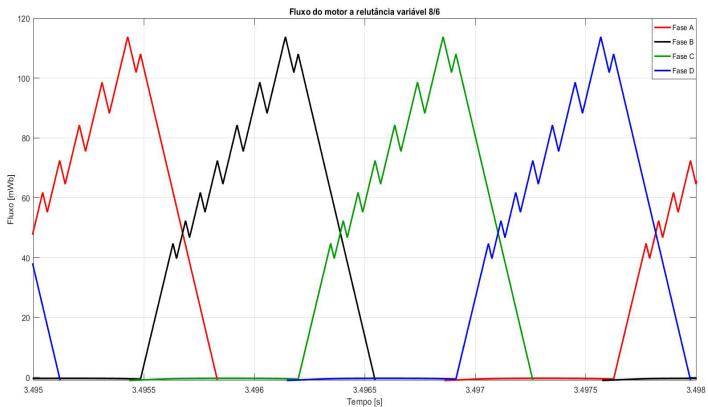


Figura 11 - Perfil do fluxo do motor a relutância variável 8/6.

Fonte: Autoria própria.

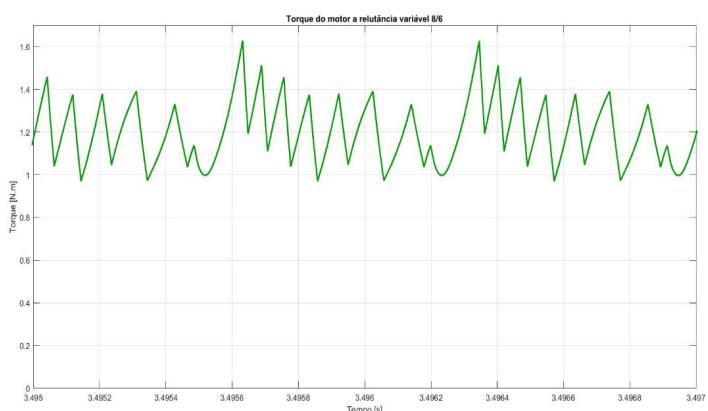


Figura 12 - Perfil do conjugado do motor a relutância variável 8/6.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 13 temos o comportamento da velocidade da MRV 8/6, desde sua partida até que a mesma atinja sua velocidade nominal, 3500 rpm.

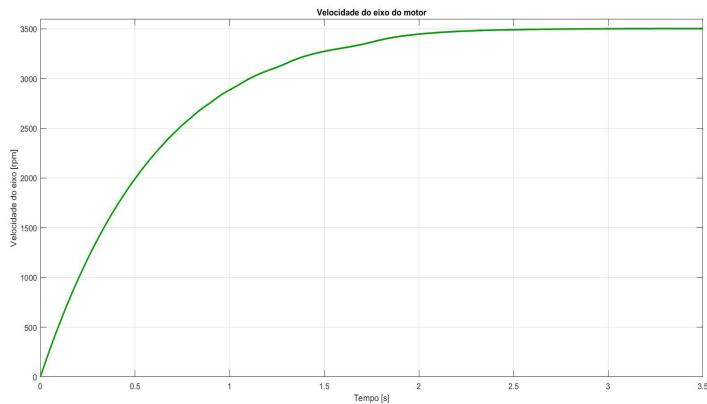


Figura 13 - Comportamento da velocidade do motor a relutância variável 8/6.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 14 temos o gráfico que expressa o comportamento do ângulo do rotor em relação a cada fase, pois, para a máquina 8/6 teremos que a cada  $60^\circ$  mecânicos o perfil de indutância da referida fase se repete.

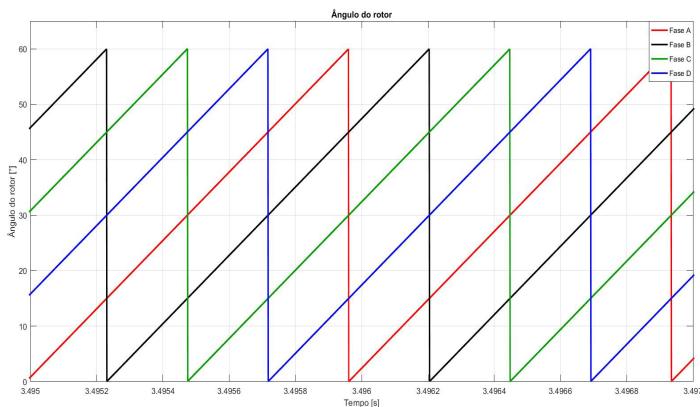


Figura 14 - Comportamento do ângulo do polo do rotor no motor a relutância variável 8/6.

Fonte: Autoria própria.

## 4 | MONTAGEM DE PLATAFORMA

Na etapa de montagem experimental trabalhamos com 6 circuitos principais, os quais em conjunto permitem o acionamento e controle da MRV 8/6, tal que:

1 - Conversor *half-bridge* e isoladores: O conversor *half-bridge* foi construído através de chaves do tipo insulated gate bipolar transistor (IGBT), adquiridas da empresa Fuji Electric, modelo 6MBI100S-060, tendo as ligações entre seus terminais alteradas de modo que tivéssemos um conversor com quatro braços (MORAES FILHO et al., 2014). A fim de implementar um desacoplamento elétrico entre sistemas de potência e de controle, foi inserido um circuito de acopladores ópticos para cada chave. Além de isolar a parte de potência da parte de controle, o circuito isolador tem

a função de elevar a tensão de sua entrada de 3,3 V para 15 V em sua saída, pois, o valor de tensão na saída do microcontrolador utilizado não é suficiente para acionar os elementos utilizados como chaves no conversor estático, porém, após o sinal passar pelo circuito isolador a tensão recebe um ganho o qual garante o acionamento das chaves quando necessário. O layout final da placa que aloja o conjunto de chaves que exerce a função do conversor e os circuitos isoladores pode ser visualizada na Figura 15.

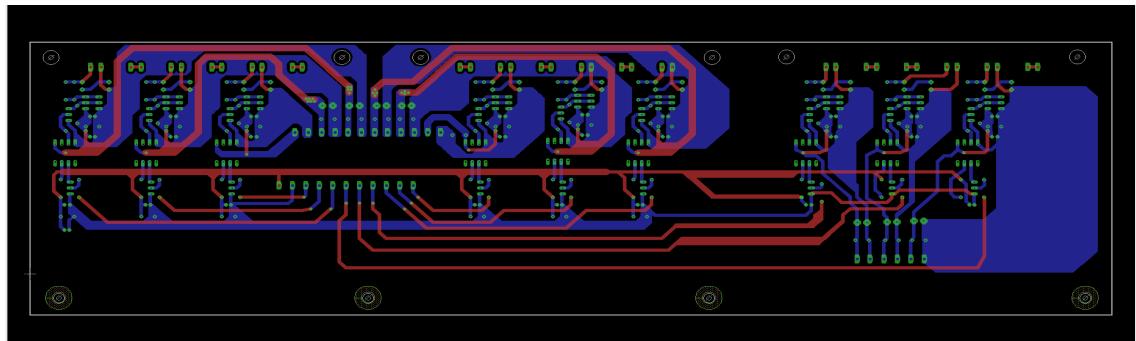


Figura 15 - Layout da placa de potência.

Fonte: Autoria própria.

2 - Fontes de alimentação: Como o circuito isolador necessita de fontes com referências de terras distintas, deveremos ter uma fonte de alimentação para cada circuito isolador. A Figura 16 mostra o layout da placa das fontes dos circuitos isoladores.

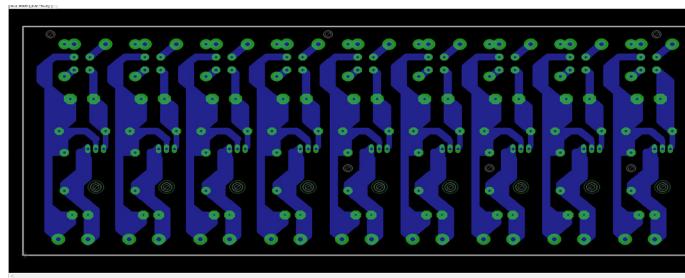


Figura 16 - Layout da placa das fontes dos isoladores.

Fonte: Autoria própria.

3 - Microcontrolador: O microcontrolador utilizado neste projeto é o DSC TMS320F28335, ilustrado na Figura 17, o qual é um microcontrolador da Texas Instruments® e pertence a um grupo específico de dispositivos de processamento digital chamado Digital Signal Controller (DSC). É um chip que combina o processamento de um processador digital de sinais a periféricos embarcados de um microcontrolador. Devido seu enorme potencial, velocidade de processamento, versatilidade para trabalhar com operações matemáticas complexas e a necessidade de se controlar o sistema em tempo real, um DSC é o dispositivo indicado para a aplicação abordada.



Figura 17 - DSC TMS320F28335.

Fonte: Autoria própria.

4 - Transdutores de tensão e corrente: A fim de implementar o controle e acionamento da MRV precisamos efetuar as medidas de alguns parâmetros da mesma, os quais são aquisicionados pela placa ilustrada na Figura 18, que conta com transdutores de corrente e tensão, filtros, além de um sistema que adequa seu sinal de saída a patamares que podem ser trabalhados pelo microcontrolador utilizado no projeto. O projeto desta placa foi desenvolvido por professores do Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP), Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

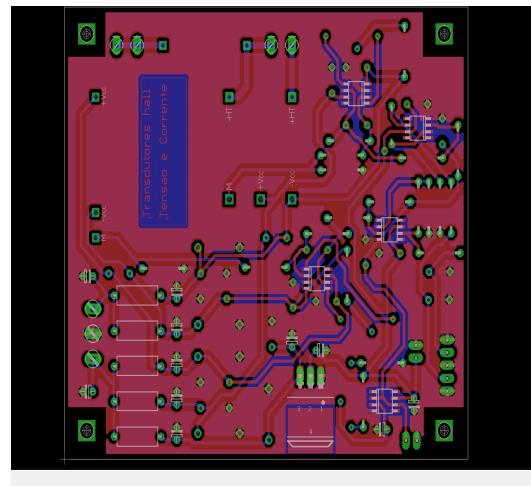


Figura 18 - Layout da placa dos transdutores de corrente e tensão.

Fonte: Autoria própria.

5 - Adaptadores de níveis de tensão: Alguns elementos presentes na plataforma proposta podem não ter sinais dentro de níveis (do ponto de vista de amplitude) aceitáveis pelo DSC utilizado, e a função desta placa é fazer a adaptação de sinais digitais de forma que possam ser utilizados como entradas no DSC. Um exemplo de aplicação da placa de adaptação de níveis de tensão é a saída do encoder, que apresenta níveis de tensão de 0 e 15 V, sendo os mesmos adaptados para níveis de 0 e 3,3 V, respectivamente. Assim como a placa dos transdutores de tensão e corrente

esta também teve seu projeto desenvolvido pelos professores do Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP), Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

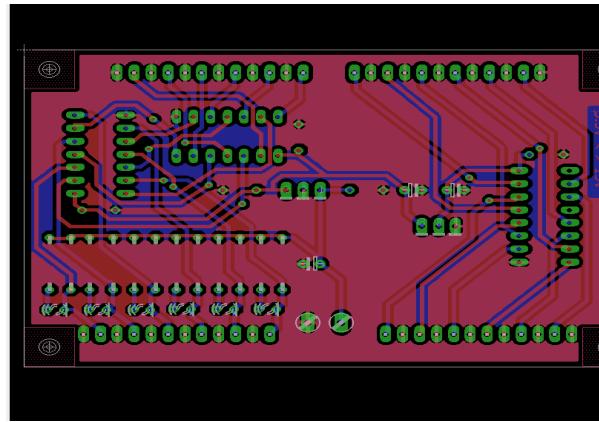


Figura 19 - Layout da placa para adaptação de níveis de tensão.

Fonte: Autoria própria.

6 - Encoder absoluto: A função deste elemento é fornecer de forma precisa a posição de rotor em relação ao estator, para que, a partir desta informação possamos identificar o momento correto de acionar cada fase da máquina. O encoder utilizado neste projeto necessariamente deve ser do tipo absoluto, pois, neste tipo de encoder a posição é dada pela leitura de um código único para cada posição, condição indispensável para o correto acionamento da MRV. O encoder utilizado apresenta uma resolução de  $0,35^\circ$  mecânicos e é mostrado na Figura 20.



Figura 20 - Encoder utilizado na plataforma proposta.

Fonte: Autoria própria.

Após definidos os principais elementos que iriam compor a plataforma os mesmos foram divididos basicamente em dois subsistemas, tal que o primeiro mostrado na Figura 21 suporta um transformador com 9 saídas isoladas para alimentar as fontes dos isoladores, a placa com as fontes dos isoladores, a placa com os circuitos isoladores e ligações dos módulos IGBTs, os módulos IGBTs e o sistema de retificação que fornecerá a tensão contínua necessária ao funcionamento da MRV 8/6. O segundo subsistema é mostrado na Figura 22, e é composto pelas placas de transdutores,

placas de adaptadores de níveis de tensão, pelo DSP e pela fonte que irá alimentar todas esses circuitos, além do encoder, o qual estará acoplado ao eixo da máquina.

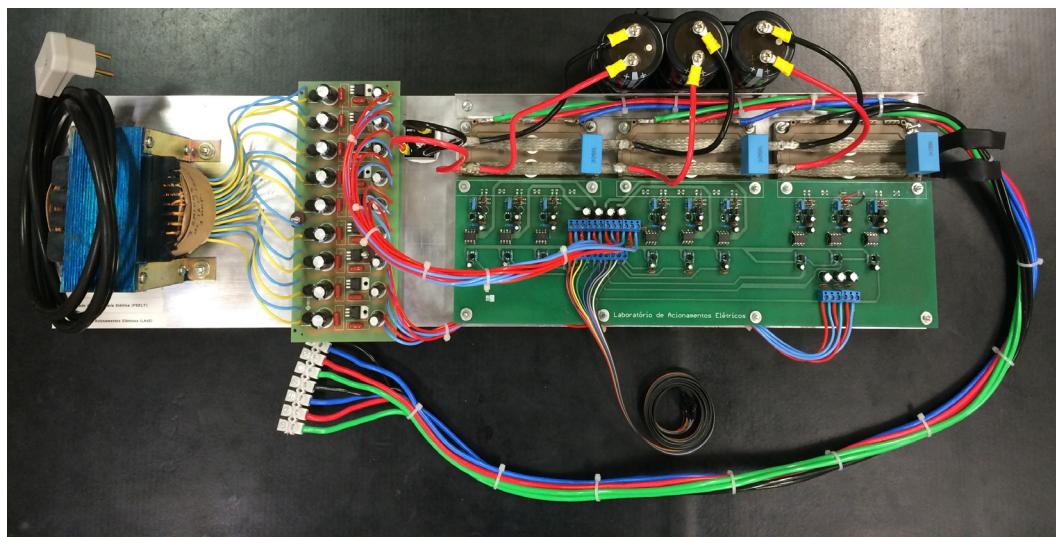


Figura 21 - Montagem final do sistema de potência.

Fonte: Autoria própria.

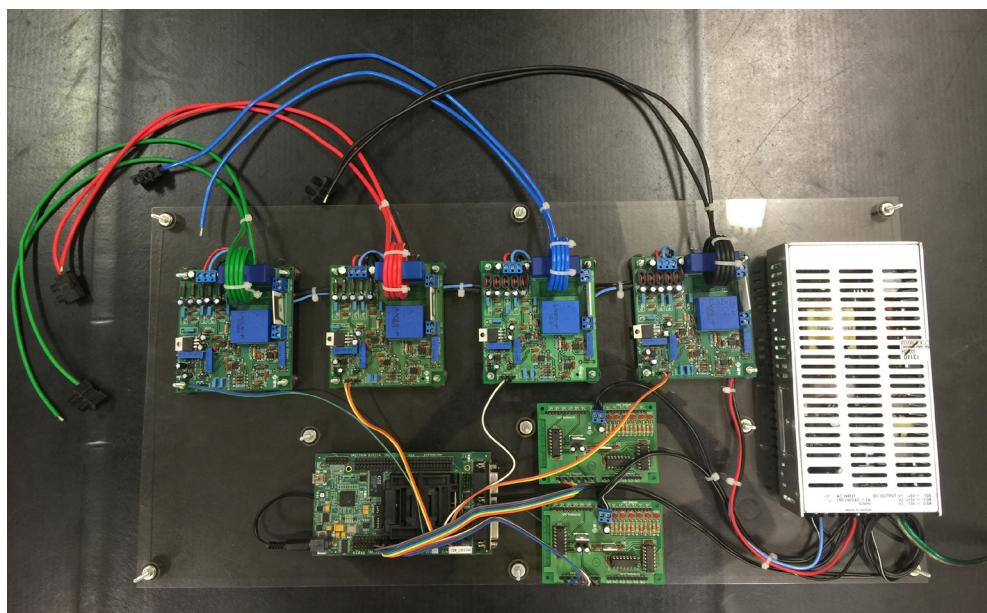


Figura 22 - Montagem final do sistema transdutores, placas de adaptação de níveis de tensão e microcontrolador.

Fonte: Autoria própria.

## 5 | CONCLUSÕES

A MRV mostra-se como uma máquina com potencial a contribuir com as fontes motrizes atualmente utilizadas, focando principalmente no aspecto que tange a controle de conjugado e eficiência energética.

A partir deste projeto temos estímulos a fim de continuar este estudo no âmbito experimental, abordando em quais situações e sobre quais máquinas a MRV 8/6

apresenta pontos positivos, negativos e possíveis adaptações ou melhorias, as quais podem ser implementadas a fim de extrair todo o potencial desta máquina.

## 6 | AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FAPEMIG e ao CNPq pelo apoio financeiro, e à Universidade Federal de Uberlândia pela infraestrutura disponibilizada.

## REFERÊNCIAS

BIANCHI, R. B.; ANDRADE, D. A. **Projeto, Modelagem e Levantamento de Curva de Indutância de Máquina a Relutância Variável 8x6 Utilizando Elementos Finitos**. XI Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica - XI CBQEE. Campina Grande - PB. 2015.

KRISHNAN, R. **Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications**. CRC Press 2001. 432. ISBN ISBN-10: 0849308380. ISBN-13: 9780849308383.

MILLER, T. J. E. **Electronic Control of Switched Reluctance Machines**. Newnes, 2001. 272. ISBN ISBN-10: 0750650737. ISBN-13: 9780750650731.

MORAES FILHO, M. J.; GOMES, L. C.; ANDRADE, D. A.; SILVEIRA, A. W. F. V. **Estudo e implementação de um sistema de acionamento para motor a relutância variável 8/6**. XII Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica - XII CEEL. Uberlândia - MG. 2014.

## ESTUDO COMPARATIVO DE MODELAGENS DE ENROLAMENTOS DE UM TRANSFORMADOR UTILIZANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISES DE ESFORÇOS ELETROMECÂNICOS

**Pedro Henrique Aquino Barra**

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia  
de São Carlos

São Carlos – SP

**Arnaldo José Pereira Rosentino Junior**

Universidade Federal do Triângulo Mineiro,  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Uberaba – MG

**Antônio Carlos Delaiba**

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade  
de Engenharia Elétrica  
Uberlândia – MG

Eletromecânicos, Método dos Elementos Finitos,  
Modelagem Computacional, Transformadores.

### A COMPARATIVE STUDY OF MODELING TRANSFORMER WINDINGS BY FINITE ELEMENT METHOD FOR ELECTROMECHANICAL STRESSES ANALYSIS

**ABSTRACT:** This work aims to present and compare, with respect to electromechanical efforts in transformers, three different types of modeling a transformer winding using finite element method. The analyzed device is made of traditional ferromagnetic core with three columns and two concentric double layered windings. In this regard, the electromechanical stresses and the distribution characteristic of magnetic flux produced by high short-circuit current will be estimated for each case.

**KEYWORDS:** Short-circuit, Electromechanical Stresses, Finite Element Method, Computational Modeling, Transformers.

### 1 I INTRODUÇÃO

As falhas em transformadores, de acordo com a literatura, podem ser classificadas como sendo de origens térmicas, dielétricas, químicas

**RESUMO:** Este trabalho tem por objetivo apresentar e comparar, no que tange aos esforços eletromecânicos em transformadores, três diferentes modelagens para enrolamentos de um transformador trifásico de três colunas, do tipo núcleo envolvido com dois enrolamentos de dupla camada por fase. Os esforços eletromecânicos serão estimados para a condição de um curto-circuito trifásico. As três modelagens serão comparadas entre si e também com os resultados analíticos apresentados por outros trabalhos científicos. Deve-se salientar também que as características da distribuição de fluxo magnético no interior do transformador, obtidas nas três situações também serão apresentadas e discutidas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Curto-Círcito, Esforços

e mecânicas (CIGRE; GROUP, 2002). Independentemente do tipo de falha ocorrida no transformador, ter-se-á como consequência um alto custo financeiro, quer seja para sua substituição, quer seja para seu reparo, pois estes são componentes essenciais nos sistemas elétricos, sendo um dos elementos de maior custo.

Acerca das falhas de origens mecânicas, tem-se que a interação entre a corrente elétrica e a densidade de campo magnético de dispersão origina forças eletromagnéticas que atuam nos enrolamentos de um transformador (YUN-QIU; JING-QIU; ZI-HONG, 1990). Quando em operação nominal, estas forças nos enrolamentos são pequenas, pois as correntes e a densidade de campo magnético de dispersão são pequenas. Sob outra perspectiva, em sua vida útil, os transformadores estão sujeitos a vários distúrbios, como por exemplo, os curtos-circuitos. Nesse tipo de situação, sobremaneira sendo o curto-círcito trifásico, as elevadas correntes implicam em elevadas forças internas nos transformadores.

A respeito das forças eletromagnéticas devido às correntes de curto-círcito trifásico, é possível encontrar no trabalho de Waters (1966) formulações analíticas para forças radiais e axiais que permitem analisar o efeito destas correntes sobre os enrolamentos. Ainda neste sentido, detalhamentos também podem ser verificados em Mcnutt et al. (1970).

Nessa conjuntura, os danos causados aos transformadores devido aos esforços eletromecânicos são evidentes, sabendo até mesmo que curtos trifásicos acarretam na redução da vida útil do transformador ao longo do tempo (GUIMARÃES, 2013). Por conseguinte, pesquisadores tem se esforçado em suas investigações para compreender qualitativa e quantitativamente as origens das falhas mecânicas nos transformadores. Pode-se encontrar na literatura a aplicação do método dos elementos finitos para a obtenção dos esforços frente às faltas simétricas (BARRA; ROSENTINO; DELAIBA, 2016; ROSENTINO JUNIOR, 2010), assimétricas e correntes de energização (BARRA, 2017; BARRA; ROSENTINO; DELAIBA, 2018). Têm-se também trabalhos que buscam formas de diagnosticar falhas em transformadores, ou ainda, por indícios que apontem para a operação segura de transformadores sob a perspectiva da suportabilidade mecânica (BARRA et al., 2018; FARIA NETO; BARRA; DELAIBA, 2017)

Dentro desse contexto, este artigo segue no sentido de analisar e comparar três diferentes modelagens de enrolamentos de um transformador trifásico, sob o método dos elementos finitos, objetivando encontrar os esforços eletromagnéticos oriundos de curtos-circuitos do tipo trifásico. Para tanto será utilizado o programa FEMM (*Finite Element Method Magnetics*). Para uma comparação mais consistente, a operação nominal do transformador também será analisada, e as características da distribuição de fluxo magnético no interior do transformador serão obtidas. Em uma primeira modelagem, a geometria do enrolamento do transformador será considerada como sendo um enrolamento único, ou seja, não há discretização geométrica de camadas e nem espiras. Em um segundo momento, a modelagem leva em consideração o fato do enrolamento do transformador utilizado ser constituído em duas camadas,

mas não fazendo análises espira por espira. Por fim, na terceira modelagem, será desenvolvida considerando o enrolamento o mais próximo de sua realidade física, ou seja: camada por camada e espira por espira. Destaca-se que para obtenção das correntes em condições nominais e em condições de curto-círcuito, utilizou-se a ferramenta computacional ATP (*Alternative Transient Program*).

## 2 | MODELAGENS DO TRANSFORMADOR NO PROGRAMA FEMM

O transformador utilizado nas simulações é trifásico de três colunas do tipo núcleo envolvido com dois enrolamentos de dupla camada por fase, sendo 33 espiras por camada. Suas conexões são em estrela, com tensão nominal em cada enrolamento de 127 V e sua potência trifásica 15 kVA - 3,47%. Algumas características geométricas deste transformador podem ser encontradas na Figura 1, sendo que as características físicas e geométricas adicionais podem ser encontradas em Azevedo (2007). Para todos os casos que serão aqui mostrados, foi utilizado o modelo planar com uma profundidade de 1 [mm]. Logo, para todos os modelos os valores de força obtidos estarão na unidade [N/mm].

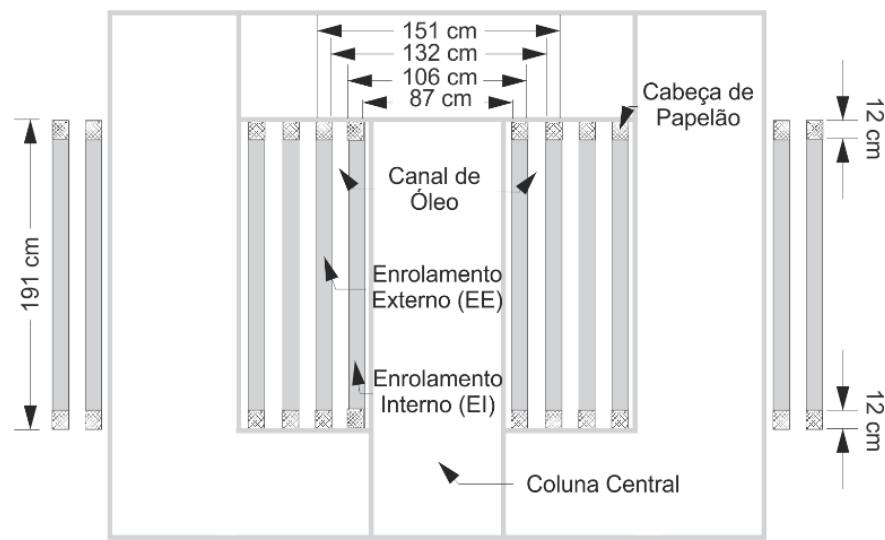


Figura 1. Vista frontal do núcleo do transformador e enrolamentos do transformador modelado.

