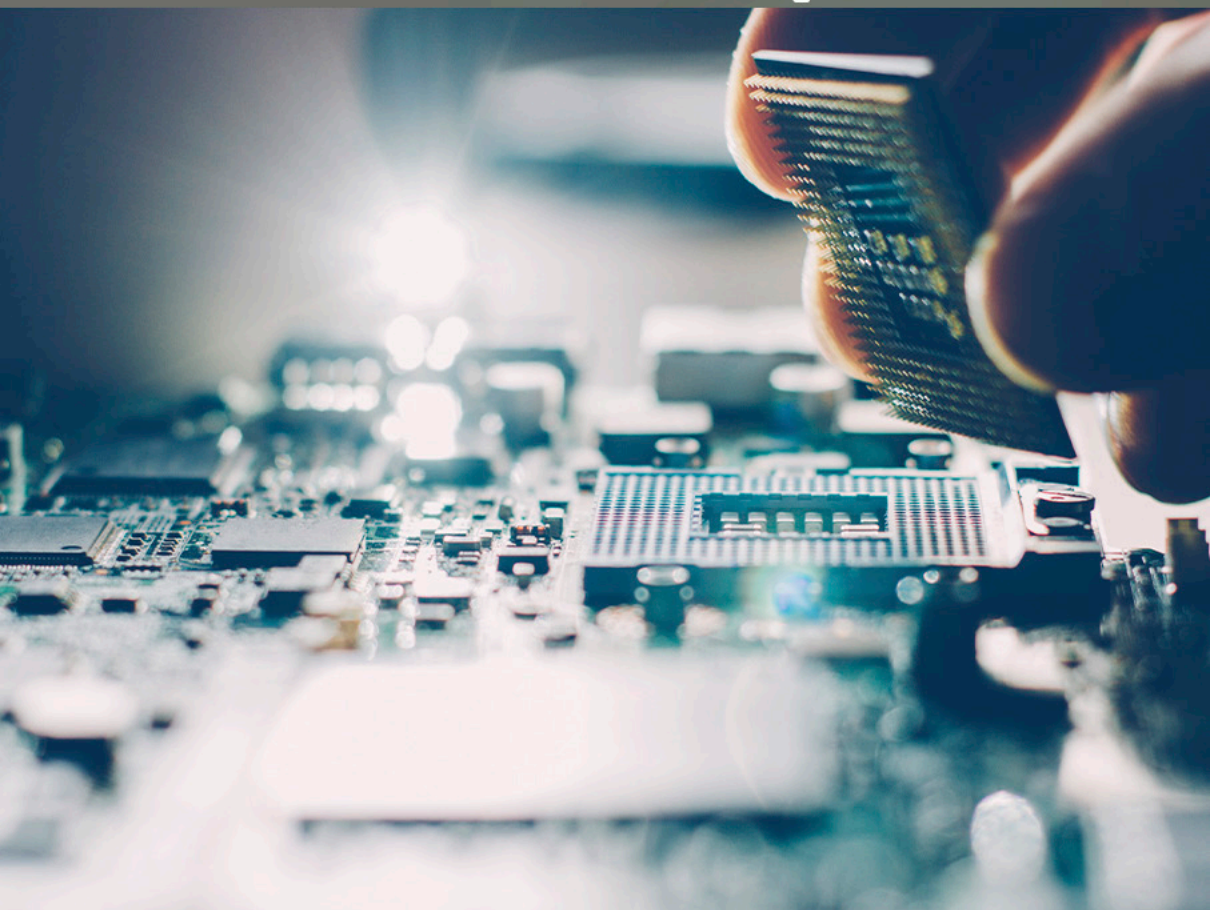


COLEÇÃO  
**DESAFIOS**  
DAS  
**ENGENHARIAS:**

ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO 2

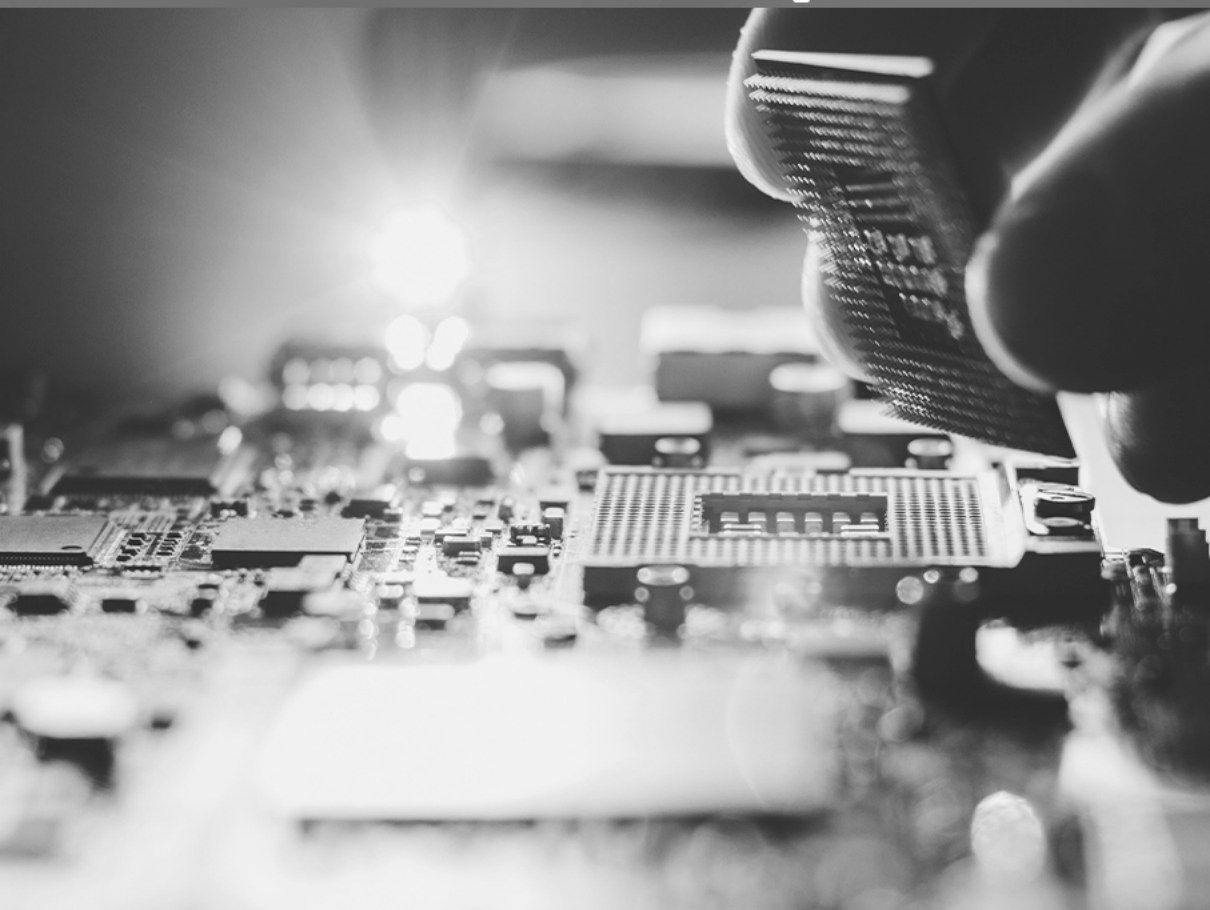


ERNANE ROSA MARTINS  
(ORGANIZADOR)

 **Atena**  
Editora  
Ano 2021

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

**ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO 2**



**ERNANE ROSA MARTINS**  
(ORGANIZADOR)

**Atena**  
Editora  
Ano 2021

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Assistentes editoriais**

Natalia Oliveira

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremona

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

**Revisão**

Os autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



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

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

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

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

**Conselho Editorial**

**Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

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

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

Profª Drª Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#### **Linguística, Letras e Artes**

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

**Diagramação:** Maria Alice Pinheiro  
**Correção:** Giovanna Sandrini de Azevedo  
**Indexação:** Gabriel Motomu Teshima  
**Revisão:** Os autores  
**Organizador:** Ernane Rosa Martins

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

C691 Coleção desafios das engenharias: engenharia de computação 2 / Organizador Ernane Rosa Martins. - Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-384-9

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.849211808>

1. Engenharia da computação. I. Martins, Ernane Rosa (Organizador). II. Título.

CDD 621.39

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos - CRB-8/9166

**Atena Editora**

Ponta Grossa - Paraná - Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

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

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

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

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



## DECLARAÇÃO DA EDITORA

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

## APRESENTAÇÃO

A Engenharia de Computação é a área que estuda as técnicas, métodos e ferramentas matemáticas, físicas e computacionais para o desenvolvimento de circuitos, dispositivos e sistemas. Esta área tem a matemática e a computação como seus principais pilares. O foco está no desenvolvimento de soluções que envolvam tanto aspectos relacionados ao software, quanto à elétrica/eletrônica. Os profissionais desta área são capazes de atuar principalmente na integração entre software e hardware, tais como: automação industrial e residencial, sistemas embarcados, sistemas paralelos e distribuídos, arquitetura de computadores, robótica, comunicação de dados e processamento digital de sinais.

Dentro deste contexto, esta obra aborda diversos aspectos tecnológicos computacionais, tais como: implementação e modificações numéricas a serem feitas no algoritmo de Anderson (2010) para simular o escoamento sobre uma asa finita submetida a ângulos de ataque próximos ao estol; modelo distribuído para analisar a influência da formação e do adensamento de geadas sobre o desempenho de evaporadores do tipo tubo-aletado, comumente usados em refrigeradores frost-free; um algoritmo de Redes Neurais Convolucionais (CNN) que identifica se a pessoa está ou não utilizando a máscara; potencialidades do M-Learning e Virtual Reality no curso técnico em Agropecuária; avaliação da qualidade da energia elétrica em um sistema de geração de energia fotovoltaica; uma abordagem para a segmentação de imagens cerebrais, utilizando o método baseado em algoritmos genéticos pelo método de múltiplos limiares; estudo numérico de uma âncora torpedo sem aletas cravada em solo isotrópico puramente coesivo, utilizando um modelo axissimétrico não-linear em elementos finitos; estudo acerca da análise numérica de placas retangulares por meio do método das diferenças finitas, obtendo soluções aproximadas para o campo de deslocamentos transversais bem como os correspondentes momentos fletores, para problemas envolvendo uma série de condições de contorno, utilizando-se o software Matlab® para simulação; desenvolvimento e aplicação da Realidade Virtual (RV) como Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC) para auxiliar no processo de ensino-aprendizado de disciplinas do Ensino Médio; avaliação dos resultados obtidos em campanhas de medição de qualidade da energia elétrica (QEE) na rede básica em 500 kV; examinar o comportamento mecânico-estático de uma longarina compósita projetada para uma aeronave esportiva leve através de investigações numéricas, empreendidas em software (ANSYS Release 19.2) comercial de elementos finitos; construção de um sistema para monitoramento de ativos públicos; a relação da Sociedade 5.0 envolvida no contexto da Indústria 4.0 e a Transformação Digital; algoritmos de seleção e de classificação de atributos, identificando as vinte principais características que contribuem para o desempenho alto ou baixo dos estudantes; a Mask R-CNN, utilizada para a segmentação de produtos automotivos (parabrisas, faróis, lanternas, para-choques e retrovisores) em uma empresa do ramo de reposição automotiva; o nível de usabilidade do aplicativo protótipo

para dispositivo móvel na área da saúde voltado ao auxílio do monitoramento móvel no uso de medicamentos em seres humanos.

Sendo assim, esta obra é significativa por ser composta por uma gama de trabalhos pertinentes, que permitem aos seus leitores, analisar e discutir diversos assuntos importantes desta área. Por fim, desejamos aos autores, nossos mais sinceros agradecimentos pelas significativas contribuições, e aos nossos leitores, desejamos uma proveitosa leitura, repleta de boas reflexões.

Ernane Rosa Martins


## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

#### **NONLINEAR LIFTING LINE IMPLEMENTATION AND VALIDATION FOR AERODYNAMICS AND STABILITY ANALYSIS**

André Rezende Dessimoni Carvalho

Pedro Paulo de Carvalho Brito


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8492118081>

### **CAPÍTULO 2..... 11**

#### **INFLUÊNCIA DA FORMAÇÃO DE GEADA EM EVAPORADORES DE TUBO ALETADO USANDO UM MODELO DISTRIBUÍDO**

Caio Cezar Neves Pimenta

André Luiz Seixlack

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8492118082>

### **CAPÍTULO 3..... 24**


#### **INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE SEÇÕES DE CONECTORES NA EFICIÊNCIA DA RUPTURA POR SEÇÃO LÍQUIDA EM CANTONEIRA DE CHAPA DOBRADA**

Jéssica Ferreira Borges

Luciano Mendes Bezerra

Francisco Evangelista Jr

Valdeir Francisco de Paula

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8492118083>


### **CAPÍTULO 4..... 37**

#### **INFORMATION THEORY BASED STOCHASTIC HETEROGENEOS MULSTISCALE**

Ianyqui Falcão Costa

Liliane de Allan Fonseca

Ézio da Rocha Araújo

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8492118084>

### **CAPÍTULO 5..... 59**

#### **INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA IDENTIFICAR O USO DE MÁSCARA NA PREVENÇÃO DA COVID-19**

Roberson Carlos das Graças

Edyene Cely Amaro Oliveira

Guilherme Ribeiro Brandao


Igor Siqueira da Silva

Samara de Jesus Duarte

Samara Lana da Rocha

Hermes Francisco da Cruz Oliveira


Guilherme Henrique Chaves Batista

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8492118085>

**CAPÍTULO 6..... 67**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO MECÂNICO DE PLACAS A PARTIR DE MÉTODOS APROXIMADOS**

Gabriel de Bessa Spínola  
Edmilson Lira Madureira  
Eduardo Morais de Medeiros

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8492118086>

**CAPÍTULO 7..... 85**

**M-LEARNING E VIRTUAL REALITY NO ENSINO TÉCNICO DE AGROPECUÁRIA**


Gabriel Pinheiro Compto  
Jeconias Ferreira dos Santos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8492118087>

**CAPÍTULO 8..... 95**

**MODELLING AND ANALYSIS OF AEROBOAT JAHU**


João B. de Aguiar  
Júlio C.S. Sousa  
José M. de Aguiar

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8492118088>

**CAPÍTULO 9..... 113**

**MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE ENERGIA EM SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA - ANÁLISE DAS CAMPANHAS DE MEDIÇÃO DE TENSÃO E CORRENTE E CARACTERÍSTICAS DE INJEÇÃO DE HARMÔNICOS DOS SISTEMAS DE BAIXA, MÉDIA E ALTA TENSÃO**

Nelson Clodoaldo de Jesus  
João Roberto Cogo  
Luiz Marlus Duarte  
Jesus Daniel de Oliveira  
Luis Fernando Ribeiro Ferreira  
Éverson Júnior de Mendonça  
Leandro Martins Fernandes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.8492118089>

**CAPÍTULO 10..... 127**

**OTIMIZAÇÃO MULTI-LIMAR PARA SEGMENTAÇÃO DE MRI POR ALGORÍTIMO GENÉTICO**

Tiago Santos Ferreira  
Paulo Fernandes da Silva Júnior  
Ewaldo Eder Carvalho Santana  
Mauro Sérgio Silva Pinto  
Jayne Muniz Fernandes  
Ana Flávia Chaves Uchôa  
Jarbas Pinto Monteiro Guedes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180810>

**CAPÍTULO 11..... 138**

**ANÁLISE NUMÉRICA DA CAPACIDADE DE CARGA DE ÂNCORAS TORPEDO CONSIDERANDO EFEITOS DE SETUP**

Guilherme Kronemberger Lopes

José Renato Mendes de Sousa

Gilberto Bruno Ellwanger


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180811>

**CAPÍTULO 12..... 156**

**ANÁLISE NUMÉRICA DE PLACAS EM ESTRUTURAS AEROESPACIAIS POR DIFERENÇAS FINITAS**

Júlio César Fiorin

Reyolando Manoel Lopes Rebello da Fonseca Brasil

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180812>

**CAPÍTULO 13..... 172**


**NUMERICAL SIMULATION OF LABYRINTH SEALS FOR PULSED COMPRESSION REACTORS (PCR)**

Hermann Enrique Alcázar Rojas

Briam Rudy Velasquez Coila

Arioston Araújo de Moraes Júnior

Leopoldo Oswaldo Alcázar Rojas

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180813>

**CAPÍTULO 14..... 183**

**PRÁTICAS E CONTROLE DA CORRUPÇÃO NO MERCADO SEGURADOR: UMA PROPOSTA DE DADOS PARA SISTEMAS DE CONTROLE E COMPLIANCE**

Lucas Cristiano Ferreira Alves

Melissa Mourão Amaral

Liza Dantas Noguchi

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180814>


**CAPÍTULO 15..... 198**

**PREDICTING EFFECTIVE CONSTITUTIVE CONSTANTS FOR WOVEN-FIBRE COMPOSITE MATERIALS**

Jonas Tieppo da Rocha

Tales de Vargas Lisbôa

Rogério José Marczak

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180815>


**CAPÍTULO 16..... 210**

**PREVENTING SPURIOUS ARTIFACTS WITH CONSISTENT INTERPOLATION OF PROPERTIES BETWEEN CELL CENTERS AND VERTICES IN TWO-DIMENSIONAL RECTILINEAR GRIDS**

Alexandre Antonio de Oliveira Lopes

Flávio Pereira Nascimento

Francisco Ismael Pinillos Nieto  
Túlio Ligneul Santos  
Alberto Barbosa Júnior  
Luca Pallozzi Lavorante

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180816>

**CAPÍTULO 17..... 230**

**REALIDADE VIRTUAL APLICADA COMO FERRAMENTA DE AUXÍLIO AO ENSINO**

Simone Silva Frutuoso de Souza  
Everton Welter Correia  
Gabrielly Chiquezi Falcão  
Leonardo Plaster Silva  
Érica Baleroni Pacheco  
Fábio Roberto Chavarette  
Fernando Parra dos Anjos Lima

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180817>

**CAPÍTULO 18..... 245**

**RESULTADOS DE CAMPANHAS DE MEDIÇÃO DE QUALIDADE DA ENERGIA EM SISTEMAS COM COMPENSADORES ESTÁTICOS DE REATIVOS - ANÁLISE DO IMPACTO DE OUTROS AGENTES NA AMPLIFICAÇÃO DE HARMÔNICOS EM SISTEMA DE 500 kV**


Nelson Clodoaldo de Jesus  
João Roberto Cogo  
Luis Fernando Ribeiro Ferreira  
Luiz Marlus Duarte  
Éverson Júnior de Mendonça  
Leandro Martins Fernandes  
Jesus Daniel de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180818>

**CAPÍTULO 19..... 258**

**SIMPLIFIED NUMERICAL MODEL FOR ANALYSIS OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE BEAMS WITH PARTIAL INTERACTION**

Samuel Louzada Simões  
Tawany Aparecida de Carvalho  
Ígor José Mendes Lemes  
Rafael Cesário Barros  
Ricardo Azoubel da Mota Silveira


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180819>

**CAPÍTULO 20..... 266**

**SIMULAÇÃO DE UMA LONGARINA COMPÓSITA DE UMA AERONAVE ESPORTIVA LEVE**

Felipe Silva Lima  
Álvaro Barbosa da Rocha  
Daniel Sarmento dos Santos

Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180820>

**CAPÍTULO 21.....279**

**SISTEMA RFID PARA CONTROLE DE ATIVOS PÚBLICOS**

João Felipe Fonseca Nascimento

Jislane Silva Santos de Menezes

Jean Louis Silva Santos

Jennysson D. dos Santos Júnior

Luccas Ribeiro Cruz

Jean Carlos Menezes Oliveira

João Marcos Andrade Santos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180821>

**CAPÍTULO 22.....292**

**SISTEMAS ESTRUTURAIS CONVENCIONAIS E SISTEMAS DE LAJES LISAS EM EDIFÍCIOS DE CONCRETO ARMADO**

Pablo Juan Lopes e Silva Santos


Carlos Henrique Leal Viana

Sávio Torres Melo

Rebeka Manuela Lobo Sousa

Tiago Monteiro de Carvalho

Thiago Rodrigues Piauilino Ribeiro

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180822>

**CAPÍTULO 23.....303**

**SOCIEDADE 5.0 CORRELACIONADA COM A INDÚSTRIA 4.0 E A TRANSFORMAÇÃO DIGITAL**

Pablo Fernando Lopes

Thiago Silva Souza

Fernando Hadad Zaidan

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180823>

**CAPÍTULO 24.....313**

**TÉCNICA DE DIAGNÓSTICO DE BARRAS QUEBRADAS EM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO SEM CARGA POR MEIO DA TRANSFORMADA WAVELET**

Carlos Eduardo Nascimento

Cesar da Costa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180824>

**CAPÍTULO 25.....332**





**UNCERTAINTY QUANTIFICATION OF FRACTURE POTENTIAL AT CONCRETE-ROCK INTERFACE**

Mariana de Alvarenga Silva

Francisco Evangelista Junior

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180825>



<b>CAPÍTULO 26</b> .....	<b>342</b>
<b>USANDO MINERAÇÃO DE DADOS PARA IDENTIFICAR FATORES MAIS IMPORTANTES DO ENEM DOS ÚLTIMOS 22 ANOS</b>	
Jacinto José Franco	
Fernanda Luzia de Almeida Miranda	
Davi Stiegler	
Felipe Rodrigues Dantas	
Jacques Duílio Brancher	
Tiago do Carmo Nogueira	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180826">https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180826</a>	
<b>CAPÍTULO 27</b> .....	<b>355</b>
<b>ARTIFICIAL INTELLIGENCE USAGE FOR IDENTIFYING AUTOMOTIVE PRODUCTS</b>	
Leandro Moreira Gonzaga	
Gustavo Maia de Almeida	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180827">https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180827</a>	
<b>CAPÍTULO 28</b> .....	<b>366</b>
<b>UTILIZAÇÃO DE APLICATIVO PARA DISPOSITIVO MÓVEL PARA ADMINISTRAÇÃO DE MEDICAMENTOS</b>	
Luísa de Castro Guterres	
Allan Rafael da Silva Lima	
Wender Antônio da Silva	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180828">https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180828</a>	
<b>CAPÍTULO 29</b> .....	<b>399</b>
<b>VIBRATIONS ANALYSIS UNCOUPLED AND COUPLED FLUID-STRUCTURE BETWEEN SHELL AND ACOUSTIC CAVITY CYLINDRICAL FOR VARIOUS BOUNDARY CONDITIONS</b>	
Davidson de Oliveira França Júnior	
Lineu José Pedroso	
 <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180829">https://doi.org/10.22533/at.ed.84921180829</a>	
<b>SOBRE O ORGANIZADOR</b> .....	<b>410</b>
<b>ÍNDICE REMISSIVO</b> .....	<b>411</b>

# CAPÍTULO 1

## NONLINEAR LIFTING LINE IMPLEMENTATION AND VALIDATION FOR AERODYNAMICS AND STABILITY ANALYSIS

*Data de aceite:* 02/08/2021

*Data de submissão:* 05/05/2021

### André Rezende Dessimoni Carvalho

Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Mecânica  
<http://lattes.cnpq.br/7476570541028392>

### Pedro Paulo de Carvalho Brito

Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Mecânica  
<http://lattes.cnpq.br/7127964828220017>

**ABSTRACT:** The well-known Prandtl's Lifting Line Theory, elaborated in 1918, was the first well-succeeded mathematical model capable of describing the flow along the span of a wing. Since then, some modifications implemented by Weissinger, Multhopp, Philips, and Anderson were presented. Compared with other potential flow-based methods, such as the Vortex Lattice and Panel Method, the Lifting Line has the advantage of the lowest computational cost and the most straightforward implementation, making it suitable for fast aerodynamic optimization codes. Furthermore, Anderson's method has the convenience of incorporating both numerical and experimental, bi-dimensional viscous data. This paper will describe the implementation and numerical modifications made in the algorithm proposed by Anderson (2010) to simulate the flow over a finite wing under angles of attack near the stall. A big concern of this work is to show, with enough detail, the effects of the boundary

conditions and numerical strategies adopted over the results and accuracy. Various numerical differentiation, interpolation, and discretization schemes were tested to achieve values of circulation at the wing tip inside the iterative process. The results were compared with potential flow open source codes and experimental data, showing good agreement.

**KEYWORDS:** Aerodynamics, Nonlinear Lifting Line, Numerical Methods.

### IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE LINHA SUSTENTADORA NÃO LINEAR PARA ANÁLISE AERODINÂMICAS E DE ESTABILIDADE

**RESUMO:** A célebre teoria da linha sustentadora de Prandtl, elaborada em 1908, foi o primeiro modelo matemático a conseguir descrever com sucesso o resultado do escoamento ao longo da envergadura de uma asa. Desde então, algumas modificações implementadas por Weissinger, Multhopp, Philips, e Anderson foram apresentadas. Comparada com outros métodos potenciais, como o método Vortex Lattice e o método dos painéis, a linha sustentadora tem a vantagem do menor custo computacional e da maior facilidade de implementação, tornando-a adequada para códigos de otimização aerodinâmica. Além disso, o método de Anderson tem a vantagem de permitir incorporar dados bidimensionais viscosos tanto de fontes numéricas como de fontes experimentais. Esse trabalho detalha a implementação e modificações numéricas a serem feitas no algoritmo de Anderson (2010) para simular o escoamento sobre uma asa finita submetida a ângulos de

ataque próximos ao estol. Uma grande preocupação desse trabalho é mostrar, com suficiente nível de detalhe, os efeitos de condições de contorno e estratégias numéricas adotadas, sobre os resultados e a acuracidade. Várias técnicas de derivação numérica, interpolação e esquemas de discretização são testados para alcançar os valores de circulação na região de ponta da asa dentro do processo iterativo. Os resultados foram comparados com códigos de fonte aberta baseados em métodos potenciais e com dados experimentais, mostrando boa concordância.

**PALAVRAS - CHAVE:** Aerodinâmica, Linha Sustentadora Não-Linear, Métodos Numéricos.

## 1 | INTRODUCTION

Fast numerical methods capable of evaluating many configurations during a design process are significant during the aerodynamic conceptual phase in the aeronautical industry. The first remarkable achievement was in 1918 when Prandtl developed the classical Lifting Line Theory (LLT). Later, other authors work to extend the method to the lift curve's nonlinear region and accept wings with arbitrary shape, which is an excellent accomplishment in the area. The LLT method is still used today for preliminary calculations of finite wings because of its low computational cost. The method has a good agreement with the experimental results for predicting the stall characteristics of wings, a difficult task even when more advanced approaches, such as CFD, are applied. The present work shows in a detailed way the capabilities of the Nonlinear Lifting Line (NL-LLT) to predict the near stall characteristics of finite wings and stability parameters.

## 2 | METHODOLOGY

### 2.1 Theoretical Fundaments

#### Circulation and Lift Generation

A fundamental definition in aerodynamics is the circulation ( $\Gamma$ ) because it is how we can mathematically model the lift. It is expressed by Eq. (1), which says that the circulation about a curve  $C$  is equal to the vorticity integrated over any open surface bounded by  $C$ . In Eq. (1),  $\vec{V}$  is the velocity vector.

$$\Gamma = - \oint_C \vec{V} ds = \int \int_S (\nabla \times \vec{V}) ds \quad (1)$$

The importance of the concept of circulation defined above is exposed by the Kutta-Joukowski theorem (1902-1906), which relates the lift per unit span ( $L'$ ) on a lifting airfoil or cylinder to the circulation, as shown in Eq. (2).

$$L' = \Gamma \rho_\infty V_\infty \quad (2)$$

where  $\rho_\infty$  is the free stream density, and  $V_\infty$  is the free stream velocity.

## Prandtl Classical Lifting Line

The implementation of the classical lifting-line relies on the substitution of a finite wing by a large number of horseshoe vortices, where 40 is usually enough. This way, using the Kutta-Joukowski theorem and analyzing the local airfoil section of a wing, we can obtain the fundamental equation of Prandtl's lifting line theory, given by Eq. (3). In this equation,  $c(y_0)$  is the local chord at an arbitrary station;  $y$  is the spanwise direction coordinate;  $b$  is the wingspan; and  $\alpha_{L=0}$  is the angle of attack for which the lift of the airfoil section is equal to zero.

$$\alpha(y_0) = \left[ \frac{\Gamma(y_0)}{\pi V_\infty c(y_0)} + \alpha_{L=0} \right] + \left[ -\frac{1}{4\pi} \int_{-b/2}^{b/2} \frac{(d\Gamma/dy)}{y_0 - y} \right] \quad (3)$$

Equation (3) states that the local geometric angle of attack ( $\alpha(y_0)$ ) is the sum of the effective angle of attack ( $\alpha_{eff}$ ) plus the induced angle of attack ( $\alpha_i$ ).