Os três tipos de modelagens dos enrolamentos deste transformador formam os estudos de caso analisados neste trabalho, e são descritos da seguinte forma:

- **Caso A:** Modelagem considerando enrolamento único. Os enrolamentos do transformador são considerados como cilindros, isto é, de forma única. Dessa forma, algumas considerações acerca de suas características físicas foram inibidas, quais sejam, suas camadas e espiras. Para esse a geração das malhas nesse modelo, necessitou-se de 24.282 nós.
- **Caso B:** Modelagem considerando enrolamento camada por camada. Buscando-se maior precisão e riqueza em informações, a modelagem do transformador contou com enrolamentos subdivididos em suas duas camadas,

mas ainda sem considerar espira por espira. Foram necessários 37.555 nós para a geração das malhas.

- **Caso C:** Modelagem considerando enrolamento camada por camada e espira por espira. Por fim, nesse caso foi considerado o enrolamento camada por camada, espira por espira. Nesse caso, exigiu-se um maior processamento na geração das malhas, necessitando de 444.407 nós. Entretanto, verifica-se que este tipo de modelagem oferece maior precisão e também maior possibilidade de estudos e análises do tema aqui enfocado.

A Figura 2 apresenta parte do enrolamento ampliado para os três casos acima descritos. A Figura 3, por sua vez, exemplifica o resultado da geração das malhas para a modelagem do Caso C.

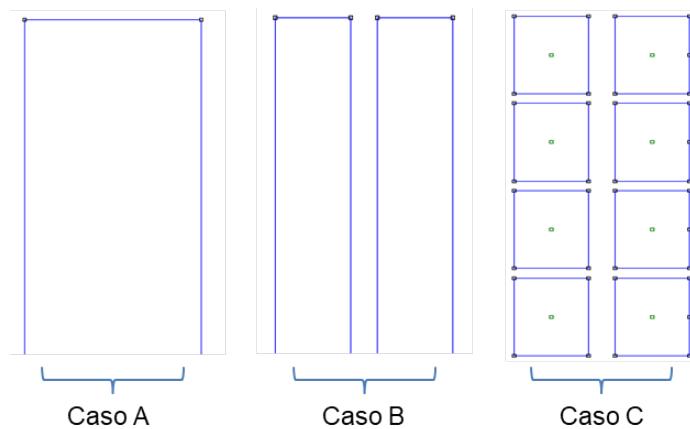


Figura 2. Parte ampliada de um enrolamento, demonstrando as três possibilidades de modelagem.

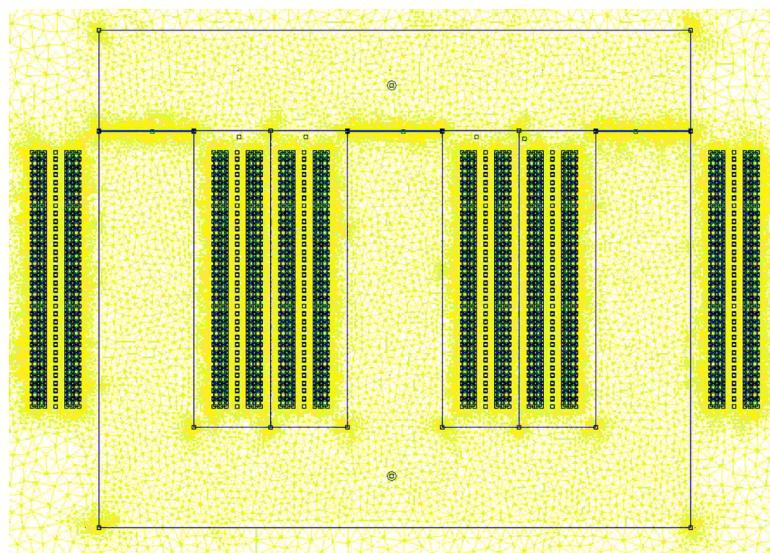


Figura 3. Malhas geradas para o caso da modelagem de enrolamento camada por camada e espira por espira.

A seguir serão apresentados os resultados das simulações considerando-se esses três estudos de caso. Para a análise sob condição nominal apresenta-se apenas a distribuição de fluxo magnético, visto que os esforços eletromecânicos nesta situação são desprezíveis. Por outro lado, para a análise sob condição de curto-círcuito trifásico, apresenta-se a distribuição de fluxo magnético e as forças atuantes nos enrolamentos.

O processo como um todo de modelagem e análise baseia-se nas seguintes etapas:

- **Passo 1:** Utilização do software ATP para obtenção das correntes elétricas em condições normais e de curto-círcito para implementação do modelo no FEMM;
- **Passo 2:** Criação da geometria do transformador no FEMM, com as devidas considerações a respeito dos enrolamentos;
- **Passo 3:** Definição das propriedades físicas dos materiais relacionados à geometria;
- **Passo 4:** Geração das malhas;
- **Passo 5:** Solução da modelagem;
- **Passo 6:** Análise dos resultados obtidos.

### 3 | SIMULAÇÃO DO TRANSFORMADOR SOB CONDIÇÕES NOMINAIS

Para a implementação no FEMM dos valores das correntes para as condições nominais e sob falta utiliza-se o software ATP. O circuito modelado no ATP, representado na Figura 4, foi realizado conforme o trabalho de Rosentino Junior (2010). As correntes nominais obtidas são apresentadas na Tabela 1.

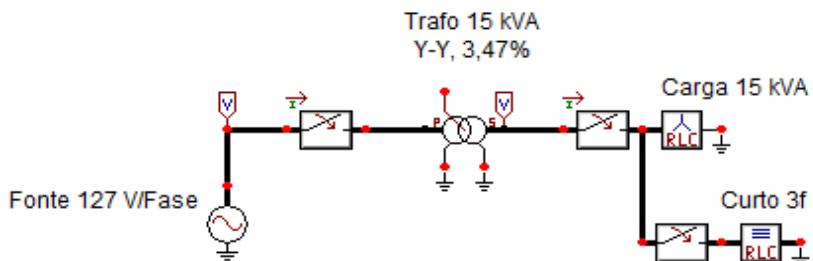


Figura 4. Circuito modelado no ATP para condições nominais e sob falta.

Corrente	Fase A [A]	Fase B [A]	Fase C [A]
<b>Primário</b>	-25,655	56,632	-30,977
<b>Secundário</b>	-25,094	55,431	-30,337

Tabela 1. Valores das correntes trifásicas obtidas em condição nominal.

Diante da similaridade dos resultados obtidos no programa FEMM para esta condição, este trabalho destaca por meio da Figura 5, a distribuição de fluxo magnético no transformador apenas para o Caso C. O fluxo na coluna central é de aproximadamente 1,55 [T], valor este também informado pelo fabricante, implicando em uma consistência nos resultados obtidos. Nota-se ainda, como esperado, que em condições normais de operação o fluxo magnético se concentra totalmente no material ferromagnético, fazendo com que o fluxo de dispersão seja muito pequeno. Dessa forma, o produto vetorial entre este fluxo de dispersão e a corrente nominal,

resulta em pequenos valores de forças eletromagnéticas. Naturalmente, esses valores são desprezíveis, no que tange à suportabilidade mecânica do transformador. Para fins de comparação, a Tabela 2 mostra os resultados encontrados para força radial total no enrolamento interno, denotado por ( $F_{r-El}$ ) e externo, denotado por ( $F_{r-EE}$ ), onde nota-se boa proximidade entre as modelagens e também com a metodologia analítica desenvolvida e verificada por Rosentino Junior (2010). Quanto às forças axiais totais, são praticamente nulas e por isto, não são apresentadas nesta situação operacional.

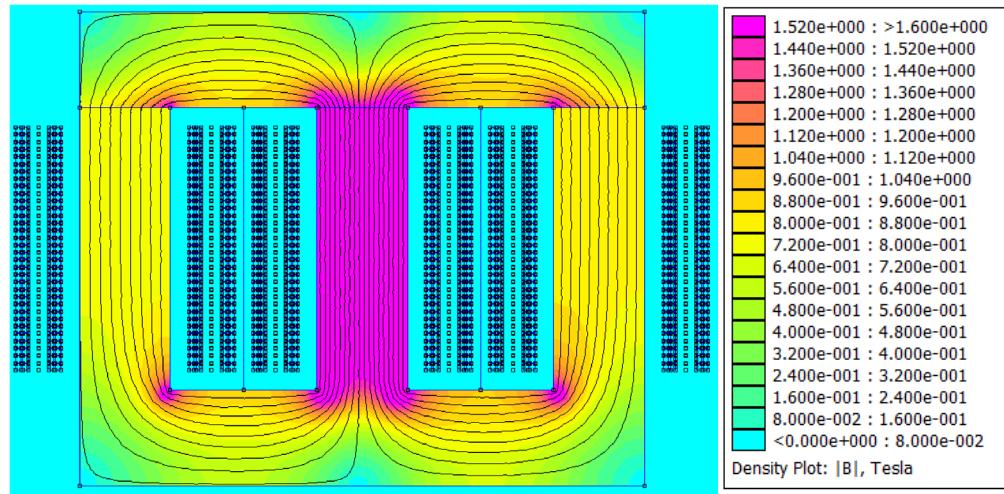


Figura 5. Densidade de fluxo em condição nominal, para modelo de enrolamento camada por camada e espira por espira.

	Metodologia Analítica	Caso A	Caso B	Caso C
$F_{r-El}$ [N]	15,2663	14,1388	14,1349	14,1336
$F_{r-EE}$ [N]	23,3658	20,8160	20,8160	20,9107

Tabela 2. Comparação de resultados obtidos para forças radiais nas diferentes modelagens, sob condição nominal.

#### 4 | SIMULAÇÃO DO TRANSFORMADOR SOB CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO

Da mesma forma que para condições nominais, as correntes foram obtidas através de modelo no ATP, conforme Figura 4. Estas correntes são elencadas na Tabela 3.

Corrente	Fase A [A]	Fase B [A]	Fase C [A]
Primário	-769,58	2.192,1	-1.422,6
Secundário	-768,98	2.191,9	-1.422,9

Tabela 3. Valores de correntes em condição de curto-círcuito trifásico.

Para a operação sob curto-círcuito trifásico, foram obtidas as densidades de fluxo, bem como os esforços eletromecânicos nos enrolamentos para cada modelagem. Os resultados encontram-se apresentados nos tópicos a seguir.

#### 4.1 Caso A: Modelagem Considerando Enrolamento Único

A Figura 6 apresenta o resultado da densidade de fluxo magnético obtido para esta modelagem. No que diz respeito aos esforços eletromecânicos no transformador, por meio do FEMM, encontra-se para o enrolamento interno da fase B uma força radial distribuída de compressão de 71,6636 [N/mm] e uma força radial distribuída de tração de 71,8582 [N/mm] para o enrolamento externo. De acordo com a geometria do enrolamento e das espiras, obtém-se um comprimento médio de  $\pi^*96,5$  mm para espiras no enrolamento interno e de  $\pi^*141,5$  mm para espiras no enrolamento externo. Dessa forma, encontra-se uma força radial total de compressão para o enrolamento interno de 21,726 [kN] e uma força radial total de tração para o enrolamento externo de 31,944 [kN]. Vale ressaltar que, o sentido das forças radiais (tração ou compressão) foi também encontrado via o FEMM. Sob a perspectiva de forças axiais, verifica-se uma força total desprezível nos enrolamentos internos e externos, não sendo possível verificar nesta modelagem, a amplitude dessas forças nas extremidades dos enrolamentos. Assim, pode-se observar uma das limitações desse tipo de modelo.

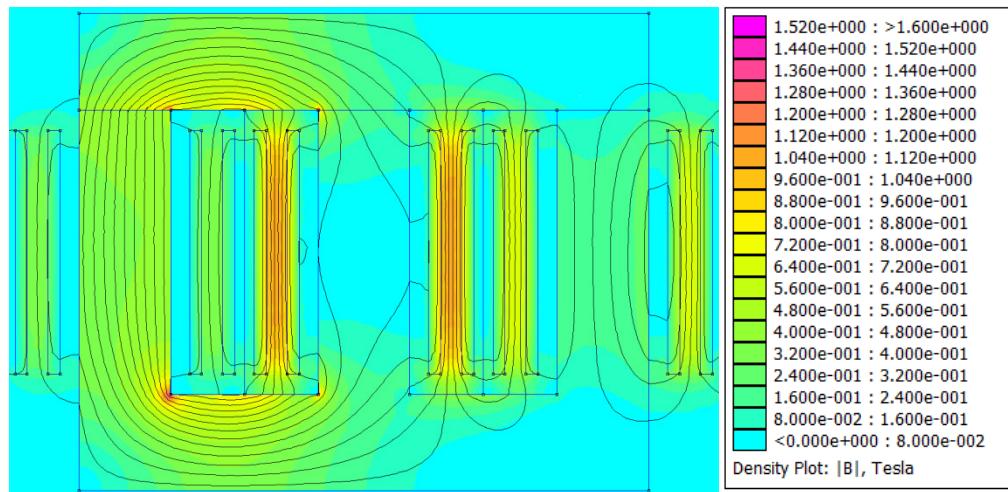


Figura 6. Densidade de fluxo em condição de curto-circuito, para modelo de enrolamento interno.

#### 4.2 Caso B: Modelagem Considerando Enrolamento Camada por Camada

Para este estudo de caso, verifica-se também na Figura 7, uma grande distribuição de fluxo magnético de dispersão entre os enrolamentos externo e interno, causando solicitações mecânicas mais intensas nas camadas mais próximas, ou seja, camada externa do enrolamento interno e interna do enrolamento externo, vinculadas à fase B. Para esta modelagem, as forças radiais correspondem ao somatório das forças radiais encontradas para cada camada. Portanto, encontrou-se uma força radial distribuída de compressão de 71,6431 [N/mm] para o enrolamento interno e uma força radial distribuída de tração de 71,8565 [N/mm] para o enrolamento externo. Fazendo as mesmas considerações anteriormente adotadas, tem-se uma força radial total de

compressão de 21,720 [kN] no enrolamento interno e uma força radial distribuída de tração de 31,943 [kN] no enrolamento externo. No que tange à força axial total, encontra-se um valor nulo. Novamente, não é possível verificar forças axiais nas extremidades dos enrolamentos, indicando uma limitação do modelo referente ao Caso B.

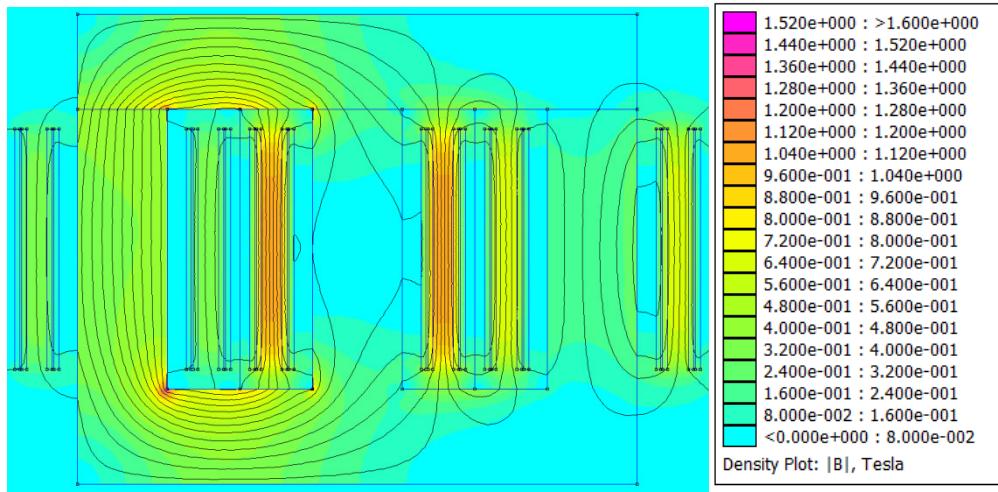


Figura 7. Densidade de fluxo em condição de curto, para modelo de enrolamento camada por camada.

#### 4.3 Caso C: Modelagem Considerando Enrolamento Camada por Camada e Espira por Espira

A Figura 8 apresenta o resultado da densidade de fluxo magnético em condição de curto, tomando-se o modelo de enrolamento camada por camada e espira por espira.

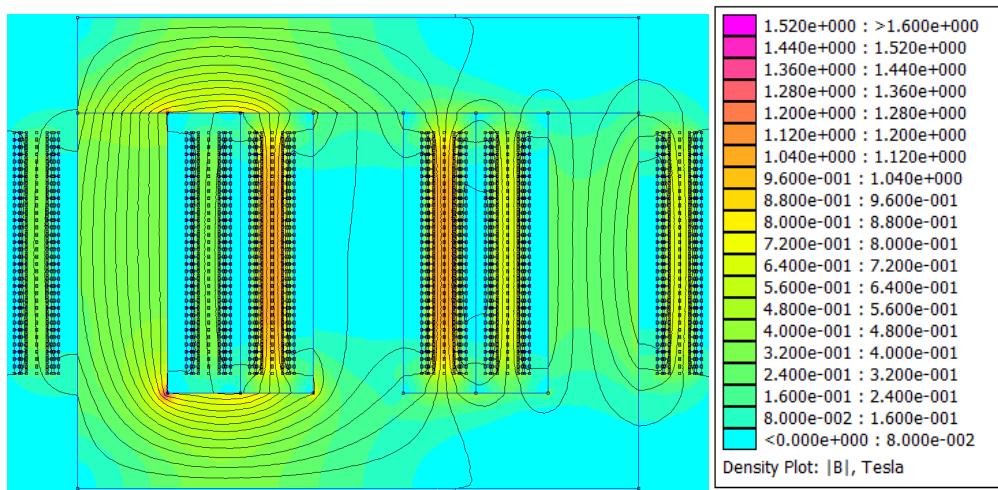


Figura 8. Densidade de fluxo em condição de curto, para modelo de enrolamento camada por camada e espira por espira.

Esta modelagem engloba de forma mais fidedigna as características físicas dos enrolamentos. Dessa forma, pode-se realizar uma análise de forças ao longo de todo o enrolamento. A força radial de compressão e tração em cada espira, podem

ser visualizadas nas Figuras 9 e 10. A força radial total no enrolamento é o somatório das forças encontradas em cada espira. Assim, obtém-se uma força radial total de compressão de 22,22 [kN] no enrolamento interno e uma força radial total de tração de 31,21 [kN] no enrolamento externo.

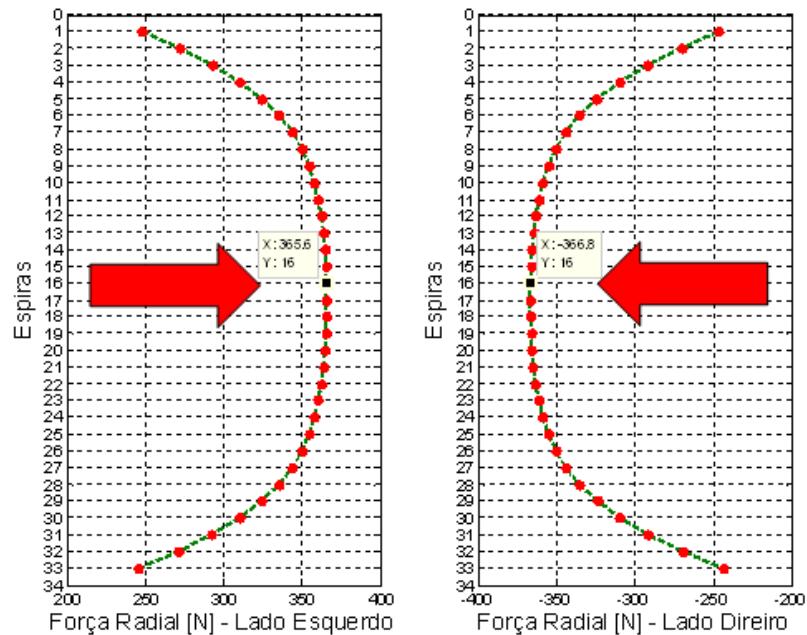


Figura 9. Força radial de compressão distribuída no enrolamento interno.

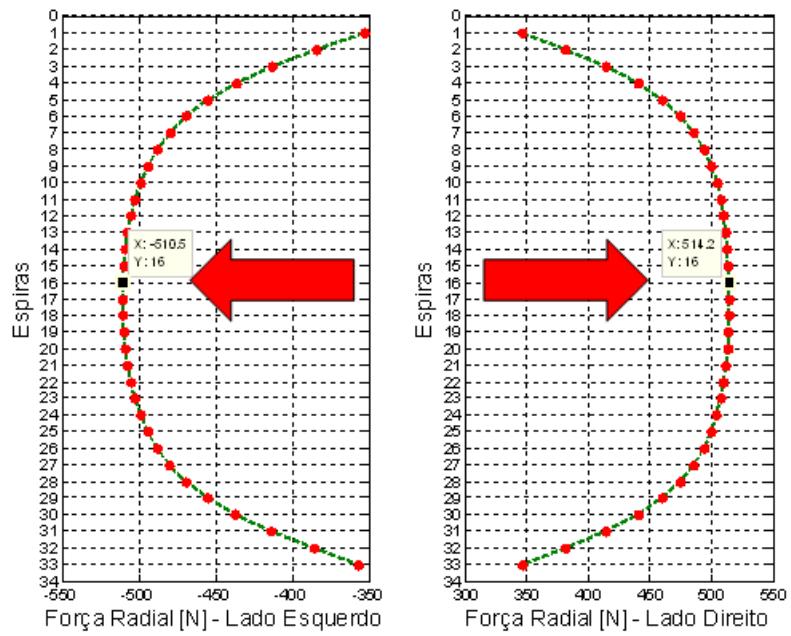


Figura 10. Força radial de tração distribuída no enrolamento externo.

Quanto às forças axiais, conforme destacam as Figuras 11 e 12, esta modelagem apresenta uma maior riqueza de informações. Verifica-se que a força axial total no enrolamento é desprezível. Entretanto, verifica-se que nas extremidades existe uma força axial considerável. Além disso, verifica-se por meio da Figura 12, a existência de uma força compressiva significativa na metade de ambos os enrolamentos.

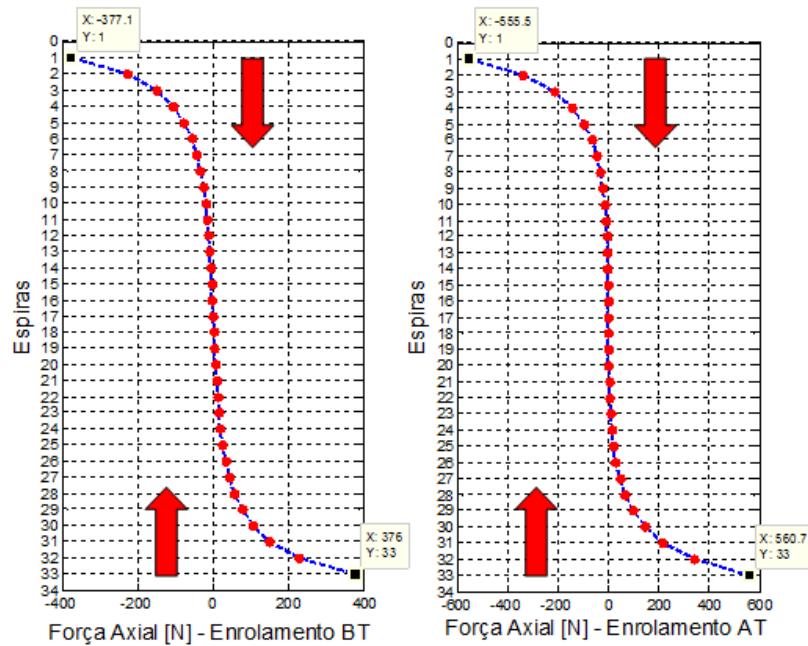


Figura 11. Força axial distribuída total em ambos os enrolamentos.

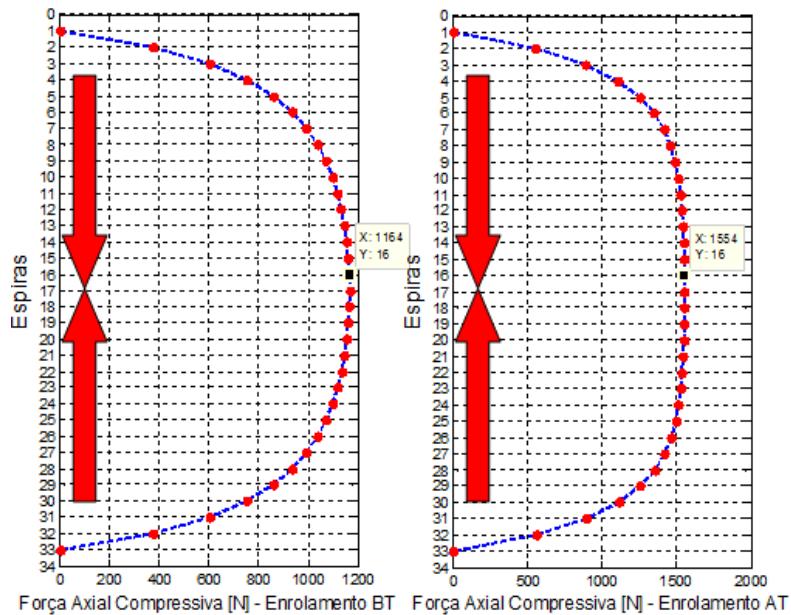


Figura 12. Força axial compressiva total na metade dos enrolamentos.

#### 4.4 Discussão

Em condições de curto-circuito verifica-se por meio dos resultados obtidos em todas as modelagens que a densidade de fluxo se concentra no meio isolante entre os enrolamentos da fase B, igual a aproximadamente 1,1 [T], conforme Figuras 5, 6 e 7. Dessa forma, este fluxo de dispersão associado a uma elevada corrente, produziu grandes esforços eletromecânicos, que em média foi 1534 vezes maior que o esforço encontrado para a condição nominal. Observa-se também que a densidade de fluxo magnético no núcleo é consideravelmente reduzida, como esperado, tendo em vista que em situações de curto-circuito, praticamente a totalidade do fluxo magnético fica distribuído no meio isolante (ROSENTINO JUNIOR, 2010).

Ainda em relação aos esforços eletromecânicos, constata-se através da Tabela

4 que os resultados para a força radial total no enrolamento interno, denotado por ( $F_{r-EI}$ ) e externo, denotado por ( $F_{r-EE}$ ) possuem ótima proximidade, até mesmo com resultados analíticos desenvolvidos e encontrados em (ROSENTINO JUNIOR, 2010). Entretanto, deve-se ressaltar que a modelagem do enrolamento considerando camada por camada e espira por espira, apesar da necessidade de maior processamento, forneceu informações qualitativas e quantitativas importantes para maior compreensão dos esforços eletromecânicos em transformadores, principalmente relacionadas às forças axiais. Portanto, dentro do enfoque deste trabalho, indica-se para a análise dos esforços eletromecânicos no transformador a modelagem desenvolvida no caso C.

	<b>Metodologia Analítica</b>	<b>Caso A</b>	<b>Caso B</b>	<b>Caso C</b>
$F_{r-EI}$ [N]	23.870	21.726	21.720	22.220
$F_{r-EE}$ [N]	35.000	31.944	31.943	31.210

Tabela 4. Comparação de resultados obtidos para forças radiais nas diferentes modelagens, sob condição de curto-círcuito trifásico.

## 5 | CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a modelagem de um transformador trifásico, enfatizando e comparando o uso de três possíveis modelagens para seus enrolamentos. Verificou-se que, apesar da necessidade de maior processamento, o enrolamento sendo modelado camada por camada e espira por espira proporciona mais possibilidades de análises, oferecendo dessa forma mais informações qualitativas e quantitativas acerca dos esforços eletromecânicos atuantes nas partes ativas dos transformadores.

## REFERÊNCIAS

AZVEDO, A. C. **Estresse Eletromecânico em Transformadores Causado por Curtos-Circuitos “Passantes” e Corrente de Energização**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

BARRA, P. H. A. **Estresse eletromecânico em transformadores sob o enfoque de curtos-circuitos assimétricos: Uma abordagem analítica e computacional**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

BARRA, P. H. A. et al. **Power system influence in a qualitative index for mechanical withstand safety margin analysis of transformers**. 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE). *Anais...IEEE*, 2018.

BARRA, P. H. A.; ROSENTINO, A. J. P.; DELAIBA, A. C. **Análise dos esforços eletromecânicos e, transformadores devido a assimetria dos enrolamentos, utilizando o método dos elementos finitos (MEF)**. VIII Workspot - International Workshop on Power Transformers, Equipment, Substations and Materials. *Anais...2016*

BARRA, P. H. A.; ROSENTINO, A. J. P.; DELAIBA, A. C. **Método dos Elementos Finitos para Análise de Esforços Eletromecânicos em Transformadores Devido às Faltas Assimétricas**.

IX Workspot - International workshop on power transformers, equipment, substations and materials. **Anais...**2018.

CIGRE; GROUP, W. **The Short Circuit Performance of Power Transformers**, 2002.

FARIA NETO, H. J.; BARRA, P. H. A.; DELAIBA, A. C. **Análise de resposta em frequência (FRA) para diagnóstico de falhas em transformadores**. XV Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica. **Anais...**2017.

GUIMARÃES, R. **Suportabilidade Mecânica e Vida Útil de Transformadores Submetidos a Corrente de Energização e Curto-Círcuito**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

MCNUTT, W. J. et al. Power Transformen Short-Circuit Strength - Requirements, Design, and Demonstration. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-89, n. 8, p. 1955–1969, 1970.

ROSENTINO JUNIOR, A. J. P. **Estimativa dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores Submetidos a um Curto-Círcuito Trifásico**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2010.

WATERS, M. **The Short-Circuit Strength of Power Transformers**. London: Macdonald & Co., 1966.

YUN-QIU, T.; JING-QIU, Q.; ZI-HONG, X. Numerical calculation of short circuit electromagnetic forces on the transformer winding. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 26, n. 2, p. 1039–1041, 1990.

## PROCEDIMENTO PARA AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DO LAÇO DE HISTERESE MAGNÉTICA

**Vítor Hörbe Pereira Da Costa**

Universidade do Estado de Santa Catarina,  
Centro de Ciências Tecnológicas, Departamento  
de Engenharia Elétrica  
Joinville – Santa Catarina

**Antônio Flavio Licarião Nogueira**

Universidade do Estado de Santa Catarina,  
Centro de Ciências Tecnológicas, Departamento  
de Engenharia Elétrica  
Joinville – Santa Catarina

**Leonardo José Amador Salas Maldonado**

Universidade do Estado de Santa Catarina,  
Centro de Ciências Tecnológicas, Departamento  
de Engenharia Elétrica  
Joinville – Santa Catarina

primeiro algoritmo é voltado para o cálculo das perdas magnéticas a partir da área do ciclo de histerese. O segundo algoritmo produz a curva de magnetização normal através da junção dos pontos que representam os vértices situados no primeiro quadrante de um conjunto de laços de histerese concêntricos em torno da origem do plano *B-H*. Cada laço de histerese está associado a um nível diferente da tensão de alimentação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Histerese, Perdas magnéticas, Núcleo de transformadores

**ABSTRACT:** The paper describes a set-up for the acquisition of the hysteresis loop using lumped circuit elements and a digital oscilloscope. All experiments relate to an especially designed and constructed shell-type power transformer. By using the digital oscilloscope in the X-Y mode, the hysteresis loop can be exhibited on the oscilloscope, and data related to the loop can be recorded. Two numeric algorithms in Python language perform the post-processing calculations. The first algorithm evaluates the area of one hysteresis loop to compute the core loss. The second algorithm produces the mean magnetization curve by joining the points at the first-quadrant tips of a family of loops produced at different levels of excitation.

**KEYWORDS:** Hysteresis, Magnetic losses, Transformer cores

**RESUMO:** O artigo descreve uma montagem para aquisição do laço de histerese empregando resistores, capacitores e um osciloscópio digital. Os experimentos são efetuados em um pequeno transformador de potência tipo concha, projetado e construído para ensaios em laboratório. O uso de um osciloscópio digital com dois canais operando no modo XY permite o traçado do laço de histerese na tela do osciloscópio e a gravação em arquivo digital dos pontos que representam o lugar geométrico do laço no plano *B-H*. Dois algoritmos numéricos em linguagem Python são usados no pós-processamento das informações. O

## 1 | INTRODUÇÃO

Os materiais ferromagnéticos são amplamente usados na indústria de equipamentos elétricos. Uma das aplicações mais relevantes desses materiais é a construção de transformadores. Surge assim a necessidade de caracterização do material ferromagnético. Ou seja, é preciso saber como um dado material irá se comportar quando submetido a um campo magnético de determinada intensidade (MALDONADO, 2015). É prática usual na indústria caracterizar materiais ferromagnéticos através dos laços de histerese magnética ou mesmo através da curva de magnetização normal. Os laços de histerese podem ser obtidos experimentalmente e os dados inerentes a cada laço podem ser processados separadamente empregando-se algoritmos numéricos para se estimar as perdas magnéticas no núcleo e levantar a curva de magnetização normal.

## 2 | O TRANSFORMADOR DE TESTE

O trabalho experimental é focado em um pequeno transformador do tipo concha com potência de 58 VA, projetado para operar na frequência de 60 Hz. Como se pode observar na Figura 1, os dois enrolamentos concêntricos, primário e secundário, estão localizados na trave central do núcleo laminado. O enrolamento externo forma o primário do transformador. Possui 240 espiras de cobre AWG-22 e tensão nominal de 48 V. O enrolamento interno, mais próximo à trave central, forma o secundário do transformador. Possui 1100 espiras de cobre AWG-28 e tensão nominal de 220 V. O núcleo do transformador é formado por lamações de aço com baixo teor de silício e espessura de 0,5 mm. Nenhum material isolante é inserido entre as lâminas adjacentes, e a condutividade elétrica das lâminas, medida em laboratório, é 2,71 MS/m. As dimensões geométricas do núcleo do transformador são indicadas na Figura 2.



Figura 1. Fotografia do núcleo laminado do transformador de teste

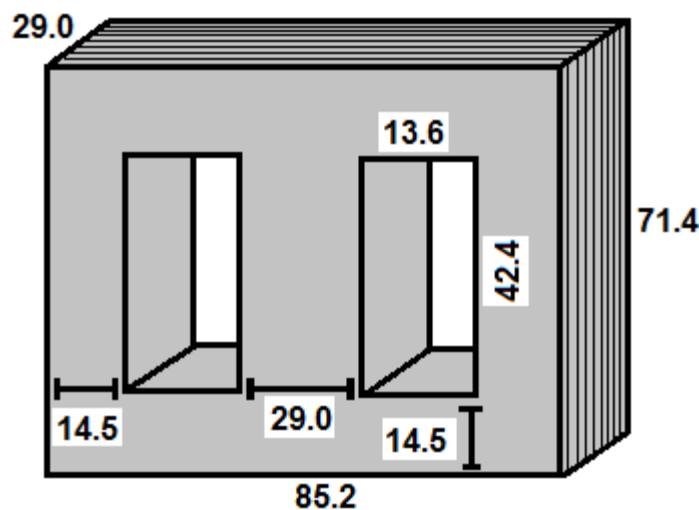


Figura 2. Núcleo do transformador. Dimensões geométricas em milímetro

### 3 | MONTAGEM DO EXPERIMENTO

A montagem do experimento para aquisição do laço de histerese deve ser feita de forma que o núcleo do transformador de teste possa, de fato, atingir a saturação magnética. A escolha mais óbvia para o experimento consiste em uma montagem similar ao ensaio de circuito aberto. Nessa condição de operação, a corrente secundária e a força magnetomotriz desmagnetizante são nulas, o fluxo magnético está totalmente confinado no núcleo e atinge valores elevados, limitados somente pela relutância finita do núcleo do transformador (NOGUEIRA, 2013).

O circuito eletroeletrônico empregado na montagem para aquisição do laço de histerese é mostrado na Figura 3. Nesse circuito, o ramo paralelo faz o papel de um “circuito integrador”, já que a tensão sobre o capacitor  $V_C$  é o resultado da integração analógica da corrente  $I_C$ . Esse ramo “desvia” parte da corrente que circula entre a fonte

e o enrolamento, e isso interfere negativamente no processo de aquisição dos sinais. Adicionalmente, o resistor  $R_1$  que é colocado em série com a fonte de alimentação também interfere negativamente no processo, porque aumenta a impedância vista pela fonte e reduz a magnitude da corrente que circula entre a fonte e o enrolamento primário.

Para minimizar os efeitos negativos desses componentes passivos no processo de aquisição dos sinais, o resistor  $R_2$  e o capacitor  $C$  que formam o ramo paralelo do circuito devem ser escolhidos de forma que a corrente desse ramo,  $I_C$ , seja muito menor que a corrente  $I_1$  que circula entre a fonte e o enrolamento. Em outras palavras, a magnitude da impedância do ramo paralelo deve ser muito maior que a magnitude da impedância intrínseca,  $Z_p$ , do enrolamento primário. Essa condição é expressa pela inequação  $|R_2 + 1/(jwC)| \gg |Z_p|$ , onde  $w$  representa a frequência angular em rad/s.

Na operação em circuito aberto, a corrente de primário é conhecida como corrente de excitação. Trata-se de uma corrente não senoidal, cuja amplitude para alimentação com tensão nominal é da ordem de 1 a 5% da corrente nominal do enrolamento. É desejável que a amostragem da corrente de excitação,  $I_1$ , não sofra redução significativa devido à presença do elemento  $R_1$  colocado em série com a fonte de alimentação. É prática usual o emprego de resistores-série  $R_1$  na faixa de 1,0 a 10,0 ohms, uma vez que possuem resistência elétrica suficientemente maior que a do enrolamento e por serem encontrados com facilidade nos laboratórios de eletrotécnica. Os valores dos componentes passivos empregados na montagem e escolhidos com base nesses critérios são indicados na Tabela I.

Componente	$R_1$ ( $\Omega$ W)	$R_2$ ( k $\Omega$ )	$C$ ( $\mu\text{F}$ )
Valor	10,0	200	1,57

Tabela I - Valores dos componentes passivos empregados na montagem

No ensaio para aquisição do laço de histerese, o enrolamento primário de 240 espiras é alimentado através do autotransformador variável (*variac*). Para uma dada tensão de alimentação, circula uma corrente primária  $I_1$  que é obtida, de forma indireta, através da leitura do sinal de tensão  $V_{ch1}$  no canal X do osciloscópio. O valor do campo magnético  $H$  no núcleo do transformador é proporcional à corrente primária  $I_1$  e é calculado como função da tensão  $V_{ch1}$ . Já a indução magnética  $B$  no núcleo do transformador é proporcional à queda de tensão  $V_C$  sobre o capacitor, medida através da leitura do sinal de tensão  $V_{ch2}$  no canal Y do osciloscópio. Para se obter o laço de histerese e exibi-lo na tela do osciloscópio é necessário efetuar a composição dos sinais  $V_{ch1}$  e  $V_{ch2}$  no modo XY.

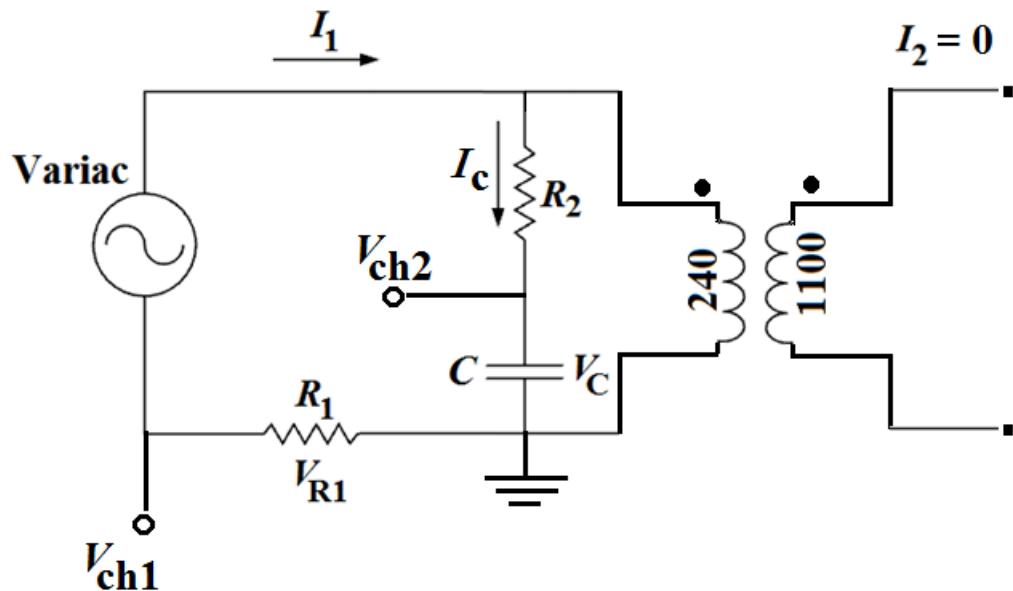


Figura 3. Circuito eletroeletrônico para aquisição do laço de histerese

As constantes de proporcionalidade entre as tensões medidas e as grandezas magnéticas  $H$  e  $B$  dependem dos valores dos elementos de circuito  $R_1$ ,  $R_2$  e  $C$ , bem como das dimensões geométricas do núcleo do transformador e número de espiras  $N_1$  e  $N_2$  dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente. Para um núcleo magnético com perímetro médio  $l_m$  e seção magnética  $A$ , a intensidade do campo magnético  $H$  no núcleo é calculada pela equação

$$H = \frac{N_1}{l_m \cdot R_1} \cdot V_{ch1}. \quad (1)$$

A indução magnética  $B$  no núcleo é calculada pela equação

$$B = \frac{R_2 \cdot C}{N_1 \cdot A} \cdot V_{ch2}. \quad (2)$$

Uma vez obtido o laço de histerese no osciloscópio, é possível gravar em um arquivo digital os pontos que definem o lugar geométrico do laço no plano  $B-H$  para processamento futuro.

#### 4 | PERDAS MÁGNÉTICAS E CURVA NORMAL

As informações relativas aos ciclos de histerese foram processadas externamente empregando-se algoritmos numéricos desenvolvidos em linguagem Python (PYTHON LANGUAGE REFERENCE, 2019). O primeiro algoritmo emprega os pontos ( $B, H$ ) associados a um único ciclo de histerese, como aquele mostrado na Figura 4. Esse

algoritmo é usado no cálculo da potência média que quantifica as perdas magnéticas no núcleo do transformador na operação em circuito aberto. Nessa condição de operação, o enrolamento de 240 espiras é alimentado pela tensão nominal de 48 V. A densidade volumétrica de energia,  $w$ , associada a um ciclo de histerese é calculada pela integral cíclica

$$w = \oint H dB. \quad (3)$$

Para operação em uma dada frequência  $f$ , a potência média,  $P$ , que representa as perdas energéticas no núcleo do transformador é calculada pela integral cíclica

$$P = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot C \cdot f \cdot \oint V_{ch1} dV_c. \quad (4)$$

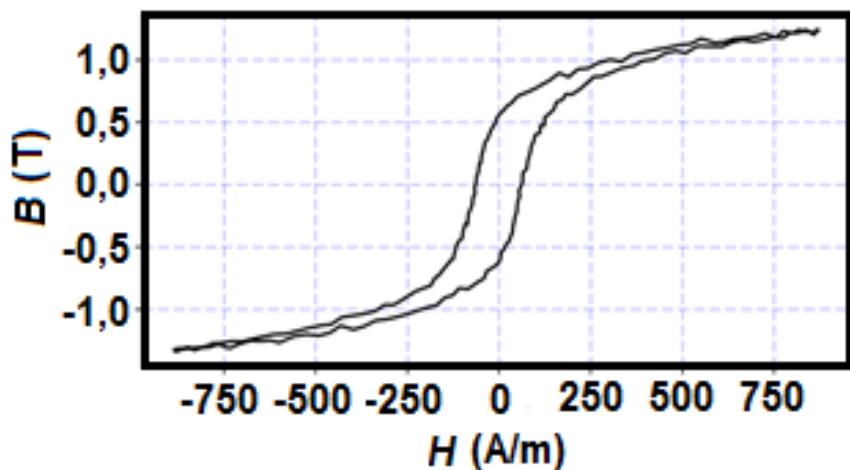


Figura 4. Laço de histerese

O método utilizado para traçar a curva de magnetização normal mostrada na Figura 5 é baseado na união dos vértices de um conjunto de laços de histerese concêntricos em torno da origem do plano  $B-H$  (Slemon and Straughen, 1982). A junção dos vértices é feita por um algoritmo numérico que utiliza segmentos retilíneos para unir os pontos  $(B,H)$  associados aos vértices situados no primeiro quadrante. Essa característica é a informação mais comumente encontrada em catálogos de fabricantes de materiais magnéticos e aços elétricos, e é utilizada com frequência em programas de análise numérica e projeto de máquinas e transformadores.

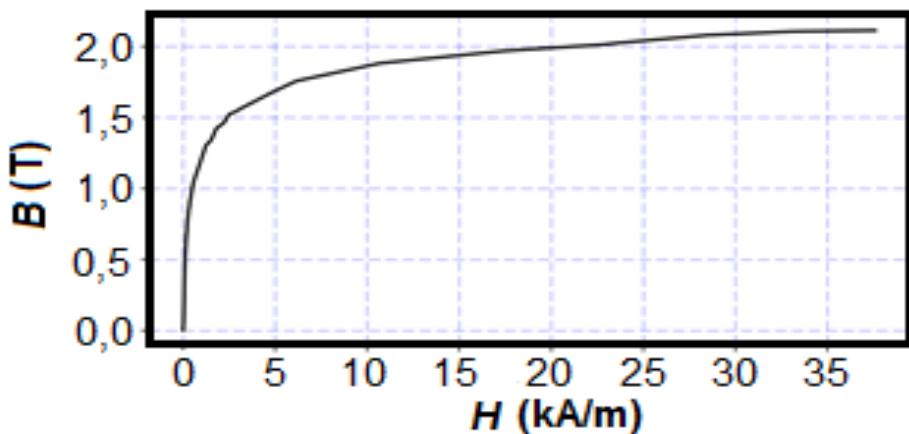


Figura 5. Curva de magnetização normal

## 5 | CONCLUSÕES

O artigo descreve um procedimento para aquisição e processamento numérico do laço de histerese magnética do núcleo de um transformador monofásico. Esse procedimento é uma alternativa de baixo custo para o processo de caracterização de materiais ferromagnéticos, já que na indústria a caracterização desses materiais é feita empregando-se equipamentos de custo elevado como o histeresígrafo e o quadro de Epstein.

## REFERÊNCIAS

MALDONADO, L.J.A.S. **Caracterização de materiais magnéticos a baixo custo aplicada à obtenção dos parâmetros de um dispositivo eletromagnético**. Dissertação de mestrado. Orientada por A.F.L. Nogueira. Universidade do Estado de Santa Catarina (2015).

NOGUEIRA, A.F.L. **Calculation of power transformers equivalent circuit parameters using numerical field solutions**. International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, **17**(1) 19-26 (2013).

**PYTHON LANGUAGE REFERENCE**. Version 3.6.2. Python Software Foundation. Visited on 10/02/2019. Available: <http://www.python.org>

SLEMON, G.R. and STRAUGHEN, A. **Electric machines** (Addison Wesley Publishing Company, London, 1982), p. 16.

## SIMULAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO E CORRENTE ELÉTRICA EM TECIDOS BIOLÓGICOS

**Guilherme Brasil Pintarelli**

Instituto de Engenharia Biomédica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina  
(ORCID 0000-0002-6920-0049)

**Afrânio de Castro Antonio Jr.**

Instituto de Engenharia Biomédica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina  
(ORCID 0000-0002-8436-7736)

**Raul Guedert**

Instituto de Engenharia Biomédica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina  
(ORCID 0000-0002-2466-5061)

**Sandra Cossul**

Instituto de Engenharia Biomédica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina  
(ORCID 0000-0003-4839-9447)

**Daniela Ota Hisayasu Suzuki**

Instituto de Engenharia Biomédica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina  
(ORCID 0000-0001-6373-1677)

procedimentos clínicos, em função de diversas condições tecnicamente impostas. Nesse capítulo são abordados o processo de condução em meios biológicos, aplicações derivadas de indução de potencial transmembrana, modelagem matemática e exemplo de uso de simulações em áreas médicas. A abordagem do capítulo não envolve conhecimentos prévios em áreas de tecnologia ou saúde.

**PALAVRAS-CHAVES:** Campo Elétrico. Tecidos Vivos. Modelagem matemática. Simulação Matemática.

### SIMULATIONS OF ELECTRICAL FIELD AND ELECTRIC CURRENT DISTRIBUTION IN BIOLOGICAL TISSUES

**ABSTRACT:** Electrical field and current distribution simulations in biological tissues can reduce costs and research times and save lives. Nevertheless, they allow predicting events that have not yet occurred and optimising clinical procedures, depending on several technically imposed conditions. In this chapter, the biological conduction process, applications derived from transmembrane potential induction, mathematical modelling and an example of the use of simulations in medical areas is discussed. The chapter approach does not involve prior knowledge in areas of technology or health.

**RESUMO:** As simulações de distribuição de campo e corrente elétrica em tecidos biológicos podem reduzir custos e tempos de pesquisas, e poupar vidas. Ainda assim, permitem prever eventos que ainda não aconteceram e otimizar

**KEYWORDS:** Electric field. Living tissues. Mathematical modeling. Mathematical simulation.

## 1 | INTRODUÇÃO

Nesse capítulo são abordados aspectos introdutórios de simulações de distribuição de campo e corrente elétrica em tecidos biológicos. Os tecidos biológicos podem possuir parâmetros complexos. Resolver a distribuição de campos e corrente elétrica pode ser de execução laboriosa quando aplicada à um tecido biológico e resolução analítica inviável. Por isso, faz-se necessário uso de recursos computacionais e métodos de simulação numérica.

Para explicação do tópico, serão utilizadas quatro subseções, na primeira será explicado os princípios de condução de correntes em meios biológicos, como se comportam campos elétricos e propriedades elétricas dos tecidos. Na segunda, os fenômenos de indução de potencial transmembrana e efeito joule, que por consecutiva explicam algumas das aplicações de campos elétricos em tecidos. Na terceira, a modelagem matemática. Por fim, serão exemplificadas aplicações, com ênfase em tratamentos por eletroporação.

## 2 | A CONDUÇÃO E CAMPO ELÉTRICO EM MEIOS BIOLÓGICOS

O campo elétrico é imposto pela distribuição de cargas elétricas, ou seja, gradiente de potencial elétrico, e possui natureza vetorial. Partículas eletricamente carregadas são sujeitas a forças quando localizadas em um campo elétrico. Em meios biológicos, é comum a existência de cargas iônicas. Os íons são moléculas ou átomos eletricamente carregados. Por exemplo,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$  E  $\text{SO}_4^{2-}$ . A orientação do fluxo iônico por condução é de acordo com o vetor campo elétrico, enquanto o sentido do fluxo depende da polaridade do íon. O fluxo de cátions é no sentido do campo elétrico, já o fluxo de ânions é oposto ao campo. A corrente de condução iônica é representada na Figura 1. Observe que o mecanismo de condução iônico é diferente dos materiais elétricos. Nestes materiais, o princípio de condução é por deslocamento de elétrons (GRIMNES; MARTINSEN, 2014).