## 2.2 Numerical Methods

According to the numerical NL-LLT methodology presented by (Anderson, 2010), to solve the Eq. (3), we should first divide the wing into  $k+1$  spanwise stations. Then, we assume a preliminary elliptical distribution of  $\Gamma$  at all the stations. Now, using the Simpson's rule to evaluate the integral, the second term in the RHS of Eq. (3) becomes:

$$\alpha_i(y_n) = \frac{1}{4\pi V_\infty} \frac{\Delta y}{3} \sum_{j=2,4,6}^k \frac{(d\Gamma/dy)_{j-1}}{y_n - y_{j-1}} + 4 \frac{(d\Gamma/dy)_j}{y_n - y_j} + \frac{(d\Gamma/dy)_{j+1}}{y_n - y_{j+1}} \quad (4)$$

In Eq. (4),  $y_n$  is an arbitrary station, and  $\Delta y$  is the distance between stations. A second-order central difference scheme may be used to perform the derivatives. In Eq. (4), when  $y_n = y_{j-1}$ ,  $y_j$ , or  $y_{j+1}$ , a singularity occurs. It can be avoided replacing the term of the sum in which the singularity occurs by the average value of the same term in the two adjacent sections. As an example, if  $y_n = y_{j-1}$ , then the first term will be given by:

$$\frac{(d\Gamma/dy)_{j-1}}{y_n - y_{j-1}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{(d\Gamma/dy)_{j-1}}{y_n - y_{j-1}} + \frac{(d\Gamma/dy)_{j-1}}{y_{n+1} - y_{j-1}} \right] \quad (5)$$

Once  $\alpha_i$  is obtained for each station, and assumed that the geometrical angle of attack is known, we can isolate  $\alpha_{eff}$  (first term in the RHS of the Eq. (3)), obtaining the Eq.(6).

$$\alpha_{eff} = \alpha - \alpha_i(y_n) \quad (6)$$

With the distribution of  $a_{eff}$  calculated, we should obtain the bidimensional lift coefficient ( $c_l$ ), at each station. These data can be obtained from experimental polars or bi-dimensional codes such as Xfoil (Drela, 1989). Eventually, the value off  $a_{eff}$  obtained for some stations can be outside the range of bi-dimensional data. In such cases, the airfoil data should be extrapolated.

To ensure the boundary condition, we should set the local lift coefficient as zero at the tip stations. We also use a unidimensional third order interpolation scheme at the station adjacent to the tip to smooth numerical instabilities associated with the numerical derivative. Figure 1 shows the difference in  $c_l$  distribution for a given wing, and how the interpolation of the penultimate station leads to stabilization over the tip region.

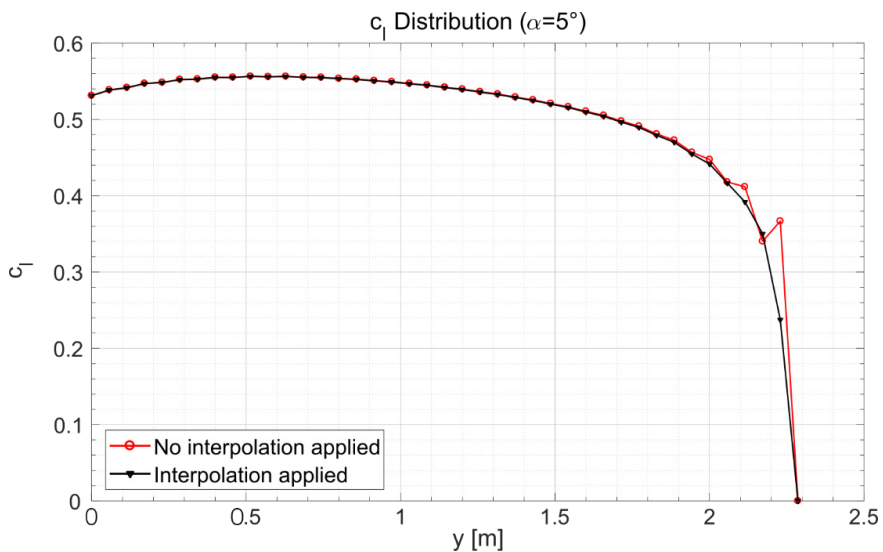


Figure 1: Comparison between  $c_l$  distributions ( $\alpha = 5^\circ$ ) according to the use of interpolation in the station adjacent to the tip station.

Next, from Eq. (2) and the definition of lift coefficient, we can calculate a new circulation, given by Eq. (7).

$$\Gamma(y_n) = \frac{1}{2} V_\infty c_n c_l(y_n) \quad (7)$$

In Eq. (7)  $c_n$  is the chord length at each station. The new distribution of  $\Gamma$  is compared with that assumed previously, starting an iterative process given by the Eq. (8), where  $\Gamma_{old}$  is the circulation calculated in the previous iteration;  $\Gamma_{new}$  is the circulation obtained by Eq. (7);  $\Gamma_{input}$  is the circulation used as input to Eq. (4) in the next iteration, and  $D$  is a damping factor, with typical values of 0.05. The iterative process is repeated sufficiently until  $\Gamma_{new}$  and  $\Gamma_{old}$  agree within acceptable residue.

$$\Gamma_{\text{input}} = \Gamma_{\text{old}} + D(\Gamma_{\text{new}} - \Gamma_{\text{old}}) \quad (8)$$

When performing  $C_L$  calculations for various values of  $\alpha$ , it is possible to accelerate the convergence by utilizing previous values of converged  $\Gamma$ . The present authors propose to substitute the initial elliptical guess in Anderson's methodology (except in the first simulation) by Eq. (9), where  $\Gamma_{\alpha+\Delta\alpha}$  is the initial input to be used in the following  $C_L(\alpha)$  simulation;  $\Gamma_\alpha$  is the current converged distribution of circulation;  $\Delta\alpha$  is the  $\alpha$  step between two simulations;  $c$  is the vector of local chords.

$$\Gamma_{\alpha+\Delta\alpha} = \Gamma_\alpha + \frac{1}{2}V_\infty c 2\pi\Delta\alpha \quad (9)$$

Equation (9) is valid only for the linear region, so if it is necessary to simulate high angles of attack, the initial guess can be weighted linearly so that, for the second angle of attack in the linear region, the initial assumption is given only by Eq. (9). In contrast, for the final  $AoA$ , the initial assumption becomes Anderson's method. Figure 2 compares, for a given wing, the number of iterations performed to converge the solutions and the values of  $C_L$  obtained, using the proposed methodology and the original approach.

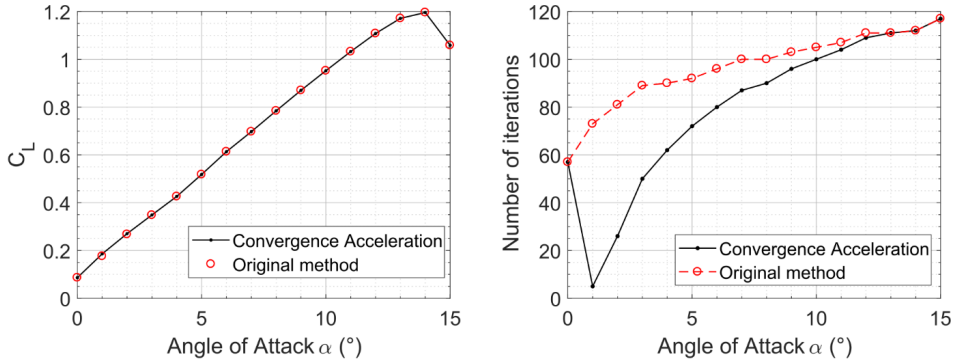


Figure 2: Comparison of results of  $C_L$  and number of iterations, according to the use of the acceleration of convergence.

After the end of the iterative process, the global force and moments coefficients can be calculated. Lift ( $C_L$ ), induced drag ( $C_{Di}$ ), and parasite drag ( $C_{D0}$ ) coefficients are expressed by the equations Eq. (10) to Eq. (12), respectively. In these equations,  $S$  is the wing area;  $c$  is the local chord; and  $C_{d,0}$  is the local airfoil drag, obtained by bi-dimensional computations.

$$C_L = \frac{2}{V_\infty S} \int_{-b/2}^{b/2} \Gamma(y) dy \quad (10)$$

$$C_{D,i} = \frac{2}{V_{\infty} S} \int_{-b/2}^{b/2} \Gamma(y) \alpha_i(y) dy \quad (11)$$

$$C_{D,0} = \frac{1}{S} \int_{-b/2}^{b/2} c_{d,0}(y) c(y) dy \quad (12)$$

Besides these coefficients, (Sivells et al., 1947a) also provide the equations Eq. (13) to Eq.(16) to calculate proper coefficients for stability analysis, respectively: pitching-moment ( $C_m$ ), rolling-moment, ( $C_l$  induced-yawing-moment ( $C_{n,i}$ ) and profile-yawing-moment coefficients ( $C_{n,0}$ ). In these equations,  $c'$  is the mean aerodynamic chord, and  $c_m$  is the local bi-dimensional pitching-moment.

$$C_m = \frac{1}{S c'} \int_{-b/2}^{b/2} c_m(y) c(y)^2 dy \quad (13)$$

$$C_l = \frac{1}{S b} \int_{-b/2}^{b/2} c_l(y) c(y) y dy \quad (14)$$

$$C_{n,i} = \frac{1}{S b} \int_{-b/2}^{b/2} \frac{\pi c_l(y) c(y) \alpha_i(y)}{180} y dy \quad (15)$$

$$C_{n,0} = \frac{1}{S b} \int_{-b/2}^{b/2} c_{d,0}(y) c(y) y dy \quad (16)$$

To evaluate equations Eq. (13) to Eq. (16) with command deflections, the  $c_l$  values over the control surface stations,  $c_l(y_{cs})|_{\delta_f}$ , can be refreshed according to Eq. (17), where  $c_l(y_{cs})|_{\delta_f=0^\circ}$  is the original  $c_l$  over those stations, without considering the control surface;  $\partial c_l / \partial \delta_f$  is the derivative of  $c_l$  with respect to the surface deflection, and  $\delta_f$  is the desired angle of deflection. An equivalent equation shall be used for bi-dimensional pitching moment and drag coefficients. Another possibility to take into account the effects of the deflection is to substitute the airfoil polars over the command surface stations with the polars of the deflected airfoils.

$$c_l(y_{cs})|_{\delta_f} = c_l(y_{cs})|_{\delta_f=0^\circ} + \frac{\partial c_l}{\partial \delta_f} \delta_f \quad (17)$$

### 3 | RESULTS

Aiming to compare the results provided by the implemented method with experimental data and other potential flow-based codes, the wing studied by (Sivells, 1947b) was chosen. The case was a straight wing with NACA 64-210 airfoil, aspect ratio 9, taper ratio 0.5, chord root 0: 7257m, 2° washout, and 3° dihedral, at Mach 0.17 and Reynolds number  $4.4 \cdot 10^6$ . Although Anderson's method does not consider dihedral effects (Barbosa,2015), 3° is small

enough to be negligible in lift calculations. It is worth noting that the dihedral was considered in the other codes.

The other codes used to compare were: a) classical Prandtl's lifting line code; b) Machup (Hunsaker, 2011), a modern lifting line code; c) XFLR5 6.38 (Deperrois, 2017), a code that allows panel method as well as extended lifting line solution using 2D data from Xfoil; and d) AVL 3.35 (Drela et. al, 2017), a vortex lattice code. The bi-dimensional airfoil data used in lifting line based methods (except XFLR5) were extracted from (Abbott, 1959).

Figure 3 shows the curve  $C_L vs \alpha$  with an angle increment of  $0.1^\circ$  near the stall for the nonlinear methods (the points that did not converge were not considered). Table 1 points the results of  $C_L$  for  $\alpha = 5^\circ$ , the lift slope at the linear region ( $C_{L\alpha}$ ), and the angles of stall. As can be seen, all potential methods presented nearly the same deviation from the experimental results. However, the present work method has given the closest value for the stall angle compared to the experiment. It is also important to note that even XFLR5 using bi-dimensional data from Xfoil, its results were close to the present work using experimental bi-dimensional data.

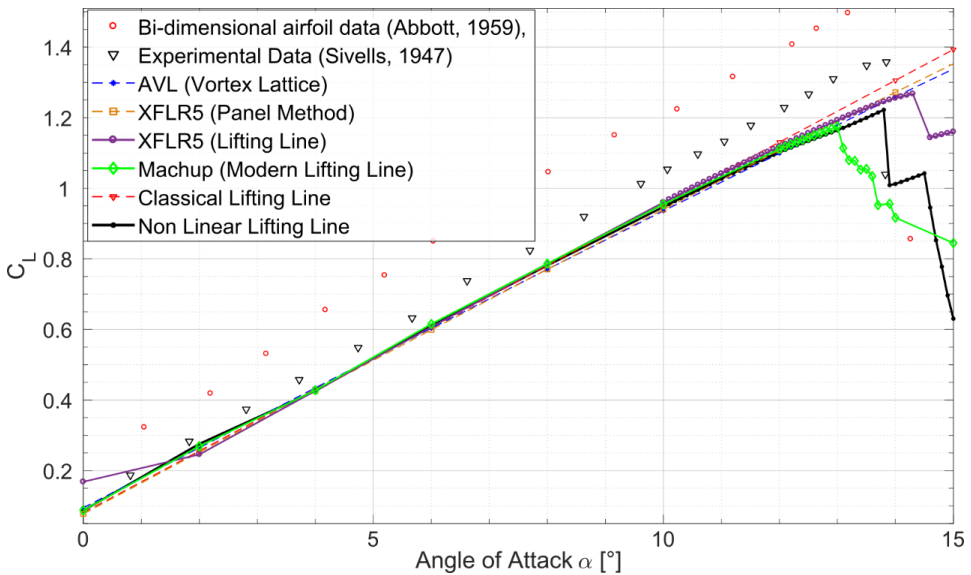


Figure 3:  $C_L vs \alpha$  comparison between the Nonlinear Lifting Line, potential codes, experimental data, and 2-D section experimental data.



	$C_L(\alpha = 5^\circ)$	$C_{L\alpha}(\text{rad}^{-1})$	Angle of stall
Present work (NL-LLT)	0.5181	4.95	13.7°
Classical Lifting Line	0.5182	5.01	–
Machup (Modern Lifting Line)	0.5196	5.04	13.0°
XFLR5 (Extended Lifting Line)	0.5170	4.86	14.3°
XFLR5 (Panel Method)	0.5130	4.83	–
AVL (Vortex Lattice)	0.5190	4.78	–
(Sivells, 1947b)	0.5721	5.35	13.8°

Table 1:  $C_L(\alpha = 5^\circ)$ ,  $C_{L\alpha}$  and angle of stall comparison between methods.

The  $c_l$  distributions for  $\alpha = 5^\circ$ , are shown in Figure 4. The deviation at the tip for the present method can be explained by the linear discretization proposed by Anderson (2010). Other methods use cosine clustering, which allows a better resolution near root and tips. As Philips (2000) suggests, this distribution is given by Eq. (18), where  $n$  is the desired number of horseshoes on each semi-span, and  $s_i$  is an arbitrary station position.

$$s_i/b = [1 - \cos(1\pi/n)]/4, \quad 0 \leq i \leq n \quad (18)$$

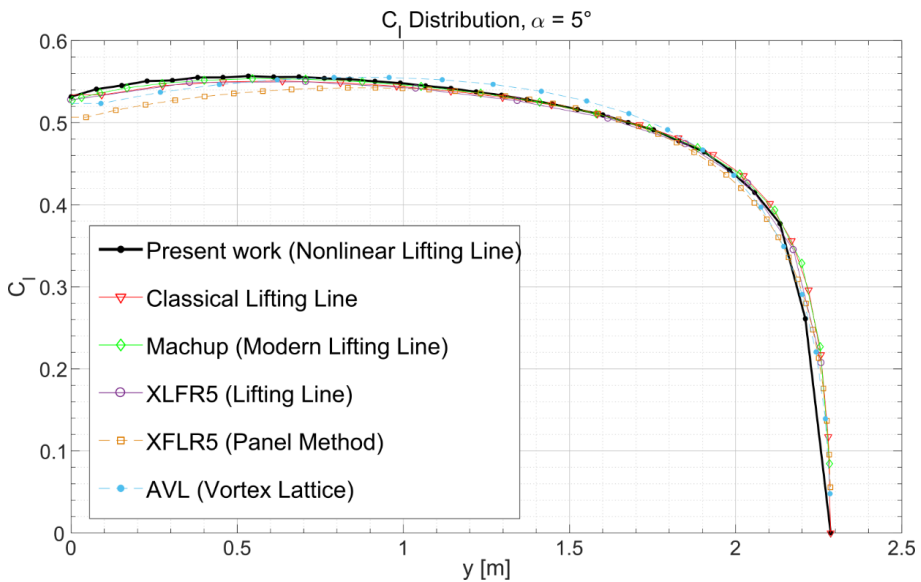


Figure 4: Comparison between  $c_l$  distribution over midspan provided by potential methods for  $\alpha = 5^\circ$ .

In order to evaluate results provided by the equations Eq. (13) to Eq. (17), we implemented a  $20^\circ$  asymmetric right deflection of a trailing edge control surface positioned between  $0.8 \cdot b/2 \leq y_{cs} \leq 1.0 \cdot b/2$ , with chord length of 20% of the local chord. The results were compared with the XFLR5 panel method. Figure 5 compares distributions of  $c_l$  and  $c_d$  between the methods, and Table 2 compares its global force and moment coefficients.

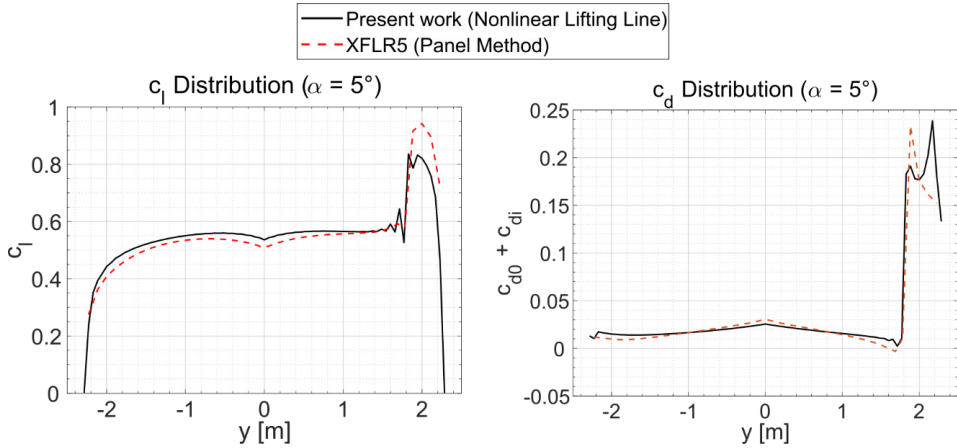


Figure 5: Comparison between  $c_l$  and  $c_d$  distributions for  $20^\circ$  right deflection of a  $0.20 c_n$  trailing edge control surface.

Although there are numerical instabilities near the inboard section of the control surface for the present work, the global force and moment coefficients agree with XFLR5, while lifting line calculation time was quite faster. It is worth to note that these results should be used carefully, since surface deflections generate high three-dimensional flow, eventually exceeding capabilities of potential flow codes.

	$C_L$	$C_D$	$C_n$	$C_l$
Present Work	0.552	0.020	0.003	-0.014
XFLR5 (Panel Method)	0.554	0.022	0.002	-0.017

Table 2: Comparison between force and moment coefficients for  $20^\circ$  right deflection of a  $0.02 c_n$  trailing edge control surface.

## 4 | CONCLUSIONS

We numerically investigated the capabilities of the modified classical NL-LLT for predicting the aerodynamic coefficients in low and near stall angles of attack, where a wing of aspect ratio 9 was simulated.

The use of third order interpolations at the tip stations, and the right boundary

conditions, allowed us to obtain smoother lift distribution along the wing span for high angles of attack, and showed to be a reasonable approach to reduce the instabilities at this region. An even better result could be achieved by changing the spacial discretization strategy.

For the case analyzed, the NL-LLT implemented was capable to provide the best prediction for the angle of stall compared with the experimental data from (Sivells, 1947b), with less than 1% error. The method also presented concordance with panel method when simulating effects of deflected surfaces in force and moment coefficients, as well as in lift distribution. In conclusion, this work confirms that the NL-LLT is a useful approach for predicting the aerodynamic coefficients in small and near stall angles of attack, making it suitable for the conceptual design phase of small subsonic airplanes, when detailed information of the flow field is not required, and low computational cost is needed. However, it is important to pay attention to the limitation of the method in simulating wings with high sweep or dihedral, and low aspect ratio, because of the existence of highly three-dimensional flows in such cases.

## REFERENCES

Abbott, I. & Doenhoff A., 1959. **Theory of Wing Sections Including a Summary of Airfoil Data**. Dover Publications, Inc.

Anderson, J., 2010. **Fundamentals of Aerodynamics**. 5 ed., McGraw-Hill Education.

Barbosa, A., 2015. **Influencia da Asa em Gaivota nos Coeficientes Aerodinamicos de uma Aeronave**. Master thesis, Universidade de Sao Paulo

Deperrois, A., 2017. **XFLR5 6.38**. Retrieved from <http://www.xflr5.com/xflr5.htm>.

Drela, M. 1989. **XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils**. Low Reynolds Number Aerodynamics: Proceedings of the Conference Notre Dame, pp. 1 to 12, Springer Berlin Heidelberg.

Drela, M. & Youngren, H. 2017. **AVL 3.35**. Retrieved from <http://web.mit.edu/drela/Public/web/avl/>.

Hunsaker, D., 2011. **A Numerical Lifting-Line Method Using Horseshoe Vortex Sheets**.

Philips, W., Snyder, D., 2000. **Modern Adaptation of Prandtl's Classic Lifting-Line Theory**. Journal of Aircraft, vol. 37.

Sivells, J. & Neely, R., 1947a. **Method for Calculating Wing Characteristics by Lifting-Line Theory Using Nonlinear Section Lift Data**. National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note No 1269.

Sivells, J., 1947b. **Experimental and Calculated Characteristics of Three Wings of NACA 64-210 and 65-210 Airfoil Sections With and Without 2° Washout**. National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note No 1422.

## INFLUÊNCIA DA FORMAÇÃO DE GEADA EM EVAPORADORES DE TUBO ALETADO USANDO UM MODELO DISTRIBUÍDO

Data de aceite: 02/08/2021

### Caio Cezar Neves Pimenta

Department of Mechanical Engineering  
Santo Antônio da Barra, GO – Brazil  
<http://lattes.cnpq.br/5842214559502448>

### André Luiz Seixlack

Department of Mechanical Engineering  
Ilha Solteira, SP – Brazil  
<http://lattes.cnpq.br/8658860438651895>

**RESUMO:** Neste trabalho apresenta-se um modelo distribuído para analisar a influência da formação e do adensamento de geada sobre o desempenho de evaporadores do tipo tubo-aletado, comumente usados em refrigeradores *frost-free*. As equações fundamentais de conservação da massa, da quantidade de movimento e de conservação de energia são usadas para modelar o escoamento do fluido refrigerante. A equação da conservação da energia na parede do tubo também é resolvida, para o cálculo da distribuição de temperatura ao longo dessa parede. Do lado do ar, os princípios de conservação da massa, quantidade de movimento e de conservação da energia são empregados para simular a formação e crescimento da geada sobre a superfície do evaporador. O sistema de equações governantes é integrado numericamente e resolvido iterativamente por substituições sucessivas. Os resultados obtidos pelo modelo apresentam boa concordância em relação aos dados experimentais disponíveis

na literatura. Considerando toda faixa analisada de temperatura do refrigerante na entrada do evaporador,  $-25,9\text{ °C}$  a  $-20,2\text{ °C}$ , os desvios absolutos médios entre os resultados calculados e os dados experimentais em relação à capacidade de refrigeração do evaporador e à massa de geada formada são, respectivamente, 8,1% e 6,0%.

**PALAVRAS - CHAVE:** Evaporador de tubo-aletado. Formação de geada. Refrigerador doméstico. Modelo distribuído. Desempenho.

**ABSTRACT:** This work presents a distributed model to analyze the influence of frost formation and thickening on the performance of tube-finned evaporators, commonly used in frost-free refrigerators. The fundamental equations of conservation of mass, amount of movement and conservation of energy are used to model the flow of refrigerant. The energy conservation equation on the tube wall is also solved, for calculating the temperature distribution along this wall. On the air side, the principles of conservation of mass, amount of movement and conservation of energy are employed to simulate the formation and growth of frost on the surface of the evaporator. The system of governing equations is integrated numerically and solved iteratively by successive substitutions. The results obtained by the model are in good agreement with the experimental data available in the literature. Considering the entire analyzed range of refrigerant temperature at the evaporator inlet,  $-25.9\text{ °C}$  to  $-20.2\text{ °C}$ , the mean absolute deviations between the calculated results and the experimental data in relation to the evaporator's cooling capacity and mass of

frost formed are, respectively, 8.1% and 6.0%.

**KEYWORDS:** Tube-fin evaporator. Frost formation. Household refrigerator. Distributed model. Performance.

## 1 | INTRODUÇÃO

Atualmente sistemas de refrigeração são imprescindíveis tanto em termos de conforto térmico, garantindo boas condições térmicas, quanto em relação à conservação de gêneros alimentícios, garantindo a qualidade dos produtos por meio da conservação em baixas temperaturas. A maioria dos sistemas de refrigeração atual utiliza o ciclo de refrigeração por compressão a vapor, constituídos por quatro dispositivos principais: compressor, condensador, evaporador e um dispositivo de expansão ou válvula de expansão.

Quando esses evaporadores operam em temperaturas próximas a temperatura de a  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ficam sujeitos a um fenômeno físico inevitável e indesejável: a formação de geada em suas superfícies. A geada é um meio poroso formado pela sublimação do vapor d'água em pressões menores do que a do ponto triplo da água. Com o equipamento em funcionamento o acúmulo de geada, dependendo da sua espessura, aumenta a resistência térmica entre os tubos e o escoamento do ar, dificulta o escoamento do ar ao longo do evaporador e, conseqüentemente, reduz sua capacidade de refrigeração. Em razão disso, as temperaturas do compartimento refrigerado aumentam e o compressor permanece ligado por mais tempo, o que aumenta o consumo de energia do refrigerador. Para reduzir o problema, periodicamente, uma resistência elétrica é acionada para o degelo da superfície do evaporador. Entretanto, esse procedimento também contribui com o aumento do consumo de energia do refrigerador (KNABBEN, 2010) [4].

A formação de geada na superfície de evaporadores é um assunto que há muito tempo desperta interesse de vários pesquisadores em razão de sua influência sobre o desempenho desses trocadores de calor. Reduções de até 40 % foram observadas na capacidade de refrigeração de evaporadores de tubo-aletado em razão da formação de geada (SILVA, 2012) [8].

Hayashi *et al.* (1977) [1] avaliaram experimentalmente o processo de formação de geada em placas planas, com o intuito de obter uma relação entre as condições externas do escoamento e do meio poroso. Os autores observaram o crescimento da geada por meio de equipamentos e técnicas de visualização e notaram que esse crescimento depende das condições psicrométricas do ar, da temperatura da superfície da placa e das condições do escoamento do ar. O crescimento da geada foi dividido em três etapas: (i) crescimento dos cristais de geada; (ii) crescimento da camada de geada; (iii) crescimento completo da camada de geada.

De acordo com Sánches e Brun (2002) [7], que analisaram o crescimento da camada de geada experimentalmente em evaporadores, a desumidificação do ar a baixas

temperaturas é um grande problema na operação desses trocadores de calor em câmaras frigoríficas. Com o tempo a formação de geada na superfície do evaporador reduz o desempenho dos ciclos de refrigeração usados na indústria de alimentos. Sánches e Brun (2002), concluíram que, para certas condições, o fluxo de vapor d'água foi pequeno para temperaturas muito baixas e a distribuição de geada ao longo do evaporador foi bastante irregular, o que indica que algum fator desconhecido causou este comportamento na formação de geada no evaporador.

Yang, Lee e Song (2006) [11] elaboraram um modelo matemático para avaliar o comportamento de um evaporador de tubo-aletado sujeito à formação de geada sobre as serpentinas e aletas, utilizando equações da difusão de massa na superfície da camada da geada. Os coeficientes de transferência de calor e massa na superfície dos tubos e aletas foram calculados por correlações empíricas. O modelo foi validado comparando-se a espessura da camada de geada e a taxa de transferência de calor calculadas com os respectivos valores medidos, apresentando boa concordância, com um desvio médio de 2,2 % entre os resultados. Os autores não apresentaram informações sobre o procedimento utilizado para a medição da espessura da geada. O modelo não informou sobre o procedimento de solução do refrigerante que escoo no evaporador.

Silva, Hermes e Melo (2011) [11] apresentaram um modelo para analisar a formação de geada em evaporadores de tubo-aletado sob condições típicas de operação de sistemas de refrigeração comerciais leves. O modelo baseou-se nas equações dos balanços de massa, energia e quantidade de movimento do lado ar para prever a formação de geada em regime transiente na superfície do evaporador. Os resultados numéricos foram comparados com os dados experimentais de queda de pressão no lado do ar, vazão de ar, capacidade de refrigeração e massa de geada acumulada. Todas as previsões permaneceram dentro das faixas de incerteza experimentais. Os efeitos da redução progressiva da área de passagem do ar causada pela camada de geada e pela baixa condutividade da camada de geada sobre a resistência térmica global também foram avaliados. Verificou-se que o crescimento da camada de geada é a principal causa da redução da taxa de transferência de calor do evaporador, aumentando a queda de pressão do lado do ar e reduzindo o fluxo de ar através do evaporador.

Silva (2012) [8] elaborou um modelo matemático para avaliar diferentes variáveis que influenciam na formação de geada na superfície do evaporador do tipo tubo-aletados e avaliar sua influência na capacidade de refrigeração e teve como objetivos quantificar a massa de geada acumulada, taxas de transferência de calor sensível e latente, temperatura do ar na saída do evaporador e a perda de carga do escoamento de ar, através de um aparato experimental criado para observar este fenômeno, onde foi construída uma câmara de testes para avaliar o escoamento do ar, o crescimento e adensamento das partículas de água no estado sólido sobre a superfície do evaporador, no qual permiti a realização de ensaios com vazão fixa e variável onde se usa um controlador de velocidade. Para

a análise deste caso, foi usado um método matemático substituições sucessivas, para o cálculo das equações de transferência de massa, conservação da massa, energia e quantidade de movimento.

Por meio de seus resultados experimentais, Silva (2012) [8] constatou que: (a) a taxa de acúmulo de massa de geada sobre o evaporador aumenta com a elevação da vazão de ar; (b) a taxa de acúmulo de massa decresce ao longo do tempo, devido à redução da vazão de ar movimentada pelo ventilador e a elevação da temperatura da superfície da geada; (c) a mesma massa de geada causa diferentes graus de obstrução no evaporador dependendo das condições nas quais foi gerada; (d) aletas do tipo *wavy* (onduladas) apresentam melhor desempenho do que aletas com *louvers* (ventiladas), quando sujeitas à formação de geada.

A partir de seus resultados computacionais, Silva (2012) [8] observou que: (a) a espessura da camada de geada é maior na primeira fileira de tubos do evaporador; (b) temperaturas de evaporação abaixo do valor necessário aumentam a taxa de formação de geada e originam um meio poroso com baixa densidade e condutividade térmica; (c) apesar da vazão de ar do ventilador diminuir com a formação de geada, observou-se um aumento da velocidade do ar entre as aletas devido à redução da área de passagem.

Em razão disso, neste trabalho propõe-se um modelo distribuído para analisar a influência da formação e adensamento de geada sobre o desempenho de evaporadores de tubo-aletado, comumente usados em refrigeradores *frost-free* (ver Figura 1). Para isso elabora-se um código computacional para simular o escoamento do refrigerante no interior dos tubos e do ar no exterior do evaporador com formação de geada. Para analisar o escoamento do fluido refrigerante no interior dos tubos, utiliza-se um modelo desenvolvido anteriormente por Pimenta (2015) [5], no qual o desempenho do evaporador foi analisado sem considerar a formação de geada sobre sua superfície.

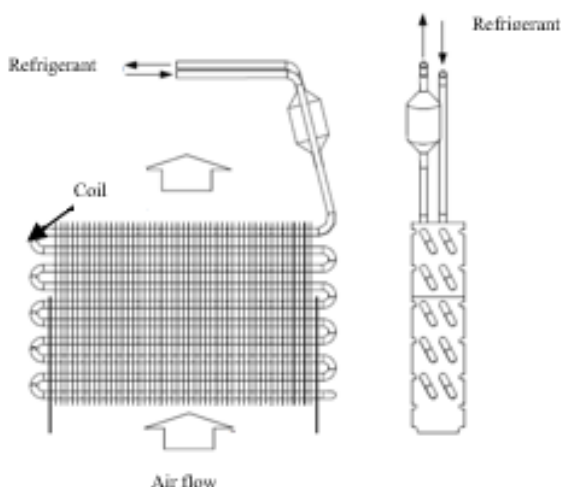


Figura 1 - Evaporador de tubo-aletado de refrigeradores *frost-free*

No modelo de Pimenta (2015)[5] as equações de conservação da massa, da quantidade de movimento e de conservação de energia do lado do fluido refrigerante são resolvidas, respectivamente, para o cálculo da velocidade, da pressão e da entalpia específica do refrigerante. Resolve-se também a equação da conservação de energia ao longo da parede do tubo, para obter sua distribuição de temperatura.

No presente trabalho implementa-se do lado do ar um modelo para a simulação da formação, crescimento e adensamento da camada de geada, sobre a superfície do evaporador. Para isso, as equações de conservação de massa de vapor d'água e de conservação de energia do ar são resolvidas, respectivamente, para o cálculo da umidade absoluta e da temperatura do ar. A queda de pressão do lado do ar é calculada por meio de correlações obtidas na literatura.

As propriedades termofísicas do fluido refrigerante, do ar e da água devem ser determinadas e equações constitutivas são requeridas para o cálculo dos fatores de atrito, dos coeficientes de transferência de calor para o refrigerante e para o ar e do coeficiente de transferência de massa para o ar. Além disso, é necessário determinar a eficiência das aletas.

Neste trabalho, as propriedades termofísicas do fluido refrigerante, do ar e da água são calculadas usando a biblioteca de propriedades termodinâmicas REFPROP 8.0 (LEMMON; HUBER; MCLINDEN, 2007). As propriedades termofísicas do material da parede dos tubos e aletas são obtidos por ajustes dos dados fornecidos por Incropera *et al.* (2014) [3].

O modelo é validado por meio de comparações dos resultados obtidos com dados experimentais disponíveis na literatura.

## 2 | MODELO MATEMÁTICO

O modelo proposto constitui-se do sistema formado pelas equações da conservação da massa, quantidade de movimento e energia para o refrigerante, conservação de energia na parede do tubo, conservação da energia e massa de vapor d'água do lado do ar e equações da difusão de massa e energia na camada de geada.



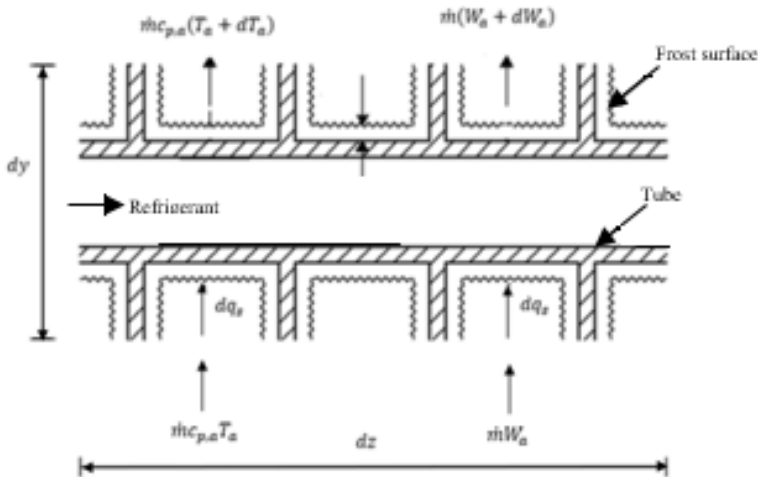


Figura 2 - Volume de controle para o balanço de energia e massa de vapor d'água no ar.

Realizando o balanço de massa do refrigerante no volume de controle mostrado na Figura 2, obtém-se

$$\frac{\partial \rho_r}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_r u)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

na qual  $\rho_r$  é a massa específica do refrigerante,  $u$  é a velocidade média do refrigerante na seção transversal do tubo,  $z$  é a coordenada ao longo do tubo,  $t$  é o tempo e  $A$  é a área da seção transversal do tubo.

Realizando o balanço de quantidade de movimento no volume de controle mostrado na Figura 2, obtém-se

$$\frac{\partial (\rho_r u)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_r u^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - F_z \quad (2)$$

na qual  $F_z$  é a força por unidade de volume em razão do atrito entre o fluido refrigerante e a parede do tubo. Frequentemente esse termo é representado por  $F_z = (dp/dz)_f$ , pois representa a parcela da queda de pressão total do fluido ao longo do tubo que é causada pelo atrito entre o fluido e a parede do tubo.

Realizando o balanço de conservação de energia no volume de controle mostrado na Figura 2, obtém-se

$$\frac{\partial \rho_r i_r}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_r u i_r)}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{h_{wr} P_i}{A} (T_w - T_r) \quad (3)$$

na qual  $h_{wr}$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o refrigerante e a parede interna do tubo do evaporador,  $T_w$  é a temperatura da parede do tubo e  $T_r$  é a temperatura do refrigerante.

Realizando o balanço de conservação de energia no volume de controle ao longo da parede do tubo e aletas, mostrado na Figura 2, obtém-se

$$m_{wf}c_{wf}\frac{\partial T_w}{\partial t} = [U_{aw}(T_a - T_w) + h_m(W_a - W_{a,w})i_{sv}]P_t - h_{wr}(T_w - T_r)P_i \quad (4)$$

na qual  $T_a$  é a temperatura do ar,  $W_a$  e  $W_{a,w}$  são, respectivamente, a umidade absoluta do ar e a umidade absoluta do ar saturado na temperatura da superfície da parede do tubo,  $i_{sv}$  é o calor latente de dessublimação da água na temperatura da superfície da camada de geada,  $U_{aw}$  é o coeficiente global de transferência de calor entre o ar e a parede do tubo e  $h_m$  é o coeficiente convectivo de transferência de massa determinando por meio da analogia entre transferência de calor e massa.  $U_{aw}$  e  $h_m$ .

Dessa forma, a modelagem do escoamento do fluido refrigerante no interior dos tubos do evaporador é obtida pelas Equações (1), (2), (3) e (4), usadas, respectivamente, para o cálculo das variáveis,  $u$ ,  $p$ ,  $i_r$  e  $T_w$ .

A seguir, realizando os balanços de massa e de difusão de calor na camada de geada mostrada na Figura 2, obtém-se as equações do modelo do lado do ar (geada)

$$T_{a,i+1} = T_{sg} - (T_{sg} - T_{a,i})\exp\left(-\frac{h_a A_t}{\dot{m}_a c_{p,a}}\right) \quad (5)$$

$$W_{a,i+1} = W_{a,sg} - (W_{a,sg} - W_{a,i})\exp\left(-\frac{h_m A_t}{\dot{m}_a}\right) \quad (6)$$

$$W_{a,sg} = W_w \cosh\left(\sqrt{\frac{\tau \lambda x_g}{\varepsilon D_{ab}}}\right) \quad (7)$$

$$T_{sg} = T_w + \frac{q''_{tot} x_g}{k_g} + \frac{i_{sv} \rho_a D_{ab} \varepsilon_g W_{a,w}}{k_g \tau_g} \left[1 - \cosh\left(\sqrt{\frac{\tau \lambda x_g}{\varepsilon D_{ab}}}\right)\right] \quad (8)$$

$$\frac{dx_g}{dt} = \frac{m''_c}{\rho_g} \quad (9)$$

$$m = \iint m'' dAdt \quad (10)$$

nas quais, as variáveis das equações de (5) à (10), são a temperatura do ar,  $T_{a,j-1}$ , a umidade absoluta do ar  $W_{a,j-1}$  obtidas na saída do volume,  $A_t$  é a área total de contato entre o ar e a superfície da geada, temperatura da superfície da geada, a umidade absoluta do ar na superfície da geada,  $W_{a,sg}$ , a porosidade,  $\varepsilon_g$  e a tortuosidade da geada,  $t_g$ ,  $W_{a,w}$  é a umidade absoluta do ar saturado na temperatura da parede do tubo ( $T_w$ ),  $i_{sv}$  é o calor latente de desublimação do vapor d'água e  $q''$  é o fluxo de calor por condução na geada, a condutividade térmica da geada,  $K_g$ , e a difusividade do vapor no ar,  $D_{ab}$ , temperatura da superfície da geada,  $T_{sg}$ ,  $m$  é a massa de geada acumulada.

Dessa forma, a modelagem do escoamento do lado do ar no evaporador é obtida pelas Equações (5), (6), (7), (8), (9) e (10), usadas, respectivamente, para o cálculo das variáveis,  $T_{a,i+1}$ ,  $W_{a,i+1}$ ,  $W_{a,sg}$ ,  $T_{sg}$ ,  $\frac{dx_g}{dt}$  e  $m$

### 3 I METODOLOGIA DE SOLUÇÃO

O sistema de equações do escoamento do fluido refrigerante e a equação da conservação da energia para a parede e aletas do evaporador. Tais equações são resolvidas por integração numérica e o sistema de equações algébricas resultante é solucionado iterativamente por substituições sucessivas.

Para isso, o tubo de evaporador é dividido em  $m - 1$  volumes de controle, como mostrado esquematicamente na Figura 3, e as equações são integradas no tempo e ao longo desses volumes obtendo-se um sistema de equações algébricas. A partir de valores conhecidos em um dado instante de tempo e um dado ponto, a solução desse sistema de equações fornece os valores das variáveis para cada ponto ao longo do evaporador.

O evaporador de quatro fileiras com cinco tubos é mostrado esquematicamente na Figura 4 (a) e (b). O índice  $NR$  refere-se a fileira e os índices  $i, j$  refere-se ao escoamento do ar e do refrigerante.

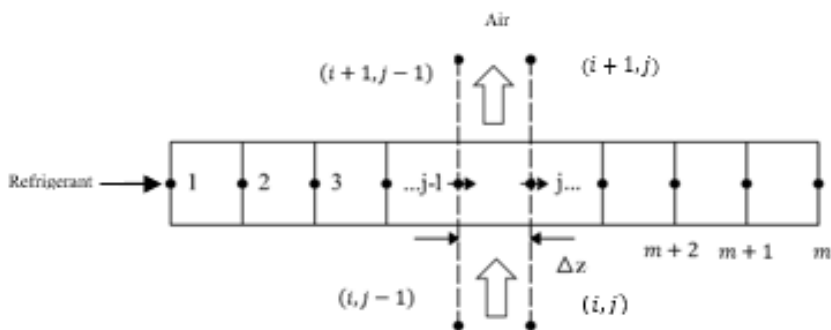


Figura 3 - Esquema da divisão ao longo do evaporador

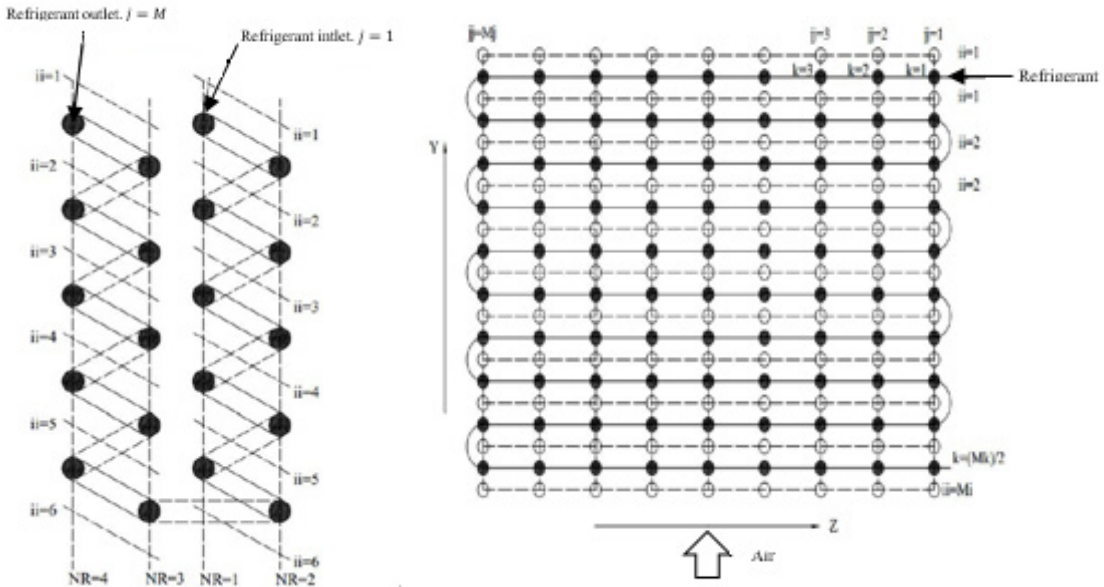


Figura 4 (a) – Vista frontal da divisão dos tubos para o evaporador de quatro fileiras com 5 tubos.

Figura 4 (b) – Vista frontal da divisão dos tubos para o evaporador de quatro fileiras com 5 tubos.

Uma vez conhecidas as condições de operação e as dimensões do evaporador, o modelo permite calcular os parâmetros de desempenho do evaporador, capacidade de refrigeração, massa de geada, queda de pressão e vazão de ar.

O tubo do evaporador é dividido em  $M$  pontos equidistantes de  $\Delta z$ . As equações discretizadas para o cálculo das variáveis apresentam a mesma forma para todos os pontos. Para evitar a utilização de uma equação distinta para o ponto  $j = 1$ , na entrada do evaporador, adota-se um ponto fictício em tal posição

Para uma dada configuração da serpentina do evaporador, o processo de simulação inicia-se com um conjunto de condições de entrada do ar e do refrigerante. Para o refrigerante, a vazão em massa,  $m_r$ , o título,  $x$ , e a temperatura,  $T_r$ , são fornecidos na entrada da serpentina  $z = 0$ . Para o ar, a vazão em massa,  $m_a$ , a umidade relativa,  $UR$ , e temperatura,  $T_a$ , são fornecidas na entrada do evaporador.

A solução das equações é obtida para cada ponto ao longo do evaporador, calculando-se as seguintes variáveis  $u, \rho, i_r, T_w$  para o escoamento do refrigerante. Com as propriedades do ar e as condições do tubo, calcula-se para o escoamento do ar  $p_g, k_g, T_s, x_g, t, \varepsilon$ , também pelo método de substituição sucessivas.

A convergência é obtida ponto a ponto da divisão do evaporador, quando a variação das variáveis calculadas atingirem uma variação inferior a  $10^{-4}$ .

## 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os parâmetros geométricos e as condições de operação do evaporador testado por Knabben (2010) [4] são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 1 e 2.

<b>Parâmetros geométricos</b>	
Comprimento do tubo reto	340 mm
Profundidade, $W_{evap}$	60 mm
Comprimento total da serpentina	6,8 m
Altura, $L_{evap}$	190 mm
Espaçamento transversal dos tubos	22 mm
Espaçamento longitudinal dos tubos	23 mm
Diâmetro interno do tubo	6,3 mm
Diâmetro externo do tubo	8,0 mm
Espessura das aletas	0,22 mm
Número de aletas por tubo	52

Tabela 1 - Parâmetros geométricos do evaporador

Fonte: Knabben (2010).

<b>Parâmetros de entrada</b>	
Temperatura do refrigerante	-25,9 a 20,2°C
Umidade relativa	39,6 a 44,7%
Vazão de ar	46 m <sup>3</sup> /h
Espessura inicial da geada	0,001 mm

Tabela 2 - Condições de operação usadas por Knabben (2010).

Fonte: Knabben (2010).

A seguir apresentam-se as comparações entre os resultados calculados pelo presente modelo e os dados experimentais obtidos por Knabben (2010) [4]. Tais comparações são realizados em termos das distribuições de capacidade de refrigeração do evaporador, de massa de geada formada, de queda de pressão do lado do ar e de vazão de ar, todas avaliadas ao longo de um período de quatro horas.

Observa-se na Figura 5(a) que aproximadamente 87% dos valores das capacidades de refrigeração calculadas pelo modelo completo e pelo modelo com  $T_w = T_{evap}$  encontram-se na faixa de -10 % a +10 % em relação aos valores experimentais. Observa-se também que o desvio absoluto médio foi de 8,8%, considerando todos os testes realizados, o que demonstra a qualidade do modelo proposto. Nota-se na Figura 5(b), que aproximadamente 60% dos valores das massas de geada calculadas pelos modelos encontram-se na faixa de +15% a -15% em relação aos valores medidos. Observa-se também que o desvio absoluto médio foi de 6,2%, considerando todos os testes realizados.

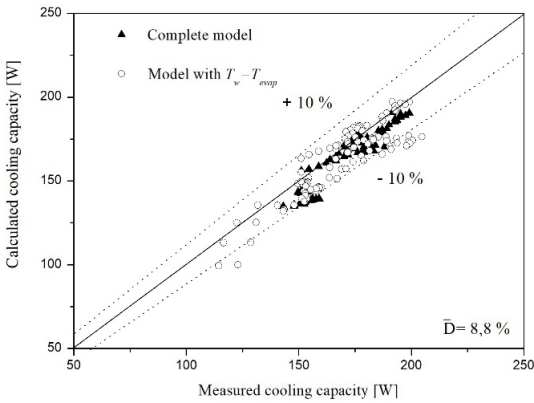


Figura 5 (a) - Comparação entre as capacidades de refrigeração calculadas e medidas por Knabben (2010).

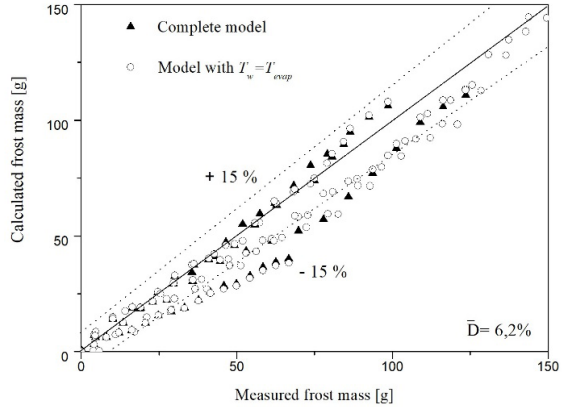


Figura 5 (b) - Comparação entre as massas de geada calculadas e medidas por Knabben (2010).

Observa-se na Figura 6(a), que aproximadamente 72% das quedas de pressão do lado do ar calculadas pelo modelo encontram-se na faixa de +15% a -15% em relação aos valores medidos e que o desvio absoluto médio foi de 1,5%, considerando todos os testes realizados. Observa-se na Figura 6(b), que aproximadamente 90% dos valores das vazões de ar calculadas pelo modelo encontram-se na faixa de +15% a -15% em relação aos valores medidos. Observa-se também que o desvio absoluto médio foi de 1,7%, considerando todos os testes realizados.

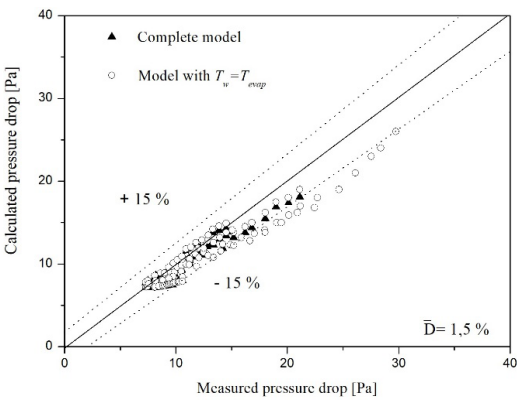


Figura 6(a) - Comparação entre as quedas de pressões do lado do ar calculadas e medidas por Knabben (2010).

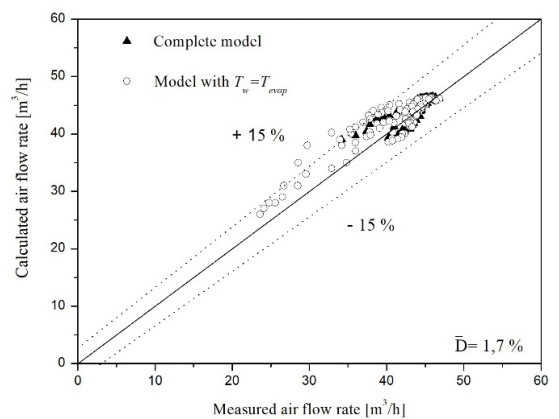


Figura 6(b) - Comparação entre as vazões de ar calculadas e medidas por Knabben (2010).

## 5 I CONCLUSÕES

Para analisar a formação e adensamento da camada de geada utiliza-se como base

o modelo desenvolvido por Hermes *et al.* (2009)[2].

As equações diferenciais do escoamento do refrigerante são discretizadas por integração numérica e com as equações da formação de geada são resolvidas iterativamente por substituições sucessivas.

Os resultados obtidos foram comparados com dados experimentais obtidos por Knabben (2010) [4], para um evaporador de tubo aletado que usa o fluido refrigerante R134a como fluido de trabalho. Esse evaporador é comumente usados em refrigeradores *frost-free* do tipo *top-mont*.

Tais comparações foram realizadas em termos de capacidade de refrigeração, massa de geada, queda de pressão do lado do ar e vazão de ar e apresentaram boa concordância com os dados experimentais de Knabben (2010) [4].

Considerando todos os testes realizados, ao longo de um período de 4 horas, durante o qual se avaliou a formação, crescimento e adensamento da camada de geada, os desvios absolutos médios entre os resultados calculados e os dados experimentais disponíveis na literatura foram de: (i) 8,1 % para a capacidade de refrigeração do evaporador; (ii) 6,0 % para a massa de geada formada; (iii) 1,0 % para a queda de pressão do lado do ar; (iv) 1,2 para a vazão de ar.

## REFERENCES

[1] HAYASHI, Y.; AOKI, A.; ADASHI, S.; HORI, K. Study of frost properties correlating with frost formation types. **ASME Journal of Heat Transfer**, v. 99, p. 239-245, 1977.

[2] HERMES, C. J.L.; PIUCCO, R. O.; BARBOSA JR, J. R.; MELO, C.; **A study of frost growth and densification on flat surfaces**. *Experimental Thermal and fluids Science*, v. 33, p.371-379, 2009.

[3] INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 643 p.

[4] KNABBEN. F.T. **Um estudo IN-SITU da formação de geada em evaporadores no-frost**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Florianópolis, Santa Catarina. 2010.

[5] PIMENTA, P.H.N. **Modelo distribuído aplicado à análise de evaporadores do tipo tubo aletado**.2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Iha Solteira – SP. 2015.

[6] PIUCCO, R. O. **Análise Teórico-Experimental da Formação de Geada em Refrigeradores Domésticos**. 2008. 110 f. Dissertação de Mestrado – POSMEC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

[7]SÁNCHEZ, J.A.G; BRUM, N.C.L. **Crescimento da camada de gelo em evaporadores**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2002

[8] SILVA, D. L. **Análise da formação de gelo e geada e seu efeito no desempenho termo-hidráulico de evaporadores do tipo tubo aletado**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Florianópolis, 2012.

[9] SILVA, D. L.; HERMES, C.J.L; MELO, C. **Experimental study of frost accumulation on fan-supplied tube-fin evaporators**. 2011. Applied Thermal Engineering, v. 31, n. 6, p. 1013-1020, 2011.

[10] YANG, Dong-Keun; LEE, Kwan-Soo; SONG, Simon. Modeling for predicting frosting behavior of a fin-tube heat exchanger. **International journal of heat and mass transfer**, v. 49, n. 7-8, p. 1472-1479, 2006.



## INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE SEÇÕES DE CONECTORES NA EFICIÊNCIA DA RUPTURA POR SEÇÃO LÍQUIDA EM CANTONEIRA DE CHAPA DOBRADA

Data de aceite: 02/08/2021

Data de submissão: 05/05/2021

### Jéssica Ferreira Borges

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC)  
Brasília-DF, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/9744349115663657>

### Luciano Mendes Bezerra

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC)  
Brasília-DF, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/1036591688457986>

### Francisco Evangelista Jr

Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC)  
Brasília-DF, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/1213553571707025>

### Valdeir Francisco de Paula

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – IFG  
Goiânia – GO, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/5007301276663813>

**RESUMO:** A tensão de ruptura da seção líquida efetiva ( $R_{Nt}$ ) leva em conta o fenômeno de “*Shear Lag*”, que para cálculo é incorporado através do coeficiente  $C_t$ . Atualmente há um grande interesse

das normas brasileiras, americanas e europeias - que lidam com perfis em chapa dobrada - em determinar expressões mais confiáveis para o cálculo de  $C_t$ , pois ocasiona uma redução considerável na capacidade de força do perfil. Diferentes trabalhos apresentaram equações para calcular  $C_t$  através do uso da regressão dos ensaios. Assim, esse trabalho irá utilizar dados de ensaios de perfis cantoneira para avaliar a aproximação com os valores das previsões de resistências do estado limite de ruptura da seção líquida obtidas pelas equações de Yip e Cheng (2000), a da ABNT NBR 14762:2001, a de Paula (2006), a de Yu e LaBoube (2010), da NBR 14762:2010 e a da AISI (2016). As menores variações da razão entre a resistência ao rompimento do ensaio e a previsão matemática garantem mais economia e segurança, como é o caso do Paula (2006 e 2008) que apresentaram baixa variação para 3 e 4 seções de conectores. Também avalia a probabilidade de falha das equações para as diversas situações de ensaio para auxiliar os projetistas nas escolhas de suas formulações.