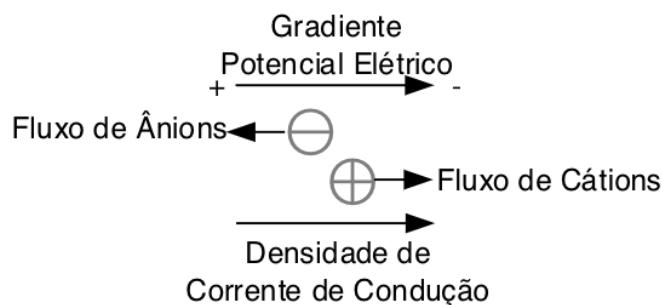


Figura 1 – Sentido de densidade de corrente por condução e deslocamento de cátions  $\oplus$  e

ânions  $\Theta$  em função de gradiente de potencial elétrico.

Além da corrente provocada por campo elétrico, pode existir uma corrente por difusão. Esta tem orientação e o sentido que segue a região de alta concentração para a região de baixa concentração de determinada partícula. Esse fenômeno é decorrência da tendência de homogeneização de concentração do sistema. O fluxo por difusão é em função do gradiente de concentração, que é descrito pela lei de Fick. Partículas carregadas resultam em densidade de corrente de difusão, como na Figura 2 – Sentido de densidade de corrente por difusão e fluxo de difusão (fluxo de cátions u) em função de gradiente de concentração.. O fenômeno de difusão também pode ocorrer para partículas não carregadas, nesse caso não há corrente de difusão. A difusão é fenômeno importante principalmente quando se estuda processos a nível celular.

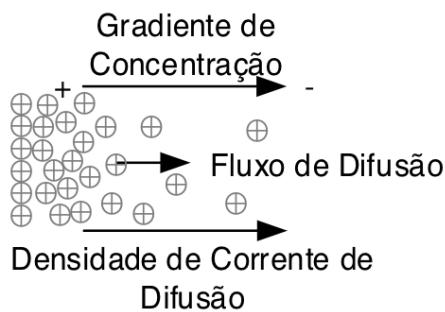


Figura 2 – Sentido de densidade de corrente por difusão e fluxo de difusão (fluxo de cátions  $\oplus$ ) em função de gradiente de concentração.

Materiais biológicos possuem características condutiva e capacitiva expressivas e geralmente são caracterizados em dois parâmetros. Que são a condutividade elétrica e a permissividade elétrica. A condutividade elétrica (representado por  $\sigma$ ) é proporcional a componente resistiva do material, e expressa a facilidade da passagem de correntes elétricas. Sua unidade no sistema internacional (SI) é Siemens por metro ( $S/m$ ). A permissividade elétrica (representado por  $\epsilon$ ) explica como um meio se polariza em função de um campo elétrico, ou seja, a facilidade de formar um campo elétrico no meio iônico. Sua unidade no SI é Farad por metro ( $F/m$ ). A distribuição do campo elétrico é em função de características elétricas do material e pode ser obtida com a solução da equação de Laplace, conforme equação (1). O vetor campo elétrico é obtido com a equação (2). Observa-se que as equações (1) e (2) são para uso em regime estático ou quase-estático.

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \quad (1)$$

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (2)$$

Onde a tensão é representada por  $V$ . Ressalva-se que  $\nabla$  é o operador divergente do cálculo vetorial e  $\nabla$  é o operador gradiente.

A completa descrição de como os campos elétricos e magnéticos existem, ou seja, como se distribuem, que configurações podem assumir e que fenômenos podem dar origem, é dada pelas equações de Maxwell (BASTOS, 2004; "Maxwells Equations", 2018). Por exemplo, a lei de Ampère (equação (3)), relaciona o vetor campo elétrico com o de campo magnético.

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3)$$

Ressalva-se que  $\nabla \times$  é o operador rotacional do cálculo vetorial.

Os tecidos biológicos podem apresentar heterogeneidade, anisotropia e propriedades elétricas não lineares (*e.g.*, condutividade em função do campo elétrico e dispersões). Heterogeneidade é a característica de complexidade estrutural e anisotropia é a característica de propriedades físicas (como propriedades elétricas) variáveis com a direção. Essas características podem ocorrer devido a morfologia do tecido. As dispersões são alterações da permissividade em função da frequência (SCHWAN, 1957). O campo de estudo de caracterização de propriedades elétricas passivas de materiais biológicos é chamado de bioimpedância (GRIMNES; MARTINSEN, 2014).

### 3 | CAMPOS ELÉTRICOS APLICADOS AOS TECIDOS BIOLÓGICOS

As aplicações de campos elétricos em sistemas biológicos variam de acordo com o nível do sistema (corpo, órgãos, tecidos, células ou moléculas). Alguns grupos de aplicações são: manipulação cinética, estimulação de células excitáveis, eletropermeabilização de membranas e ablação térmica (ZIMMERMANN; NEIL, 1996).

A característica capacitiva da membrana celular é de interesse em fenômenos que necessitam de indução de potencial transmembrana em função de campo elétrico exógeno. Quando a célula é imersa em um campo elétrico os íons se aproximam da membrana celular (no meio extracelular e no meio intracelular). Ou seja, ocorre indução de potencial transmembrana. Esse processo é demonstrado na Figura 3 – Representação da indução de cargas elétricas (íons) na membrana celular devido campo elétrico externo. Em (a) uma célula está inserida entre eletrodos e não há campo elétrico aplicado. Em (b) a mesma célula está simplificada. Nesta todo o conteúdo intracelular foi modelado por cargas positivas e negativas (íons). Em (c) um campo elétrico externo é aplicado e ocorre deslocamento dessas cargas até a membrana celular, que é eletricamente isolante.. A aplicação de campos elétricos externos pode induzir potenciais transmembrana suficientes para provocar estimulação celular e

eletroporação (KOTNIK, 2016; KRASSOWSKA; NEU, 1994).

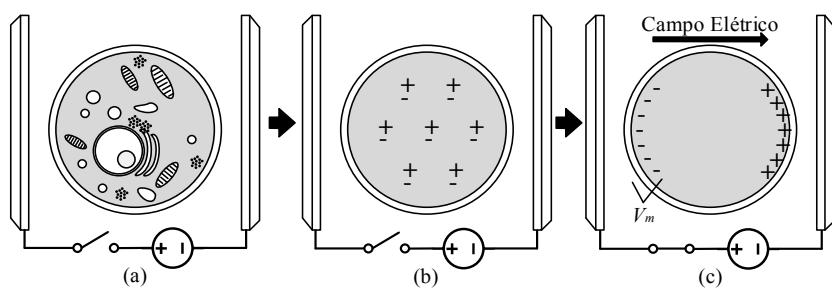


Figura 3 – Representação da indução de cargas elétricas (íons) na membrana celular devido campo elétrico externo. Em (a) uma célula está inserida entre eletrodos e não há campo elétrico aplicado. Em (b) a mesma célula está simplificada. Nesta todo o conteúdo intracelular foi modelado por cargas positivas e negativas (íons). Em (c) um campo elétrico externo é aplicado e ocorre deslocamento dessas cargas até a membrana celular, que é eletricamente isolante.

De maneira geral, na estimulação elétrica, objetiva-se respostas fisiológicas e integridade final da célula excitável. A estimulação elétrica é relevante em pesquisas e aplicações clínicas para corrigir arritmias cardíacas (VIANA *et al.*, 2016), transtornos e doenças neurológicas (SCHLENSTEDT *et al.*, 2017), alívio de dor (com uso ou não de técnicas de *Deep Brain Stimulation*, DBS) (LEVY; DEER; HENDERSON, 2010) e diagnóstico de disfunções neuromusculares (como polineuropatia diabética periférica) a partir da estimulação de nervos periféricos e sua resposta (COSSUL *et al.*, 2018).

A indução de potenciais transmembrana supra fisiológicos, possibilita realizar alterações na característica de seletividade da membrana da célula, fenômeno denominado eletroporação ou eletropermeabilização. Esse fenômeno pode ser realizado de maneira reversível ou irreversível. Essa técnica aprimora ou é mais eficiente que técnicas e métodos tradicionais. Por exemplo, na transferência genética, a eletroporação permite aplicação em maior gama de situações (diferentes níveis e características celulares) (IVORRA *et al.*, 2009); no tratamento de câncer, a eletroporação combinada com quimioterapia melhora qualidade do tratamento (GEHL *et al.*, 2018; SUZUKI; MARQUES; RANGEL, 2016) na pasteurização, a eletroporação permite conservar propriedades dos alimentos, que podem ser alteradas com pasteurização térmica (GOLBERG; FISCHER; RUBINSKY, 2010); e em extração de materiais intracelulares, a eletroporação permite extração em menores tempos (HABERL MEGLIC; MAROLT; MIKLAVCIC, 2015).

Observa-se que a indução de potencial transmembrana depende de características do campo aplicado, como intensidade e frequência (GRIMNES; MARTINSEN, 2014). Para fenômeno de indução de potencial transmembrana geralmente aplica-se campos pulsados com onda quadrada mono/bipolar e exponencial truncada mono/bipolar (BOTTER; MERLETTI, 2016; MARTY *et al.*, 2006; VIANA *et al.*, 2016).

A passagem de corrente elétrica em um material provoca geração de calor e seu aquecimento, no período da imposição de um campo elétrico. Esse fenômeno é explicado pela lei de Joule. Geralmente o efeito joule é compreendido como um

“efeito colateral” do campo elétrico. Porém, utiliza-se esse efeito em eletrocirurgia. A densidade elevada de corrente na extremidade do equipamento eletro cirúrgico, também chamado de bisturi elétrico, provoca destruição do tecido por desidratação ou vaporização. O fenômeno é utilizado principalmente para redução do tempo do corte cirúrgico e/ou coagular tecidos e vasos sanguíneos. Observa-se que nesse tipo de equipamento utiliza-se frequências de 300 kHz a 3 MHz (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013).

Ressalva-se que as aplicações de corrente elétrica em humanos ou outros animais deve-se atender a limites impostos por normas e legislações vigentes. Principalmente, limites em relação à segurança elétrica. Por exemplo, a ABNT NBR 60601 pode impor limites quanto à amplitude de campos elétricos, frequência, duração e correntes toleráveis em seres humanos (ABNT, 2016).

## 4 | A MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática é um processo desenvolvido e utilizado em paralelo ao cálculo matemático, que serve para transcrever observações do mundo em funções matemáticas. A modelagem permite prever eventos que ainda não aconteceram ou que ainda não são completamente entendidos. Os modelos matemáticos estão presentes no cotidiano, por exemplo, em estimativa de tempo de viagem de carro e previsão climática. No primeiro caso, a modelagem contextualiza que um objeto (seu carro) está se deslocando no espaço em um determinado período de tempo, e é possível obter uma função (cálculo matemático) para descrever a duração da viagem. O motorista pode aprimorar seu modelo e acrescentar intervalos de descanso com base na duração total da viagem. No segundo caso, o modelo climático é de um sistema complexo, ele é alimentado por um conjunto de informações meteorológicas provenientes de diversas estações na terra (*e.g.*, vento, pressão, temperatura e umidade) e dados de satélite.

Independente do modelo, é possível estudar fenômenos que ainda não aconteceram. Esse fato da o poder de realizar interferências apenas no modelo para prever o que irá acontecer em um ambiente real – a esse processo damos o nome de simulação. No exemplo do velocímetro do carro, é possível prever o horário de chegada baseado no limite de velocidade da via, mas também é possível simular casos em que o motorista dirige com velocidade inferior ou superior e acrescentando ou não paradas de descanso.

Devido à complexidade de alguns fenômenos, é bastante usual que os modelos matemáticos sejam específicos, transcrevendo muitas vezes apenas uma parcela de um fenômeno, ou, o transcrevendo sem considerar alguns aspectos. Por este motivo um modelo pode não ser exato, ou seja, o resultado prático não será idêntico ao modelado, mas sim estará dentro de um intervalo de confiança. Um bom modelo é aquele que representa uma determinada situação de maneira suficiente (quantidade de erros conhecida e adequada) e que pode ser computado em tempo adequado.

Por exemplo, um modelo de previsão do tempo para o dia seguinte não é adequado se ele demorar mais de 24 horas para ser computado (FISCHER, 2008; WOELKE; MURGUEITIO; PREISSNER, 2010).

Além de recursos do cálculo matemático, pode-se utilizar outros recursos para um modelo. Por exemplo, o modelo de Hodgkin-Huxley utiliza a teoria de circuitos elétricos (HODGKIN; HUXLEY, 1952). Nele, são modelados os processos de ativação e propagação dos potenciais de ação de neurônios. Nota-se que esse processo é um fenômeno bioquímico, mas pode ser modelado considerando que as variações biológicas e químicas das células correspondem a variações em um circuito elétrico. Como o modelo se propõe a analisar taxas de variações, matematicamente isso pode ser transscrito por equações diferenciais, neste caso, por quatro equações diferenciais ordinárias não-lineares. Os coeficientes utilizados são obtidos através de experimentos práticos, método que também pode ser utilizado para validar o modelo proposto (HAEFNER, 2005).

Geralmente os modelos matemáticos que descrevem a distribuição de campo e corrente elétrica em um tecido não são adequados ao método de cálculo analítico, portanto, é necessário a resolução numérica. Um tecido pode ser dividido em unidade infinitesimais. Para um modelo ser compatível a um computador é necessário processo de discretização. Ou seja, divisão do tecido, para fins de cálculo, em partes finitas. O método de elementos finitos é um procedimento utilizado para discretização. O resultado dessa divisão recebe o nome de malha. Na Figura 4 – Malhas geradas por um software de simulação. (a) Malha com menos elementos finitos. (b) Malha com mais elementos finitos e, portanto, maior resolução. É mostrado exemplos de duas malhas geradas por um software de simulação. Nota-se que quanto maiores os elementos da malha, maior será o erro associado a simulação, visto que a resolução do problema será tratada de forma cada vez mais genérica. Por outro lado, malhas muito finas (com muitos elementos), embora aumentem o grau de resolução da simulação, também aumentam a complexidade computacional, pois mais cálculos deverão ser realizados. Pode-se associar a resolução de uma malha à pixels de uma fotografia ou vídeo. Uma fotografia de menor resolução demanda menos recursos computacionais. Uma fotografia com maior resolução demanda mais recursos computacionais.

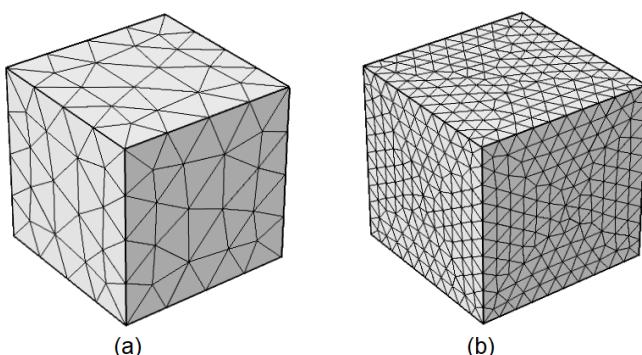


Figura 4 – Malhas geradas por um software de simulação. (a) Malha com menos elementos finitos. (b) Malha com mais elementos finitos e, portanto, maior resolução.

As dimensões das malhas utilizadas dependem da aplicação. Uma simulação de elementos grandes, como a variação térmica em peças de motores, pode não necessitar de resoluções micrométricas. Em um estudo de simulação de uma célula, pode ser necessário resolução na ordem de nanômetros.

Durante a resolução numérica pode-se aplicar métodos numéricos iterativos. Estes operam com varreduras de possibilidades e convergência para resultados possíveis. Um dos métodos de iteração é o de Newton, onde o software realiza progressivos cálculos para o mesmo ponto, atribuindo possíveis respostas e buscando a convergência para o melhor resultado, interrompendo a busca ao encontrar um valor com um erro menor que o limiar desejado.

Embora os resultados de simulações contenham erros associados (e.g., erros da modelagem, resolução da malha e de resolução numérica), os resultados computacionais e experimentais costumam ser próximos. É possível prever com pequenos desvios resultados práticos em um ambiente computacional, o que permite estudar e compreender como um fenômeno reage a diversos estímulos. É comum o uso de softwares integrados e especializados para construção do modelo, geração da malha e solução numérica.

## 5 | APLICAÇÃO EM ELETOPORAÇÃO

Quando o tecido é submetido a campos suficientemente intensos, a membrana celular sofre alterações que resultam na abertura de poros (potenciais transmembrana supra fisiológicos), que aumentam a permeabilidade celular. Essas alterações podem apresentar duas características, dependendo da intensidade do campo aplicado. Na eletroporação reversível, a célula aumenta sua permeabilidade momentaneamente, mas ainda é capaz de retornar ao seu estado inicial. Já na eletroporação irreversível, as mudanças na membrana são tão intensas que a célula perde sua capacidade de retornar ao estado inicial, consequentemente morrendo pela perda da homeostase e desbalanceamento osmótico, visto que sua permeabilidade é permanentemente alterada (IVORRA, 2010).

Entre as diversas aplicações para eletroporação, destaca-se a possibilidade de auxiliar o tratamento de câncer por quimioterapia em uma técnica denominada eletroquimioterapia. Nela, utiliza-se a eletroporação reversível para aumentar a citotoxicidade dos fármacos quimioterápicos, acelerando o processo de inserção destes em meio intracelular, isto é, aplica-se o quimioterápico na massa tumoral em conjunto com a eletroporação, que aumenta a permeabilidade celular e atua como um “catalisador” do fármaco no sentido do transporte entre a membrana (Okino & Hitoshi, 1987).

A principal vantagem da técnica é que, como a eletroporação utilizada é reversível, ela não será responsável pela morte celular, mantendo os benefícios de seletividade dos tratamentos quimioterápicos. Dessa forma, são reduzidos o tempo de tratamento e dosagem de medicamentos (e efeitos colaterais) (MARTY *et al.*, 2006). Por outro lado, há desafios de implementação, uma vez que no tratamento todo o volume do tumor deve ser contemplado por campos elétricos adequados, nem sempre havendo alterações visuais instantâneas no tecido.

As simulações computacionais são uma ferramenta essencial para o pré-tratamento da eletroquimioterapia, neste objetiva-se simular o volume de eletroporação através da distribuição de campos elétricos e estudar se o protocolo é suficiente para atingir todo o tumor. Nesse caso, os parâmetros como tensão aplicada e configuração dos eletrodos podem ser otimizados para o tratamento. Como a eletroporação altera as membranas celulares, ela altera também as características elétricas do tecido. Por causa disso, os modelos utilizados para esse tipo de simulação consideram que as características elétricas do tecido (*e.g.*, condutividade) são alteradas em função do campo elétrico aplicado e eletroporação (SEL *et al.*, 2005). As figuras 5 e 6 representam o processo de avaliação, reconstrução computacional e resultado das simulações para diferentes casos, as setas indicam áreas onde a margem de segurança é muito pequena e representam situações de risco (campo elétrico inadequado).

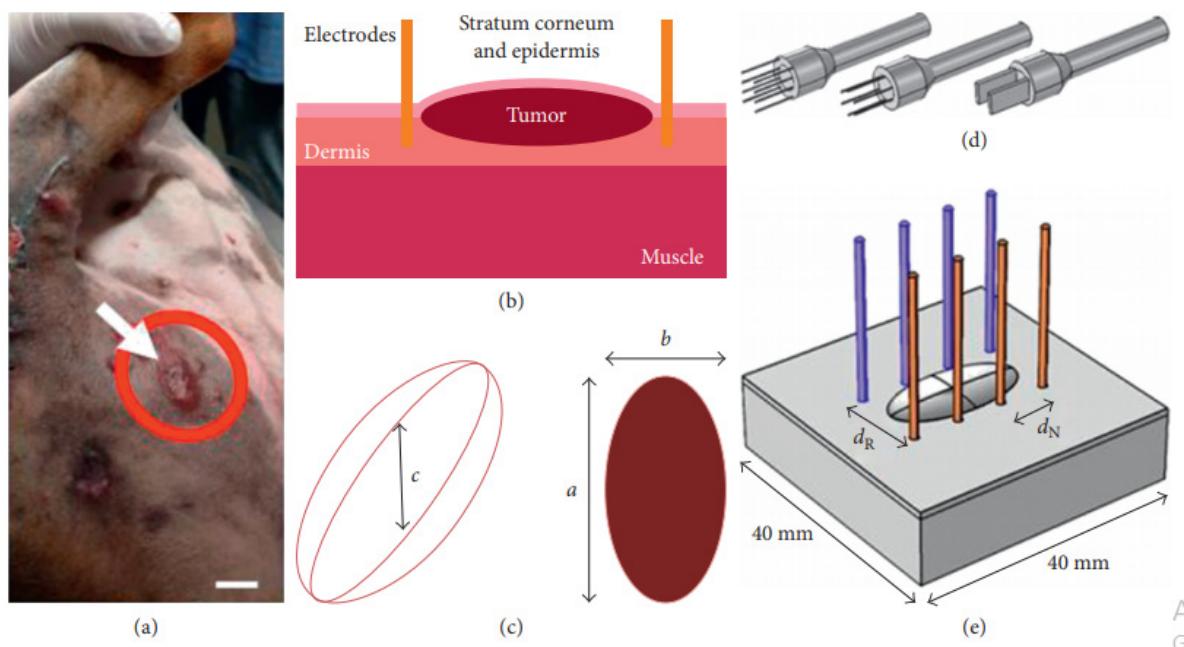


Figura 5 – Caso prático de eletroquimioterapia. (a) Tumor superficial diagnosticado em um cachorro. (b) Esquemático bidimensional do tumor e tecidos adjacentes. (c) Esquemático das dimensões tumorais. (d) Eletrodos disponíveis no mercado. (e) Reconstrução em software de simulação do caso apresentado para uma configuração de eletrodos. Fonte: José Alvim Berkenbrock, Rafaela Grecco Machado, and Daniela Ota Hisayasu Suzuki, “Electrochemotherapy Effectiveness Loss due to Electric Field Indentation between Needle Electrodes: A Numerical Study,” Journal of Healthcare Engineering, vol. 2018, Article ID 6024635, 8 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/6024635>.

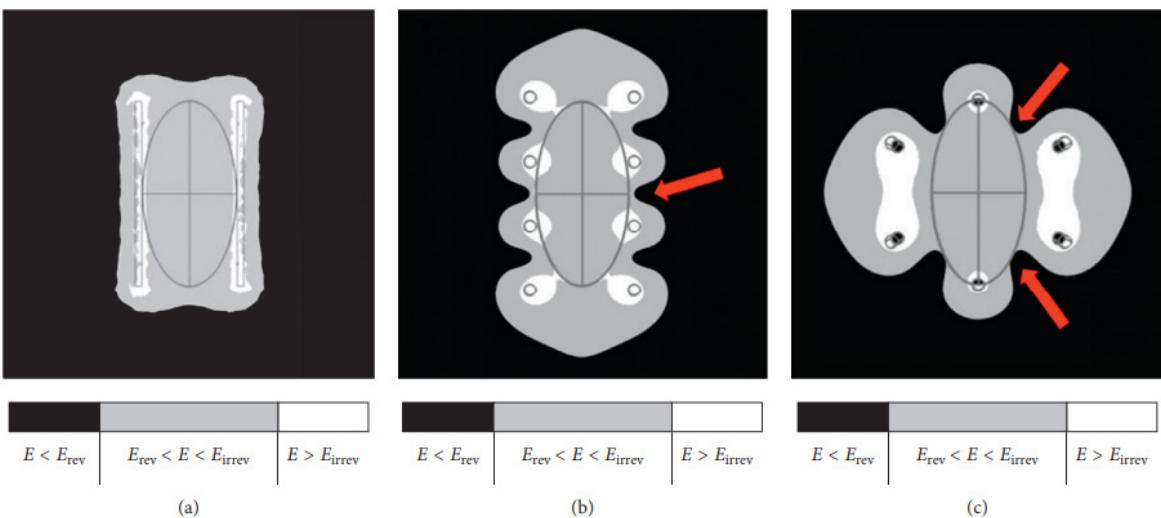


Figura 6 – Resultados das simulações para três casos. (a) Utilizando placas paralelas. (b) Utilizando uma configuração de agulhas em paralelo. (c) Utilizando uma configuração de agulhas hexagonais. Fonte: Adaptado José Alvim Berkenbrock, Rafaela Grecco Machado, and Daniela Ota Hisayasu Suzuki, “Electrochemotherapy Effectiveness Loss due to Electric Field Indentation between Needle Electrodes: A Numerical Study,” Journal of Healthcare Engineering, vol. 2018, Article ID 6024635, 8 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/6024635>.

A aplicação de eletroporação retratada nesse capítulo exemplifica o pré-tratamento de câncer em tecido animal *in vivo*. Neste caso as simulações indicam caminhos adequados e inadequados para o tratamento sem experimentações exaustivas em tecido vivo. Todavia, as experimentações em tecido vivo são necessárias para construção do modelo. Uma vez construído, o modelo pode ser utilizado para diversos tratamentos. Isso mostra possibilidade de poupar recursos e tempo de centros de pesquisa e empresas.

A economia de recursos também é possível em casos que o experimento prático envolve destruição mecânica da amostra, necessita de infraestrutura com grandes dimensões e/ou características não encontradas facilmente na natureza (*e.g.*, condições de pressão e temperatura), ou a própria amostra é de alto custo (*e.g.*, desenvolvimento de embarcações). Em áreas de experimentação biológica, o uso de simulações pode reduzir ou substituir a quantidade de animais necessários para um determinado estudo, pois resultados preliminares já podem ser obtidos no ambiente de simulação (JONES; GARDNER; WATSON, 2009); como também, em casos que não há possibilidade de ensaio prático, a simulação pode informar a solução com maior chance de sucesso (SUZUKI *et al.*, 2015, 2017).

As aplicações de simulações de campos elétricos e seus efeitos são em estimulação elétrica (*e.g.*, de tecido neural (OPITZ *et al.*, 2015) e muscular (KOCBACH; MOHN; BRIX, 2011; ZEIGHAMI; ALIZADEH; SAVIZ, 2019)), ablação não térmica (SANO *et al.*, 2016) electrode exposure lengths, and tissue types. A vegetable (potato e tratamentos por eletroporação em geral (GARCIA; DAVALOS; MIKLAVCIC, 2014; RITTER *et al.*, 2018)).

Observa-se que nesse capítulo foram abordadas situações de fenômenos em

baixa frequência, ou seja, campos estáticos ou quasi-estáticos, ambos não ionizantes. Em algumas aplicações utiliza-se espectros de frequência superiores. Por exemplo, em simulações para taxa de absorção específica (*Specific Absorption Rate*, SAR) e de campos eletromagnéticos ionizantes. Esse valor indica quanto de potência pode ser absorvido por um tecido biológico vivo. Equipamentos com tecnologias sem fio e equipamentos médicos podem ser sujeitos à esse tipo de regulação (CHABALKO; SHAHMOHAMMADI; SAMPLE, 2017). Além da física elétrica, os modelos podem comportar física mecânica, termodinâmica e acústica (MAKAROV *et al.*, 2017).

## REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR IEC 60601-1:2010 Emenda 1:2016. Rio de Janeiro: [s.n.].
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR IEC 60601-2-2, 2013.
- BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-Estática**. Florianópolis, SC: Editora da UFSC, 2004.
- BOTTER, A.; MERLETTI, R. EMG of Electrically Stimulated Muscles. In: **Surface Electromyography : Physiology, Engineering, and Applications**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2016. p. 311–332.
- CHABALKO, M. J.; SHAHMOHAMMADI, M.; SAMPLE, A. P. Quasistatic Cavity Resonance for Ubiquitous Wireless Power Transfer. **PLOS ONE**, v. 12, n. 2, p. e0169045, 15 fev. 2017.
- COSSUL, S.; FAVRETTO, M. A.; ANDREIS, F. R.; IWATA, D. N. R.; MARQUES, J. L. B. Proposta de um Sistema para Estudos de Condução Nervosa. Uberlandia, 2018,
- FISCHER, H. P. Mathematical modeling of complex biological systems: from parts lists to understanding systems behavior. **Alcohol research & health : the journal of the National Institute on Alcohol Abuse and Alcoholism**, v. 31, n. 1, p. 49–59, 2008.
- GARCIA, P. A.; DAVALOS, R. V.; MIKLAVCIC, D. A Numerical Investigation of the Electric and Thermal Cell Kill Distributions in Electroporation-Based Therapies in Tissue. **PLoS ONE**, v. 9, n. 8, p. e103083, 12 ago. 2014.
- GEHL, J.; SERSA, G.; MATTHIESSEN, L. W.; MUIR, T.; SODEN, D.; OCCHINI, A.; QUAGLINO, P.; CURATOLO, P.; CAMPANA, L. G.; KUNTE, C.; CLOVER, A. J. P.; BERTINO, G.; FARRICHA, V.; ODILI, J.; DAHLSTROM, K.; BENAZZO, M.; MIR, L. M. Updated standard operating procedures for electrochemotherapy of cutaneous tumours and skin metastases. **Acta Oncologica**, v. 0, n. 0, p. 1–9, 25 mar. 2018.
- GOLBERG, A.; FISCHER, J.; RUBINSKY, B. The Use of Irreversible Electroporation in Food Preservation. In: [s.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 273–312.
- GRIMNES, S.; MARTINSEN, O. G. **Bioimpedance and Bioelectricity Basics**. 3rd. ed. [s.l.]: Academic Press, 2014.
- HABERL MEGLIC, S.; MAROLT, T.; MIKLAVCIC, D. Protein Extraction by Means of Electroporation from *E. coli* with Preserved Viability. **The Journal of Membrane Biology**, v. 248, n. 5, p. 893–901, 23 out. 2015.

HAEFNER, J. W. **Modeling Biological Systems**. New York: Springer-Verlag, 2005.

HODGKIN, A. L.; HUXLEY, A. F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. **The Journal of physiology**, v. 117, n. 4, p. 500–44, 15 ago. 1952.

IVORRA, A. Tissue Electroporation as a Bioelectric Phenomenon: Basic Concepts. In: RUBINSKY, B. (Ed.). **Irreversible Electroporation**. [s.l.]: Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. p. 23–61.

IVORRA, A.; AL-SAKERE, B.; RUBINSKY, B.; MIR, L. M. In vivo electrical conductivity measurements during and after tumor electroporation: conductivity changes reflect the treatment outcome. **Physics in Medicine and Biology**, v. 54, n. 19, p. 5949–5963, 7 out. 2009.

JONES, H. M.; GARDNER, I. B.; WATSON, K. J. Modelling and PBPK Simulation in Drug Discovery. **The AAPS Journal**, v. 11, n. 1, p. 155–166, 2009.

KOCBACH, J.; MOHN, L.; BRIX, O. A Simulation Approach to Optimizing Performance of Equipment for Thermostimulation of Muscle Tissue using COMSOL Multiphysics. **Biophysics & Bioeng. Letters**, v. 4, n. 2, p. 9–33, 2011.

KOTNIK, T. Transmembrane Voltage Induced by Applied Electric Fields. In: **Handbook of Electroporation**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 1–17.

KRASSOWSKA, W.; NEU, J. C. Response of a single cell to an external electric field. **Biophysical Journal**, v. 66, n. 6, p. 1768–1776, jun. 1994.

LEVY, R.; DEER, T. R.; HENDERSON, J. Intracranial neurostimulation for pain control: a review. **Pain physician**, v. 13, n. 2, p. 157–65, 2010.

MAKAROV, S. N.; NOETSCHER, G. M.; YANAMADALA, J.; PIAZZA, M. W.; LOUIE, S.; PROKOP, A.; NAZARIAN, A.; NUMMENMAA, A. Virtual Human Models for Electromagnetic Studies and Their Applications. **IEEE Reviews in Biomedical Engineering**, v. 10, n. c, p. 95–121, 2017.

MARTY, M.; SERSA, G.; GARBAY, J. R.; GEHL, J.; COLLINS, C. G.; SNOJ, M.; BILLARD, V.; GEERTSEN, P. F.; LARKIN, J. O.; MIKLAVCIC, D.; PAVLOVIC, I.; PAULIN-KOSIR, S. M.; CEMAZAR, M.; MORSLI, N.; SODEN, D. M.; RUDOLF, Z.; ROBERT, C.; O'SULLIVAN, G. C.; MIR, L. M. Electrochemotherapy – An easy, highly effective and safe treatment of cutaneous and subcutaneous metastases: Results of ESOPE (European Standard Operating Procedures of Electrochemotherapy) study. **European Journal of Cancer Supplements**, v. 4, n. 11, p. 3–13, nov. 2006.

**Maxwells Equations.** Disponível em: <[maxwells-equations.com](http://maxwells-equations.com)>.

OKINO, M.; MOHRI, H. Effects of a high-voltage electrical impulse and an anticancer drug on in vivo growing tumors. **Japanese journal of cancer research : Gann**, v. 78, n. 12, p. 1319–21, dez. 1987.

OPITZ, A.; PAULUS, W.; WILL, S.; ANTUNES, A.; THIELSCHER, A. Determinants of the electric field during transcranial direct current stimulation. **NeuroImage**, v. 109, p. 140–150, abr. 2015.

RITTER, A.; BRUNERS, P.; ISFORT, P.; BARABASCH, A.; PFEFFER, J.; SCHMITZ, J.; PEDERSOLI, F.; BAUMANN, M. Electroporation of the Liver: More Than 2 Concurrently Active, Curved Electrodes Allow New Concepts for Irreversible Electroporation and Electrochemotherapy. **Technology in Cancer Research & Treatment**, v. 17, p. 153303381880999, 9 jan. 2018.

SANO, M. B.; FAN, R. E.; HWANG, G. L.; SONN, G. A.; XING, L. Production of Spherical Ablations Using Nonthermal Irreversible Electroporation: A Laboratory Investigation Using a Single Electrode and Grounding Pad. **Journal of Vascular and Interventional Radiology**, v. 27, n. 9, p. 1432–1440.e3, set. 2016.

SCHLENSTEDT, C.; SHALASH, A.; MUTHURAMAN, M.; FALK, D.; WITT, K.; DEUSCHL, G. Effect of high-frequency subthalamic neurostimulation on gait and freezing of gait in Parkinson's disease: a systematic review and meta-analysis. **European Journal of Neurology**, v. 24, n. 1, p. 18–26, 1 jan. 2017.

SCHWAN, H. P. Electrical Properties of Tissue and Cell Suspensions. In: [s.l: s.n.]. p. 147–209.

SEL, D.; CUKJATI, D.; BATIUSKAITE, D.; SLIVNIK, T.; MIR, L. M.; MIKLAVCIC, D. Sequential Finite Element Model of Tissue Electroporation. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, v. 52, n. 5, p. 816–827, maio 2005.

SUZUKI, D. O. H.; ANSELMO, J.; DE OLIVEIRA, K. D.; FREYTAG, J. O.; RANGEL, M. M. M.; MARQUES, J. L. B.; RAMOS, A. Numerical Model of Dog Mast Cell Tumor Treated by Electrochemotherapy. **Artificial Organs**, v. 39, n. 2, p. 192–197, fev. 2015.

SUZUKI, D. O. H.; BERKENBROCK, J. A.; DE OLIVEIRA, K. D.; FREYTAG, J. O.; RANGEL, M. M. M. Novel application for electrochemotherapy: Immersion of nasal cavity in dog. **Artificial Organs**, v. 41, n. 8, p. 767–773, 1 ago. 2017.

SUZUKI, D. O. H.; MARQUES, C. M. G.; RANGEL, M. M. M. Conductive Gel Increases the Small Tumor Treatment With Electrochemotherapy Using Needle Electrodes. **Artificial Organs**, v. 40, n. 7, p. 705–711, jul. 2016.

VIANA, M. A.; BASSANI, R. A.; PETRUCCI, O.; MARQUES, D. A.; BASSANI, J. W. M. System for open-chest, multidirectional electrical defibrillation. **Research on Biomedical Engineering**, v. 32, n. 1, p. 74–84, 12 abr. 2016.

WOELKE, A. L.; MURGUEITIO, M. S.; PREISSNER, R. Theoretical Modeling Techniques and Their Impact on Tumor Immunology. **Clinical and Developmental Immunology**, v. 2010, n. May 2014, p. 1–11, 2010.

ZEIGHAMI, A.; ALIZADEH, F.; SAVIZ, M. Optimal currents for electrical stimulation of bone fracture repair: A computational analysis including variations in frequency, tissue properties, and fracture morphology. **Bioelectromagnetics**, v. 40, n. 2, p. 128–135, fev. 2019.

ZIMMERMANN, U.; NEIL, G. A. **Electromanipulation of cells**. [s.l.]: CRC Press, 1996.

## SISTEMA DE PRESENÇA UTILIZANDO IDENTIFICAÇÃO POR RADIOFREQUÊNCIA

**Giovani Formaggio Mateus**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Campus Hortolândia  
Hortolândia – SP

**Ricardo Barroso Leite**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo – Campus Hortolândia  
Hortolândia – SP

**RESUMO:** O presente projeto utiliza uma rede de sensores de Identificação por Radiofrequência para controle de presença em ambiente escolar, no âmbito da Internet das Coisas. A tecnologia escolhida, além de ser de baixo custo e fácil utilização, garante maior durabilidade do que outras tecnologias de identificação, como a biometria. O processo não será feito de forma totalmente automática, adotando o paradigma de uso ativo por parte do docente assegurando, assim, a confiabilidade dos resultados. Para garantir essa participação ativa, será desenvolvida uma interface intuitiva e eficiente. Com o objetivo de obter uma melhor aceitação e aproveitamento da solução pela comunidade, será feita consulta com os docentes e os servidores administrativos para estabelecer os requisitos de software e hardware necessários, de acordo com o tempo e materiais disponíveis. O projeto tem potencial de inovação, visto que poderá melhorar muitos

processos administrativos e burocráticos atuais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Identificação, Radiofrequência, Internet das Coisas.

**ABSTRACT:** The project uses a network of Radiofrequency Identification sensors to presence control in school environment, in the scope of Internet of Things. The chosen technology, besides being low cost and easy to use, ensures greater durability than other identification technology, such as biometry-based ones. The process will not be fully automatic, adopting the active use by the teacher, ensuring the reliability of the results. In order to ensure this active use, an interactive and efficient interface will be developed. With the objective of obtaining a better acceptance and use, a consultation with faculty and administrative staff will be made to establish software and hardware requirements, according to the available time and materials. The project has innovation potential, since it could improve many administrative and bureaucratic processes

**KEYWORDS:** Identification, Radiofrequency, Internet of Things.

### 1 | INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico relacionado à eletrônica, sensores e redes de

comunicação, aliado ao crescimento da tecnologia móvel e a ambientes de software abertos, descentralizados e inteligentes permitirá a tomada de decisão por parte dos objetos e máquinas ou a automatização de tarefas sem que haja a interação de um operador. A essa realidade em que há a comunicação de vários objetos através de uma rede sem fio se dá o nome de Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*) (NASSAR e VIEIRA, 2014).

As redes de sensores são adotadas na indústria há muito tempo, de forma a auxiliar na atuação de sistemas de automação. Atualmente, muitos desses sensores utilizam a radiofrequência, para comunicação de curta, média e longa distância entre dispositivos ativos, ou localização de bens passivos.

O sistema de *Radio Frequency Identification* (RFID) é uma tecnologia utilizada para a identificação de objetos de forma automática, utilizando ondas eletromagnéticas para poder acessar dados armazenados em um microchip que é acoplado, fisicamente unido ou ligado, a uma pequena antena (chamado de *tag*, ou etiqueta), identificando automaticamente os objetos nele fixados. O leitor, por sua vez, está conectado a um computador central ou a outro equipamento que possua inteligência necessária para processar os dados.

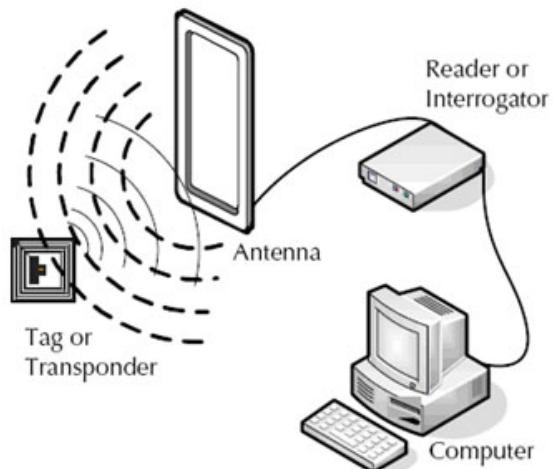


Figura 1 - Componentes principais de um sistema RFID.

Ao contrário de um leitor de código de barras, um leitor RFID não necessita de contato visual com a etiqueta para ler os dados e a leitura pode ser feita através de diversos materiais. O leitor pode, ainda, realizar a leitura simultânea de milhares de microchips e armazenar o resultado em uma memória para posterior envio ao servidor do sistema.

Sistemas que utilizam o RFID para identificação são usados nos mais diversos ambientes. Como exemplo, podemos citar ambientes industriais (PREDIGER et al., 2015), transporte público (NASSAR e VIEIRA, 2014) e bibliotecas (OLIVEIRA et al., 2014).

A legislação já prevê sistemas digitais para controle de ponto, com uma série de

regras determinadas pela Portaria nº 1.510/2009, publicada pelo Ministério do Trabalho e Emprego, que precisam ser seguidas rigorosamente. Caso contrário, a empresa estará sujeita a sofrer uma autuação fiscal e pagar multa. Entre as regras, o registro de ponto precisa ter certificação de órgãos técnicos e memória inviolável, emitindo um comprovante ao funcionário a cada registro de ponto (GUTH, 2010).

No ambiente escolar, empresas como a Aghora e a Haco já oferecem soluções que integram as *tags* RFID ao uniforme da escola e que fazem a leitura a grandes distâncias (RIBEIRO e AZEVEDO, 2013). Essas soluções visam garantir confiabilidade e total automação da entrada dos alunos na escola, de forma a informar com precisão a presença ou ausência dos estudantes aos respectivos pais e responsáveis.

Esses objetivos, embora sejam de reconhecido anseio social, são muito difíceis de serem atingidos do ponto de vista técnico. Os leitores RFID com *tags* passivas em geral não conseguem realizar leitura a grandes distâncias, sendo essa distância dependente também da frequência utilizada. Além da distância envolvida, algumas variáveis como ângulo para a leitura do sinal, ruído térmico ou interferência de outros equipamentos também impactam no projeto de instalação da antena e podem inviabilizar objetivos mais restritivos. Sensores de frequência mais alta, na faixa de *Ultra High Frequency* (UHF), prometem distâncias de até 9 metros, mas não operam bem perto de metais ou líquidos. Já leitores de *Low Frequency* (LF) têm boa operação próximas a metais e líquidos, porém possuem alcance de até 0,5 metro (HESSEL et al., 2011).

Deste modo, para este projeto a tecnologia RFID não será usada de forma autônoma, mas de forma ativa pelo docente, como auxílio em acelerar processos administrativos e não automatizando por completo essas atividades. O uso ativo por parte do docente é feito através de uma interface intuitiva e eficiente promovendo, também, outras funcionalidades.

## 2 | REVISÃO DA LITERATURA

Para o desenvolvimento do projeto foram analisadas obras referentes à Internet das Coisas e à tecnologia RFID e seus usos nas mais diversas áreas, incluindo a educação.

O desenvolvimento tecnológico relacionado à eletrônica, sensores, redes de comunicação e tecnologia mobile, aliado a ambientes de software abertos, descentralizados e inteligentes permite uma comunicação entre vários dispositivos diferentes através de uma rede sem fio, caracterizando um ambiente chamado de Internet das Coisas (NASSAR e VIEIRA, 2014).

O sistema de *Radio Frequency Identification* (RFID), por exemplo, é uma tecnologia utilizada para a identificação de objetos de forma automática, utilizando ondas eletromagnéticas para poder acessar dados armazenados em um microchip

que é acoplado, fisicamente unido ou ligado, a uma pequena antena (chamado de *tag*, ou etiqueta), identificando automaticamente os objetos nele fixados. O leitor, por sua vez, está conectado a um computador central ou a outro equipamento que possua inteligência necessária para processar os dados.

Uma vez que usa ondas de radiofrequência para a leitura da etiqueta, um leitor RFID não necessita de contato visual com ela para ler os dados, podendo ser feita através de diversos materiais. A leitura simultânea de milhares de microchips e armazenar o resultado em uma memória para posterior envio ao servidor do sistema também é possível.

A distância de leitura depende do tipo de *tag* e frequência utilizada. Além da distância envolvida, algumas variáveis como ângulo para a leitura do sinal, ruído térmico ou interferência de outros equipamentos também impactam no resultado e podem inviabilizar objetivos mais restritivos. Sensores de frequência mais alta, na faixa de *Ultra High Frequency* (UHF), prometem distâncias de até 9 metros. Já leitores de *Low Frequency* (LF) porém possuem alcance de até 0,5 metro (HESSEL et al., 2011).

Na educação, os EUA utilizam a tecnologia RFID para aperfeiçoar o monitoramento e a segurança dos alunos no âmbito escolar. A *Northside Independent School District*, por exemplo, implantou o RFID após um alto índice de abandono de alunos nas escolas ser apresentado.

Uma aplicação móvel desenvolvida pela ScholarChip consiste em monitorar e acompanhar estudantes através de celulares com a tecnologia *Near Field Communication* (NFC), compatível com o sistema RFID, e o sistema operacional para celulares Android.

Além de trazer benefícios à sociedade, o RFID também é relacionado à falta de privacidade, uma vez que muitos relacionam a tecnologia como uma forma de espionagem, monitorando o indivíduo a todo momento (RIBEIRO e AZEVEDO, 2013).

## 3 | PLANEJAMENTO DO SISTEMA

### 3.1 Objetivos

O projeto tem como objetivo geral desenvolver um sistema utilizando a Identificação por Radiofrequência e que auxilie o docente no controle de presença, fornecendo informações para acompanhamento dos estudantes pelos funcionários administrativos, pais e responsáveis. Para atingir esse objetivo de forma eficiente, foi adotado o paradigma de uso ativo por parte do docente.

Como objetivos específicos, o sistema permite acompanhamento, em tempo real, do número de alunos presentes em cada ambiente e tendo boa portabilidade, sendo facilmente integrado com sistemas de instituições de ensino diversas possibilitando, assim, a customização da utilização do sistema de acordo com os requisitos específicos

de cada instituição.

### 3.2 Materiais e métodos

A metodologia para desenvolvimento do projeto foi de estudar de forma aprofundada os equipamentos utilizados e desenvolver um protótipo que atenda aos objetivos descritos. Foram considerados principalmente equipamentos de baixo custo, baixo consumo e fácil integração. A plataforma escolhida foi o NodeMCU, um microcontrolador *single-board* com Wi-Fi integrado compatível com a IDE Arduino. Os leitores RFID são baseados no chip MFRC522 operando na frequência de 13,56MHz.

O *script* responsável pelo registro da presença do aluno no banco de dados foi feito a partir da linguagem *Personal Home Page* (PHP), que possui uma boa conectividade com banco de dados, possibilitando a execução de comandos de forma rápida e segura.

Para garantir melhor aceitação e aproveitamento da solução pela comunidade, foram feitas consultas aos docentes e servidores administrativos para estabelecer os requisitos de software e hardware necessários, de acordo com o tempo e materiais disponíveis.

Além disso, o sistema foi desenvolvido para ter uma boa portabilidade entre sistemas, tornando possível a utilização do mesmo em diversas instituições de ensino diferentes.

### 3.3 Planejamento do sistema

#### 3.3.1 Requisitos

Levando em consideração os objetivos do projeto, em conjunto com consultas aos docentes, foram estabelecidos os requisitos funcionais do sistema. Esses requisitos envolvem a possibilidade de que o aluno registre a sua entrada na aula, o controle ativo do docente com relação aos registros de presença dos alunos e a verificação da quantidade de alunos presentes na aula.

Alguns requisitos não-funcionais também foram analisados como a portabilidade para sistemas de instituição distintas, a confiabilidade dos resultados, evitando fraudes e falhas no sistema. Além disso, a leitura do cartão deve ser rápida e eficiente, para que se evitem transtornos nas entradas das salas de aula.

Os requisitos funcionais foram colocados em um diagrama de casos de uso, mostrado na figura abaixo.

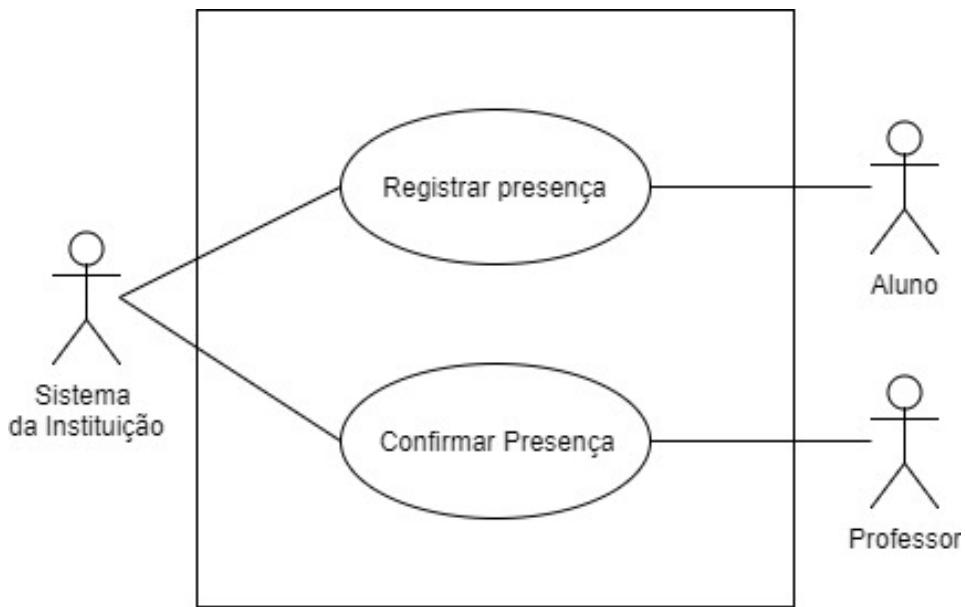


Figura 2 - Diagrama de casos de uso do sistema.

### 3.3.2 Infraestrutura

Para atender adequadamente os requisitos, o sistema foi elaborado em três componentes básicos, sendo eles:

- O leitor RFID, localizado na sala de aula, onde o aluno registraria a sua presença no início e no término da aula;
- O banco de dados, onde estariam armazenados todos os dados referentes às aulas, aos alunos e suas frequências, professores e turmas.
- Sistema da instituição, onde o professor poderá fazer um *login* e verificar ou modificar a presença do aluno na sala. Junto à hospedagem do sistema, haveria também um arquivo PHP

O banco de dados atua como a parte central, sendo fundamental para o funcionamento adequado do sistema, uma vez que ele é o único componente que possui comunicação com todos os outros componentes.

O leitor, por sua vez, fica responsável pela leitura da *tag* do aluno e pela comparação com os dados presentes no banco de dados.

### 3.3.3 Modelagem do banco de dados

A criação do banco de dados foi priorizada no projeto, uma vez que ele é parte fundamental para o sistema. Foi feito um banco de dados com dados genéricos relacionados à escola e sistemas de presença, tentando ser fiel ao máximo ao banco de dados usados na escola e aumentando, assim, a adaptabilidade com os sistemas já adotados pela instituição. Para isso, foram obtidas informações sobre o funcionamento em alto nível do atual sistema, através de diálogos com usuários do mesmo.

A partir das informações foi feito um modelo entidade-relacionamento (MER) para

a modelagem do banco de dados do sistema. A linguagem escolhida foi a *Structured Query Language* (SQL), utilizando o sistema de gerenciamento de banco de dados (SGBD) MySQL, usado por muitos softwares disponíveis no mercado.