**PALAVRAS - CHAVE:** Conexões parafusadas, Fator Shear lag, Chapa dobrada, Probabilidade de Falha.

### INFLUENCE OF THE NUMBER OF BOLTED SECTION ON EFFICIENCY THE NET SECTION RUPTURE OF ANGLE COLD-FORMED STEEL

**ABSTRACT:** The net section rupture ( $R_{Nt}$ ) takes into account the phenomenon “*Shear Lag*”, which for calculation is incorporated through the coefficient  $C_t$ . Actually has a big interest in

Brazilian, American and European standards – which deal with angle cold-formed-steel – in determining more reliable expressions for the calculation of  $C_t$ , as it cause a considerable reduction in the capacity cold-formed steel. Different studies have presented equations for calculating  $C_t$  through datas the use of regression. Thus, this work will use test data from angle sections to evaluate the approximation with the values of the resistance predictions of the limit state of the net section rupture obtained by the equations of Yip and Cheng (2000), of ABNT NBR 14762:2001, of Paula (2006), of Yu e LaBoube (2010), of NBR 14762:2010 and AISI (2016). The smallest variations in the ratio between the ultimate experiment force and ultimate prediction force guarantee more economy and safety, as is the case of Paula (2006 and 2008), wich presented a low variation for 3 and 4 bolted sections. It also evaluate the failure probability of the equations for the different experiments situations to assist designers in choosing their formulations.

**KEYWORDS:** Bolted connection, Shear lag, Cold-formed steel, failure probability.

## 1 | INTRODUÇÃO

A ruptura dos perfis metálicos tracionados ocorre normalmente na região das conexões, devido à concentração de tensões e a redução da área do perfil. Nas peças conectadas por parafusos esses fatores atuam juntos, onde a redução da área bruta é definida facilmente pela subtração do comprimento dos furos dos conectores no comprimento da aba. Já a concentração de tensões varia dependendo da geometria escolhida para as conexões. A distribuição de tensão não ocorre uniformemente em toda a área da seção bruta e esse efeito é denominado de “*Shear lag*” (HOLCOMB, YU e LABOUBE, 1995).

Através de regressões dos resultados experimentais diversas equações têm sido desenvolvidas para encontrar um fator que represente o “*Shear lag*”, que são denominadas de coeficiente de redução de área líquida ( $C_t$ ). Alguns pesquisadores vêm desenvolvendo equações para representar o  $C_t$ , como Yip e Cheng (2000), Paula (2006), Bolandim et al. (2013), Clements e Teh (2013), Liu et al (2014), Teh e Gilbert (2013, 2014), Yu e Panyanouvong (2013).

Além dos pesquisadores citados, vale analisar as equações propostas pela especificação brasileira (NBR 14762) e americana (AISI), que foram atualizadas recentemente e que fundamentam as previsões de ruptura dos projetos. Mas como  $C_t$  é um fator para corrigir a não uniformidade da tensão na seção, ele varia devido às geometrias das conexões e os modos de contato entre o parafuso e os perfis.

De modo a avaliar essa interferência, esse trabalho irá aferir a aderência de forças de tração experimentais com as previsões das formulações especificadas em Yip e Cheng (2000), ABNT NBR 14762:2001, Paula (2006), ABNT NBR 14762:2010, Yu e LaBoube (2010) e AISI (2016). Os valores experimentais foram obtidos do trabalho de Paula (2006) que consta de diferentes combinações geométricas dimensionadas para romper pela seção líquida. Sendo que, com a razão desses valores se conseguirá avaliar a proximidade

entre o valor real e a predição, indicando em quais casos não é conveniente utilizar dada formulação por apresentar muito conservador ou resultar em falha.

## 2 | METODOLOGIA

Em um primeiro momento, foi levantado os dados experimentais realizados em Paula (2006) de perfis cantoneira ensaiados à tração conectados a uma chapa *Gusset*, com diferentes geometrias e metodologias de fixação. Buscando melhorar a análise, entende-se que o “*Shear lag*” terá mais influência com a mudança do número de seções de conectores, com o modo de realização dos furos, com a distância entre os furos, uso ou não de arruelas. Para representação dividiu os ensaios em grupos nomeados com a simbologia apresentada na Tabela 1. Nos ensaios também variou a dimensão dos perfis, ensaiando-os nas medidas 50x50 mm, 80x80 mm, 100x100 mm, 50x80 mm, 50x100 mm e 80x100 mm com siglas de A à F, respectivamente.

Os ensaios resultaram em 116 experimentos, sendo que a grande parcela foi de cantoneiras conectadas apenas por uma aba. A espessura dos perfis variou de 2,25 mm a 3,75 mm, com intenção de avaliar a influência na não uniformidade de tensão. Utilizou a combinação de conectores em série e em paralelo, variando de 0 a 4 seções transversais de conectores.

Característica	Sigla	Símbolo
Cantoneira simples conectada por uma aba	A - F	A
Afastamento do primeiro furo à borda do perfil na direção da sollicitação (1,5d a 3,5d)	A - F: E	B
Cantoneira conectada pelas 2 abas	A - F: F	C
Cantoneira de abas desiguais conectada pela maior aba	A - F: L	D
Furos executados por punçionamento	A - F: P	E
Parafusos instalados sem aplicação de torque mínimo	A - F: T	F
Parafusos instalados sem uso de arruelas	A - F: W	G
Furos executados com excentricidades variadas	A - F: X	H

Tabela 1. Tipos de conexões

Dos trabalhos escolheu analisar seis equações de estudos consolidadas, sendo elas Yip e Cheng (2000), ABNT NBR 14762:2001, Paula (2006), Yu e LaBoube (2010), ABNT NBR 14762:2010 e AISI (2016). Em todos os casos, os valores de  $C_f$  foram obtidos por regressão e o valor de resistência à tração será dependente das variáveis de  $C_f$ .

Realizando a razão do valor do ensaio e os valores da resistência prevista por cada formulação, obtém um coeficiente para avaliar a qualidade da equação no valor da predição. Conseguindo avaliar para quais situações cada formulação é melhor aplicável.

Nos casos que este coeficiente for inferior a um significa que a predição da força foi inferior ao valor do ensaio, encontrando um ponto de falha.

### 3 | REVISÃO TEÓRICA

Diversos teóricos ao longo dos anos realizam experimentos para prever uma equação que represente a perda de área da seção transversal devido à distribuição de tensões no perfil. Em geral, se realiza ensaios de peças submetidas à tração direta em que o valor de  $C_t$  é encontrado através da razão entre a carga de ensaio obtida e a carga de ruptura considerando toda a seção transversal como efetiva.

A predição de projeto para os valores da força de tração resistente é encontrada através da equação 1, em que  $C_t$  é o coeficiente de redução da área líquida,  $A_n$  é a área líquida (Eq. 2) e  $f_u$  é a tensão última de ruptura do aço.

$$R_{Nt} = C_t A_n f_u \quad (1)$$

$$A_n = A_g - n_f (d_f + 3,5)t + \sum \frac{4s^2}{g} \quad (2)$$

Em que  $A_g$  é a área bruta da seção transversal,  $n_f$  é o número de conectores na seção,  $d_f$  é o diâmetro do conector,  $t$  é a espessura do perfil,  $s$  é a distância entre as seções dos conectores e  $g$  é a distância entre os conectores perpendicular a linha de ação da força de tração. O último termo da direita da Eq. (2) só é considerado quando a seção analisada fizer um zigue-zague. O coeficiente  $C_t$  da Equação 2 varia conforme o perfil a conectar e as configurações dos furos dos conectores.

Como dito anteriormente os valores de  $C_t$  acabam englobando os fatores de excentricidades das seções, a não linearidade das tensões na seção do perfil. Essas características são variáveis de ensaio para ensaio, por exemplo, a variação da distribuição de tensão na seção transversal é modificada pela utilização ou não de arruelas e pela aplicação de torque controlado nos parafusos.

Com isso, pesquisadores vêm desenvolvendo fatores para ponderar a área líquida que garantam a confiabilidade da previsão de carga da ruptura. Em geral, essas equações consideram as características geométricas das conexões que levam em conta a (a) espessura da chapa do perfil formado a frio, (b) distância do plano da aba/alma conectada até o centro de gravidade do perfil, (c) comprimento total da ligação parafusada, (d) largura total da aba conectada, (e) largura total da aba desconectada e (f) largura líquida da aba conectada.

Alguns trabalhos que podem ser consultados como referência são Fox e Schusters (2006), Holcomb et. al. (1995), Paula (2006), Yip e Cheng (2000). No próximo subtópico se apresenta as equações para  $C_t$  definidas nos trabalhos escolhidos para análise.

### 3.1 Coeficiente de redução de área líquida

Yip e Cheng (2000) realizaram ensaios com 23 cantoneiras, além de utilizar um software de elementos finitos para validar os modelos. Em sua análise chegou à conclusão de que o coeficiente da área de seção líquida efetiva ( $C_t$ ) se relacionava com a razão entre o comprimento da aba ( $b_c$ ) e a espessura da chapa ( $t$ ), do diâmetro do conector ( $d$ ), do comprimento da conexão ( $L$ ) e da excentricidade do perfil ( $\bar{x}$ ). A equação (3) apresenta o resultado da regressão dos ensaios para o coeficiente de redução da área líquida.

$$C_t = 1 - 0,085 \left( \frac{\bar{x}}{L} \right)^{0,41} \left( \frac{b_c}{t} \right)^{0,36} \left( \frac{b_c}{d} \right)^{0,51} \quad (3)$$

No Brasil, a norma para perfis formados a frio, ABNT NBR 14762, na versão do ano de 2001, e a equação do fator de “*Shear Lag*” depende da quantidade de conectores. Em peças tracionadas com dois conectores ou mais, na linha de ação da força, a redução da área líquida é apresentada pela Eq. (4), sendo que esse valor não deve ser inferior a 0,40 ou superior a 0,90.

$$C_t = 1 - 1,20 \left( \frac{\bar{x}}{L} \right) \quad (4)$$

No caso de perfis com os conectores em uma única seção, o perfil deve ser tratado como chapa equivalente e o coeficiente  $C_t$  é encontrado pela Eq. (5).

$$C_t = 2,50 \left( \frac{d}{g} \right) \quad (5)$$

Em que  $d$  é o diâmetro do conector e  $g$  é o comprimento das abas, para um único conector, ou a distância entre os conectores para dois conectores. Para peças conectadas pelas duas abas esse coeficiente valerá 1. Outra consideração é a redução em 90% da área líquida ( $A_n$ ) e um coeficiente de redução da força (Eq. 6) por um coeficiente de minoração,  $\gamma$ , de 1,35.

$$N_{t,Rd} = \frac{C_t 0,9 A_n f_u}{\gamma} \quad (6)$$

Em busca de aprimorar o coeficiente de redução da área líquida ( $C_t$ ), De Paula (2006) realizou uma série de experimentos para através de regressão encontrar uma nova equação para o mesmo. Como desejado a maioria dos perfis rompeu pela seção líquida e a equação regredida é apresentada a seguir (Eq. 7).

$$C_t = 1,12 - 0,29 \left( \frac{\bar{x}}{L} \right) - \frac{0,55b_{cn} + 0,13b_d - 2,51t}{b_c} \quad (7)$$

Em que  $b_{cn}$  é a largura líquida da aba conectada,  $b_c$  é a largura da aba conectada,  $b_d$  é a largura da aba desconectada,  $t$  é a espessura do perfil e as demais variáveis já foram especificadas anteriormente.

A partir de novos estudos, a ABNT NBR 14762 foi colocada em revisão, sua última versão entrou em vigor no ano de 2010. Porém, quando se trata de ruptura da seção líquida a única alteração que se teve referente à norma de 2001 foi no coeficiente  $\gamma$ , que mudou de 1,35 para 1,65. Mesmo que essa mudança não interfira no valor de  $C_t$  ele modificará na carga de ruptura, encontrando menores valores de resistências com as equações 4, 5 e 6.

Outra vertente publicada nesse mesmo ano foi à atualização do livro de Yu e LaBoube (2010), que na sua terceira edição levava em consideração as relações entre as dimensões das abas conectadas dos perfis e o diâmetro dos conectores, deixando de lado essa formulação. Na nova edição ele adota a Eq. (4) como coeficiente de  $C_t$  para perfis cantoneira, restringindo a utilização de conexões com apenas um conector na linha de força. O coeficiente de minoração da carga de tração é de 0,65 segundo a metodologia de *LRFD* dos coeficientes de minoração das resistências.

E por fim a última equação a ser analisada é a AISI:2016, que é a especificação norte americana de perfis formado a frio. A ruptura pela seção líquida dessa especificação deve ser multiplicada por um coeficiente apresentado na Eq. (8), que leva em conta a largura da aba conectada ( $b_c$ ), a largura da aba desconectada ( $b_d$ ) e a razão entre a excentricidade e o comprimento da conexão ( $\bar{x}/L$ ).

$$C_t = \frac{1}{1,1 + \frac{0,5b_d}{b_c + b_d} + 2\left(\frac{\bar{x}}{L}\right)} \quad (8)$$

A carga de tração para ser considerada de projeto deve ser minorada pelo fator de 0,65 definida pela *LRFD*. Na próxima seção será discutido os resultados obtidos de cada embasamento teórico.

## 4 | DISCUSSÕES

Este item apresentará os resultados encontrados da razão entre a força de ensaio ( $P$ ) e a predição ( $R_{Nt}$ ) variando o número de seções de conectores (NS). Apresentando os gráficos de dispersão e as probabilidades de falha de cada uma das configurações das ligações ensaiadas.

## 5 | RESULTADOS

A metodologia de Yip e Cheng (2000) mostraram uma variação no valor calculado de até o dobro do real, independentemente do número de seções de conectores, como

se vê na Fig. 1. Mesmo com a utilização do coeficiente de minoração da resistência utilizada, nota-se a ocorrência de falha nas configurações quando apenas uma seção está conectada. Para situações com mais de duas seções os valores previstos se deram na maioria dos casos superior ao valor de ensaio, resultando em  $P/R_{Nt}$  sempre maiores que 1, apresentando um método conservador.

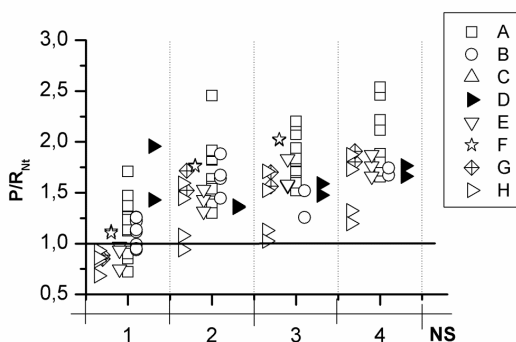


Figura 1. Razão entre a força de tração de ensaio ( $P$ ) e a predição da carga de ruptura ( $R_{Nt}$ ) por Yip e Cheng (2000).

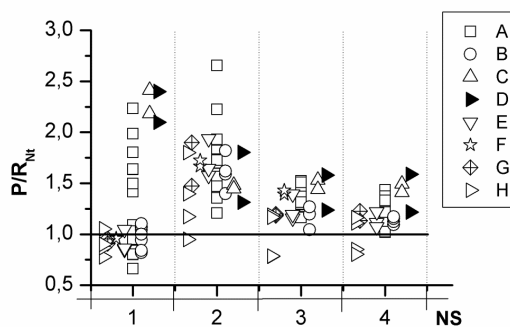


Figura 2. Razão entre a força de tração de ensaio ( $P$ ) e a predição da carga de ruptura ( $R_{Nt}$ ) pela ABNT NBR 14762:2001.

Os resultados encontrados com a Eq. 6, ABNT NBR 14762:2001, apresentaram próximos dos valores de ensaio nos casos de 3 e 4 seções (Fig. 2), entretanto para as configurações em que a ligação possuía excentricidades na aba conectada (sigla H) ocorreu falhas, independentemente do número de seções da ligação. Para perfis conectados apenas por uma aba (A) com duas seções transversais ocorreu o aumento da força calculada em até 2,75 o valor de falha do ensaio, diminuindo essa variação quando se utiliza mais seções, ou seja, quando se aumenta o comprimento da conexão ( $L$ ).

Nos perfis conectados apenas pela maior aba ( $D$ ) o valor de ensaio se aproxima da predição quando aumenta o número de seções, mas a sua dispersão ocorre em uma mesma taxa. Agora nos casos que o furo foi realizado por puncionamento ou quando não garantiu o torque mínimo o valor da predição apresentou praticamente igual à carga de ensaio, tendo pequena variação, ou seja, a equação de  $C_i$  representa bem essa situação.

Com a Eq. 7 desenvolvida por Paula et al (2008) os valores de predição de carga de ruptura apresentaram menor relação com a carga de ensaio, apresentando maior variação para os perfis conectados apenas por uma seção (Fig. 3). Os perfis conectados por mais de uma seção apresentaram baixas variações, o que pode ser explicado pelo fato da regressão da equação 7 ter sido realizada em cima desses dados, mas esse comportamento é o esperado para uma boa equação.

Entretanto os valores do coeficiente tiveram variação de aproximadamente 0,25 para

mais e para menos, resultando em uma elevada probabilidade de falha. Mas vale ressaltar que nessa formulação não foi aplicado nenhum coeficiente de minoração, explicando a diferença com as demais predições.

Comparando a Figura 3 com as Figuras 2 e 1 percebe-se que a Eq. (7) reproduz mais fielmente o comportamento de peças com conectores em mais de uma seção. A razão entre os carregamentos possui pouca variação para mais de duas seções. Indicando que o fator  $C_1$  consegue representar bem a redução de área efetiva.

Como visto na Fig. 4 a ABNT NBR 14762:2001 resultou em valores bem próximos de 1, mesmo utilizando o coeficiente de minoração, talvez por isso com a revisão no ano de 2010 esse valor foi aumentado. Como esperado, a diferença está em menores falhas obtidas em comparação com a predição e os valores dos ensaios. A razão entre a carga de ensaio e a carga de predição também aumentou em comparação com os valores apresentados na Fig. 4 devido à mudança do coeficiente  $\gamma$ .

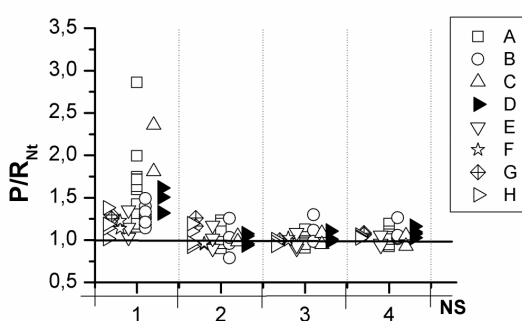


Figura 3. Razão entre a força de tração de ensaio ( $P$ ) e a predição da carga de ruptura ( $R_{Nt}$ ) por Paula (2006).

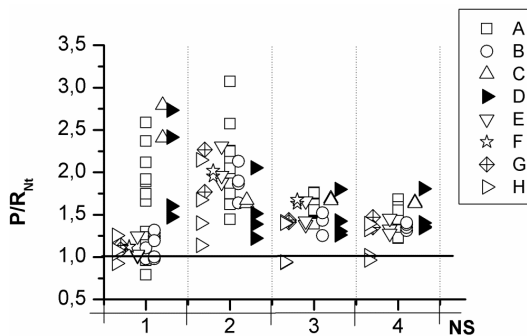


Figura 4. Razão entre a força de tração de ensaio ( $P$ ) e a predição da carga de ruptura ( $R_{Nt}$ ) pela ABNT NBR 14762:2010.

Apresentando uma excelente convergência entre a predição e a força de ensaio para 3 e 4 seções com conectores. Agora para um número menor que duas seções conectadas obteve dispersão em todas as geometrias.

No ano de 2010 o livro referência em aço formado a frio foi revisado e a equação a considerar é a mesma da ABNT NBR 14762 o comportamento segundo essa metodologia (Fig. 5) é bem similar aos da Fig. 4 e 2. A dispersão entre os valores de 3 e 4 seções é pequena, mas com o coeficiente de minoração utilizado ele permanece mais econômico, aumentando em média 60% do valor da carga de predição.

O coeficiente de minoração da resistência resulta em mais variação entre o valor real e o valor previsto devido ao aumento da razão entre esses carregamentos, máximo valor de 2,70. Nas combinações com 3 e 4 seções essa formulação apresenta menor variação,



nas situações de apenas uma seção teve alguns casos de ruptura por esmagamento nos ensaios, que também foram considerados, com a resistência calculada através dessa metodologia. Já os que romperam por ruptura da seção líquida com apenas uma seção foram desprezados, pois a Eq. (4) não se aplica a essa situação.

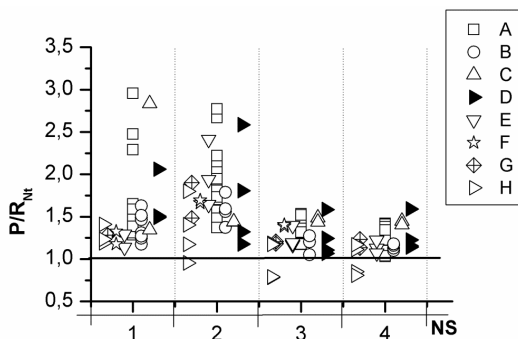


Figura 5. Razão entre a força de tração de ensaio (P) e a predição da carga de ruptura ( $R_{Nt}$ ) por Yu e LaBoube (2010).

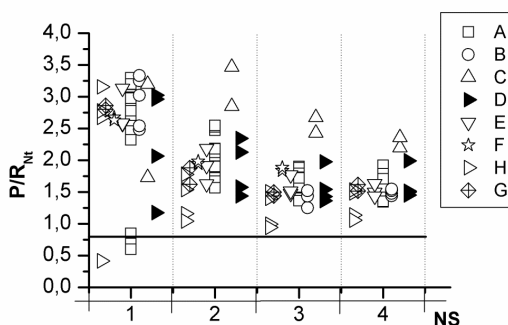


Figura 6. Razão entre a força de tração de ensaio e a predição da carga de ruptura pela AISI:2016.

Agora com a equação 8 se analisa a predição da norma americana para perfil formado a frio (AISI, 2016). Na mesma, também é especificado a equação para hipótese de ruptura por rasgamento, sendo que nos casos experimentais que apresentaram esse rompimento se utilizou a formulação para esse tipo de ruptura. Na Fig. 6 é apresentada a dispersão dos valores encontrados por essa metodologia, nota-se que a dispersão para situações de 3 e 4 seções de conectores resultou em uma baixa dispersão, aproximadamente 0,75. Mas nos casos de 1 e 2 seções ocorreu dispersão em torno de 1. No caso de mais de duas seções o coeficiente de minoração da norma resultou em falha nula, ocorrendo apenas nos casos de única seção de conectores.

Em geral se realizou a análise dessas sete especificações de cálculo para predição da ruptura de peças tracionadas pela seção líquida, no entanto em algumas situações ocorreu a ineficiência da predição de carga, ou seja, em todos os momentos que a razão foi inferior a 1,00. Permitindo avaliar a probabilidade de falha ( $p_f$ ) para cada uma das configurações das ligações, conseguindo estabelecer em quais situações as formulações são inadequadas. Os valores das  $p_f$  estão apresentados na Figura 7, aonde apresenta que a maior  $p_f$  encontrada em todas as configurações são as predições realizadas por Paula (2006), seguido da formulação de Yip e Cheng (2000), principalmente para peças com conexões excêntricas (H) na aba conectada.

Os valores com piores predições foram os que apresentam a excentricidade das conexões nas formulações e consideram a distância entre os conectores e a chapa Gusset,

mas não consideram a posição do conector na aba, como a ABNT NBR 14762. Note que com o aumento do coeficiente de minoração da NBR 14762:2010 não ocorreu quase nenhuma falha das conexões.

Vale ressaltar que não foi utilizado nenhum coeficiente de redução nos valores do trabalho de Paula (2006), com função de tornar uma força de tração de projeto, por este motivo essa quantidade elevada de falhas pode ser corrigida com a inserção deste coeficiente de minoração. Mesmo com o coeficiente de minoração de projeto as formulações dos códigos brasileiro e europeu possuem falhas de aproximadamente 5% no caso A, mais comum.

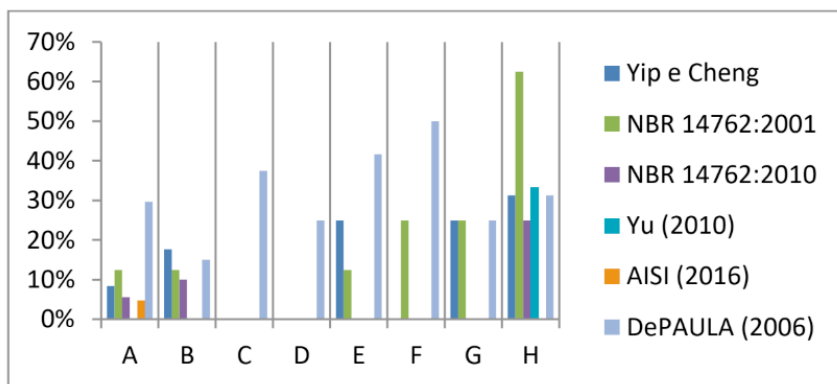


Figura 7. Porcentagem de predição de falha para cada uma das formulações e configurações das conexões.

Portanto, para determinada configuração geométrica pode-se julgar qual a melhor equação para prever essa ruptura, sendo a que não apresentou falha na Figura 7 e que a razão entre os carregamentos possui pouca variação do seu valor médio. Conclui que o caso em que as conexões ocorrem de modo excêntrico não são bem determinadas pelas equações.

## 6 | CONCLUSÕES

O cálculo da área líquida efetiva do perfil submetido à tração é encontrado através da fatoração da área líquida por um coeficiente que será responsável por transmitir a variação da distribuição das tensões na seção. As equações de predições desses coeficientes são encontradas por processos de regressão que podem variar de acordo com as variáveis escolhidas, com as configurações de ensaio e à qualidade de execução do mesmo.

Notou-se que de todas as especificações consideradas ocorre uma variação na razão entre a carga de ensaio e a predição de carga, quanto menor for essa variação mais preciso será a equação para a predição da real carga de ruptura. Quase todas as especificações

aqui utilizadas ainda especificam qual o coeficiente de minoração da resistência se deve utilizar, garantindo uma margem de segurança para as predições.

Devido à maioria das equações de  $C_t$  utilizarem como variáveis o comprimento da conexão, escolheu analisar a variação da razão de carga ensaiada e a predição de carga com o número de seções da conexão. Concluindo que a maioria das equações de  $C_t$  conseguem prever melhor o valor de ruptura das conexões com 3 ou 4 seções ao longo da linha do carregamento, apenas a equação de Yip e Cheng (2000) apresentou quase a mesma variação da razão para qualquer valor de seção.

Como nos ensaios se utilizou diversas configurações de conexões, a avaliação das falhas ocorreu de modo separado para identificar quais as configurações às formulações eram mais falhas na predição, concluindo que a maior probabilidade de falha foi encontrada quando se utilizou as equações de Paula (2006), seguido da ABNT NBR 14762:2001, principalmente quando os conectores possuíam excentricidade com a aba do perfil conectado. As falhas encontradas em Paula (2006) serão minoradas com o uso do coeficiente de ponderação, implicando que essas falhas tenderam a não existir.

Outra consideração importante a se analisar é que todos os seis modos de predição apresentaram maior probabilidade de falha para o caso com excentricidade da conexão na aba, indicando que as predições de  $C_t$  não estão considerando a variação de tensão causada pelo momento no perfil. Implicando em uma consequência a ser analisada como variável. E todas as equações descritas não representam bem situações de ligações com uma única seção de conectores.

## REFERÊNCIAS

American Institute of Steel Construction – AISC, 2016. *Specification for structural steel buildings*. Chicago, IL.

American Iron and Steel Institute – AISI, 2016. *Edition of the specification for the design of cold-formed steel structural members*. Washington DC.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2001. *NBR 14.762 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – Procedimento*. Rio de Janeiro.

\_\_\_\_\_ – ABNT, 2010. *NBR 14.762 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio – Procedimento*. Rio de Janeiro.

Bolandim EA, Beck AT and Malite M., 2013. Bolted connections in cold-formed steel: reliability analysis for rupture in net section. *Journal of Structural Engineering* 139(5): 748–756.

Clements, D.D.A. and Teh L. H., 2013. Active shear planes of bolted connections failing in block shear. *Journal of Structural Engineering* 139(3): 320–327.

Fox, D. M.; Schuster, R. M., 2006. Single bolted tension member design—A new approach. Proc., *18th Int. Speciality Conf. ColdFormed Steel Structures*, University of Missouri, Rolla, MO, 695–713.

Holcomb, B.D.; Yu, W. W.; LaBoube, R.A., 1995. Tensile and bearing capacities of bolted connections. *Second Summary Report, Civil Engineering Study 95-1*. University of Missouri-Rolla.

Liu J., Xu L. and Fox S., 2014. Structural strength of lapped cold-formed steel Z-shaped purlin connections with vertical slotted holes. In: *22nd international specialty conference on cold-formed steel design and construction*, St Louis, MO, 5–6 November, pp. 697–712. Rolla, MO: Missouri University of Science and Technology.

Paula, V. F. de, 2006. *Análise Experimental e Numérica de Cantoneiras de Aço Formadas a Frio, sob Tração e Conectadas por Parafusos*, Publicação n.º E.TD 005A/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 167p.

Paula, V. F. de; Bezerra, L. M.; Matias, W. T., 2008. Efficiency reduction due to shear lag on cold-formed steel angles connected with bolts. *Journal of Constructional Steel Research*. VI. 64.

Prabha, P.; Jayachandran, S. A.; Saravanan, M.; Marimuthu, V., 2011. Prediction of the tensile capacity of cold formed angles experiencing shear lag. *Thin-Walled Structures*, 49 (2011), 1348 – 1358.

Rogers, C. A., Hancock, G. J., 1998. Bolted connection tests of thin G550 and G300 sheet steels. *J. Struct. Eng.*, 124(7), 798–808.

Teh L. H. and Gilbert B. P., 2013b. Net section tension capacity of cold-reduced sheet steel channel braces bolted at the web. *Journal of Structural Engineering* 139(5): 740–747.

Teh L. H. and Gilbert B. P., 2014a. Design equations for tensile rupture resistance of bolted connections in cold-formed steel members. In: *22nd international specialty conference on cold-formed steel design and construction*, St Louis, MO, 5–6 November, pp. 713–728. Rolla, MO: Missouri University of Science and Technology.

Teh L. H. and Gilbert B. P., 2014b. Net section tension capacity of equal angle braces bolted at different legs. *Journal of Structural Engineering* 140(6): 06014002.

Teh L. H. and Gilbert B.P., 2013a. Net section tension capacity of cold-reduced sheet steel angle braces bolted at one leg. *Journal of Structural Engineering* 139(3): 328–337.

Teh, L. H. and Gilbert, Benoit P., 2012. In-plane Shear Lag of Bolted Connections. *International Specialty Conference on Cold Formed Steel Structures*. 2.

Teh, L. H.; ASCE, A. M.; Gilbert, B. P., 2012. Net section tension capacity of bolted connections in cold-reduced steel sheets. *J. Struct. Eng.*, 138 (3), 337 – 345.

Yip, A. S.; Cheng, J. J. R. *Structural Engineering Report No. 233: Shear lag in bolted cold-formed steel angles and channels in tension*. Department of Civil & Environmental Engineering, University of Alberta.

Yu C. and Xu K., 2013. Shear strength of a cold-formed steel sheet in bolted connections using oversized holes. *Journal of Structural Engineering*, 139(5): 860–864.

Yu, W. W., LaBoube, R. A., 2000. *Cold-formed Steel Design*, 3rd Ed., New York, John Wiley & Sons, Inc..

Yu, W. W., LaBoube, R. A., 2010. *Cold-formed Steel Design*, 4rd Ed., New York, John Wiley & Sons, Inc.

## INFORMATION THEORY BASED STOCHASTIC HETEROGENEOUS MULTISCALE

*Data de aceite: 02/08/2021*

*Data de submissão: 06/05/2021*

### Ianyqui Falcão Costa

Federal University of Pernambuco, UFPE;  
Recife-PE  
<http://lattes.cnpq.br/6364550354773688>

### Liliane de Allan Fonseca

Federal University of Pernambuco, UFPE;  
Recife-PE  
<http://lattes.cnpq.br/1953612357623612>

### Ézio da Rocha Araújo

Federal University of Pernambuco, UFPE;  
Recife-PE  
<http://lattes.cnpq.br/3628800246349427>

**ABSTRACT.** This work brings together theoretical formulation and computational strategies for upscaling in random heterogeneous mediums. The approach uses a mixing of information theory and statistical mechanics to extract relevant probabilistic information from microscale and adaptively control the stochastic distance between two scale responses. A goal-oriented upscaling procedure is defined to guarantee equivalence between micro and macroscale target to specific output, and its generalization to a mathematical sound multi-goal-oriented response where users control distinct accuracies of specific target responses. Preliminary applications in one-dimension domain for elliptic and hyperbolic equations are presented.

Applications use realizations from microscale parameters distributions producing a reduced number of equivalent macroscale realizations, as required by to satisfy user desired accuracy. The full formulation requires solving an optimization problem for an extended Lagrangian formulation that is solved with a Parallel Deterministic Annealing. Mathematical formulation is such that parallelization is done over realizations so that the overall computation cost of the stochastic scale transposition is on the same order of a deterministic one.

**KEYWORDS:** Reservoir, Stochastic, Multiscale, Multiphysics, Goal-oriented

### MULTIESCALA HETEROGENEA E ESTOCÁSTICA BASEADA NA TEORIA DA INFORMAÇÃO

**RESUMO:** Este trabalho reúne formulação teórica e estratégias computacionais para upscaling em meios heterogêneos aleatórios. A abordagem usa uma mistura de teoria da informação e mecânica estatística para extrair informações probabilísticas relevantes de microescala e controlar de forma adaptativa a distância estocástica entre respostas de duas escalas. Um procedimento de upscaling orientado a objetivos é definido para garantir a equivalência entre o alvo micro e macroescala para saída específica, e sua generalização para uma resposta matemática orientada a múltiplos objetivos onde os usuários controlam precisões distintas de respostas alvo específicas. Aplicações preliminares no domínio unidimensional para equações elípticas e hiperbólicas são apresentadas. As aplicações usam realizações das distribuições

dos parâmetros em microescala, produzindo um número reduzido de realizações em macroescala equivalentes, conforme exigido por para satisfazer a precisão desejada pelo usuário. A formulação completa requer a resolução de um problema de otimização para uma formulação Lagrangiana estendida que é resolvida com um Recozimento Determinístico Paralelo. A formulação matemática é tal que a paralelização é feita sobre as realizações de modo que o custo total de computação da transposição da escala estocástica seja da mesma ordem de um determinístico.

**PALAVRAS - CHAVE:** Reservatório, estocástico, multiescala, multifísica, orientado a objetivos.

## INTRODUCTION

This text describes some mathematical and computational aspects of a formulation for transposing scales governed by different stochastically physics, of a microscale whose equations are discretized by a dense mesh, or *micromesh*, that adequately captures the uncertain heterogeneities of the parameters, for macroscales (*generative upscaling*), represented by sparse meshes, or *macromesh*, appropriate to the execution of hundreds or thousands of probabilistic sample simulations (realizations) of these uncertain parameters. Consequently, it is assumed that the system of equations resulting from discretization at the microscale is prohibitively large for the capacity of the computers available, particularly when resolved repeatedly, in response sampling procedures (optimization, stochastic control). Former applications on elliptic equations are done in Costa et. al. (2017).

Although the formulation is quite general (in the sense that it applies to the solution of systems of elliptical, parabolic and hyperbolic differential equations), the greatest interest is in the simulation of hydrocarbon reservoirs. It is realized that the reservoir is described by a finite number of *geostatistical realizations* of different distributions (variograms) used for description of the lithofacies of a given geological scenario. Also, and especially important, the techniques of discretization in space and time (finite elements or volumes, finite differences, etc.) are immaterial, as well as the characteristics of the solution and the algorithms used to find them. The formulation is non-invasive.

The formulation imitates Koutsourelakis (2007). It adds new elements: the possibility of to use different physics at different scales; a generalization of the principles presented in Weinan and Engquist (2003); fruitful mesh ideas oriented to the objectives, as used in the technology of the finite element method (goal-oriented FEM); and extended to finite elements for multiple scales in Nonnenmacher (2011). The transposition of the micro to the macroscale brings inevitable losses of resolution or accuracy of the answers. However, these losses can be substantially reduced if transitions are made to different macroscales with different objectives and accuracy, hence the notion proposed here of *upscaling oriented to the objectives* of the analysis.

In the technique presented here, at least two measures are used to quantify the

quality of the transposition of scales and physics. With a first measure, similarly to the spectral decompositions of covariance (KKL expansions, for example), the retention in the macroscale of probabilistic information relevant to the problem is evaluated. The importance of the information retained, being dependent on the problem - the source terms, the objective of the problem, etc. - requires a measure or a set of them that judges the accuracy of the desired response compared to the response on the microscale. The use of more than one measure contrasts with the usual techniques of *upscaling* and, equivalently, of the basis reduction techniques (e.g., KKL, PCA, POD decompositions).

A final problem of conditional extremity is solved with an Augmented Lagrangian formulation, and with the elaboration of a parallel algorithm, PDA – *Parallel Deterministic Annealing*, a parallel and extended version of DA- *Deterministic Annealing*, described in Koutsourelakis (2007), that originated in Rose (1991, 1994, 1998). PDA is naturally parallelized over geostatistical realizations. These variants of the probabilistic *Simulating Annealing* are the natural ones for this class of problems given the spontaneous occurrence of possible exponential distributions in their solution. Clearly, other algorithms can be used efficiently.

## METHODOLOGY

Let the reservoir be described by a set of  $N_R$  geostatistical realizations collectively aggregated in the ensemble  $\mathbf{X}$ , each with a number of cells.

We identify  $\mathbf{X}$  with the random field it represents (discrete random fields). It is recognized that field  $\mathbf{X}$  may contain more information than it is necessary for the solution of a given reservoir simulation problem. The objective is to describe this field by random vectors  $\mathbf{Y}$  with  $n < N$  cells and, possibly,  $n_r < N_R$  realizations of the macroscale, in such a way that the answer to the specific problem can be found with less computational effort, within pre-established approximations. It is thought that can be as detailed as a *geocellular mesh*, and that it contains information on the *microscale* that can be compressed into a desired *macroscale* for the *specific objective*.

If the properties described by  $\mathbf{X}$  can be compressed into  $\mathbf{Y}$  for the solution of a specific problem, what needs to be determined is what information in  $\mathbf{X}$  must be *statistically* preserved, in such a way that the distortion in the statistics of the desired response can be controlled. At least two measures need to be established in this way. The first is the fidelity of the representation of  $\mathbf{X}$  by  $\mathbf{Y}$ , and another of the statistical accuracy of the desired response. Notoriously, physics at the *microscale* and the *macroscale* do not need, or should not, in many cases, be the same.

Traditional spectral techniques, such as *KKL expansions*, the analysis of the main components (PCA), (same as *KKL decompositions*), multidimensional scaling (MDS), and its variants that are not linear, seek to preserve the covariance structure using a hierarchy



of approximations given by a sequence of eigenvalues and eigenvectors. This does not maximize the compression of the information, since both preserve unnecessary modes and omit, by the early truncation of the series or succession, eigenmodes that may be important for a specific response, they do not consider the characteristics of external excitations. For covariance functions that are not smooth and for long and weakly correlated processes, high order eigenmodes cannot be neglected without causing a significant loss of accuracy. The Galerkin-wavelet approaches, although they improve the accuracy of high-order eigenmodes, they do not solve the problem mentioned above, namely, the indeterminacy of the relevant eigenmodes for a specific response, since they recognize only the covariance and never the excitation.

The idea behind the described methodology is that it is not possible to choose representative elements of volume (REV) or to make use of periodicity of information in the microscale, given the essentially stochastic character in all scales of heterogeneities and that, probably, some separation of scales cannot be guaranteed. In this way, the change of scales must be made based on approximation measures, which may not be as approximate as desired.

The usual deterministic *upscaling* techniques are extended here (Weinan and Engquist, 2003). for stochastic transposition of scales (see Appendix). An adjacent set of cells is replaced by an equivalent cell (macrocell, macroelement), to be stochastically homogenized. One that ensures that the statistical description of the response has the desired accuracy. Such procedures are usually referred to as semi-local to local. It is evident that a global-local procedure can also be employed at the expense of greater computational effort in the generation of the macro mesh.

The scale change is made by assimilation of previous data from the models, from observed data, or both, making the technique also suitable for stochastic control, as for example, in closed loop control with prediction and assimilation of production data, at any scale of time. One of the main problems of stochastic control is the computational effort in the two phases, prediction, and assimilation. In this case, the parameterization techniques, such as spectral decompositions, can be conveniently replaced by macro meshes, which are stochastically equivalent. Both Bayesian methods, such as MCMC and RML, as classical estimators, such as those of maximum likelihood, regularized (maximum *a posteriori*, for example), benefit from the computational economy of the scale change, from the use of a macro mesh. This summarizes the importance of the present study.

### **Indicator of mutual information between random fields**

The main aspect of the methodology follows Koutsourelakis (2007) and is generalized for multiple physics and multiple algorithms. It is based on models of statistical mechanics (Hill, 1956), and of information theory originating mainly in Shannon (1948), with specific algorithms developed in Rose (1991, 1994, 1998).

The substitution of the  $\mathbf{X}$  field for smaller  $\mathbf{Y}$ , implies the possibility of assigning the same value to large regions of the domain. The concept of the indicator of mutual information is introduced by Shannon (1948) as a measure of the average information that the knowledge of  $\mathbf{Y}$  can provide of  $\mathbf{X}$  and vice versa.

The hypothesis that the large regions of the heterogeneous domain of interest can be assigned the same values allows the description of the random field  $\mathbf{X}$  by the field of smaller dimension  $\mathbf{Y}$ . A measure of the ability of  $\mathbf{Y}$  to approach  $\mathbf{X}$  can be given by the *mutual information indicator* (Shannon, 1948),

$$I(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \iint p_{XY}(x, y) \log \frac{p_{XY}(x, y)}{p_X(x)p_Y(y)} dx dy, \quad (1)$$

where  $p_{XY}(x, y)$  is the joint density of ( $\mathbf{X}$  and  $p_X(x)$ ,  $p_Y(y)$  are the respective marginal distributions. Its *minimum value* is zero when the two fields are independent, in other words,  $p(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = p_X(\mathbf{X})p_Y(\mathbf{Y})$ . Its *maximum value* is known as the *entropy* of  $\mathbf{X}$ , that occurs when the two fields are identical  $\mathbf{X} \equiv \mathbf{Y}$ . Defining *joint entropy* as the indicator itself, and developing,

$$H(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = -\int p_X(x) \log p_X(x) dx + \iint p_{XY}(x, y) \log \frac{p_{XY}(x, y)}{p_Y(y)} dx dy, \quad (2)$$

using the fact that  $\iint p_{XY}(x, y) \log p_X(x) dx dy = \int p_X(x) \log p_X(x) dx$ . The first term in the second member of eq. (2) is the entropy (Planck (1948)) of  $\mathbf{X}$ ,

$$H(\mathbf{X}) = -\int p_X(x) \log p_X(x) dx, \quad (3)$$

while the second is *conditional entropy* or *equivocation*, or, preferably, *ambiguity*,

$$H_Y(\mathbf{X}) = -\iint p_{XY}(x, y) \log \frac{p_{XY}(x, y)}{p_Y(y)} dx dy, \quad (4)$$

which is zero when  $\mathbf{X} = \mathbf{Y}$ . Then we have that  $I(X, Y) = H(X) - H_Y(X)$  and  $I(\mathbf{X}) = H(\mathbf{X})$ . In information theory,  $I(X, Y)$  it is also known as the rate of transmission of information from a continuous channel (Shannon, 1948).

The convenience of using logarithmic measures, usually based on information theory, is justified by practicality, intuitive property, and mathematical convenience. However, entropy and the mutual information indicator, although they can measure uncertainty, are not probabilistic measures. Apparently, a probabilistic measure can be obtained by dividing the indicator by the entropy of  $\mathbf{X}$ . Se the entropy of  $\mathbf{Y}$  is less than that of  $\mathbf{X}$ , compression can be done at higher rates. The authors, based on the concept of relative entropy or Kullback-Leibner divergence, are currently developing other appropriate non-probabilistic measures of proximity of the two fields.

## Fidelity of the macroscale to the microscale

It seems evident that, apart from some atypical pathologies, the quality of representation in the macroscale should be evaluated, for greater accuracy, with measures that compare specific responses, and not all possible responses. As, for example, the ability of the macroscale to approximate the history matching of a certain quantity produced by the microscale, is of great interest in reservoir geoen지니어ing. It is difficult to imagine that a single macroscale can, in general, satisfactorily replace the microscale in the solution of all the problems of interest. So, it makes sense to imagine that, optimally, you can have specific models on the macro scale to reproduce specific responses, or classes of them.

The measure of fidelity is known as the *measure of distortion* of the response provided by the two fields. This measure can be a scalar, a vector or a matrix. Without loss of generality, it will be assumed that the measure is scalar, since the other measures should always be transformed into one or a set of scalar measures. To exemplify, be the distance given by,

$$d(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = (r(\mathbf{X}) - r(\mathbf{Y}))^2, \quad (5)$$

where  $r(\mathbf{X})$  is the response due to the microscale and  $r(\mathbf{Y})$  to the macroscale, usually functions implicitly defined by one or different numerical simulators.

There are no statistics in the eq. (5), that is, the random functions  $r(\mathbf{X}): \mathfrak{R}^N \rightarrow \mathfrak{R}$ , and  $r(\mathbf{Y}): \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$  should be understood as an ensemble, or set, of samples, or realizations,  $r(X_i), i=1, \dots, N_R$ , e  $r(Y_i), i=1, \dots, n_R$ . In addition, it will be admitted, without loss of generality, that the microscale is represented only by a random variable  $Y$ . This means that the macro mesh has a single element, cell, or block, with a single property that, essentially, is its best stochastic representation. The distance, in this case, will be an application  $d(\mathbf{X}, Y): \mathfrak{R}^N \times \mathfrak{R} \rightarrow \mathfrak{R}^+$ .

It is important to note, at this stage, that there is no reference to the physics that prevail in the geometric domain. It is possible, for example, to evaluate  $r(\mathbf{X})$  in a complex physics of carbonates, using *Darcy-Stokes* or *Stokes-Brinkman* with *Darcyan* fractures, or even in compositional models, and  $r(\mathbf{Y})$  in the physics of the *Black-Oil* model. The role of admitting heterogeneity in the physics involved is evident here.

In addition, some, or all the domain in the microscale may have been transformed into a spectral representation, such as the *KKL* decomposition or some of its variants. This is always unnecessary, but if it is done, it will possibly have significant and unknown loss of accuracy, as previously mentioned. It does not in any way replace the natural option of decreasing the accuracy in the calculation of the distortion.

The goal is twofold. First, a compression scheme of  $\mathbf{X}$  to  $\mathbf{Y}$  that leads to minimal distortion of the desired response and then determine its value. Determining the optimal transformation involves assessing the *a posteriori* distribution of  $Y, \rho_Y(y)$ .

Importantly, from a practical point of view, is that once the desired distortion is specified, the scheme will allow the determination of several suboptimal transformations and their respective distortions. In practice, suboptimal transformation could be preferable.

For the stochastic scheme to be complete, it is necessary to evaluate the distortion in a probabilistic way. One possibility is that distortion is the mathematical expectation of distance, but more significant functions for certain applications, such as percentiles and risk measures on probability density tails, can be chosen,

$$D = E[d(\mathbf{X}, Y)]. \quad (6a)$$

In cases, such as those described above, it is convenient to use expressions that represent *sample arithmetic means*, of the type,

$$d(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (R_i(y) - r_i(x))^2, \quad (5b)$$

where index  $i$  can indicate, for example, each of the  $M$  components of the answers at a certain point, or at different points, in the domain.

The mathematical expectation of the distortion remains the same as in equation (6a), for example,

$$D(X; Y) = E_{p(x,y)}[d(x, y)] \quad (6b)$$

By hypothesis, the field that describes the microscale is given by the ensemble of  $N_R$  geostatistical realizations. Thus, the evaluation of the distortion, its mathematical expectation, or any other convenient stochastic measure, can be done using some Monte Carlo technique, or some simplifying variant. Schemes that avoid Monte Carlo can be imagined. Since  $\mathbf{X}$  is already sampled it is possible to write, using the relationship between joint density and conditional density,

$$D = E[d(\mathbf{X}, Y)] = \sum_{\mathbf{X}, Y} p_{\mathbf{X}Y}(\mathbf{X}, Y) d(\mathbf{X}, Y) = \sum_{\mathbf{X}, Y} p_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) p_{\mathbf{X}Y}(Y / \mathbf{X}) d(\mathbf{X}, Y), \quad (7)$$

where  $p_{\mathbf{X}Y}(Y / \mathbf{X})$  is the conditional density of  $Y$ . Its minimum with respect to  $p_{\mathbf{X}Y}(Y / \mathbf{X})$ , will be a *Dirac's delta* function that assigns to each  $x$  of  $X$  the  $Y$  that minimizes  $d(\mathbf{X}, Y)$ .

This optimization problem requires more computational effort than desired. Instead, we try to solve the *Augmented Lagrangean* with the restriction that indicator  $I(\mathbf{X}, Y)$  is less than or equal to a pre-specified value  $I(\mathbf{X}, Y) \leq R$ .

With this objective, we can develop eq. (1),

$$I(\mathbf{X}, Y) = \sum_{\mathbf{X}, Y} p_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) p_{\mathbf{X}Y}(Y / \mathbf{X}) \log \frac{p_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) p_{\mathbf{X}Y}(Y / \mathbf{X})}{p_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) \sum_{\mathbf{X}} p_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) p_{\mathbf{X}Y}(Y / \mathbf{X})}, \quad (8)$$

obtaining, after cancellation of  $p_{\mathbf{X}}(\mathbf{X})$ ,

$$I(\mathbf{X}, Y) = \sum_{\mathbf{X}, Y} p_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) p_{Y|\mathbf{X}}(Y / \mathbf{X}) \log \frac{p_{Y|\mathbf{X}}(Y / \mathbf{X})}{q_Y(Y)}, \quad (9)$$

where,

$$q_Y(Y) = \sum_{\mathbf{X}} p_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) p_{Y|\mathbf{X}}(Y / \mathbf{X}), \quad (10)$$

is the marginal of  $Y$ . The augmented Lagrangean function to be minimized will then give by,

$$F = D + T(I(\mathbf{X}, Y) - R), \quad (11)$$

where  $T \geq 0$  is the Lagrange multiplier. The minimum will be given for derivative of  $F$  with respect to  $p_{Y|\mathbf{X}}(Y|\mathbf{X})$  equal to zero, and  $T(I(\mathbf{X}, Y) - R) = 0$  better known as Kuhn-Tucker conditions. In this way, keeping  $T$  greater than zero and gradually increasing  $R$ , realizations of  $Y$  will be obtained that are more informative of the realizations of  $\mathbf{X}$ . This minimization problem is equivalent to minimizing the complementary Lagrangian function,

$$F^c = I(\mathbf{X}, Y) + \beta(D - D_0), \quad (12)$$

for a specified  $D_0$  distortion. Both functions are simultaneously minimized for  $T = \beta^{-1}$

The Lagrange multiplier  $T$  can be attributed the same meaning as the temperature in the method known as *Simulating Annealing*, originating in Statistical Mechanics. The algorithm described below takes advantage of this similarity.

The optimal conditional distribution is that of Gibbs, obtained by canceling the gradient of  $F$ ,

$$p_{Y|\mathbf{X}}^*(Y / \mathbf{X}) = \frac{q_Y(Y) \exp\left(-\frac{d(\mathbf{X}, Y)}{T}\right)}{Z(\mathbf{X})}, \quad (13)$$

where,

$$Z(\mathbf{X}) = \sum_{\mathbf{X}} q_Y(Y) \exp\left(-\frac{d(\mathbf{X}, Y)}{T}\right) \quad (13a)$$

is a normalizing constant. It converges to the Dirac delta when  $T$  goes to zero. The corresponding minimum of  $F$  will be,

$$F^* = -T \sum_{\mathbf{X}} p(\mathbf{X}) \log Z(\mathbf{X}) + TR = -T \sum_{\mathbf{X}} p(\mathbf{X}) \log \sum_{\mathbf{X}} q_Y(Y) \exp\left(-\frac{d(\mathbf{X}, Y)}{T}\right) + TR. \quad (14)$$

We can eliminate the product  $TR$  from the above expression without any loss, since only the values of the variables that minimize it are relevant, namely, the  $Y$  realizations and their probabilities of occurrence given by the marginal  $q_Y(Y)$ . Achievements  $\mathbf{X}$ , in turn, are supposed to be provided associated with your probabilities. Geostatistical achievements, in general, are not ranked. In this case, it is usual to assume the same probability  $1/N_R$  for each.

The problem posed is to minimize  $F^*$  in relation to the random variable  $Y$  submitted

to the constraint that  $\sum_i q_i = 1$ , that is, to minimize the increased Lagrangean  $F^{**}(y_i, q_i, \lambda)$  given by,

$$F^{**}(y_i, q_i, \lambda) = F^*(y_i, q_i) - \lambda(\sum_i q_i - 1), \quad (15)$$

where  $y_i \in Y$  are the achievements on the macroscale,  $\lambda$  the Lagrange multiplier, and  $q_i$  the marginal of  $y_i$ . Taking the gradient in  $q_i$ ,

$$\frac{\partial F^{**}}{\partial q_i} = T \sum \frac{1}{Z(\mathbf{X})} \exp\left(\frac{d(\mathbf{X}, y_i)}{T}\right) = 0, \quad (16)$$

and, considering eq. (3) and eq. (10), results in that

$$\sum_x p_x(\mathbf{X}) \frac{p_{xy}(Y/\mathbf{X})}{q_y(Y)} = \frac{\lambda}{T} = 1. \quad (17)$$

Now taking the gradient in  $y_i$ ,

$$\frac{\partial F^{**}}{\partial y_i} = \sum p_x(\mathbf{X}) p_{xy}^*(y_i/\mathbf{X}) \frac{\partial d(\mathbf{X}, y_i)}{\partial y_i} = 0, \quad (18)$$

by which one obtains

$$r(y_i) = \frac{\sum_x p_x(\mathbf{X}) p_{xy}(y_i/\mathbf{X}) r(\mathbf{X})}{q_y(y_i)}. \quad (19)$$

We are now able to formulate algorithms to determine  $Y$  and its associated marginal  $q_y(Y)$ .

## PDA Algorithm

The algorithm below is a version of the so-called *Deterministic Simulated Annealing*, or DA, elaborated and discussed in Koutsourelakis (2007) and Rose (1991, 1994, 1998). It finds  $Y$  and his associated marginal  $q_y(Y)$ . It is considered a deterministic version of the classic *Stochastic Simulated Annealing*.

The details given are greater than those normally provided in the literature, allowing their immediate programming. In addition, the computations are ordered in such a way that the calculations for each microscale realization are done in parallel. Thus, the use of the geocellular mesh is encouraged because it is the description on a smaller available stochastic scale.

### Algorithm PDA: *Parallel Deterministic Annealing*

- (1) Start with  $K = 1$  a sufficient higher value of  $T = T_{\max}$  a factor  $a < 1$ ,  $y_1$  arbitrary,  $q_1 = 1$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  tolerances for convergences, and  $T_f$  a final value close to zero,
- (2) Para  $k = 1, 2, \dots, K$  do in parallel for each microscale realization.
  - a. Calculate the  $N_R$  distances to  $y_k$ ,  $d(X_p, Y_k) = (r(X_p) - r(y_k))^2$  eq. (5),
  - b. Calculate the  $N_R$  denominators,  $Z(X_j) = \sum_{i=1}^K q_i \exp\left(-\frac{d(X_j, y_i)}{T}\right)$ ,

c. Calculate the  $N_R$  conditional densities,  $p(y_k / X_j) = \frac{q_k \exp(-d(X_j, y_k))}{Z(X_j)}$ . eq. (13),

d. Estimate (Monte Carlo) the marginal of  $y_k$ ,  $q_k = \sum_{j=1}^{N_k} p(X_j) p(y_k / X_j)$ , see eq. (10),

e. Estimate (Monte Carlo),  $G_k = \sum_{j=1}^{N_k} p(X_j) p(y_k / X_j) r(X_j)$ , see eq. (19),

f. Solve the unidimensional problem  $y_k = r^{-1}(\frac{G_k}{q_k})$  see eq. (19).

(3) Check with  $\varepsilon_1$  the convergence of  $Y_k$  and  $q_k$ . If not satisfied, repeat step (2).

Otherwise, continue to step (4),

(4) Estimate, using Monte Carlo, the average distortion, and the indicator, (in parallel),

a. The average distortion,  $D = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{N_k} p(X_j) p(y_k / X_j) d(X_j, y_k)$ ,

b. The indicator,  $I = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{N_k} p(X_j) p(y_k / X_j) \log \frac{p(y_k / X_j)}{q_k}$ ,

(5) Reduce the temperature  $T$ ,  $T \leftarrow \alpha T \geq T_f$ .

(6) Double the number of realizations  $y_k$  in other words, do  $K \leftarrow 2K$  and initialize  $y_{k+k} = y_k$ ,  $q_{k+k} = q_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ .

(7) Eliminate redundancies with  $\varepsilon_2$  in  $Y$  determine  $n_r \leq K$  and consolidate  $q_k$ ,  $k = 1, \dots, n_r$ .

There are more current sequential versions of this algorithm, which will be studied later. Usually the cooling should be slow, as, for example, reducing the temperature by its thousandths, that is,  $\alpha = 1/1.001$ . Modern Homotopy or Continuation methods can be used in an equivalent way.

What distinguishes this algorithm from *Simulated Annealing* is the introduction of a deterministic algorithm (*steepest descent*) at each temperature level. For some distances  $d$  and answers  $r$  to eq. (18) does not have a single fixed point, therefore, it does not offer a single answer. In these cases, one should choose the one with the lowest average distortion  $D$ .

The *Machine Learning* literature reports that, although with different algorithms and different objectives, suboptimal solutions obtained with a specific value for  $\beta = T^{-1}$ , dependent on the class of problems, are sufficient. This needs to be studied in the present context.

## APLICACIONES

### Example 1

In order to evaluate the quality of the formulation and the accuracy of its results, consider (Koutsourelakis, 2007) the second order differential equation with a variable stochastic coefficient, where  $\omega \in \Omega$ ,  $\Omega$  the sample space,

$$\frac{d}{dx} \left[ a(x, \omega) \frac{dp}{dx} \right] = 0, \quad x \in [0, 1], \quad (20)$$

with mixed boundary conditions,  $p(0) = 0$  and  $v(1) = \alpha(1) \frac{dp}{dx} \Big|_{x=1} = 1$ .

This equation corresponds both to a problem of steady state monophasic flow in a porous medium with prescribed pressure and velocity, known as pressure equation; as for an elastic bar with prescribed displacements and force; Fig. 1.1.

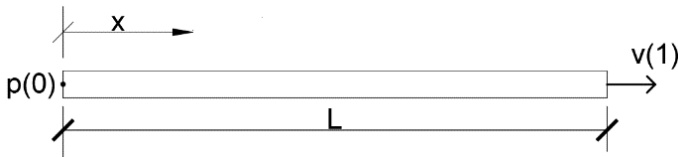


Figure 1.1 – Elastic bar or one dimensional, one phase, steady state flow in reservoir

**Source: The Author.**

The variability of the parameter  $a(x,\omega)$ , is given by,

$$a(x, \omega) = 1 + 0,5\cos\left(2\pi\frac{x}{x_0} + \phi(\omega)\right) \tag{21}$$

where the phase angle  $\phi(\omega)$  is uniformly distributed over the interval  $[0,2\pi]$ , and the constant  $x_0$  characterizes the length or scale of correlation of spatial heterogeneity. For each realization, there is an equivalent, or effective parameter, given by the harmonic mean of its values in the domain. For small values of the correlation length the variance is small, and the distribution of the effective parameter can be given by its harmonic mean.

The problem is to find the equivalent distribution for the determination of  $\rho(1)$  when the correlation length is large, typically larger than the domain. The chosen microscale has 1000 elements, and the macroscale only one element. The scheme used is of the local-global type. Two exercises are performed, one with a correlation length less than the length of the domain, and the other with a correlation length ten times its length. Note that the learning takes place for fixed boundary conditions, unlike Example 2, where the learning will take place for a given range of variation of the boundary condition.

For  $x_0 = 1/100$ , the stochastic field was described by 100 microscale realizations, and the 100 solutions were calculated for estimating  $\rho(1)$ , one for each realization. The macroscale realizations are then estimated, *oriented* towards the estimate of  $\rho(1)$ . The problem is essentially deterministic and the result is a single realization with the parameter given by the harmonic mean. The mathematical expectation of distortion is null.

Taking  $x_0 = 10 \gg 1$ , greater than the extension of the geometric domain, and simulating 1000 microscale realizations, the macro realizations were recalculated, with the same objective of determining  $\rho(1)$ . Fig. 1.2 shows the Distortion-Rate graph. To avoid that the algorithm remains trapped in a local minimum, only  $N_R = 500$  realizations were used by means of random selections, during the annealing, of the  $v(1)$ 's values in the microscale.



The initial temperature used was  $T = 100$  with a slow annealing given by  $\alpha = 1/1.001$ . Fig. 1.3 shows the *optimal density* of the effective properties calculated for the macroscale. The distributions on the two scales are shown in the Fig. 1.4.

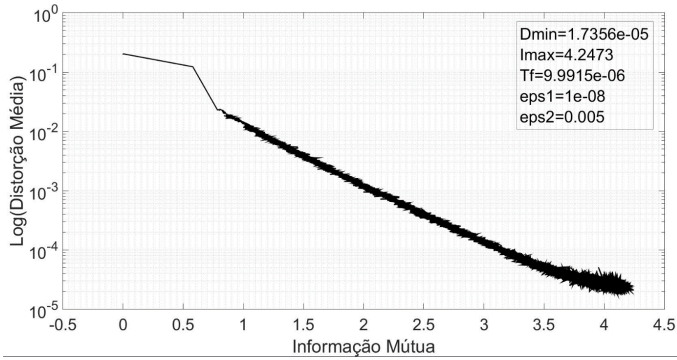


Figure 1.2 - Average Distortion  $\times$  Mutual Information, Example 1, showing its minimum (Dmin) and maximum (Imax) values, respectively, the final temperature value Tf and the PDA convergence tolerances.

Source: The Author.

Fig. 1.4 shows the exact distribution of  $\rho(1)$  obtained using the effective parameters,  $a_{efi}$ ,  $i = 1, \dots, 1000$ , given by the harmonic means of the parameters of the elements in each realization  $i$ . The solution for each realization is given by,

$$p_i(1) = v(1)/a_{efi} = 1/a_{efi}, \quad (22)$$

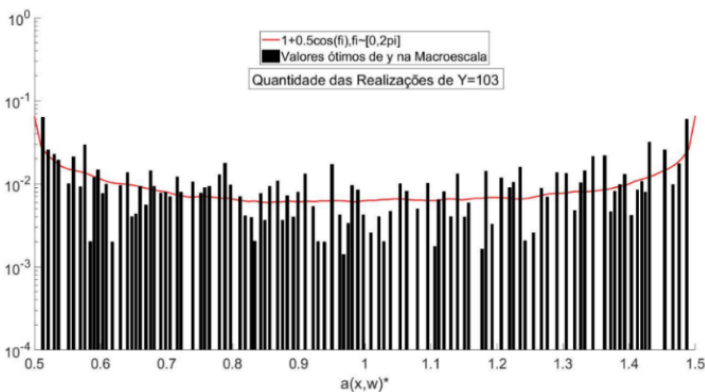


Figure 1.3 - Density and distribution of realizations on the two scales, Example 1, only 1 macro element.

Source: The Author.

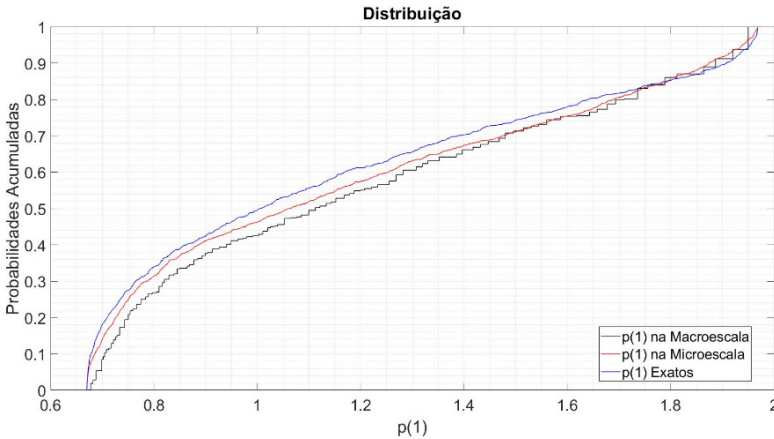


Figure 1.4 - Distribution of realizations of displacement (pressures) on the macroscale, microscale and exact. Example 1, only 1 macro element.

Source: The Author.

while the probabilities  $q_i[p_i(1)]$  of the 1000 realizations of the solution  $p_i(1)$ ,  $i = 1, \dots, 1000$ , are uniformly distributed,

$$q_i[p_i(1)] = 1/1000. \quad (23)$$

The distributions of  $p(1)$  on the microscale and on the macroscale are also shown in Fig. 1.4. The sampling in the microscale, for each of the realizations, was obtained from the solution of the linear system resulting from the discretization of eq. (20). The probabilities of  $N_R$  realizations in the micromesh are uniformly distributed with  $1/N_R$ , where  $N_R = 1000$ .

The optimal distribution of the solution on the macro scale was obtained with  $n_R = 103$  realizations  $y_i$  and their respective probabilities  $q_p$  arising from the PDA, as Fig. (1.3). The  $q_i[p_i(1)]$  probabilities of the optimal  $p_i(1)$  are obtained as,

$$p_i(1) = \frac{v(1)}{y_i} \quad (24)$$

$$q_i[p_i(1)] = \frac{q[v(1)]}{q(y_i)} \frac{1}{Z_i} = \frac{q(y_i)^{-1}}{Z_i} \quad (25)$$

where,  $Z_i = \sum_{i=1}^{n_R} \frac{1}{p(y_i)}$  is a normalization constant.

In Fig. 1.4, there is a difference between the values obtained of  $p(1)$  in the microscale and the exact solution, due to the processes used in the calculations; in the microscale through linear systems and in the exact one using effective parameters. As it is a stochastic problem, small variations can be found for different methods of solution.

The number of realizations used in the macroscale,  $n_R = 103$ , can be considered large. This is an extreme example with a long correlation length and great variability, completely inappropriate for KKL expansions and decompositions (PCA, POD).

## Example 2

In this example, the proposed methodology is applied to a one-dimensional reservoir with two-phase flow, of oil and water, and depletion by water injection, studied by Emerick and Reynolds (2013). This reservoir was also used to study strategies and algorithms in stochastic control by Fonseca (2015).

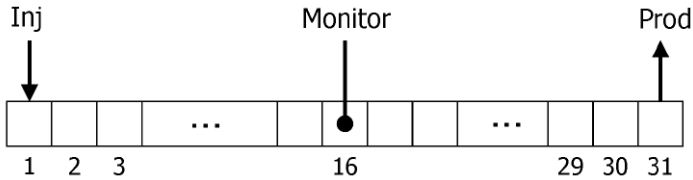


Figure 2.1 - Reservoir micromesh. Emerick, A, Reynolds, A, (2013)

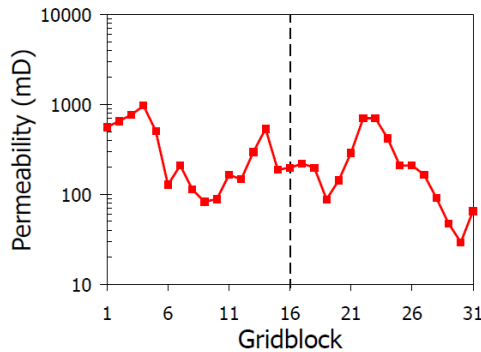


Figure 2.2 - Permeability of the true model represented by its 100 realizations in the micromesh. Emerick, A, Reynolds, A, (2013).

The reservoir is described in Fig. 2.1 and has 31 blocks of dimensions  $50ft \times 50ft \times 50ft$ . The natural logarithm of permeabilities,  $\ln(k)$ , has an exponential autocorrelation function with a correlation length of 10 blocks, with a mean of 5 and variance 1. The porosity is constant and equal to 0.25, the water viscosity is  $1.0cP$  and oil,  $2.0cP$ . The initial pressure in the reservoir is  $3500psi$  and the compressibility of oil, water and rock are  $10^{-5}psi^{-1}$ ,  $10^{-6}psi^{-1}$  e  $5 \times 10^{-6}psi^{-1}$ , respectively. There is a water injector well in the first block that operates with a  $4000psi$  downhole pressure. In the last block there is a producing well that operates at a bottom pressure of  $3000psi$ . There is a pressure observation well in the center of the reservoir. The production period is  $360days$ , with monthly measurements. The production period was defined such that there is water production in the observation well, but not in the producing well.

Authors generated a permeability field described by 100 equally probable realizations, based on the scenario shown in Fig.2.2. All the problem data were provided by the authors through digital files, as well as the executable code of the simulator used by them. The problem was originally devised to compare methods for solving inverse problems for permeability fields.

The exercise here consists in determining the new field of absolute permeabilities for the macro mesh given in Fig.2.3. Original micromesh dimensions of the three blocks with wells were maintained. The remaining blocks were scaled two by two, resulting in a macro mesh of 1 blocks. It is known that, in multiphase problems, there is also a need to change the scale of the relative permeabilities, and that the reservoirs are more sensitive to this change in scale if the reduction in cardinality is high. The reduction in geometric cardinality in this exercise is the lowest possible uniform reduction. Therefore, it is expected that the absence of a change in the scale of relative permeabilities will have little influence.

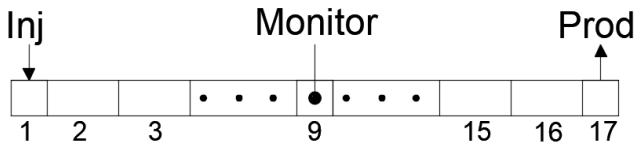


Figure 2.3 – Reservoir macromesh.

Source: The Author.

Reservoir simulations used in this example were made with MRST-2017b, Lie (2016), and the scale transposition was done with the values taken from the simulations, in a single-phase problem (water), when reservoir were in steady state flow.

The procedure starts with the simulation of the 100 realizations in the micro mesh. These are the only simulations performed on the micro mesh. 14 scale changes were made, one for each macro element, with Dirichlet boundary conditions in the simulation of each macro element, and with the distortion measure given by Eq. (5b).

Boundary conditions for each macroelement were calculated with the stationary values of the micro mesh, where the pressure on the left (right) is the pressure of the microelement on its left (right).

The responses,  $r(x_j)$ , used in Eq. (5b) were the speeds at the interface of each two microelements; while the answers,  $R(y_k)$ , are the velocities at the center of each macro element.

For the solution of the one variable inverse problem, given by,

$$y_k = R^{-1} \left[ \frac{E_{p(x,y_k)}[r(x)]}{p(y_k)} \right] = R^{-1} \left[ \frac{G(X;y_k)}{p(y_k)} \right]. \quad (27)$$

Among the three options given by Zuji and Trykozko (2001), the first option was used, which corresponds to the conservation of the driving force. With this option,

$$y_k = k_k^* = \frac{-u}{\nabla p} = \frac{G(X; y_k)l}{p(y_k)(p_o - p_i)} \quad (28)$$

where  $\bar{u}$  is the average speed at the center of the macro element,  $l = 100/\bar{t}$  is its length, and  $p_i$  and  $p_o$  are the pressures on the left and right sides of the macro element, respectively.

Table 2.1 summarizes the data and results for this example. Fig. 2.4 shows the Average Distortion by Mutual Information graph for two macro element. Figs. 2.5 shows the quantization of the probability densities of the absolute permeabilities obtained during the application of the PDA for two macroelement. Fig. 2.6 shows the speeds obtained for two element of the macro mesh and micro mesh. In order to verify the results obtained by the PDA, a comparison between the model obtained by the macro mesh and the original model in the micro mesh, both biphasic, was carried out. Figs. 2.7 and 2.8 show the water and oil saturations and the reservoir pressures in 750 days in both the macro mesh and the micromesh.

Example 2 - Results obtained by PDA				
$Tf = 0.5 \times 10^{-7}$ $\epsilon 1 = 1 \times 10^{-5}$ $\epsilon 2 = 5$				
Macroelements	$\bar{\nabla p} \times 10^5$	$D_{min}$	$I_{máx}$	$n_R$
2	7,32	$4.45 \times 10^{-9}$	10.83	12
3	6,56	$1.25 \times 10^{-12}$	5.79	10
4	5,81	$3.01 \times 10^{-10}$	24.21	11
5	5,40	$4.25 \times 10^{-12}$	17.63	8
6	5,19	$1.94 \times 10^{-10}$	13.02	9
7	5,98	$8.32 \times 10^{-9}$	12.16	16
8	6,03	$8.98 \times 10^{-10}$	49.08	12
10	6,15	$5.27 \times 10^{-12}$	12.02	8
11	5,99	$8.76 \times 10^{-9}$	19.75	11
12	5,72	$5.34 \times 10^{-10}$	12.30	7
13	6,55	$2.07 \times 10^{-10}$	11.01	10
14	6,02	$3.64 \times 10^{-10}$	14.38	12
15	6,28	$7.59 \times 10^{-9}$	16.92	8
16	7,27	$9.06 \times 10^{-9}$	2.74	15

Table 2.1: Summary of the results obtained in Example 2, showing the values of the pressure gradient (force), the minimum value of the mean distortion (Dmin), the maximum value of the mutual information (Imax) and the temperature (Tf), the amount of achievements of the macro mesh and the tolerances used in the PDA algorithm.

Source: The Author.

From the results obtained in Table 2.1, it can be seen that the distortions,  $D_{min}$ , were very small, with an order of magnitude from  $10^{-9}$  a  $10^{-12}$ , a fact that results from the application of the PDA algorithm in just two blocks (in the other applications they ranged from 100 to 1000). Mutual Information continues to demonstrate good results, for non-linear time dependent problems.

The number of realizations,  $n_R$ , varied between 7 and 16, which shows a significant reduction in the probability dimension of the micro mesh, in the order of 90%.

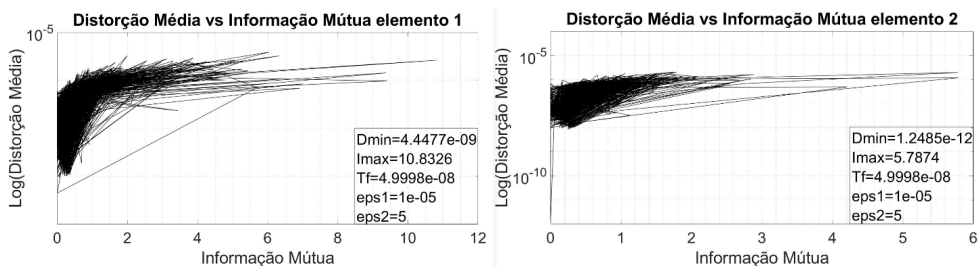


Figure 2.4: Average distortion and mutual information of macroelements 1 and 2.

Source: The Author.

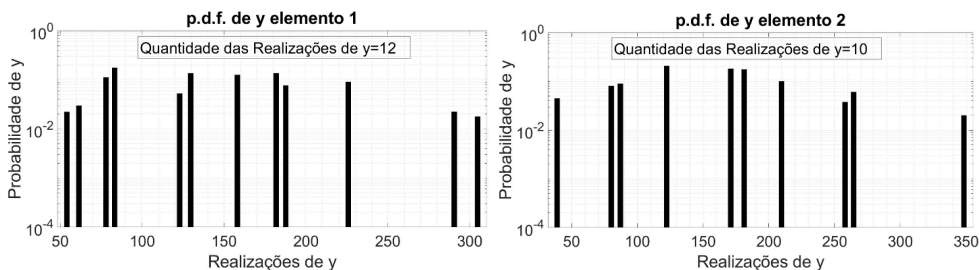


Figure 2.5: Quantization of the densities of the properties of macroelements 1 and 2.

Source: The Author.

From the analysis of the saturation and pressure graphs, Fig. 2.6 and Fig. 2.7 of the two-phase reservoir it is possible to say that the results obtained with 100 micro meshes and 10 macro meshes realizations are very close, in particular that of the pressures, showing that, with the application of the PDA in two phases reservoir problems, it is possible to reduce both the probabilistic dimension and the cardinality of the meshes in a controlled and goal-oriented manner.

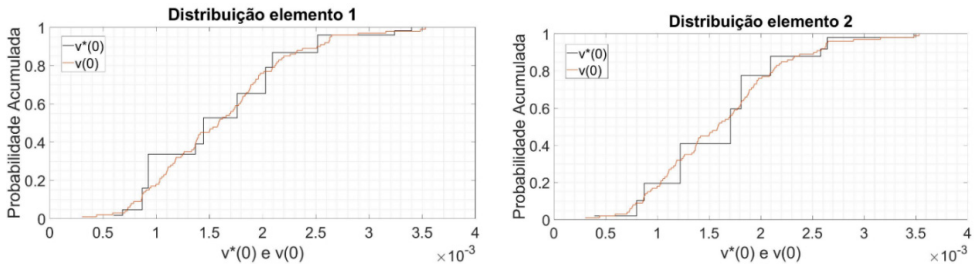


Figure 2.6: Velocity distribution of macroelements 1 and 2.

Source: The Author.

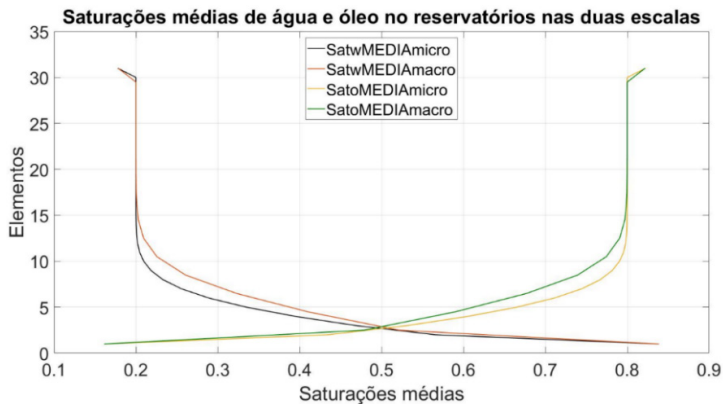


Figure 2.7 – Average saturation of water and oil in the reservoir in both scales, at 750 days, showing the average saturation of water and oil in the micro mesh and the macro mesh

Source: The Author.

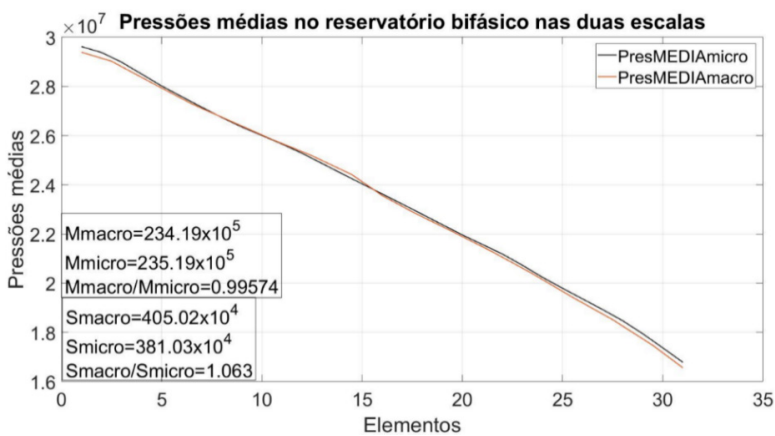


Figure 2.8 – Average reservoir pressures at both scales, at 750 days.

Source: The Author.

## CONCLUSIONS

The main conclusion to be drawn from this work is that the development of a computer program for the end user is fully justified. This program would use calls to a commercial program, as a black box, for control and optimization of reservoir management. In addition, other relevant conclusions can be highlighted, which may be:

Determining the succession of distributions from a given temperature to the optimal distribution has an extremely high computational cost.

The scale change process studied is quite adequate to produce models that estimate characteristic values of a solution distribution. The proposed technique can then be classified as goal oriented. It is thought that it must be especially important in the problems of stochastic control (closed loop control) and stochastic optimization.

Proposed techniques should obtain more expressive computational gains in problems with three-dimensional geometric domain.

Application of Monte Carlo methods for Multiple Scales (MSMC) in reservoirs with heterogeneous (or physical) permeabilities requires that there are at least three meshes embedded, physically and probabilistically consistent. The author does not know any method of scale change in the literature that simultaneously meets these three requirements, in addition to what is proposed in this work.

The mathematical and computational experience acquired in the development of this work suggests that the continuity of the investigative process may be in the direction of some points.

Given an ensemble with  $N_R$  realizations, it is not possible to know a priori what the number of realizations is to be used to analyze the microscale, unless after the numerical simulation of each realization, and, perhaps, after the analysis of the statistics. In other words, which realizations are of interest, a priori, in each problem? This question stems from the fact that, for realistic problems, the viable number of simulations,  $n_s$ , must be much less than the amount  $N_R$  of geocellular realizations, typically between a dozen and a hundred,  $n_s \in [10,100] \ll N_R$ . Procedures that avoid the numerical simulation of all geocellular realizations must be investigated. Some possibilities that merit systematic investigation can easily be glimpsed.

A possible alternative procedure to PDA is to establish a priori, (and, perhaps, adaptively) a specific amount of macro realizations, and to use a stochastic-deterministic algorithm (e.g. SPSA) to directly minimize the functional  $F[p(y|x)]$ , or its complement,  $F^c[p(y|x)]$ , or some variant of them. One possibility is to use Stochastic Variational Inference to maximize a lower dimension of one of these functionalities. These changes may allow for some semi-local-global schemes that are not easily treatable by the techniques of this work.

Finally, the future seems to point to the use of ideas recently exposed in the literature that is dedicated to the construction of a mathematical analysis of *Deep Learning*, until then



non-existent - see Tishby, Pereira and Bialek (1999), for the origins of their origins. The idea is to extend the Distortion Rates Theory by conditioning the solution to similarity with a third distribution. Variational Principles are established and as a consequence, the distortion measure becomes a Kullback-Leibler distance - a metric distance between two distributions.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank to UFPE and partial financial support from PETROBRAS through the SIGER network, through the UFPE / PETROBRAS / SIGER2 project.

## REFERENCES

Emerick, A., Reynolds, A., 2013; Investigation of the Sample Performance of Ensemble Based Methods with a Simple Reservoir Model. *Computational Geoscience*, Vol. 17, 325-350.

Costa, I.F, Fonseca L. de A., Araújo, É. da Rocha, 2017; Heterogeneous Stochastic Multiscale, CILAMCE 2017, Florianópolis, Santa Catarina, Brazil.

Fonseca, L. de A., 2015; Bayesian Closed-Loop Control in Reservoir Management, Ph.D. thesis, Civil Engineering Department, Federal University of Pernambuco, Recife, Brazil.

Hill, T. L. 1956; *Statistical Mechanics, Principles and Selected Applications*, Dover Publications, Inc., New York.

Koutsourelakis, P. S., 2007; Stochastic upscaling in solid mechanics: An exercise in machine Learning. *Journal of Computational Physics*, 226, 301-325.

Lie, K.-A., 2016; An Introduction to Reservoir Simulation using MATLAB. User Guide for the MATLAB Reservoir Simulation Toolbox (MRST). SINTEF ICT.

Nonnenmacher, A., 2011; Adaptive Finite Element Methods for Multiscale Partial Differential Equations. PhD. Thesis, EPFL.

Planck, M. K. E. L., 1948; *Wissenschaftliche Selbstbiographie*, Barth, Leipzig.

Rose, K., 1991. Deterministic annealing clustering and optimization. PhD. Thesis, Caltech, Pasadena, CA.

Rose, K., 1994. A Mapping approach to rate-distortion computation and analysis, *IEEE Transactions in Information Theory*, vol. 40, pp.1939-1952.

Rose, K., 1998. Deterministic annealing for clustering, compression, classification regression and related optimization problems. *Proceedings of the IEEE*, vol. 86 (11), pp. 2210-2239.

Shannon, C. E., 1948; A Mathematical Theory of Communication. Reimpress, *The Bell System Technical Journal*, Vol. 27, pp. 379-423, pp. 623-656, July, October.

Tishby, N., Pereira, F. C., Bialek, 2000, W.; The Information Bottleneck Method, ArXiv.

Weinan, E., Engquist, B., 2003; The heterogeneous multi-scale methods. *Communication in Mathematical Sciences*, Vol.1 (1), pp. 87-132.

Zijl, W., Trykozko, A., 2001; Numerical Homogenization of the Absolute Permeability using the Conformal-Nodal and Mixed-Hybrid Finite Element Method. *Transport in Porous Media*, 44: 33-62.

## APPENDIX

### Scale Transposition Schemes

The large dimensions of the real reservoirs justify schemes that avoid the simulation of the micro mesh in the PDA algorithm. Weinan and Engquist, 2003, suggest some schemes that today are widely used in the deterministic *upscaling* literature, which can, with great advantages, also be used in the scale transposition methodology proposed in this work.

Fig. A1 shows the scheme called local-local (LL), by which only the region to be homogenized (hatched) is simulated, instead of the simulation of the entire micro mesh. Good results are expected with this scheme when the correlation length of the geostatistical realization is sufficiently small. Strictly, in the order of the diameter of the region to be homogenized.