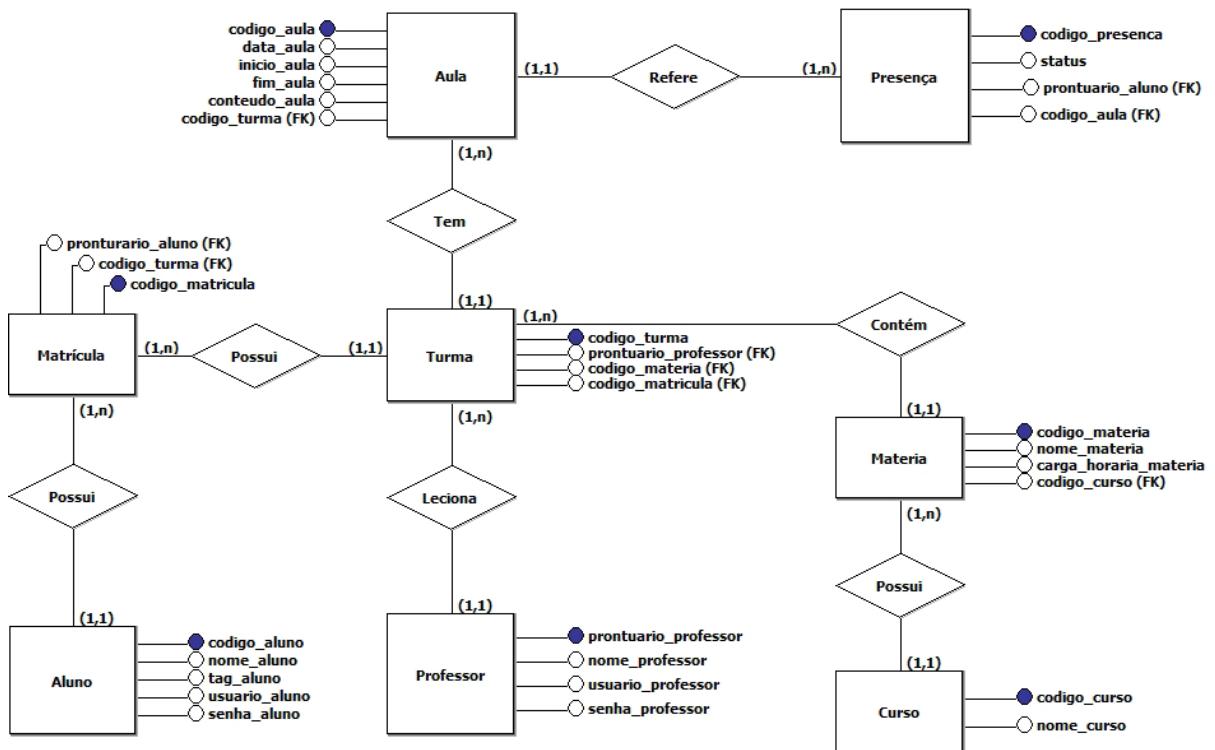


Figura 3 - Modelo Entidade-Relacionamento do banco de dados.

No banco, existem 8 entidades, cada uma com atributos e relacionamentos específicos, sendo elas:

- A entidade Aluno, que armazenaria dados referentes aos alunos cadastrados na escola, possui os atributos `codigo_aluno`, `nome_aluno`, `tag_aluno`, `usuario_aluno`, `senha_aluno`. A entidade Aluno possui relacionamento com cardinalidade um para muitos com a entidade Matricula;
- A entidade Matricula, que armazenaria os dados referentes à matrícula do aluno em determinada turma. Esta entidade possui os atributos `codigo_matricula`, `codigo_turma` e `prontuario_aluno`, relacionamento um para muitos com as entidades Turma e Aluno. Os atributos `codigo_turma` e `prontuario_aluno` são chaves estrangeiras relacionadas, respectivamente, às entidades Turma e Aluno;
- A entidade Turma, que possui os atributos `codigo_turma`, `prontuario_professor`, `codigo_materia` e `codigo_matricula`. Esta entidade refere-se às turmas de alunos que estudam uma determinada matéria, lecionada por um professor específico. Os atributos `prontuario_professor`, `codigo_materia` e `codigo_matricula` são chaves estrangeiras relacionadas às entidades Professor, Materia e Matricula, respectivamente. A entidade Turma é relacionada com cardinalidade um para muitos com as entidades Professor, Materia, Matricula e Aula;

• A entidade Professor, que se refere aos professores e tem como atributos prontuario\_professor, nome\_professor, usuário\_professor e senha\_professor. Ela possui apenas um relacionamento, de cardinalidade um para muitos, com a entidade Turma;

• A entidade Materia, referente às matérias lecionadas e apresenta os atributos codigo\_materia, nome\_materia, carga\_horaria\_materia, codigo\_curso, sendo o último chave estrangeira referenciando a entidade Curso. Os relacionamentos desta entidade são todos de cardinalidade um para muitos, sendo eles com a entidade Curso e a entidade Turma;

• A entidade Curso refere-se aos cursos oferecidos na escola. Os atributos dela são codigo\_curso e nome\_curso. Apresenta apenas um relacionamento com a entidade Materia, de cardinalidade um para muitos;

• A entidade Aula, referente ao registro de cada aula que uma turma de alunos tem sobre determinada matéria, contendo os atributos codigo\_aula, data\_aula, inicio\_aula, fim\_aula, conteudo\_aula, codigo\_turma. A entidade possui dois relacionamentos de cardinalidade um para muitos, sendo eles com as entidades Presenca e Turma. O atributo codigo\_aula é chave estrangeira e refere-se à chave de identificação codigo\_aula, da entidade Turma;

• A entidade Presenca, atribuída aos alunos da turma que estavam presentes ou ausentes em uma determinada aula ministrada. Os atributos presentes nessa entidade são codigo\_presenca, status, prontuario\_aluno e codigo\_aula. Existe apenas um único relacionamento, de cardinalidade um para muitos, com a entidade aula. Os atributos prontuario\_aluno e codigo\_aula são chaves estrangeiras referentes às chaves identificadoras das entidades Aluno e Aula.

De um modo geral, o aluno poderá fazer matrículas em diferentes turmas, que seriam de diferentes matérias, pertencentes a um mesmo curso, lecionadas por diferentes professores. Durante o período letivo, essas turmas teriam várias aulas, onde o aluno poderia estar presente ou ausente.

O banco de dados deste projeto é uma generalização de um banco de dados usado em escolas para que testes envolvendo o protótipo fossem possíveis.

## 4 | DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Para o desenvolvimento da parte física do protótipo, foram utilizados os seguintes componentes dispostos conforme a figura 4:

- Microcontrolador Node MCU;
- Protoboard de 640 (seiscentos e quarenta) pinos;
- 11 (onze) jumpers;
- 3 (três) resistores de 220 Ohms;
- 3 (três) diodos emissores de luz (LED);

- Leitor RFID MFRC522 operando na frequência de 13,56MHz.

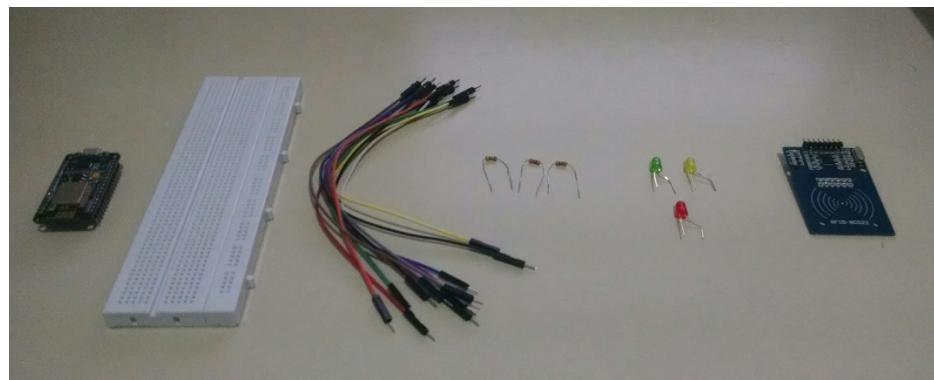


Figura 4 - Componentes utilizados para a montagem do protótipo funcional.

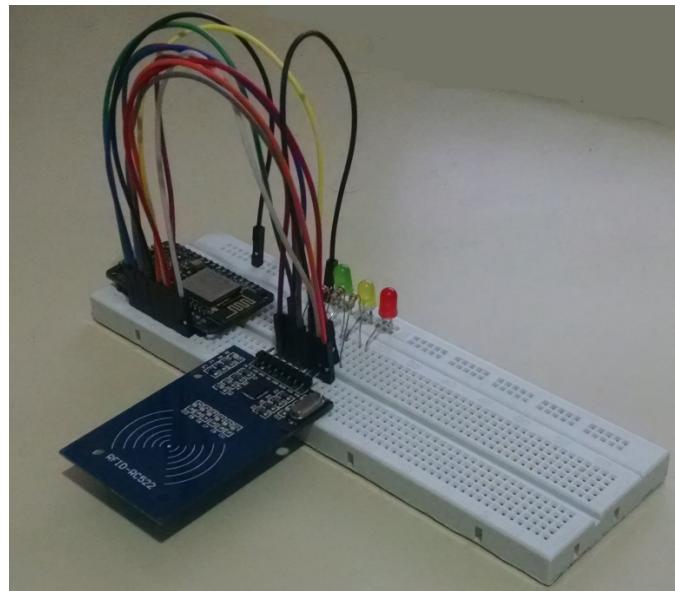


Figura 5 - Estrutura física do protótipo.

Com relação à programação do protótipo, foi utilizada a IDE Arduino e suas bibliotecas referentes ao leitor MFRC522, à conexão com o banco de dados e à conexão Wi-Fi.

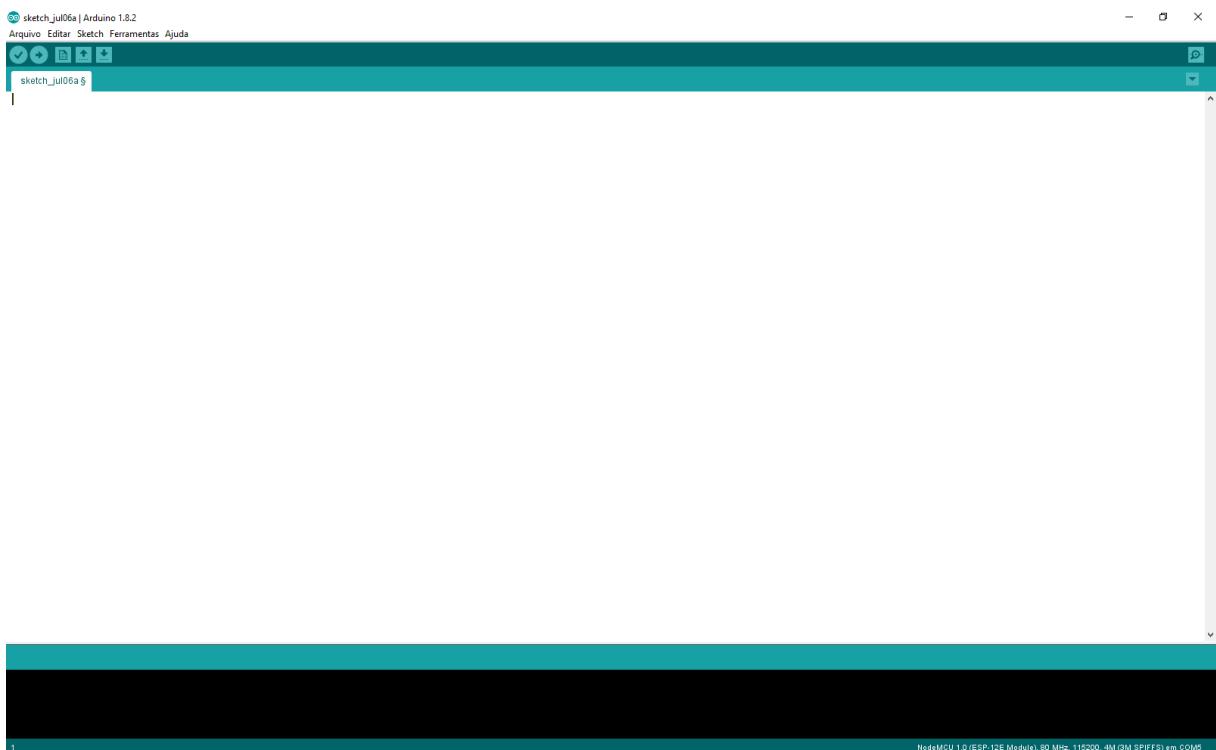


Figura 6 - IDE Arduino utilizada para a programação do protótipo

O protótipo foi desenvolvido para que, ao inicializar, se conecte à rede Wi-Fi mais próxima e ao banco de dados, armazenado em um servidor. Ao realizar as conexões, o módulo leitor de RFID é inicializado e espera a apresentação de uma *tag*. Enquanto a *tag* não for apresentada, o LED amarelo pisca de forma a indicar para o usuário o funcionamento do leitor.

Com a aproximação do cartão no leitor, a identificação de usuário (UID) da *tag* é armazenada em uma variável que, logo em seguida, é usada como parâmetro em uma seleção no banco de dados, verificando se o aluno está cadastrado em alguma turma em que a aula se encontra aberta.

Caso o aluno esteja em uma dessas turmas, o status da presença dele se altera para “Registrado pelo aluno” que, posteriormente poderá ser confirmado pelo professor, através do sistema em PHP. O LED verde se acende, indicando que o sistema registrou a entrada do aluno na sala.

Se o registro do aluno não consta em nenhuma aula em andamento, o LED vermelho se acende, indicando que o registro da presença não foi feito e que o aluno deve tentar fazer a leitura novamente.

#### 4.1 MYSQL connector/arduino

A biblioteca MySQL Connector/Arduino tem como objetivo, como escrito na documentação da biblioteca, conectar um projeto para Arduino a bancos de dados MySQL. Com isso, os dados podem ser armazenados ou pesquisados em um banco de dados.

Para o projeto, a biblioteca foi a primeira alternativa utilizada para fazer a

comparação da *tag* recebida pelo leitor no banco de dados com as *tags* cadastradas para a aula do dia. Se a *tag* apresentada estiver cadastrada na aula, a presença do aluno é registrada através de uma atualização no banco, feita também pela biblioteca.

O teste das funções da biblioteca foi feito através de um código em que um número é inserido em intervalos de alguns segundos em uma tabela. A inserção foi feita corretamente.

Assim que os testes com a inserção terminaram, as funções de seleção foram testadas. Para este fim, foi feito um código que selecionava determinado termo em uma tabela e mostrava quantos dados foram encontrados. A seleção ocorreu conforme o esperado e a quantidade de linhas encontrados foi mostrada.

Por fim, os códigos dos dois testes foram reunidos e ligeiramente modificados para que se adequasse à proposta do projeto. Assim, o código final recebe a *tag* do leitor e a utiliza em uma seleção no banco de dados referente ao registro do aluno em uma aula naquele momento. Se a contagem de registros retornados for maior que zero, um novo comando é executado no banco de dados que, por sua vez, atualiza o campo referente à presença de “Falta” para “Confirmado” no registro em que a *tag* apresentada e a aula do dia estiverem relacionados.

Ao testar esse código final, os resultados se mostraram instáveis devido ao fato de que, em alguns casos, o tempo levado demorava um tempo razoavelmente longo ou ocasionava o congelamento do sistema. Ao perceber essa instabilidade, passei a procurar novas maneiras de conectar a placa Arduino a um banco de dados MySQL.

## 4.2 Message queue telemetry transport (MQTT)

Em uma das reuniões do Grupo de Estudos e Pesquisas Sobre Internet das Coisas (GEPIC), grupo de estudos do campus onde discutimos ideias e projetos sobre Internet das Coisas, foi apresentado o protocolo MQTT, cujo principal objetivo é fazer máquinas se comunicarem, também conhecido como comunicação *Machine-to-Machine* (M2M).

Esse protocolo foi desenvolvido para enviar dados através de redes com baixa banda de dados. O MQTT utiliza, para a comunicação, o paradigma *publish/subscribe* (pub/sub). Nesse paradigma há um intermediário chamado de *broker*, que é responsável por receber, enfileirar e enviar as mensagens, os *publishers*, responsáveis por publicar mensagens no *broker* e os *subscribers*, que são responsáveis por se conectar ao *broker* para receber as informações publicadas pelo *publisher*, como mostrado na figura 7.

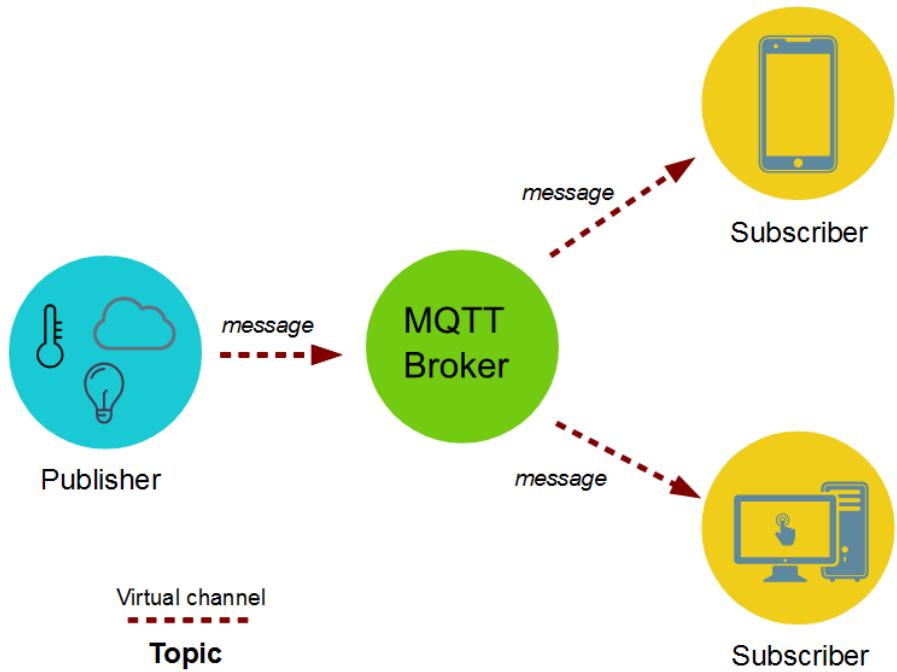


Figura 7 - Funcionamento do protocolo MQTT.

Além dos *publishers*, *subscribers* e *brokers*, o paradigma pub/sub ainda utiliza o conceito de tópicos, onde cada mensagem emitida pelo *publisher* é enviada a um tópico no *broker*. O *subscriber*, por sua vez, estaria conectado a esse tópico, acessando os dados emitidos pelo *publisher*.

Um código teste da biblioteca do Arduino responsável pelo paradigma pub/sub foi feito, onde o leitor atuava como *publisher* e a *tag* recebida por ele era enviada a um tópico no *broker*.

A utilidade no uso do MQTT no projeto seria de aumentar a velocidade de comunicação com o banco de dados, utilizando o processamento todo para o servidor do banco de dados. Com isso, o leitor ficaria responsável por ler a *tag* apresentada pelo aluno e atuaria como *publisher*, publicando essa *tag* em um tópico no *broker*. O *subscriber*, nesse caso, seria o SGBD, que receberia os dados do *broker* e executaria os comandos necessários para o registro da presença no banco de dados. Entretanto, isso se torna inviável, uma vez que o SGBD MySQL não possui uma maneira de se subscrever diretamente ao *broker*.

Mesmo não utilizando o protocolo MQTT no projeto, ele se mostrou um aprendizado importante, pois é um protocolo que pode ser muito utilizado quando se trata de Internet das Coisas por conta do baixo consumo de banda, pela facilidade de se instalar um *broker* em qualquer computador e pela possibilidade de vários dispositivos terem acesso a mesma informação simultaneamente.

#### 4.3 Protocolo hypertext transfer protocol (HTTP)

O *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) é um protocolo de comunicação no modelo computacional cliente-servidor, onde o cliente faz requisições ao servidor, aguardando

e recebendo as respostas emitidas. O servidor, por sua vez, fica responsável por fornecer os recursos ou realizar funções requisitadas pelo cliente.

No projeto, o HTTP será utilizado na comunicação entre o leitor e o sistema da instituição. O leitor atua como cliente, que envia a *tag* apresentada ao servidor, através de um método post que será recebido por um arquivo PHP dentro desse servidor.

Esse arquivo PHP tem como função verificar o registro do aluno na respectiva aula e registrar a presença para o mesmo, caso esteja cadastrado nessa aula. O PHP, por fim, retorna o resultado das operações ao leitor, que informará ao aluno qual a situação do registro da presença.

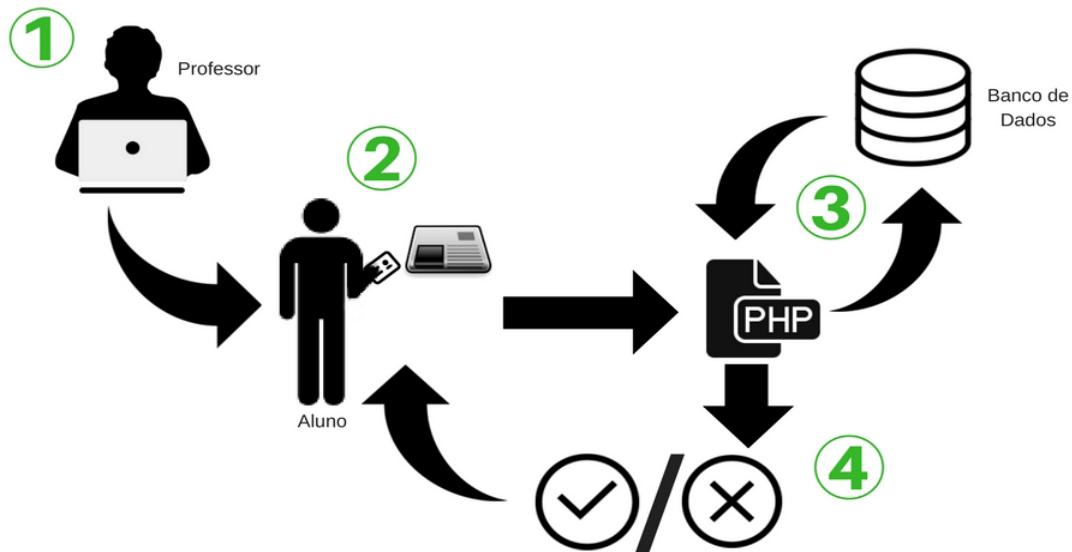
Para a realização de testes, foi utilizado uma rede local, onde foram colocados o banco de dados MySQL e o arquivo PHP em um servidor *localhost*. O leitor e a máquina utilizada como servidor se comunicam através de um roteador, estabelecendo uma rede de comunicação entre eles.

Os testes feitos mostraram que os comandos feitos no banco de dados foram bem-sucedidos com uma velocidade bem maior do que a apresentada ao utilizar a biblioteca MySQL Connector/Arduino. A resposta ao leitor foi feita corretamente. Além disso, a implementação do sistema é simples, uma vez que o arquivo PHP pode estar hospedado no mesmo servidor do site da instituição.

#### 4.4 Protótipo final

Para o protótipo final foi utilizado o protocolo HTTP, onde o leitor exerceia o papel de cliente e enviaria a *tag* apresentada a um arquivo PHP dentro do servidor. Esse arquivo PHP se conectaria com o banco de dados, verificando o cadastro do aluno na respectiva aula e registrando a presença do mesmo na aula do dia.

Para que o procedimento seja feito corretamente alguns passos devem ser seguidos sequencialmente, conforme mostrado na figura 8.



- 1 O professor cadastra a aula do dia no sistema da instituição.
- 2 O aluno, ao entrar na sala, passa a carteirinha no leitor, que ficará dentro da sala de aula.
- 3 A tag do aluno é enviada a um script PHP que verifica no banco de dados se o aluno está matriculado na aula. Se o aluno estiver, a presença é registrada.
- 4 Por fim, o leitor dá uma resposta ao aluno, acendendo um dos LEDs conforme a resposta recebida.

Figura 8 - Procedimento necessário para registro da presença.

O primeiro passo seria o cadastro da aula do dia, indicando seus conteúdos, duração e turma lecionada. Com isso, os alunos são permitidos a passar o cartão pelo leitor para registrar a presença. Ao passar o cartão, a tag seria enviada ao arquivo PHP no servidor que, por sua vez, se conectararia ao banco de dados, verificaria o cadastro do aluno na turma e, se o aluno estiver cadastrado naquela aula, o valor do campo de presença é alterado para “Registrado”. Com o final dessas operações, o resultado é retornado ao leitor, onde uma resposta é mostrada ao aluno, através dos LEDs do leitor. Se a resposta for positiva e o registro da presença foi feito, o LED verde se acende e, se for negativa, indicando que não foi feito o registro da presença, o LED vermelho se acende.

No final da aula o professor pode, enfim, confirmar a presença para os alunos que passaram o cartão no leitor, indicando a presença na aula. O professor pode também alterar o registro da presença para “Falta”, evitando fraudes e garantindo a confiabilidade do sistema.

## 5 | CONCLUSÃO

As metas propostas para o projeto foram cumpridas com êxito. O aprendizado sobre a tecnologia RFID e seus usos nas mais diversas áreas foi de grande ajuda no planejamento do projeto. Conhecimentos sobre circuitos elétricos baseados na plataforma Arduino e suas formas de conexão com redes Wi-Fi e bancos de dados

SQL foram gerados.

O objetivo de desenvolver um sistema focado em dispositivos de baixo custo e facilmente adaptável à diferentes tipos de instituições de ensino foi atingido e, aliado aos conhecimentos mencionados, permitem o desenvolvimento de muitas outras aplicações envolvendo ás tecnologias de RFID e Internet das Coisas.

Para a continuidade do projeto é necessária uma validação da qualidade do sistema pelos docentes, através de testes com a implementação do sistema em uma sala de aula.

Espera-se que, quando possível, os resultados sejam divulgados de forma ampla e que os leitores possam ser aproveitados por diversas instituições de ensino, melhorando processos administrativos atuais.

## REFERÊNCIAS

AZZOLA, F. **MQTT Protocol Tutorial: Step by step guide** Survivingwithandroid.com. Disponível em: <<https://www.survivingwithandroid.com/2016/10/mqtt-protocol-tutorial.html>> Acesso em: 26/11/2017.

GUTH, R. U. **Identificação e Ponto de Presença por Etiqueta RFID. Trabalho de conclusão do curso de Engenharia de Computação UniCEUB.** Brasília: UniCEUB, 2010.

HESSEL, F. et al. **Implementando RFID na cadeia de negócios: tecnologia a serviço da excelência.** Porto Alegre: EdiPUCRS, 2011.

NASSAR, V.; VIEIRA, M. L. H. **A Internet das Coisas com as Tecnologias RFID e NFC. Blutcher Design Proceedings**, v. 1, n. 4, p. 3238-3250. São Paulo: Blucher, 2014.

OLIVEIRA, N.; OLIVEIRA, R. M.; AMARAL, F. V. **Gerenciamento de Acervo Através da tecnologia RFID: A Experiência da Biblioteca Universitária da UFLA.** XVIII Seminário Nacional de Bibliotecas Universitárias SNBU 2014. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

PREDIGER, D.; DE FREITAS, E. P.; SILVEIRA, S. R. **Modelo de Aplicabilidade de Sistema RFID para Rastreabilidade na Indústria Alimentícia.** Revista de Sistemas e Computação-RSC, v. 6, n. 1, Salvador: UNIFACS, 2015.

RIBEIRO, E. V. L., AZEVEDO, J. A. D. **A utilização da identificação por radiofreqüência (RFID) na educação.** Trabalho de conclusão de curso de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações IFF-Campos. Campos dos Goytacazes: IFF, 2013.

SITE EPC-RFID.INFO. **What is RFID?** Disponível em: <<https://www.epc-rfid.info/rfid>> Acesso em: 26/11/2017.

## SISTEMAS DEFASADORES EM ALTA FREQUÊNCIA UTILIZANDO MICROFITA EM SUBSTRATO FR4

### Jobson De Araújo Nascimento

Universidade Federal de Alagoas(UFAL), Centro de Tecnologia(CTEC), Maceió-AL

jobson.nascimento@ic.ufal.br

### José Moraes Gurgel Neto

Centro de Estudos Superiores de Maceió Cesmac, Rua Cônego Machado, 918, Farol 57051-160-Maceió-Alagoas

neto.gurgel.moraes@gmail.com

### Alexsandro Aleixo Pereira da Silva

Centro Universitário UNIFAVIP, R. Adjar da Silva Casé, 800 - Indianópolis, Caruaru - PE, 55024-740, Caruaru – PE-Brasil

alexsandroaleixo@yahoo.com.br

### Regina Maria de Lima Neta

Instituto Federal de Pernambuco, Campus Pesqueira, BR 232 – Km 214 – Loteamento Redenção - Prado 55200-000, Pesqueira-PE-Brasil

regina.mlneta@gmail.com

**RESUMO:** O objetivo do artigo é descrever as etapas de; construção, simulação e validação de um sistema defasador em alta frequência, utilizando microfita em substrato FR4. As linhas de atraso, foram simuladas no CST®, construídas em laboratório, testadas e através da elaboração de um circuito receptor montado em dois dipolos de fio e utilizando como fonte uma antena log-periódica, o sistema foi validado,

1. Artigo apresentando e publicado nos anais do XIV CEEL em Outubro de 2016,em Uberlândia-MG.

considerando como freqüência central de medição 1,8 GHz. Os resultados apresentados possuem conformidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** interferência, linha de transmissão, medição, microfita.

### PHASE SHIFTERS SYSTEMS USING HIGH FREQUENCY SUBSTRATE WITH MICROSTRIP FR4

**ABSTRACT:** The objective of this article is to describe the construction, simulation and validation of a system phase shifters high frequency can, using microstrip in FR4 substrate. The delay lines were simulated in CST®, built in the laboratory and through the construction of a receiver circuit mounted on two wire dipoles and using as a source a log-periodic antenna, the system has been validated, considering the central frequency measurement 1,8 GHz. The results have accordingly.

**KEYWORDS:** interference,transmission line, measurement, microstrip.

### 1 I INTRODUÇÃO

Nos dias atuais em diversos setores de trabalho, sejam em indústrias, escritórios, empresas, redes de supermercados entre outros, existem diversos de equipamentos de

radiofrequência (RF). Nestes setores podem existir vários equipamentos de RF em funcionando de forma simultânea e dividindo um pequeno espaço, ou até mesmo tendo características de emissão/recepção distintas. Por existirem diversos equipamentos, alguns deles podem ter seu desempenho prejudicado ou até mesmo comprometido devido à interferência EM(eletromagnética) causado, por outro equipamento que pode está emitindo uma onda EM indesejável aos equipamentos que estão sofrendo o processo de interferência. E no mercado tecnológico de hoje o tamanho das antenas existentes nestes equipamentos torna-se cada vez menor. A miniaturização das antenas em muitos casos dificulta a localização do sistema emissor (fonte), que possa estar causando a interferência EM, visto que muitas vezes a antena está embutida nos equipamentos. Portanto o conhecimento da direção de propagação da onda EM, emitida por estas antenas ou elementos emissores de campo EM, facilitará a descoberta da(s) fonte(s) de interferência EM e a determinação das possíveis sugestões que ajudem atenuar a mesma.

O estudo de técnicas que visam diminuir os danos causados pela interferência EM, entre equipamentos eletroeletrônicos, têm aumentado nos últimos anos. Através de um estudo da polarização de ondas eletromagnéticas, pode-se identificar o comportamento do campo elétrico irradiado. O conhecimento da amplitude e fase do campo elétrico [1] permite identificar o padrão de polarização da onda.

A miniaturização das antenas, contidas em equipamentos de telefonia móvel e sistemas RFID, vem ganhando destaque, tendo como principal objetivo diminuir o espaço físico ocupado pelas antenas, mantendo a mesma eficiência ou até mesmo aumentando.

A utilização de antenas que ocupem cada vez mais menos espaço físico nos equipamentos vem sendo ampla, devido às vantagens das antenas miniaturizadas. Elas são de baixo custo, pouco peso, são fáceis de fabricar e são versáteis em termos de frequência de ressonância e polarização [2]-[3]. A maioria das aplicações em sistemas de identificação, RFID utilizam antenas miniaturizadas, pois utilizam chips com tamanhos reduzidos e o espaço físico reservado para as antenas torna-se reduzido [4].

O objetivo do artigo é validar a utilização de linhas de transmissão de microfita em substrato FR4, para obter atraso de fase em alta frequência, especificamente 1,8 GHz. E utilizando uma fonte conhecida, e um sistema de transmissão e dipolos de fio, como sistema de recepção.

O circuito de atraso discreto utilizado na prática é formado por linhas de transmissão planares, projetadas de acordo com a literatura [5],[6], simuladas no CAD CST® e construídas no substrato FR4. As linhas de transmissão funcionam como circuitos defasadores em alta frequência. No trabalho os sinais foram analisados tomando como parâmetro a frequência central de 1,8 GHz.

## 2 | METODOLOGIA

A construção das linhas defasadoras se deu após simulação no CST®.

O defasador tipo reflexão é basicamente um dispositivo de uma porta em que há reflexão do sinal de microondas no final da linha de transmissão. A amplitude do coeficiente de reflexão deverá idealmente ser unitária. O defasamento é dado pela diferença das fases respectivas dos coeficientes de reflexão correspondentes à mudança do estado final em relação ao inicial.

Um defasador tipo transmissão ideal é um circuito de duas portas em que a fase do coeficiente de transmissão do circuito é alterada por meio de uma chave, enquanto a amplitude permanece unitária em ambos os estados. O defasamento é dado pela mudança na fase de transmissão através do circuito. As necessidades de taxa de transmissão de sinais em circuitos de altas frequências levaram ao desenvolvimento de circuitos de estrutura planar. Ou seja, ao invés de serem usadas linhas de transmissão tradicionais tais como, cabos coaxiais e outros guias de onda, são utilizados linha de transmissão de estrutura planar. A estrutura planar em circuito de microfita possui modo de propagação quase- TEM, pois demonstrações baseadas nas equações de Maxwell e na distribuição de campos quase-estáticos da microfita podem ser utilizadas para mostrar que esta estrutura não pode suportar uma onda puramente TEM, devido a não estar envolvida por um único dielétrico [7], [8]. A vantagem da utilização está na simplicidade do projeto e concepção dessas linhas bem como a diminuição do espaço físico ocupado pelo circuito de atraso. A desvantagem de se utilizarem linhas de microfita como estrutura defasadora é que além de termos as perdas no substrato em que é construída a linha, é que não temos uma resposta continua do comportamento da fase do sinal, por ser discreto o sistema defasador.

Na Figura 1 pode-se observar um exemplo de estrutura planar que pode funcionar como linha de transmissão de modo a proporcionar um atraso de fase no sinal recebido por uma fonte.

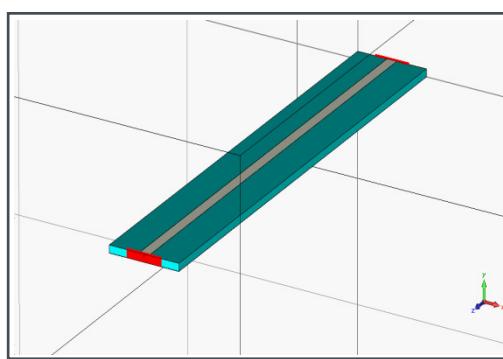


Fig. 1. Exemplo de uma linha de microfita que possui a função de atrasar a fase de um sinal em alta frequência.

O trabalho foi realizado, considerando a relação entre a largura( $W$ ) da fita e a altura do substrato( $h$ ) como:

$$a = \frac{W}{h} > 1 \quad (1)$$

Em que a largura da fita é de 2,86 mm e a altura do substrato FR4 é de 1,6 mm. Para este caso a impedância de saída é dada pela relação:

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{ef}}} \cdot \frac{1}{a + 1,393 + 0,667 \cdot \ln(a + 1,444)} (\Omega) \quad (2)$$

A frequência de trabalho( $f$ ) das linhas é da ordem de 1,80 GHz, o que nos dará um comprimento de onda igual a:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{1,8 \times 10^9} \cong 0,167m \quad (3)$$

Considerando que a impedância de saída é casada para 50 Ω temos que a permissividade efetiva é dada por:

$$\epsilon_{ef} = \left( \frac{120\pi}{50} \cdot \frac{1}{a + 1,393 + 0,667 \cdot \ln(a + 1,444)} \right)^2 \quad (4)$$

Obtendo um valor de permissividade efetiva igual a 3,62.

Quando é necessário efetuar um casamento de impedância da estrutura da Figura 1, com a impedância da carga, deseja-se verificar o casamento que a microfita é capaz de produzir. Para se obter um defasamento de  $\Psi$  (em graus), é só, lembrar das expressões:

$$\psi = \beta \cdot l \quad (5)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} (m^{-1}) \quad (6)$$

Para as expressões das eqs. (5) e (6), tem – se que  $\beta$  é a constante de fase,  $\lambda_g$  é o comprimento de onda guiada na microfita e  $|$  é o comprimento da microfita. Então ao realizar manipulações algébricas nas eqs. (5) e (6) chega – se a:

$$\psi = \frac{2\pi \cdot l}{\lambda_g} \quad (7)$$

Com os valores da permissividade efetiva e do comprimento de onda no vácuo  $\lambda_0$ , pode – se calcular o comprimento de onda guiada que é dado por:

$$\lambda_g = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{ef}}} \cdot \lambda_0 = 0,0878 = 87,8mm \quad (8)$$

E a constante de fase para este caso que é:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} = 71,56 m^{-1} \quad (9)$$

De acordo com o descrito na literatura para construir as linhas de transmissão em microfita com o atraso desejado, no final ter-se-iam linhas de comprimento muito pequeno. Para solucionar este problema então foi adicionado um comprimento de onda( $360^\circ$ ) a mais em cada uma das linhas de atraso. Porém ao realizar este procedimento aumentamos o tamanho do nosso circuito bem como as perdas nas linhas de transmissão. Essas linhas foram simuladas em CST®, porém após a simulação seus comprimentos reais necessários, uma vez que ao inserir as medidas acima, foi verificado que os atrasos requeridos não eram convergentes. Apenas quando a cada linha era inserido um comprimento adicional aproximado de 3,50 mm.

Ao utilizar como referência a eq. (7), a partir do conhecimento do comprimento de onda guiada e com os ajustes descritos, os atrasos obtidos podem ser observados na Tabela I.

Atraso(°)	Comprimento(mm)
360	91,38
405	102,28
450	105,93
495	113,25
540	124,23
585	135,20
630	146,18
675	157,15
720	168,12

Tabela I- Linhas de atraso obtidas após simulação.

Após a construção das linhas de transmissão defasadoras, todas as medições para a aquisição da fase são realizadas, seguindo o raciocínio de colocar em um dos braços do dipolo uma linha equivalente aos  $0^\circ$  (elétricos) na frequência de trabalho desejada. E no outro dipolo a linha de atraso equivalente a diferença de fase desejada de se obter. O sinal resultante é a soma dos dois sinais captados pelos dipolos com a inserção destas linhas de atraso. Uma análise fasorial obtida pela soma dos sinais em altas frequências é realizada com o objetivo de conseguir descobrir a fase do sinal transmitido ao considerar a onda completamente polarizada.

Inicialmente uma medida dos níveis de sinal em cada dipolo, de forma individual foi realizada. Depois como pode ser visto na Figura 2 uma linha de microfita equivalente aos  $0^\circ$ (elétricos) foi inserida no braço do dipolo disposto no lado esquerdo, e uma a uma, as linhas com os atrasos desejados eram inseridas no dipolo disposto no lado direito e o nível no somador foi aferido.

### 3 | RESULTADOS E MEDIÇÕES

As linhas de transmissão construídas e aferidas através de um VNA(Analizador Vetorial de Redes), e o comparativo com o CST®, podem ser observadas nas ilustrações de 2 a10.

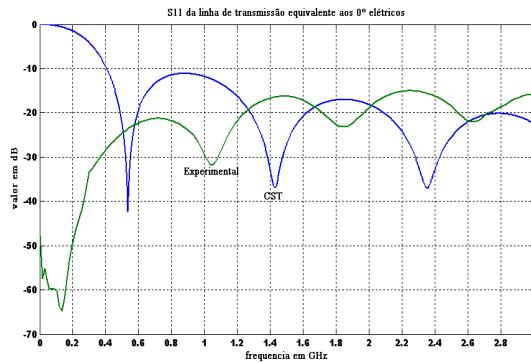


Fig. 2. Coeficiente de reflexão para a linha de atraso equivalente aos  $0^\circ$ (elétricos).

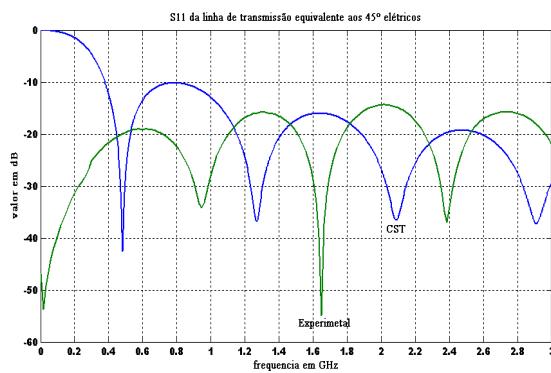


Fig. 3. Coeficiente de reflexão para a linha de atraso equivalente aos  $45^\circ$ (elétricos).

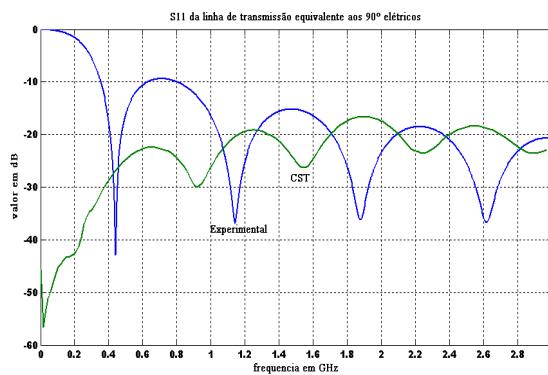


Fig. 4. Coeficiente de reflexão para a linha de atraso equivalente aos  $90^\circ$ (elétricos).

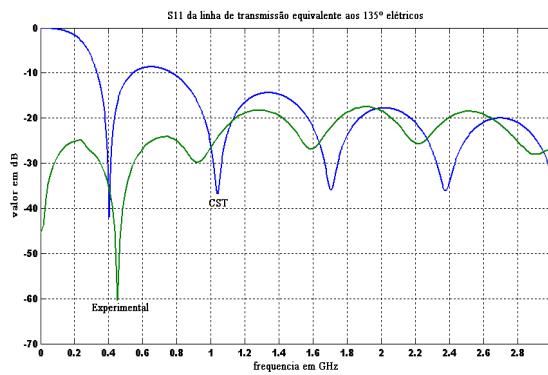


Fig. 5. Coeficiente de reflexão para a linha de atraso equivalente aos  $135^\circ$ (elétricos).

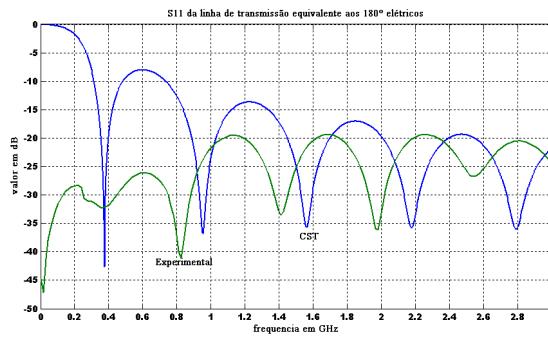


Fig. 6. Coeficiente de reflexão para a linha de atraso equivalente aos  $180^\circ$ (elétricos).

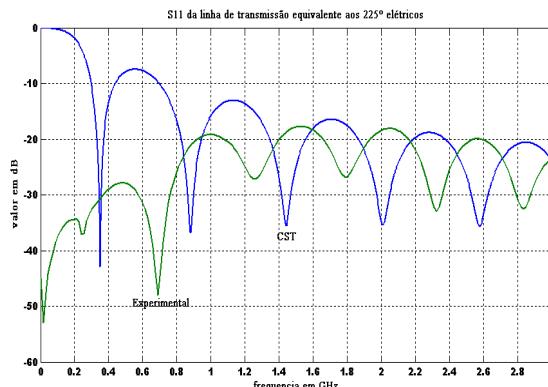


Fig. 7. Coeficiente de reflexão para a linha de atraso equivalente aos  $225^\circ$ (elétricos).

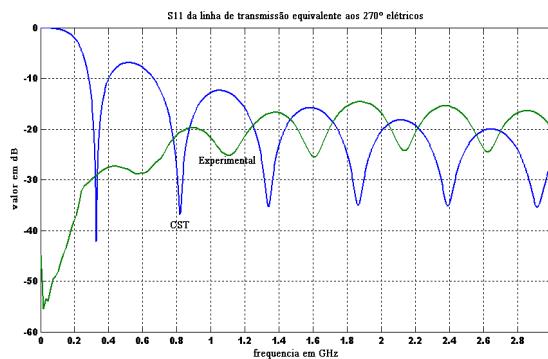


Fig. 8. Coeficiente de reflexão para a linha de atraso equivalente aos 270°(elétricos).

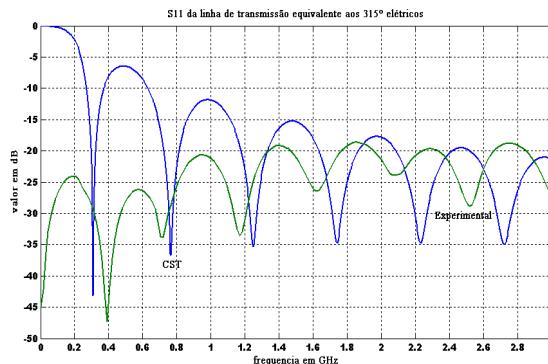


Fig. 9. Coeficiente de reflexão para a linha de atraso equivalente aos 315°(elétricos).

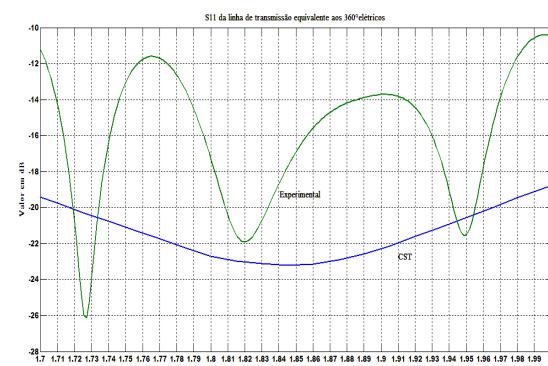


Fig. 10. Coeficiente de reflexão para a linha de atraso equivalente aos 360°(elétricos).

É possível observar nas curvas das linhas de transmissão que há uma grande conformidade entre os valores, simulado e medido.

Inicialmente uma medida dos níveis de sinal em cada dipolo, de forma individual foi realizada. Depois como pode ser visto na Figura 11 uma linha de microfita equivalente aos 0°(elétricos) foi inserida no braço do dipolo disposto no lado esquerdo, e uma a uma, as linhas com os atrasos desejados eram inseridas no dipolo disposto no lado direito e o nível no somador foi aferido.

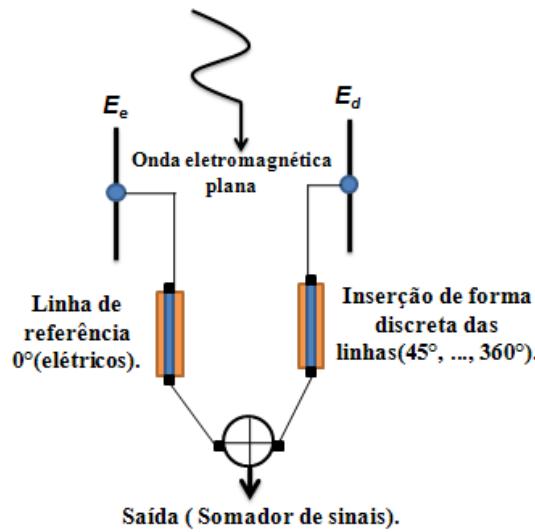


Fig.11. Circuito de validação das linhas de atraso.

Os parâmetros para esta medição considerados foram os seguintes:

- Frequência de operação: 1,8 GHz;
- Distância entre Tx/Rx:  $10,37\lambda$ ;
- Altura do plano de terra:  $6,90\lambda$ ;
- Distância entre os dois dipolos:  $\approx 1,0\lambda$ ;
- Tx: Antena log - periódica orientada à  $90^\circ$  no sentido anti – horário;
- Rx: Dipolos orientados a  $90^\circ$ , paralelos com a Tx;
- $E_e$  = dipolo disposto no lado esquerdo do observador no plano de medição;
- $E_d$  = dipolo disposto no lado direito do observador no plano de medição;

Os níveis de campo foram medidos em cada dipolo estando eles à esquerda ou à direita do observador, (denotando-os  $E_e$  e  $E_d$ , respectivamente). Ao ser considerado a recepção (Rx) e transmissão (Tx) em fase, tem-se que o sinal recebido tem a forma fasorial aproximada pelas eqs. de (11) a (13)

$$\vec{E}_e = E_e e^{j0^\circ} \hat{e} \left( \frac{V}{m} \right) \quad (11)$$

$$\vec{E}_d = E_d e^{j\theta} \hat{a} \left( \frac{V}{m} \right) \quad (12)$$

$$\vec{E}_r = [\vec{E}_e + \vec{E}_d] \left( \frac{V}{m} \right) \quad (13)$$

Os valores de campo foram medidos, como pode ser observado na Tabela II. Os níveis de campo aferidos pelo analisador de espectro foram convertidos para o nível

equivalente em tensão, medido em  $mV$ .

A antena transmissora utilizada foi uma log-periódica disposta de forma paralela aos dipolos e orientada a  $90^\circ$  no sentido anti-horário, tomando como referência o observador olhando a onda se afastar.

Disposição dos Dipolos	E(mV)
( $E_D$ )	70,39
( $E_E$ )	81,44
( $E_E$ ) + ( $E_D$ )	98,00
[ $E_E(0^\circ)$ ] + [ $E_D(45^\circ)$ ]	78,30
[ $E_E(0^\circ)$ ] + [ $E_D(90^\circ)$ ]	50,40
[ $E_E(0^\circ)$ ] + [ $E_D(135^\circ)$ ]	22,64
[ $E_E(0^\circ)$ ] + [ $E_D(180^\circ)$ ]	16,93
[ $E_E(0^\circ)$ ] + [ $E_D(225^\circ)$ ]	52,15
[ $E_E(0^\circ)$ ] + [ $E_D(270^\circ)$ ]	75,20
[ $E_E(0^\circ)$ ] + [ $E_D(315^\circ)$ ]	94,20
[ $E_E(0^\circ)$ ] + [ $E_D(360^\circ)$ ]	99,05

Tabela II.- Valores obtidos para certificação do circuito de atraso de fase.

Os resultados, simulado de acordo com a eq.(13) e medido de acordo com a Tabela II, podem ser observados na Figura 12, de forma normalizada.

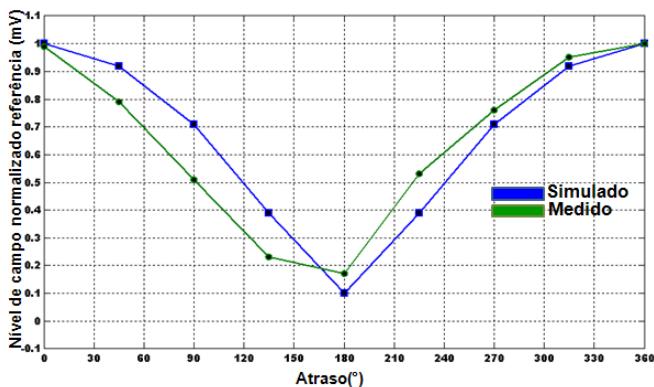


Fig. 12. Comparação entre os resultados simulado e medido para validação das linhas de atraso.

Ao se inserir nos terminais de saída do dipolo disposto à esquerda uma linha equivalente aos  $0^\circ$  elétricos, e no dipolo colocado a direita, para cada atraso desejado uma linha equivalente a esse atraso, o nível de campo resultante foi então aferido. Os níveis de campo ao final, foram normalizados e obtidas as curvas vistas na Figura 12. Como pode-se notar da Figura 12 existe uma grande conformidade entre as curvas, simulada e medida.