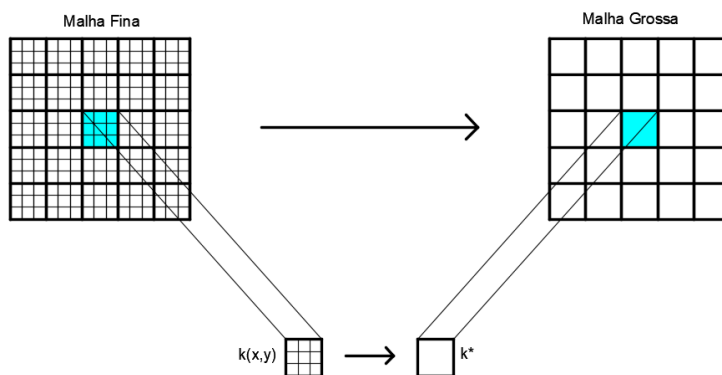


Figure A1 – Local-local scheme (LL), Weinan and Engquist, 2003.

Fig. A2 shows a semilocal-local (SL) scheme to be considered when the correlation length is greater than the region to be homogenized. For correlation lengths of the order of magnitude of the reservoir, or greater, a global-local (GL) scheme may be convenient. The decision on the scheme to be used depends on the acceptable balance between cost and accuracy.

The choice of the type of scheme should be adaptive, that is, the choice should be

made as the PDA algorithm develops. With the intention of balancing the cost-accuracy ratio, the schemes should vary from region to region of the reservoir. The geometric dimensions of the region to be homogenized is also subject to the decision to balance the cost-accuracy ratio.

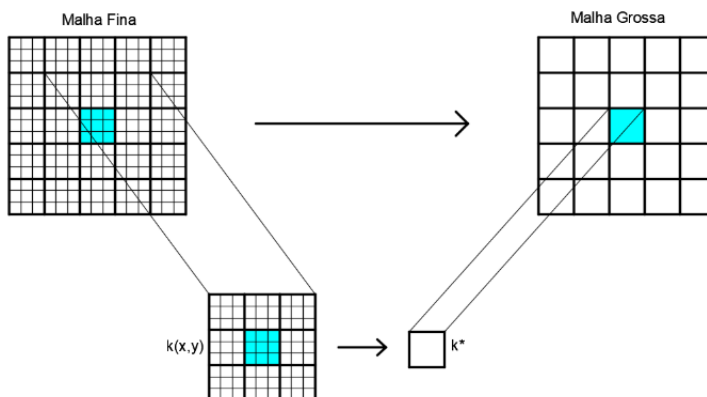


Figure A2 - Semilocal-local scheme (SL), Weinan and Engquist, 2003, with the global-local scheme (GL) as a limit.

At the geometric limit of the SL schemes is the global-local scheme (GL), when the entire micro mesh is simulated in the PDA.

In choosing these alternative schemes, a strong influence of the type of reservoir problem is also expected. Less demanding schemes can be used when dealing with problems that involve the entire reservoir and that depend a lot on the average behavior of the reservoir, such as, for example, in the stochastic control and optimization under uncertainty of the field NPV in the sweeping water. In some problems, the intensity of discretization around the wells can be decisive. This seems to be the case for thermal recoveries with parallel wells close to vapor injection and fluid intake, as well as around smart wells with multiple flow outlets.

The example used in this work were developed with the global-local scheme, GL.

## INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA IDENTIFICAR O USO DE MÁSCARA NA PREVENÇÃO DA COVID-19

Data de aceite: 02/08/2021

Data de submissão: 26/04/2021

**Guilherme Henrique Chaves Batista**

Centro Universitário Una  
Belo Horizonte / Minas Gerais  
<https://orcid.org/0000-0002-8376-7543>

**Roberson Carlos das Graças**

Cidade Universitária - Una Guajajaras Belo Horizonte / Minas Gerais  
<https://orcid.org/0000-0001-7491-1403>

**Edyene Cely Amaro Oliveira**

Centro Universitário Una Belo Horizonte / Minas Gerais  
<http://lattes.cnpq.br/5124531757655853>

**Guilherme Ribeiro Brandao**

Centro Universitário Una Belo Horizonte / Minas Gerais  
<https://orcid.org/0000-0001-9864-7248>

**Igor Siqueira da Silva**

Centro Universitário Uni BH Belo Horizonte / Minas Gerais  
<https://orcid.org/0000-0001-7966-5547>

**Samara de Jesus Duarte**

Centro Universitário Uni BH Belo Horizonte / Minas Gerais  
<https://orcid.org/0000-0002-6633-6039>

**Samara Lana da Rocha**

Universidade Federal de Minas Gerais Belo Horizonte / Minas Gerais  
<http://lattes.cnpq.br/7739484114932114>

**Hermes Francisco da Cruz Oliveira**

Centro Universitário Una Belo Horizonte / Minas Gerais  
<https://orcid.org/0000-0002-3608-5187>

**RESUMO:** Em dezembro de 2019 constatou-se o primeiro caso de Covid-19 em Wuhan, na província de Hubei, República Popular da China. Essa doença é causada pelo SARS-CoV-2, vírus que espalhou-se no mundo todo e assim causou uma pandemia. Segundo as orientações da Organização Mundial da Saúde(OMS) medidas como lavar as mãos frequentemente, evitar aglomerações e utilizar máscara devem ser tomadas para prevenção da doença. A utilização de máscaras deve ser feita por todos sempre que houver a necessidade de sair de casa. Sendo correto a utilização de máscara cirúrgica ou de pano dupla face, a qual deve cobrir todo o queixo, boca e nariz de forma ajustada ao rosto. Em alguns países como o Brasil, a não utilização de máscara foi decretado como infração e pode acarretar na cobrança de multa em algumas cidades. Pensando nesta problemática, este trabalho tem como objetivo desenvolver um algoritmo de Redes Neurais Convolucionais(CNN) que identifica se a pessoa está ou não utilizando a máscara. Esse programa poderá ser usado como uma triagem que alertará o não uso da máscara para impedir a entrada em locais de acesso públicos. Em testes iniciais constatou-se uma acurácia de 97%.

**PALAVRAS - CHAVE:** Aprendizado de Máquina; Covid-19; Coronavírus; Inteligência Artificial; Máscara.

# ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO IDENTIFY THE USE OF MASK IN THE PREVENTION OF COVID-19

**ABSTRACT:** In December 2019, the first case of Covid-19 was found in Wuhan, in the province of Hubei, the People's Republic of China. This disease is caused by the SARS-CoV-2, a virus that has spread worldwide, causing a pandemic. According to the guidelines of the World Health Organization (WHO), measures such as washing your hands frequently, avoiding crowding, and wearing a mask, should be taken to prevent the disease. The use of masks should be done by everyone, whenever there is a need to leave the house, being correct to use a surgical mask or double-sided cloth, which should cover the entire chin, mouth, and nose in an adjusted way to the face. In some countries, such as Brazil, the non-use of masks was turned into an infraction by a decree and may result in fine charges in some cities. Thinking about this problem, this work aims to develop an algorithm for Convolutional Neural Networks (CNN) that identifies whether or not a person is wearing a mask. This program can be used as a screening that will warn about the non-use of masks, to prevent entry into public access places. In initial tests, an accuracy of 97% was achieved.

**KEYWORDS:** Artificial Intelligence; Coronavirus; Covid-19; Machine Learning; Mask.

## 1 | INTRODUÇÃO

Atualmente um dos principais objetivos do mundo é conseguir uma vacina para o coronavírus (vírus causador da COVID-19), porém enquanto não foi alcançado esse feito uma das principais maneiras de conter o avanço deste vírus é usando máscaras faciais.

Para o monitoramento do uso adequado das máscaras em algumas cidades há profissionais responsáveis por fiscalizar a população podendo até multar quem não a estiver usando, mas infelizmente nem todos fazem o uso correto das mesmas. Outra alternativa para averiguar se as pessoas estão fazendo o uso de máscaras faciais ou não é por meio de redes neurais artificiais, modelo matemático capaz de realizar facilmente classificações e previsões a partir de dados informados.

## 2 | REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Redes Neurais Convolucionais

Rede Neural Convolucional (*Convolutional Neural network*) ou também conhecida como *CNN*, é um algoritmo de aprendizado profundo (*Deep Learning*) comumente utilizado para identificar e classificar imagens utilizando os pixels como entrada. A diferença deste algoritmo aos seus demais concorrentes é o fato de atribuir importância (também conhecido como pesos) a vários aspectos das imagens, e com isto, ser capaz de diferenciar um pixel do outro<sup>1</sup>.

O pré-processamento deste algoritmo é menor se comparado aos seus vários concorrentes, enquanto alguns tem a exigência do mesmo ser feito a mão, o *CNN* é capaz

<sup>1</sup> <http://deeplearningbook.com.br/introducao-as-redes-neurais-convolucionais/> acessado em 31/07/2020.

de aprender estes filtros somente com o treinamento, isto é possível graças aos seus neurônios, pois, todos são conectados entre si, possibilitando a troca de pesos e ajustes nos mesmos.

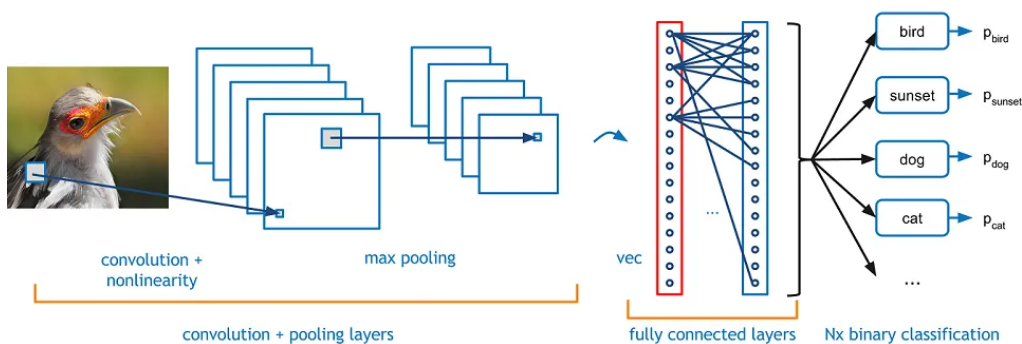


Figura 1. Redes Neurais Convolucionais.

Fonte: Deep Learning Book<sup>2</sup>.

De acordo com Ragav Venkatesan e Baoxin Li[1], no computador, “cada imagem é uma matriz ou tensor de um (imagem em escala de cinza) ou três (imagem colorida) ou mais (profundidade e outros campos) canais”. Se, por exemplo, a imagem for uma foto preto e branca com 8 bits, essa matriz terá apenas uma camada (ou canal) que guardará valores que representam a intensidade de cada pixel que vão de 0 (preto) a 255 (o mais branco possível).

Nessa matriz, normalmente, não há uma variação muito drástica nos valores de pixels próximos - quando essa mudança drástica ocorre, isso significa que há uma divisão na imagem entre, por exemplo, dois objetos diferentes. A *CNN* usa essas variações (ou bordas) para conseguir identificar o objeto - ela aplica filtros formados por pesos à matriz que é a imagem que ela recebe e cada filtro realça um tipo de elemento (se, durante o treinamento, a rede aprender um filtro para uma certa curva, os locais que apresentarem essa curva na imagem terão seu valor aumentado enquanto os outros terão o valor reduzido)[1].

Assim, a *CNN* aprende as características principais que formam um objeto (como uma máscara) e consegue detectar, com uma certa precisão, a sua presença nas imagens que ela recebe.

<sup>2</sup> <http://deeplearningbook.com.br/introducao-as-redes-neurais-convolucionais/> acessado em 31/07/2020.

### 3 | TRABALHOS CORRELATOS

Com o início da pandemia de Covid-19, surgiu a necessidade do uso de máscara em locais fechados, como por exemplo em shoppings, supermercados, bancos, ou mesmo lugares abertos, como praças, ruas e demais, colocar pessoas para verificar o cumprimento das leis do isolamento poderá ser custoso, então a IA será uma boa opção para economizar recursos e verificar se todos estão cumprindo as leis do isolamento.

Um bom exemplo é o trabalho *A Cascade framework for masked face detection*, produzido por Wei Bu, Jiangjian Xiao, Chuanhong Zhou, Minmin Yang e Chengbin Peng [2]. Ele teve como objetivo detectar rostos mascarados utilizando uma estrutura em cascata. Segundo os autores, foi difícil encontrar uma base de dados satisfatória com a quantidade de imagens necessárias para fazer um treinamento eficaz, contudo o algoritmo se saiu muito bem com as imagens a disposição e como resultado alcançou um resultado idôneo.

Outro exemplo, é o artigo *Masked Face Recognition Dataset and Application*, desenvolvido por Zhongyuan Wang, et al[3]. Ele teve como objetivo melhorar o desempenho do reconhecimento facial existente e nele foi desenvolvido um algoritmo com base no conjunto de dados state-of-the-art com multi-granularidade. Como resultado, a pesquisa contribuiu cientificamente e tecnologicamente para a prevenção e controle de epidemias e para a retomada da produção na indústria.

### 4 | METODOLOGIA, MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo de redes neurais artificiais convolucionais que detecta se uma pessoa está ou não com máscara e assim utilizá-la como uma ferramenta na prevenção da Covid-19.

#### 4.1 Banco de Dados

Foi organizado um banco de dados com o total de 17.946 imagens, as quais foram coletadas nos seguintes sites de bancos de dados abertos: Labeled Faces in the Wild<sup>3</sup>, Unsplash<sup>4</sup>, Getty Images<sup>5</sup>, iStock<sup>6</sup>, Depositphotos<sup>7</sup>, e do repositório do GitHub de X-zhangyang<sup>8</sup>, além disso, algumas das fotos de pessoas com máscara foram fotografadas pelos autores deste artigo. Com o intuito de ter um melhor desempenho, foi utilizada a mesma quantidade de imagens com pessoas com e sem máscara para treinar, validar e testar o algoritmo. Desse modo, o total de imagens de treino foi 14.426, para a validação foram usadas 2.020 imagens e por fim, o teste de desempenho foi realizado com um

3 <http://vis-www.cs.umass.edu/lfw/> acessado em 15/05/2020.

4 <https://unsplash.com/s/photos/mask> acessado em 15/05/2020.

5 <https://www.gettyimages.com.br/fotos/mask?phrase=mask&sort=mostpopular#license> acessado em 20/05/2020.

6 <https://www.istockphoto.com/br/fotos/person-with-mask?phrase=person%20with%20mask&sort=mostpopular> acessado em 20/05/2020.

7 <https://br.depositphotos.com/stock-photos/pessoa-com-m%C3%A1scara-coronav%C3%ADrus.html?filter=all> acessado em 28/06/2020.

8 <https://github.com/X-zhangyang/Real-World-Masked-Face-Dataset> acessado em 30/07/2020.

conjunto de 1.500 figuras. Tais dados são exemplificados na tabela abaixo.

Image Type	Training	Validation	Test
Without mask	7.213	1.010	1.250
With máscara	7.213	1.010	1.250
Both	14.426	2.020	1.500

Table 1. Database

## 4.2 Detector de Pessoa Sem Máscara

Foi utilizado o algoritmo de otimização Adam, o qual atualiza os pesos de forma interativa das redes neurais e usa como base os dados de treinamento. Segundo análise do trabalho recente de Gustavo Hwu Lee[4] o algoritmo Adam é mais eficiente do que outros modelos e utiliza pouca memória.

O Detector de pessoas sem máscara aplica o aprendizado profundo com duas camadas para identificar se uma imagem é de uma pessoa com ou sem máscara. Esse programa tem dois tipos de entrada para treinamento, sendo uma com um ou mais indivíduos com o uso da máscara e a outra sem. Conforme visto na figura 2 “Com máscara” e na figura 3 “Sem máscara”.



Figura 2. Com máscara.

Fonte: Autores



Figura 3. Sem máscara.

Fonte: Autores

Com a utilização do aprendizado profundo, foi desenvolvido um modelo de reconhecimento de imagens com a *CNN*. Essas redes trabalham com camadas múltiplas e realizam o processamento de dados visuais. O modelo de *CNN* desenvolvido, aplica filtros em imagens e cada pixel é relacionado a um neurônio da rede. Após esse processamento de dados, é feito o treinamento com base em imagens de pessoas com máscaras e pessoas



sem máscara. O código de aprendizado supervisionado classifica essas imagens para que posteriormente possa identificar se na foto a pessoa está sem máscara ou não. Isso foi desenvolvido inteiramente na linguagem computacional *Python* por meio da ferramenta *Google Colaboratory*<sup>9</sup> que funciona como um notebook Jupyter executado na nuvem e que não requer configuração.

### 4.3 Aplicação

A aplicação do algoritmo poderá fazer-se por meio de uma catraca com câmera que possui um sensor de presença. Assim que alguém aproximar-se do equipamento terá o rosto fotografado e analisado para detecção do uso ou não da máscara. A liberação de acesso só será feita se a saída do algoritmo for “com máscara”, caso contrário, um alarme sonoro será ativado. Por conseguinte, um funcionário se deslocará para a entrada para verificar se realmente a pessoa não utiliza a máscara, informá-la da obrigatoriedade e importância do uso e poderá até oferecer uma máscara de acordo com o seguimento do estabelecimento. Além disso, somente a aplicação do algoritmo no local pode advertir o cidadão a estar sempre com a máscara.

Outrossim, futuramente pensa-se em aperfeiçoar o algoritmo de modo que seja possível dispô-lo em imagens de vídeo em tempo real. Diante disso, sua aplicação será feita por intermédio de câmeras de segurança que irão captar a imagem da pessoa. Mediante a detecção do não uso da máscara, uma foto da pessoa será enviada para o celular de um funcionário que tomará as medidas cabíveis. Com essa melhora do algoritmo sua aplicabilidade será ampliada, pois não somente será utilizado em uma maior variedade de estabelecimentos, como também poderá fazer o controle da permanência da máscara.

## 5 | ANÁLISE DE RESULTADOS

O modelo de redes neurais implementado neste trabalho obteve resultados satisfatórios, porém no início de seu desenvolvimento, com um banco de imagens ainda em construção, ela teve dificuldades para reconhecer máscaras com desenhos de rostos de personagens, como por exemplo uma figura com a boca do coringa na máscara. Em testes iniciais imagens com esse tipo de máscara foram consideradas como “sem máscara”. No entanto, com o aumento do banco de dados foi possível melhorar isso e assim diminuir a taxa de erro.

A métrica utilizada para verificar a porcentagem de acertos foi a acurácia e, no primeiro teste, em que o número de imagens era reduzido, o sistema apresentou uma acurácia de 75%. Já no teste final, com o algoritmo mais robusto e com o ajuste de parâmetros, sua acurácia foi de 84% conforme o gráfico a seguir.

Com relação a perda de aprendizado, foi utilizada a função entropia cruzada binária (binary cross-entropy), ela verifica o quão longe o algoritmo está de resultados satisfatórios

<sup>9</sup> <https://colab.research.google.com/>

e no primeiro teste a perda estava muito elevada, e por consequência a acurácia não atingiu bons resultados, após algumas atualizações em nossa rede, adicionando mais camadas de entradas e utilizando a perda de neurônios, a perda de aprendizado foi reduzida chegando a 2% conforme o gráfico a seguir.

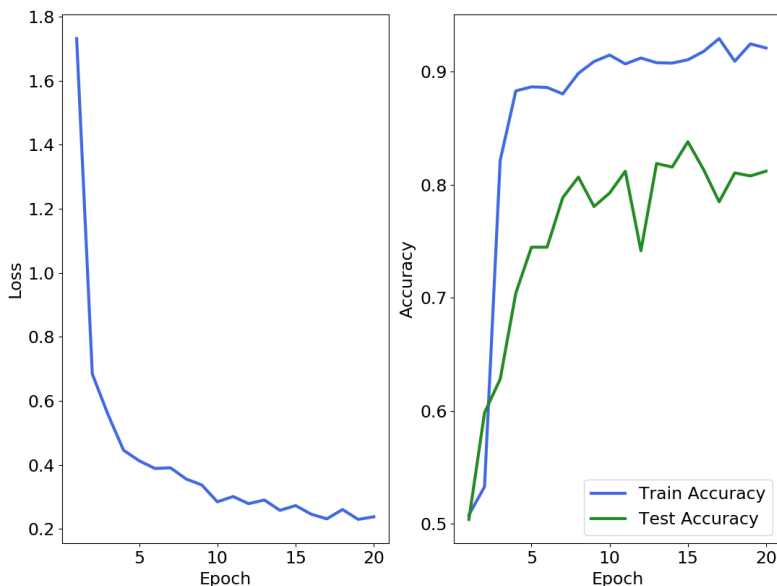


Gráfico 1. Perda e acurácia do algoritmo.

Fonte: Autores

## 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados obtidos, esta pesquisa tem a intenção de ser útil à sociedade de forma a ajudar essa a se proteger do coronavírus por meio do reconhecimento do uso da máscara por meio de um modelo de redes neurais.

Devido a pandemia da covid-19 a ação de usar uma máscara ajuda a proteger muitas vidas, pois o contato com gotículas de saliva de uma pessoa contaminada é uma das formas que mais disseminam a doença. Com o Detector de pessoas sem máscara, o trabalho de identificar o uso da máscara seria feito, principalmente, pelo programa. Desse modo, diminuiria os riscos que, mesmo com as medidas de proteção, essa função apresenta às pessoas.

Conforme dito, futuramente pretende-se aperfeiçoar o programa de modo que uma câmera de segurança possa capturar a imagem da pessoa que está sem máscara e enviar para um funcionário, por meio de um aplicativo. Isto posto, ter-se-á maior acessibilidade do

detector de pessoa sem máscara.

Além disso, com a utilização do algoritmo em softwares em locais públicos, será possível realizar o monitoramento da população com relação ao uso de máscaras. Com isso, pode-se analisar quais regiões apresentaram maior utilização da máscara pela população em geral e como isso afetou o número de contágios.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por nos guiar durante todo o desenvolvimento do trabalho com forças e saúde mesmo nesse momento difícil. Agradecemos também a nossa orientadora Edyene Cely que nos engajou e auxiliou durante todo o desenvolvimento do projeto.

## DECLARAÇÃO DE AUTORIA

Os autores confirmam que são as únicas pessoas responsáveis pela autoria deste trabalho e que todo o material que foi incluído aqui como parte do presente artigo é de propriedade (e autoria) dos autores ou tem a permissão dos proprietários para serem incluídos aqui.

## REFERÊNCIAS

[1] Ragav Venkatesan, Baoxin Li. **Convolutional Neural Networks in Visual Computing: A Concise Guide**. Taylor & Francis Group, 2018.

[2] W. Bu, J. Xiao, C. Zhou, M. Yang and C. Peng, “**A cascade framework for masked face detection**” 2017 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), Ningbo, 2017, pp. 458-462, doi: 10.1109/ICCIS.2017.8274819.

[3] Zhongyuan Wang, Guangcheng Wang, Baojin Huang, Zhangyang Xiong, Qi Hong, Hao Wu, Peng Yi, Kui Jiang, Nanxi Wang, Yingjiao Pei, Heling Chen, Yu Miao, Zhibing Huang, Jinbi Liang. “**Masked Face Recognition Dataset and Application**” Publicado no ArXiv abs / 2003.09093. 23 de março de 2020.

[4] Gustavo Hwu Lee. **Aprendizado De Máquina Profundo Na Análise De Segmentação De Clientes**; Tese de graduação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2018.

## ANÁLISE DE DESEMPENHO MECÂNICO DE PLACAS A PARTIR DE MÉTODOS APROXIMADOS

*Data de aceite: 02/08/2021*

*Data de submissão: 05/05/2021*

### **Gabriel de Bessa Spínola**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Natal – RN  
<http://lattes.cnpq.br/0584338458160579>

### **Edmilson Lira Madureira**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Natal – RN  
<http://lattes.cnpq.br/0666185389012179>

### **Eduardo Morais de Medeiros**

Universidade Federal de Campina Grande  
Natal – RN  
<http://lattes.cnpq.br/7696115928204611>

**RESUMO:** Devido à falta de consenso entre os diversos modelos aplicados à avaliação de seus esforços, o projeto das lajes representa uma tarefa de complexidade razoável. A disponibilidade de softwares de alto desempenho permite a simulação de seu desempenho mecânico a partir do conceito de placa contínua. Apesar de sua grande aceitabilidade, os resultados obtidos a partir de tal procedimento estão longe da realidade, uma vez que o domínio do conhecimento do comportamento mecânico do concreto ainda não atingiu a plenitude. A validação dos softwares pode ser realizada utilizando procedimentos simplificados adotando-se o cálculo manual ou pequenos algoritmos. Tais tipos de abordagens são úteis, inclusive,

como recursos de projeto para unidades construtivas mais modestas, ou seja, edifícios residenciais ou pequenas estruturas comerciais e industriais. A Teoria das Placas Delgadas é aplicada a corpos sólidos compostos por material linear, elástico e homogêneo, cuja espessura é inferior às suas demais dimensões. Algumas soluções da Equação Diferencial derivada do referido modelo, foram propostas por Navier e por Levi. O objetivo deste trabalho é a análise do desempenho mecânico de lajes de concreto armado, apoiadas em grupo de vigas de alta rigidez, a partir da Teoria das Placas Delgadas, considerando as soluções propostas por Navier e por Levi. Os resultados obtidos revelaram que, mesmo para os casos envolvendo cargas e condições de bordo simétricas, o momento fletor máximo positivo na direção “y” ocorre em um ponto desviado do centro da placa.

**PALAVRAS - CHAVE:** Concreto Armado, Placas, Desempenho Mecânico, Análise.

### MECHANICAL PERFORMANCE ANALYSIS OF PLATES FROM APPROXIMATED METHOD

**ABSTRACT:** Due to the lack of consensus among the several models applied to its internal forces assessment, the design of slabs represents a task of reasonable complexity. The availability of high-performance software allows its mechanical performance simulation from the continuous plate concept. Despite its great acceptability the results obtained from such procedure are far from the reality since the knowledge domain of the mechanical behavior of concrete yet did not reached fullness. The validation of software's

can be performed by using simplified procedures adopting in hand calculation or small algorithms. Such kinds of approaches are useful, including, as design resources for more modest constructive units, namely, residential buildings or small commercial and industrial structures. The Thin Plates Theory is applied to solid bodies composed by linear, elastic and homogeneous material, whose thickness is inferior to its remaining dimensions. Some solutions of the Differential Equation, derived from the referring Model, were proposed by Navier and by Levi. The aim of this work is the analysis of mechanical performance of reinforced concrete slabs, layered upon a group of high stiffness beams, from the Thin Plates Theory considering the solutions proposed by Navier and by Levi. The obtained results have revealed that, even for that cases involving symmetrical loading and edge conditions, the maximum bend moment in the “y” direction occur at a point deviated from the center of the plate.

**KEYWORDS:** Reinforced concrete, Plates, Mechanical performance, Analysis.

## 1 | INTRODUCTION

The Grid Method, The Marcus Method and the Thin Plate Theory represent models suitable to perform the analysis of displacements and internal Forces. Due to the lack of consensus of these models that has endured until nowadays, the reinforced concrete slabs design involves approach tasks of reasonable complexity.

The availability of high-performance computational codes allows the slabs mechanical performance simulation from plate elements and the assessment of the mechanical performance parameters from the consideration of their continuity. Nevertheless, the resolution carried out in this way is far from culminating into irrefutable results since the knowledge domain of the concrete behavioral response is yet to achieve fullness.

The validating operation of the obtained results referring to slabs analysis from automatic codes can be performed from the adoption of suitable simplified procedures for in hand calculation or small algorithms implementation.

Such kind of simplified approaches are useful, including, as design resources of projects of more modest constructive units, namely, buildings to support residences or commercial and industrial activities of low magnitude.

The Kirchhoff’s model, which culminates in the Thin Plates Theory, is applied to those cases involving structural solids composed by linear elastic homogeneous and isotropic material, of thickness that is very inferior to its dimensions in plant, for which, including, the Bernoulli hypothesis is valid.

A partial differential equation, namely, the Differential Equation of the Plates, is associated to the Kirchhoff’s Model, whose solution, for some special cases, was proposed by Navier and by Levi.

The aim of this work is the analysis of the mechanical performance of reinforced concrete slabs from the Thin Plates Theory considering the solutions proposed by Navier and by Levi.

Such analysis proceeding is applied to models consisting by laminar structures layered on a group of high stiffness beams that can be regarded as no displaceable supports.

The structural members defined according to this mode are diversified into a set of cases distinguished from each to another by geometric characteristics, taking into account, specially, the establishment of, at least, three different ratios between the span lengths, in the two principal coordinate directions.

## 2 I MODELLING

According to the Classical Theory of the Elasticity, the bending stiffness of plates is written in the form:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (1)$$

for which the E and  $\nu$  parameters represent, respectively, the modulus of elasticity and the Poisson's ratio of the plate constituent material, while the h parameter is the plate thickness.

For the plate shown in Fig. 1.a, its deformed shape, Fig. 1.b, is described by the Lagrange Differential Equation, which stems from the Kirchhoff's Thin Plates theory, and is of the form presented by Woinowsky-Krieger and Timoshenko [1], and by Szilard [2], expressed by:

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = \frac{p_z(x, y)}{D} \quad (2)$$

since  $p_z(x, y)$  is the load distribution function over the surface wide area of the plate.