## 4 | CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no experimento possuem como objetivo inserir atrasos em circuitos miniaturizados a baixo custo. Os resultados apresentaram conformidade, porém algumas discrepâncias foram obtidas devido a fatores como:

- Interferência externa no ambiente de medição: O experimento foi realizado em laboratório que não é um absorver eletromagnético, como uma câmara anecóica, por exemplo, logo eventualmente interferências eletromagnéticas irradiadas, podem ter prejudicado as medições;
- Perdas nos cabos e conectores utilizados no sistema de medição: A conexão entre os dipolos e as linhas de transmissão através dos conectores do tipo BNC, interfere nos resultados obtidos, devido a perda em tais conectores;
- Não igualdade nos dipolos utilizados no sistema de recepção: Os dipolos foram construídos para que tivessem as mesmas características, porém não foi obtida a mesma resposta para os elementos receptores;
- Descasamento de impedância tanto na Rx como Tx;
- Comprimento adicional dos conectores nas linhas de transmissão.

Os resultados apresentados no trabalho são satisfatórios, apesar de todas as variáveis existentes no processo de medição. E as discrepâncias observadas justificadas no texto.

## REFERÊNCIAS

- [1] Peter Kohns, Yuri Macheckhin, "Measurement of Polarization and Applications", LFNM' 2002, 3 -5 June, 2002, Kharkiv, Ukraine, pp. 188 – 196.
- [2] N. A. Zakaria, A. A. Sulaiman and A. A. Latip, "Design of Circular Microstrip Antenna", *IEEE International RF and Microwave Conference Proceedings*, pp. 289 -292, Dec. 2008.
- [3] C. Y. Huang, "Designs for an aperture – coupled compact circularly polarized microstrip antenna", *IEE Proc. – Microw. Antennas Propag*, vol. 146, nº 1, pp. 13 – 16, February 1999.
- [4] Rui – Hung Chen and Jeen – Sheen Row, "Single Microstrip Patch Antenna With Switchable Polarization", *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 56, nº 4, pp. 922 – 926, April 2008.
- [5] John D. Kraus, *Antennas*, 1<sup>a</sup> ed. McGraw – Hill book Company, 1950.
- [6] ShibanKoul, Barathi. *Microwave and millimeter wave phase shifters*, vol. 2 Boston, Ed. Artech House, 1992.
- [7] Laurence N. Dworsky. *Modern transmission line Theory and Applications*, Ed. Wiley, 1979.
- [8] Bahl, I. J. and Bhartia, P. *Microwave solid state circuit design*, John Wiley & Sons, USA - 1988.

## ANÁLISES DA RUPTURA EM TRECHO DA BR-060 NO MUNICÍPIO DE ALEXÂNIA, GOIÁS, E CONDIÇÕES APÓS SEIS ANOS DA RECUPERAÇÃO

### Rideci Farias

Universidade Católica de Brasília / Centro Universitário de Brasília (UniCEUB)  
Brasília – DF

### Tiago Matias Lino

Instituto de Ensino Superior Planalto (lesPlan)  
Brasília – DF

### Haroldo da Silva Paranhos

Universidade Católica de Brasília (UCB)  
Brasília – DF

### Itamar de Souza Bezerra

Maccaferri do Brasil  
Goiânia – GO

### Ranieri Araújo Farias Dias

Universidade Federal do Pará (UFPa)  
Belém – PA

### Alexsandra Maiberg Hausser

Centro Universitário de Brasília (UniCEUB)  
Brasília – DF

O deslizamento de terra resultou em uma cratera com cerca de 60 metros de comprimento e 12 metros de profundidade, interditando completamente a via e o tráfego de veículos. As obras de recuperação objetivaram a execução dos dispositivos de drenagem superficial e subterrânea, serviços de contenção em gabião, pavimentação e recuperação ambiental. Assim sendo, este Artigo objetiva apresentar análises das possíveis causas, mas também as soluções adotadas para recuperação do trecho avariado.

**PALAVRAS-CHAVE:** BR 060, Alexânia/GO, Estabilidade, Ruptura e Recuperação.

### ANALYSIS OF THE RUPTURE IN BRAZIL

### OF BR-060 IN THE MUNICIPALITY OF ALEXÂNIA, GOIÁS, AND CONDITIONS AFTER SIX YEARS OF RECOVERY

**ABSTRACT:** The rupture of BR-060 / GO occurred on the border between the Federal District and the state of Goiás, near the city of Alexânia / GO, km 24, December 28, 2010. On average, the highway passes about 60 thousand vehicles per day. The region is characterized by rugged terrain with hills, valleys and lowlands, which contributed to this. It is also surrounded by several water courses. The landslide resulted in a crater about 60 meters long and 12 meters deep, completely banning road and vehicular

**RESUMO:** O Rompimento da BR-060/GO ocorreu na divisa entre o Distrito Federal e o estado de Goiás, próximo à cidade de Alexânia/ GO, km 24, dia 28 de dezembro de 2010. Em média, na rodovia passa cerca de 60 mil veículos por dia. A região é caracterizada por terreno acidentado com morros, vales e baixadas, fatores estes que contribuíram para o ocorrido. Também é cercada por diversos cursos d'água.

traffic. The recovery works aimed at the execution of the surface and underground drainage devices, gabion restraint services, paving and environmental recovery. Therefore, this article aims to present analyzes of the possible causes, but also the solutions adopted to recover the damaged section.

**KEYWORDS:** BR 060, Alexânia / GO, Stability, Rupture and Recovery.

## 1 | INTRODUÇÃO

Este artigo objetiva apresentar análises das possíveis causas do deslizamento, mas também as soluções adotadas para recuperação do trecho que rompeu da BR-060/GO na divisa entre o Distrito Federal e o estado de Goiás, próximo a cidade de Alexânia/GO. Ademais das condições atuais, seis anos após o término da recuperação do trecho avariado. A solução principal para recuperação do trecho inclui o sistema de contenção em gabião, associados a obras complementares com vistas à recuperação do trecho para a liberação do tráfego na via.

## 2 | LOCALIZAÇÃO DO TRECHO AVARIADO

O trecho que sofreu ruptura localiza-se próximo a divisa do Distrito Federal e o estado de Goiás, próximo a cidade de Alexânia/GO. A região é caracterizada por topografia acidentada e áreas sujeitas a escoamento e cursos d'água. A Figura 1 mostra o mapa geral de localização da área onde ocorreu a ruptura, que fica próximo a 15 km da cidade de Alexânia/GO.

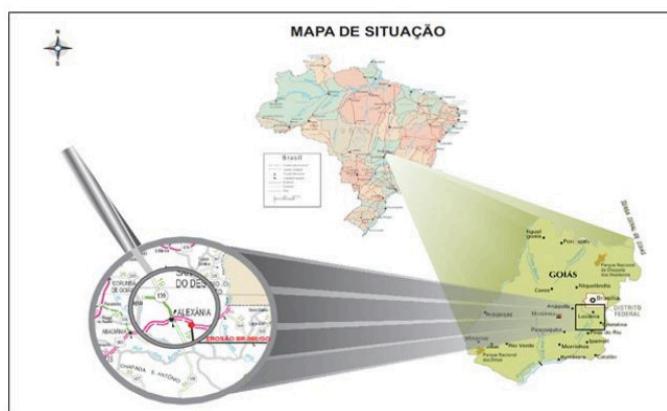


Figura 1. Localização do rompimento da BR 060/GO (DNIT, 2011).

O deslizamento de terra com uma cratera próximo de 60m de comprimento e 12 metros de profundidade, interditou a via e o tráfego de veículos na região. O intenso período de chuvas seria a causa principal do deslizamento, felizmente sem vítimas, apesar da gravidade. As Figuras 2 a 4 mostram o trecho que rompeu.



Figura 2. Trecho rompido da BR-060/GO (31/12/2010).



Figura 3. Trecho rompido da BR-060/GO (31/12/2010).



Figura 4. Trecho rompido da BR-060/GO (31/12/2010).

Em função do ocorrido, desviou-se o trânsito em duas alternativas ao motorista que partia do Distrito Federal a Goiânia. Um pela BR-070, rumo a Cocalzinho, até a GO-414 e depois à BR-060, o que aumenta em 28 quilômetros. A outra opção era chegar à GO-010 por Luziânia e seguir até Goiânia. Nesse caso, são 50 quilômetros mais, elevando para 250 km a distância entre Brasília e Goiânia. A Figura 5 mostra os caminhos alternativos para os motoristas quando a interdição da BR-060.



Figura 5. Alternativas quando da interdição da BR-060 (Jornal Correio Braziliense, 2011).

### 3 | ANÁLISES DAS POSSÍVEIS CAUSAS

#### 3.1 Alto Índice Pluviométrico – Saturação do Solo

O período chuvoso na região, com grande intensidade entre os meses de dezembro e janeiro, aumentou a saturação do solo, vindo a provocar processos erosivos, principalmente erosão interna, mas também elevação no valor da percolação e a consequente diminuição da resistência do solo nos locais onde o regime de escoamento das águas eram mais concentrados.

Ademais, a montante do corte realizado para instalação da rodovia, há uma área considerável em que houve a supressão da vegetação nativa objetivando investimentos na agricultura e pecuária. Além da supressão de vegetação, verificou-se a instalação de bacia no terreno para armazenamento de água que conciliada à infiltração e escoamento provocaram ao possível caminho preferencial de fluxo na massa de solo vindo ao aumento da saturação do subsolo à rodovia, com a consequente instabilização do maciço. A Figura 6 mostra o possível fluxo no interior do maciço, e na Figura 7 apresenta-se uma vista da área com a bacia de infiltração a montante do trecho da rodovia que sofreu a ruptura.

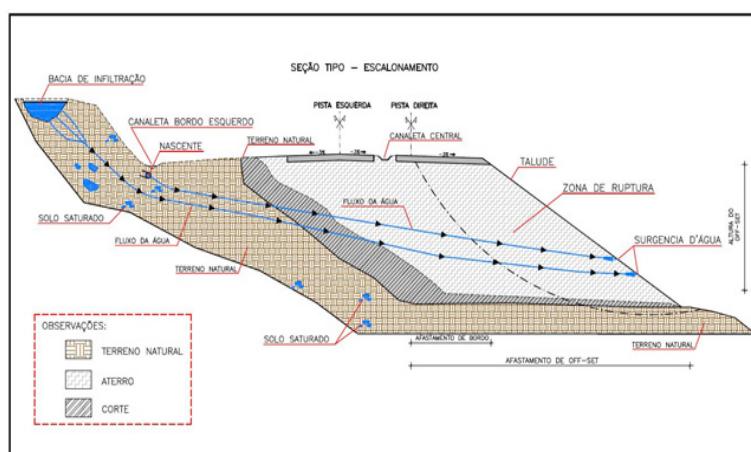


Figura 6. Possível fluxo no interior do maciço (Lino, 2016).



Figura 7. Bacia de infiltração a montante da rodovia (Lino, 2016).

Apesar de alguns dados e características iniciais da obra, não se poderia dizer o que realmente tinha causado o rompimento da rodovia. Para isso, foram realizadas investigações mais detalhadas da região, conforme a seguir.

### 3.2 Investigação Geotécnica

Além das inspeções na área do sinistro, patiu-se também para a execução de sondagem tipo SPT a fim de se verificar as condições do sobsolo, lençol freático da região, além de auxiliar nos estudos do projeto básico.

De início foram três furos de sondagem totalizando 45,35 (quarenta e cinco metros e trinta e cinco centímetros). Tais sondagens foram denominadas de SPT 01, SPT 02 e SPT 03, conforme indicação da Figura 8, sendo o SPT 1 à margem do rodovia e o SPT 02 e SPT 03 no eixo de cada uma das pistas.



Figura 8. Localização dos furos de sondagem SPT (BR- 060, km 24).

A Figura 9 mostra a execução da sondagem SPT 01 à margem da rodovia.



Figura 9. Vista de execução da sondagem SPT 1 (BR- 060, km 24).

Ao se considerar o tipo de solo encontrado, verificou-se tratar, predominantemente, de uma camada de aterro + material do corpo estradal com espessura variável de até três metros. Subjacente a esta camada, silte - argiloso a pouco argiloso/arenoso a pouco arenoso, variável até 3,0 metros de espessura. Em seguida, argila silto-arenosa / silte arenoso, pouco argiloso.

O nível d'água no SPT 01 encontrava-se a 1,50m da “boca” do furo. No SPT 02 a 6,10m, e no SPT 03 na profundidade de 7,15m. Diante disso, foi possível estabelecer o possível comportamento da linha freática no maciço.

#### 4 | ANÁLISES DE ESTABILIDADE DO TALUDE

As análises de estabilidade foram subsidiadas com verificações locais adicionadas a correlações com as sondagens SPT para escolha dos parâmetros. As correlações foram embasadas nos trabalhos de Godoy (1972) apud Cintra et al. (2003) para o peso específico. Para o ângulo de atrito foram utilizados quatro trabalhos, a saber, com a média dos valores obtidos: a) De Mello (1971) apud Schnaid (2000); b) Gibbs e Holtz (1957) apud Schnaid; c) Godoy (1983) apud Cintra et al. (2003); d) Teixeira (1996) apud Cintra et al. (2003). Para a coesão foram adotados valores comuns para o tipo de solo local que variam de 0 kPa até 15 kPa. Para o solo seco foi adotado a coesão de 10 kPa. Para o solo saturado foi adotado a coesão 0 KPa.

Na simulação com o solo não saturado trabalhou-se com 10 kPa para coesão, 30° para o ângulo de atrito e 17 kN/m<sup>3</sup> para o peso específico do solo. A Figura 10 mostra o fator de segurança na estabilidade do talude igual a 1,454. Simulação feita com os dados empíricos do solo natural, valor este condizente com os critérios mínimos de fatores de segurança da NBR 11682/2003.

A segunda simulação de estabilidade considerou o solo saturado. Para o solo saturado trabalhou-se com 0 (zero) kPa para coesão, permanecendo 30° para o ângulo de atrito, apesar de ser menor, o que baixaria ainda mais o fator de segurança, e 17

$\text{kN/m}^3$  para o peso específico do solo. A Figura 11 mostra o fator de segurança igual a 1,117. Nota-se a esperada redução do fator de segurança com a coesão de 0 kPa, considerando o solo saturado. Apesar do fator de segurança ser maior que 1, não está condizente com os critérios de segurança da NBR 11682/2003.

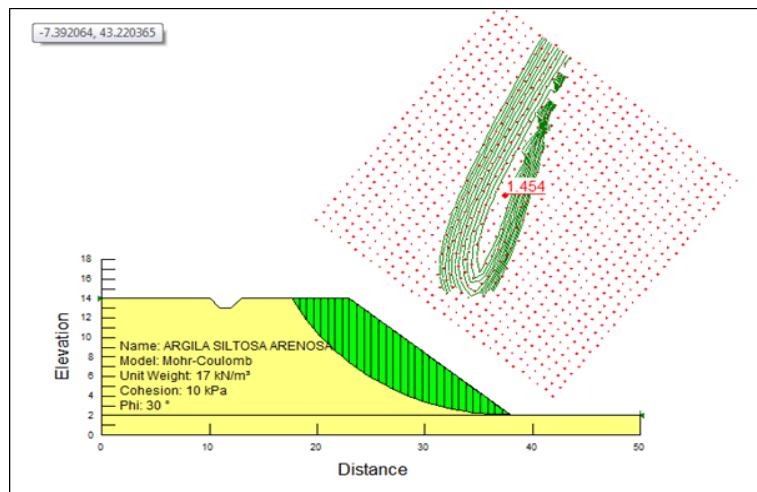


Figura 10. Análise de estabilidade com o solo natural (Lino, 2016). (FS = 1,454).

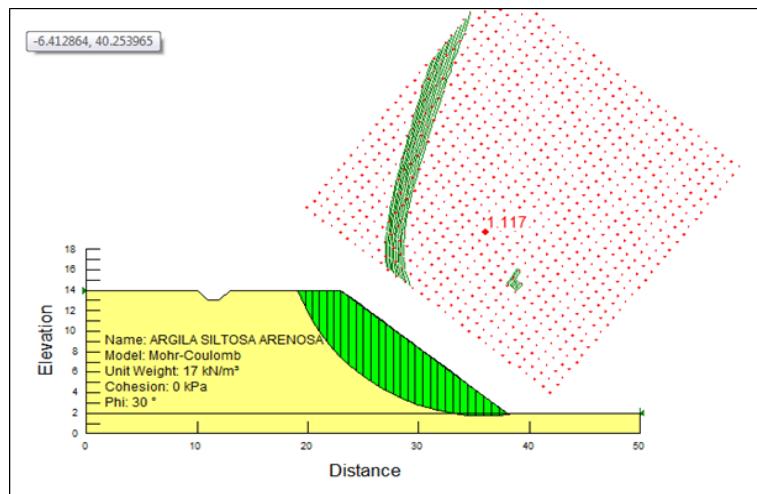


Figura 11. Análise de estabilidade com o solo saturado (Lino, 2016). (FS = 1,117).

## 5 | SOLUÇÕES PARA RECUPERAÇÃO DO TRECHO AVARIADO

O projeto desenvolvido pelo DNIT trouxe uma série de soluções com drenagem superficial e subterrânea, contenção com gabião, pavimentação, mas também a recuperação ambiental da área afetada pelas obras.

### 5.1 Drenagem Superficial e Subterrânea

A drenagem subterrânea objetiva a retirada de água do maciço. No andamento das obras de escavação e remoção do solo saturado, uma das preocupações era canalizar o fluxo de água a um destino adequado. Assi, foram executados sistemas de drenagem profunda - dreno profundo com manta geotêxtil, dreno sub-horizontal (DHP)

e colchão drenante. As Figuras 12 a 15 mostram parte da execução da drenagem profunda. Já na Figura 16 mostra-se parte da drenagem superficial com a obra finalizada.



Figura 12. Escavações para a instalação de drenos profundos (Lino, 2011).



Figura 13. Execução de drenos profundos (Lino, 2011).



Figura 14. Perfuração para instalação de DHP (Lino, 2011).



Figura 15. Execução do colchão drenante.



Figura 16. Descida d'água executado as margens do trecho recuperado na Rodovia BR 060.

## 5.2 Contenção em Gabião

Solução bastante utilizada, seja para estabilidade de aterros, contenção, proteção superficial de encostas, de cursos d'água e rodovias. São elementos de forma prismática ou cilíndrica, constituídos por uma rede metálica e preenchidos com pedras de mão ou seixos rolados, destinadas à solução de problemas geotécnicos, hidráulicos e de controle da erosão. Os gabiões podem ser, (gabião tipo caixa, gabião tipo colchões Reno ou gabião em sacos). Os gabiões são capazes de drenar as águas de percolação dos terrenos e de resistir a todos os tipos de esforços, e sobretudo, de trabalhar sob tração eliminando assim um dos principais fatores de instabilidade.

Para a recuperação do aterro e resolver os problemas de drenagem, utilizou-se estruturas em gabião. Foram executadas quatro tipos, três do tipo caixa e um do tipo Reno. As Figuras 17 e 18 mostram a seção tipo da rodovia e em seguida nas Figuras 19 a 21 mostram-se a execução e alguns dos sistemas em gabião, e nas Figuras 22 e 23 o trecho finalizado.

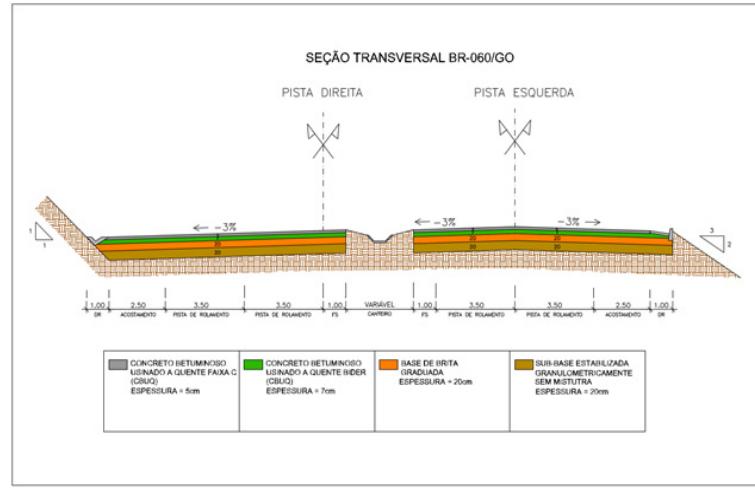


Figura 17. Seção transversal da BR 060 no trecho rompido (DNIT, 2011).

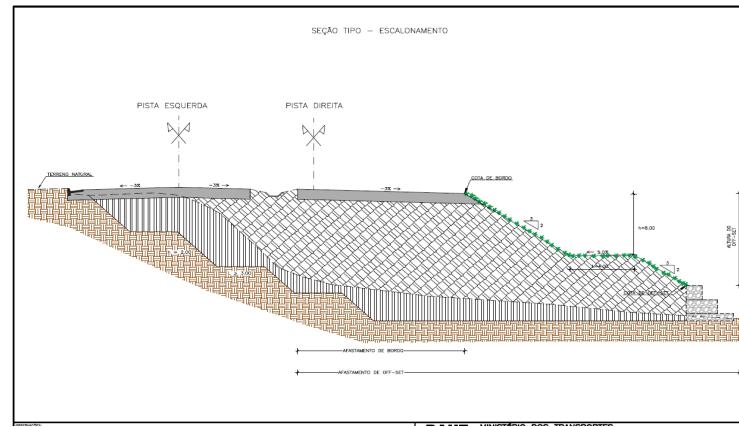


Figura 18. Seção tipo para o trecho recuperado da BR 060 (DNIT, 2011).



Figura 19. Execução da contenção em gabião.



Figura 20. Execução da contenção em gabião.



Figura 21. Sistema implantado com a finalização da obra.



Figura 22. Trecho recuperado e finalizado (Lino, 2016).



Figura 23. Trecho recuperado e finalizado (Lino, 2016).

## 6 | CONCLUSÕES / RECOMENDAÇÕES

Este artigo procurou apresentar análises das possíveis causas do deslizamento, mas também as soluções adotadas para recuperação do trecho que rompeu da BR-060/GO na divisa entre o Distrito Federal e o estado de Goiás, próximo à cidade de Alexânia/GO. Assim, diante dos estudos e verificações de campo, mas também das devidas análises é possível concluir:

- a) O período chuvoso na região, com grande intensidade entre os meses de dezembro e janeiro, aumentou a saturação do solo, e a percolação com caminhos preferenciais de fluxo vindo a provocar processos erosivos, principalmente erosão interna, mas também a consequente diminuição da resistência do maciço nos locais onde o regime de escoamento das águas eram mais concentrados;
- b) Assim, uma das principais causas da ruptura do trecho rodoviário, foi o grau de saturação do solo e o aumento da poro pressão, ocasionados pelas chuvas, com a consequente instabilização do maciço;
- c) A montante do corte realizado para instalação da rodovia, havia uma área considerável em que houve a supressão da vegetação nativa objetivando investimentos na agricultura e pecuária. Além da supressão de vegetação, verificou-se a instalação de bacia no terreno para armazenamento de água que conciliada à infiltração e ao escoamento provocaram o possível caminho preferencial de fluxo na massa de solo vindo ao aumento da saturação do subsolo à rodovia;
- d) Ao se analisar possíveis causas de ruptura em rodovia, tem-se como grande importância os estudos geológicos-geotécnicos, ambiental e hidrológico de uma região para a execução de obras de engenharia. Com esses estudos pode-se determinar a melhor forma e o tipo mais adequado de obra a ser implantada;
- e) A interferência e a ação humana tem provocado aspectos negativos no meio ambiente, consequentemente interferindo em obras de engenharia. Essas ações provocam a degradação do solo, processos erosivos graves e mudanças na dinâmica

superficial e subterrânea de regiões. No estudo de caso em questão, essa interferência ocasionou o surgimento de nascentes e bacias de infiltração, fatores que contribuíram para o rompimento da rodovia;

f) Com a análise dos problemas ambientais encontrados na região, justifica-se a execução dos dispositivos de drenagem e a contenção em gabião. A drenagem subterrânea e superficial tem como objetivo conduzir as águas para locais adequados, evitando danos a obra implantada. Já as estruturas de contenção em gabião, tem como objetivo principal conter o aterro e evitar os processos erosivos;

g) A importância de medidas preventivas em vez das corretivas a fim de evitar danos em obras e(ou) trantornos à população e danos ao meio ambiente;

h) A fim verificar as condições atuais do sistema implantado, procedeu-se à visita, em de julho de 2017, ao local em que ocorreu a ruptura e constatou-se que as obras implantadas estão condizentes com o funcionamento esperado.

## AGRADECIMENTOS

Ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), a JM Terraplenagem e Construções Ltda., a Reforsolo Engenharia Ltda., Universidade Católica de Brasília (UCB), Centro Universitário de Brasília (UniCEUB) e ao Instituto de Ensino Superior Planalto com contribuições importantes que tornaram possível a realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

ASTM D3080/D3080M:2011 - **Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.**

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N.; ALBIERO, J. H. **Tensão admissível em fundações diretas.** São Paulo: Rima, 2003. 134 p.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT: 2011. **Projeto Executivo de Obra Emergencial para a Rodovia BR-060/GO, Div. DF/GO Entrº BR-364 (Contorno de Jataí), Entrº GO-425 – Entrº GO-139 (Início Travessia Urbana Alexânia).**

Geo-slope international. (2012). **Stress deformation modeling with SIGMAW, an engineering methodology.** 335 p.

LINO, T. M. **Estabilização de Taludes.** 2016. 82p. Trabalho de Conclusão de Especialização, Publicação ENC. TCC– 020.1, Departamento de Engenharia Civil, Instituto de Ensino Superior Planalto, Brasília, DF.

SCHNAID, F. (2000) – **Ensaios de Campo de suas Aplicações à Engenharia de Fundações.** 1<sup>a</sup>. Edição, Oficina de Textos, São Paulo, 189 p.

## **SOBRE O ORGANIZADOR**

**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.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-432-0



A standard linear barcode representing the ISBN number 978-85-7247-432-0.

9 788572 474320