According Szilard [2], the solution proposed by Navier for such differential equation, applied, solely, to plates that are simply supported along its all four edges, Figure 2.a, is expressed by a double trigonometric series, as presented in Eq.(3).

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} W_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right) \quad (3)$$

such that, the " $L_x$ " and " $L_y$ " parameters, are the span lengths over the "x" and "y" coordinate directions, respectively. Equation (3) is valid if it is possible to approximate the transverse load for the trigonometric and also double series:

$$p_z(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} P_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right) \quad (4)$$

According to the Fourier's Middle Period Series concept, the " $P_{mn}$ " parameter is the, so called, Fourier's Coefficient and it is obtained from the Euler's form:

$$P_{mn} = \frac{4}{L_x L_y} \int_0^{L_y} \int_0^{L_x} p_z(x, y) \sin\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right) dx dy \quad (5)$$

Once replacing Eq. (3) and Eq. (4) into Eq. (2) and promoting relevant algebraic transformations, it may result:

$$P_{mn} = \left[ \left(\frac{m}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_y}\right)^2 \right]^2 \pi^4 D W_{mn} \quad (6)$$

and,

$$W_{mn} = \frac{P_{mn}}{\left[ \left(\frac{m}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_y}\right)^2 \right]^2 \pi^4 D} \quad (7)$$

If Eq (7) is considered in Eq. (3) this later equation assumes the form of the relationship:

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{P_{mn}}{\left[ \left(\frac{m}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_y}\right)^2 \right]^2 \pi^4 D} \sin\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right) \quad (8)$$

If the load is uniformly distributed and p is its magnitude, then:

$$P_{mn} = \frac{16p}{\pi^2 mn} \text{ and } W_{mn} = \frac{16p}{\left[ \left(\frac{m}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_y}\right)^2 \right]^2 \pi^6 mn D}, m, n = 1, 3, 5 \quad (9)$$

The bend moments, Fig. 1.c, are expressed, according to the Kirchhoff's Theory from de mathematical sentences:

$$M_x = -D \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \text{ e } M_y = -D \left( \nu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \quad (10)$$

while the twisting moments are described according to the equation:

$$M_{xy} = -(1 - \nu) D \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \quad (11)$$

If Eq. 8 is replaced into Eq. 10 and Eq. 11, it may be obtained:

$$M_x = \pi^2 D \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left(\frac{m}{L_x}\right)^2 + \nu \left(\frac{n}{L_y}\right)^2 \right] W_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right) \quad (12)$$

$$M_y = \pi^2 D \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \nu \left(\frac{m}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_y}\right)^2 \right] W_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right) \quad (13)$$

and:

$$M_{xy} = M_{yx} = -(1 - \nu)\pi^2 D \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{mn}{L_x L_y} W_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right) \quad (14)$$

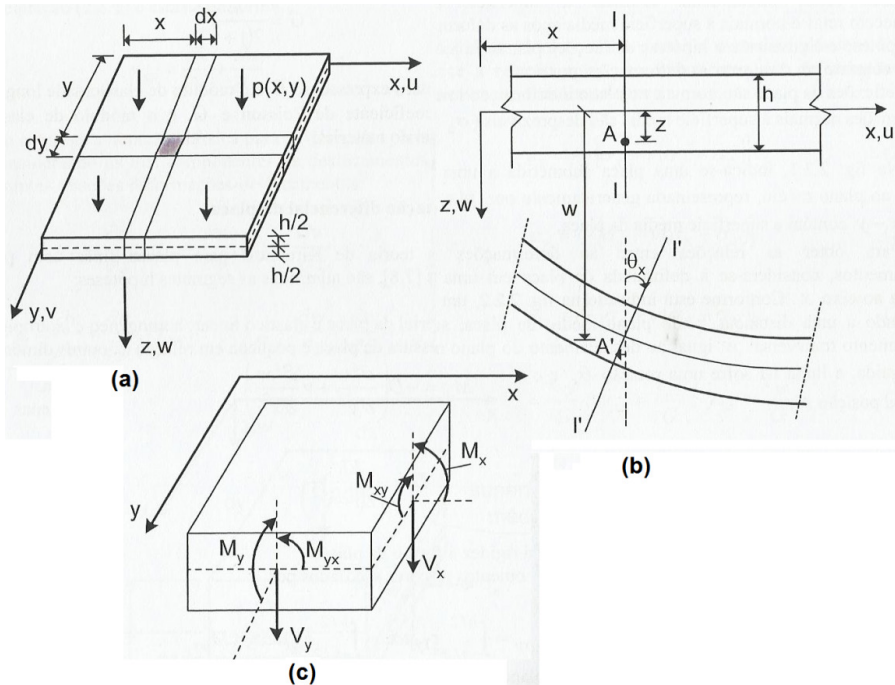


Figure 1. a) Slab; b) Deformed shape; c) Internal forces

As it was presented by Szilard [2], the solution of the Differential Equation of the Plates proposed by Levi, applied to slabs presenting the boundary conditions indicating in Fig. 2.a is of the form:

$$\omega(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \left[ A_m \cosh\left(\frac{m\pi x}{L_y}\right) + B_m \frac{m\pi x}{L_y} \sinh\left(\frac{m\pi x}{L_y}\right) + W_m \right] \sin\left(\frac{m\pi y}{L_y}\right) \quad (15)$$

For which:

$$W_m = \frac{4L_y^4}{(m\pi)^5} \frac{p}{D}; \alpha_m = \frac{m\pi L_x}{2L_y}; B_m = \frac{W_m}{2\cosh(\alpha_m)} \text{ and } A_m = -\frac{B_m \alpha_m \sinh(\alpha_m) + W_m}{\cosh(\alpha_m)}$$



Replacing Eq. (15) into Eq. (10) and Eq. (11), it may result:

$$\begin{aligned}
 & M_x \\
 & = D \frac{\pi^2}{L_x^2} \sum_{m=1}^{\infty} m^2 \left\{ [(1-\nu)A_m - 2\nu B_m] \cosh\left(\frac{m\pi x}{L_y}\right) + (1-\nu)B_m \frac{m\pi x}{L_y} \operatorname{senh}\left(\frac{m\pi x}{L_y}\right) \right. \\
 & \left. + W_m \right\} \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi y}{L_y}\right) \quad (16)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & M_y \\
 & = D \frac{\pi^2}{L_x^2} \sum_{m=1}^{\infty} m^2 \left\{ [(\nu-1)A_m - 2B_m] \cosh\left(\frac{m\pi x}{L_y}\right) + (\nu-1)B_m \frac{m\pi x}{L_y} \operatorname{senh}\left(\frac{m\pi x}{L_y}\right) \right. \\
 & \left. + \nu W_m \right\} \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi y}{L_y}\right) \quad (17)
 \end{aligned}$$

and:

$$\begin{aligned}
 & M_{xy} \\
 & = -(1-\nu) \frac{\pi^2 D}{L_x^2} \sum_{m=1}^{\infty} m^2 \left[ (A_m + B_m) \operatorname{senh}\left(\frac{m\pi x}{L_y}\right) + B_m \frac{m\pi x}{L_y} \cosh\left(\frac{m\pi x}{L_y}\right) \right] \\
 & \cdot \cos\left(\frac{m\pi y}{L_y}\right) \quad (18)
 \end{aligned}$$

As it is described by Szilard [2], Eq. 15, 16, 17 and 18 may be applied, too, for the structural analysis of slabs presenting the boundary conditions indicating in Fig. 2.b, since it is considered that:

$$B_m = \frac{W_m \operatorname{senh}(\alpha_m)}{\alpha_m + \operatorname{senh}(\alpha_m) \operatorname{cosh}(\alpha_m)} \quad (19)$$

For slabs presenting the boundary conditions illustrated on Fig. 2.c, the solution of the Differential Equation of the Plates proposed by Levi is of the form:

$$\begin{aligned}
 & \omega(x, y) \\
 & = \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \left[ A_m + D_m \frac{m\pi x}{L_y} \right] \cosh\left(\frac{m\pi x}{L_y}\right) + \left[ B_m \frac{m\pi x}{L_y} + C_m \right] \operatorname{senh}\left(\frac{m\pi x}{L_y}\right) \right. \\
 & \left. + W_m \right\} \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi y}{L_y}\right) \quad (20)
 \end{aligned}$$

since that, the “A<sub>m</sub>”, “B<sub>m</sub>”, “C<sub>m</sub>” and “D<sub>m</sub>” parameters are obtained from the set of equations 21, 22, 23 and 24, solution.

$$\begin{aligned} & \cosh(\alpha_m)A_m + \alpha_m \sinh(\alpha_m)B_m - \sinh(\alpha_m)C_m - \alpha_m \cosh(\alpha_m)D_m \\ & = -W_m \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} & \cosh(\alpha_m)A_m + \alpha_m \sinh(\alpha_m)B_m + \sinh(\alpha_m)C_m + \alpha_m \cosh(\alpha_m)D_m \\ & = -W_m \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} & \sinh(\alpha_m)A_m + [\sinh(\alpha_m) + \alpha_m \cosh(\alpha_m)]B_m - \cosh(\alpha_m)C_m \\ & - [\cosh(\alpha_m) + \alpha_m \sinh(\alpha_m)]D_m \\ & = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} & \cosh(\alpha_m)A_m + [2\cosh(\alpha_m) + \alpha_m \sinh(\alpha_m)]B_m + \sinh(\alpha_m)C_m \\ & + [2\sinh(\alpha_m) + \alpha_m \cosh(\alpha_m)]D_m \\ & = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

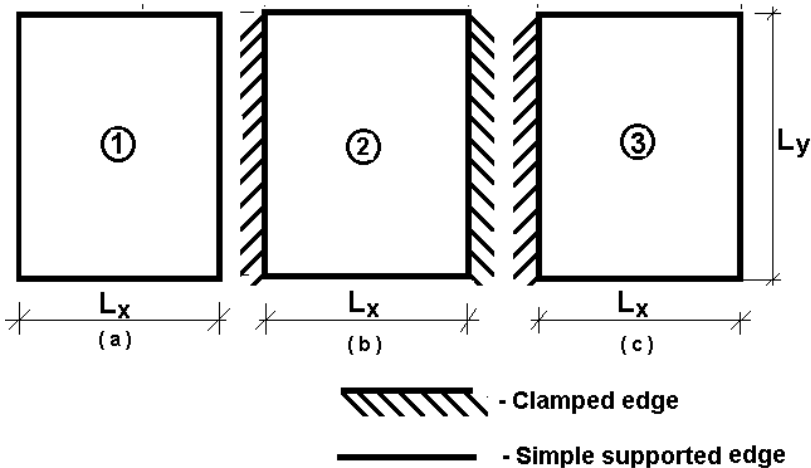


Figure 2. Plates boundary conditions

The bending and the twisting moments may be obtained by Eq. 10 and Eq. 11, respectively.

The tables prepared by Barés, presented by Araújo [3], exhibit dimensionless parameters in terms of displacement and internal forces and are determined from the theory of plates, which should be employed for the final displacements and internal forces calculations.

In the other hand, in the Grid Method formulation, the plates are discretized in both directions from finite unitary width tracks “x” and “y”, and any interaction between two adjacent tracks is disregarded, highlighting the mechanical performance of two tracks each of them distributed along every coordinate direction and intersecting themselves at the center of the referring structural member.

The tracks so defined are treated as beams whose height is equal to the slab thickness and the continuity of the set of tracks is established, merely, from the condition that the vertical displacements at the center of their spans are equal to both beams that represent the perpendicular tracks intersecting at the referring point. The Mechanics of Solid Materials postulates are applied to derive the equations that must be used to determine the displacements and internal forces. The twisting stiffness may be considered, in an approximate mode, from which the positive calculated moment magnitudes are reduced by the adoption of the coefficients proposed by Marcus, presented in Araújo [3].

### 3 | COMPUTATIONAL SUPPORT

In order to fulfill the objective proposed in this work, computational software was developed in automatic language C++, drafted upon the formulation affects to the grid method and those one referring to the solutions that were proposed by Navier and by Lévi. A computational image generator, elaborated in Delphi, called PROJECT 2, Madureira and Silva [5], including, was used.

### 4 | COMPUTATIONAL PROGRAM VALIDATION

The C++ computational program, characterized on the number 3 section of this paper, will be validated, naturally, in the course of this text development since the relevant subject of this work is a comparative structural analysis, based on several approximated models.

### 5 | ANALYZED SPECIMENS

The analyzed specimens are laminar structural members cast by C 30 concrete, whose relevant physical parameters, namely, the Young's modulus and the Poisson's ratio, were, properly, evaluated in accordance to the NBR 6118/2014, Design of Structural Concrete – Procedure [6].

The analysis subject of this work will be performed upon slabs whose span length in the “x” coordinate direction is fixed as “ $L_x = 4,00$  m”, considering a set of cases differentiated among themselves by the boundary conditions illustrated in Fig. 2 and by their span lengths in the “y” coordinate direction, “ $L_y$ ”.

The analyzed specimens are submitted to uniformly distributed load normal to its middle plan.

The works reported in this paper were carried out from the consideration of two distinct stages of analysis. At the first one, 11 (eleven) different span lengths in the “y” coordinate direction are considered, in order to establish the different and gradual values for the ratio “ $\lambda = L_y/L_x$ ”, namely: 1.0; 1.1; 1.2; 1.3; 1.4; 1.5; 1.6; 1.7; 1.8; 1.9 and 2.0. It was determined, therefore, the dimensionless parameters values for the bending moments

over both coordinate directions and for the transverse displacement, to allow the trend analysis. At the second stage of analysis, it was performed the works on slabs presenting, alternatively, three values for the span length in the “y” coordinate direction, namely: “ $L_y = 4.00$  m”; “ $L_y = 5.00$  m”; and, “ $L_y = 6.00$  m”, and the relevant results comparison were established, and then the displacements and the moments variation fields along the whole area of the slabs were drafted.

## 6 | RESULTS

From the obtained results referring to the first stage of analysis, the folders of Fig. 3, 4, 5 and 6 were drafted, and, from such figures it may be noted close agreement, for the number one case, between the Lévi solution and the Navier double trigonometric series. In addition, it may be observed that the dimensionless parameters extracted from the Barés tables, agree in a fine approach with its corresponding results obtained by the Lévi solution.

According to the curves of Fig. 3 and the Table 1, the transverse displacement magnitude on the slab center, obtained from the Thin Plates Theory, proved to be smaller than those ones determined from the Grids Method as already reported by Silva e Cashell [7] and by Madureira et al [8].

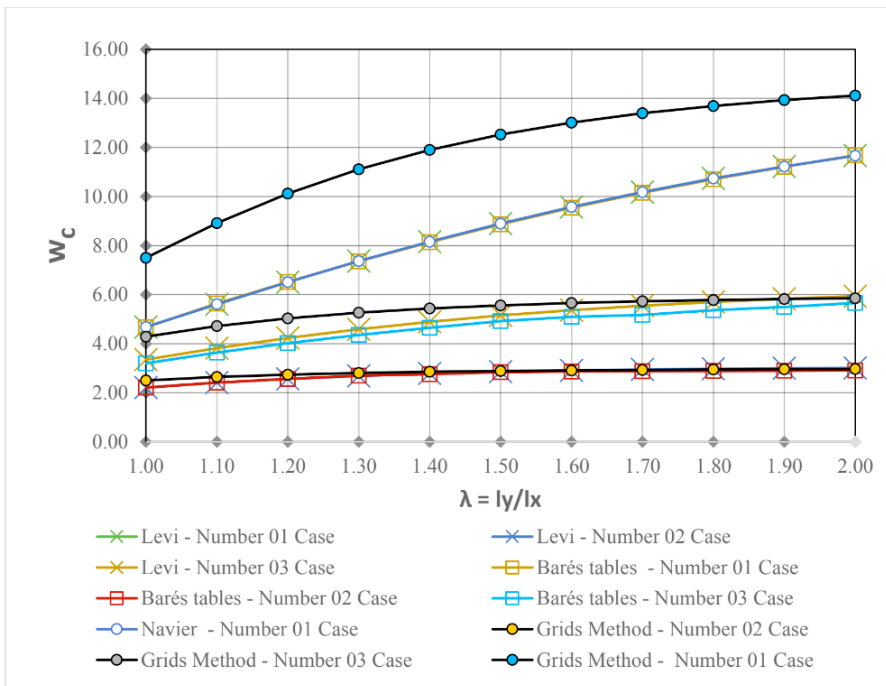


Figure 3. Transverse displacement dimensionless parameters

On the other hand, the bending moments at the center of slabs, over both coordinate directions, calculated from the Grid-Marcus Method, have presented smaller magnitudes than those ones referred in the upper paragraph, Fig. 4 and 5, while the results obtained from Grids Method present the highest one, Tables 2 and 3.

The differences among the displacement magnitudes reported above are as smaller as greater the ratio between the span lengths along the two coordinate directions, because, for the case number one, it was reduced from 37%, for  $\lambda = 1.0$ , to 17% for  $\lambda = 2.0$ , Table 1.

Displacements – $w_c$						
	Number 01 Case		Number 02 Case		Number 03 Case	
$\lambda$	P	G	P	G	P	G
1.00	4.68	7.50	2.21	2.50	3.35	4.29
1.10	5.61	8.91	2.41	2.64	3.82	4.71
1.20	6.51	10.12	2.56	2.74	4.23	5.03
1.30	7.36	11.11	2.69	2.80	4.59	5.26
1.40	8.16	11.90	2.78	2.85	4.89	5.43
1.50	8.90	12.53	2.85	2.89	5.15	5.56
1.60	9.57	13.01	2.91	2.91	5.37	5.65
1.70	10.18	13.40	2.95	2.93	5.55	5.73
1.80	10.73	13.70	2.97	2.94	5.70	5.78
1.90	11.23	13.93	2.99	2.95	5.83	5.82
2.00	11.67	14.12	3.01	2.96	5.93	5.85

P – Plates Theory Data; G – Grid Method Data

Table 1. Displacements dimensionless parameters

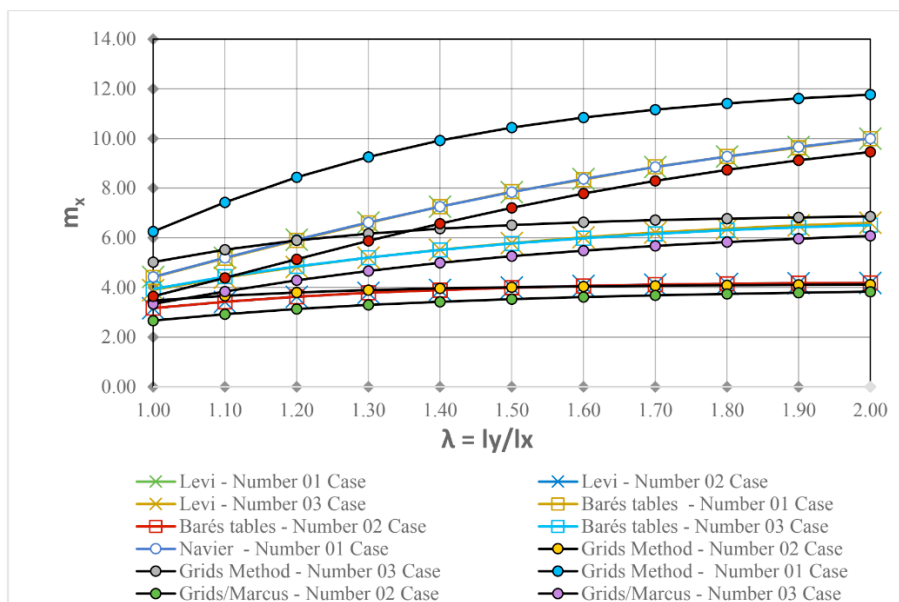


Figure 4. Dimensionless positive bending moments along the “x” direction

The differences involving the magnitudes of the positive bending moments in the “x” direction showed similar trend, ranging from 17% to 5%, if the results from the Theory of Plates and those ones from Grid-Marcus Method are compared, and, ranging from 29% to 15%, if the results from the Theory of Plates and that ones from Grid Method are compared, Table 2.

Bending Moment - $M_x$									
$\lambda$	Number 01 Case			Number 02 Case			Number 03 Case		
	P	G	GM	P	G	GM	P	G	GM
1.00	4.42	6.25	3.65	3.17	3.47	2.67	3.90	5.02	3.34
1.10	5.19	7.43	4.39	3.43	3.67	2.93	4.40	5.52	3.84
1.20	5.93	8.43	5.14	3.63	3.80	3.13	4.83	5.90	4.29
1.30	6.62	9.26	5.88	3.79	3.89	3.30	5.20	6.17	4.67
1.40	7.26	9.92	6.57	3.91	3.96	3.43	5.52	6.37	4.99
1.50	7.84	10.44	7.21	4.00	4.01	3.53	5.79	6.52	5.26
1.60	8.37	10.85	7.78	4.07	4.04	3.62	6.02	6.63	5.48
1.70	8.85	11.16	8.29	4.12	4.07	3.69	6.21	6.71	5.67
1.80	9.28	11.41	8.73	4.15	4.09	3.74	6.37	6.77	5.83
1.90	9.66	11.61	9.12	4.17	4.10	3.79	6.50	6.82	5.96
2.00	10.00	11.76	9.46	4.19	4.12	3.83	6.61	6.86	6.08

P – Plates Theory Data; G – Grid Method Data; Grid-Marcus Procedure Data

Table 2. Positive bending moment in “x” coordinate direction dimensionless parameters

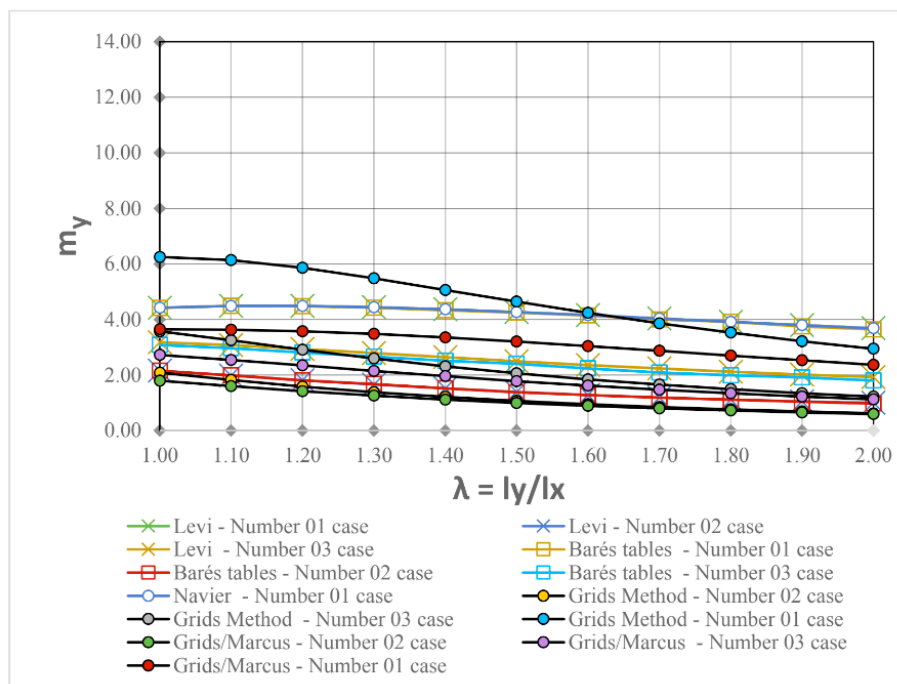


Figure 5. Dimensionless positive bending moments along the “y” direction

The differences referring to the positive bending moments over the “y” coordinate direction, seem have presented the same trendy reported above in this paragraph, if the results from the Theory of Plates and that ones from the Grid Method are compared, decreasing from 29% to 15%. However, it may be observed that, at first, it occurs reduction in such difference if the ratio between the span lengths increases from  $\lambda = 1.0$  up to  $\lambda = 1.6$  and, after that, the difference tends to increase. On the other hand, if the, if the results from the Theory of Plates and that ones from Grid/Marcus Method are compared, that difference presented diverse behavior, therefore, they increased from 24% up to 36%, since the “ $\lambda$ ” values ranged from 1.0 up to 2.0, Table 3.

Bending Moment - $M_y$									
$\lambda$	Number 01 Case			Number 02 Case			Number 03 Case		
	P	G	GM	P	G	GM	P	G	GM
1.00	4.42	6.25	3.65	2.15	2.08	1.79	3.18	3.57	2.72
1.10	4.49	6.14	3.63	1.98	1.82	1.60	3.07	3.25	2.54
1.20	4.49	5.86	3.57	1.81	1.58	1.42	2.93	2.91	2.35
1.30	4.44	5.48	3.48	1.66	1.38	1.26	2.79	2.60	2.15
1.40	4.36	5.06	3.35	1.51	1.21	1.11	2.64	2.31	1.95
1.50	4.26	4.64	3.20	1.39	1.07	0.99	2.49	2.06	1.78
1.60	4.15	4.24	3.04	1.28	0.95	0.89	2.36	1.84	1.61
1.70	4.03	3.86	2.87	1.19	0.84	0.80	2.23	1.65	1.47
1.80	3.91	3.52	2.70	1.11	0.76	0.72	2.12	1.49	1.34
1.90	3.79	3.22	2.53	1.05	0.68	0.65	2.02	1.34	1.22
2.00	3.68	2.94	2.36	1.00	0.62	0.59	1.92	1.22	1.12

P – Plates Theory Data; G – Grid Method Data; GM - Grid-Marcus Procedure Data

Table 3. Positive bending moment in “y” coordinate direction dimensionless parameters

For the cases 02 and 03 the behavioral trend was the same of that one related above in this text and was differentiated from the former, solely by the recorded values, Tables 1, 2 and 3. Nevertheless, it is worthwhile to highlight that the differences among the obtained values from Marcus-Grid Method and those ones calculated from the Theory of Plates, have resulted, significantly, smaller, and such differences was as smaller as greater was the slab bending stiffness as it may be seen in Figures 4, 5 and 6, and, in Tables 1, 2 and 3.

The acquired results reveal a satisfactory agreement among all the adopted data sources for the magnitude of the negative bending moments “ $M_{x_e}$ ”, as it may be note in Fig. 6.

The results corresponding to the second stage of analysis, for the slabs whose boundary conditions are illustrated in Fig. 2.a, obtained from the Navier solution, exhibit a good agreement with those ones calculated from the Lévi’s trigonometric series. Such a numeric results are showed in Tables 4 and 5.

For the case number one, according to the results corresponding to the span length over the “y” coordinate direction “ $L_y = 6,00$  m”, specially, once the equilibrium configuration

referring to the loading having been reached, the field of the displacements, of the bending moments and of the twisting moments have established themselves as the feature shown in Fig. 7. For the remaining cases such parameters have presented magnitude distribution in a similar way, differentiated, however, among themselves by their numerical values.

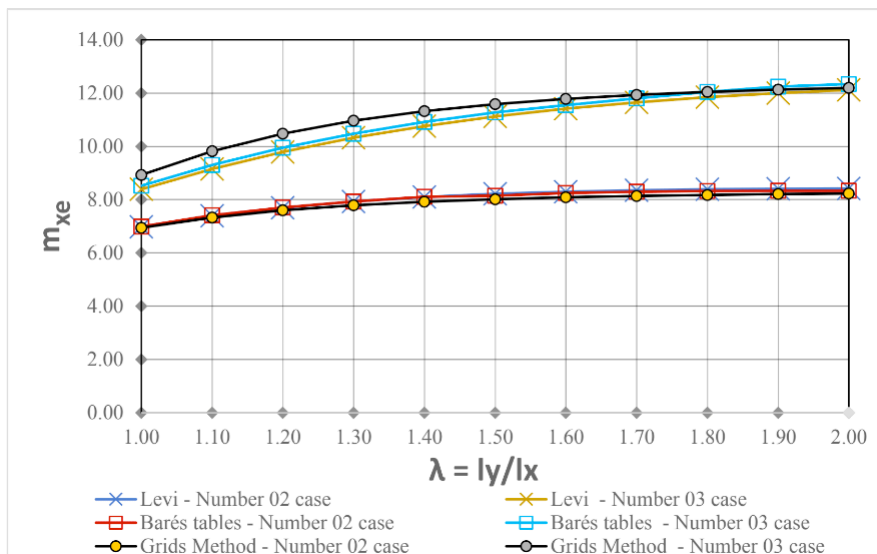


Figure 6. Dimensionless negative bending moments

X (m)	Transverse Displacements(mm)			Bending Moments $M_x$ (kNm/m)		
	$L_y = 4.0$ m	$L_y = 5.0$ m	$L_y = 6.0$ m	$L_y = 4.0$ m	$L_y = 5.0$ m	$L_y = 6.0$ m
0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.50	2.6	5.0	6.7	7.5	9.8	11.8
1.00	4.7	9.1	12.2	11.6	15.9	19.4
1.50	6.0	11.8	15.8	13.6	19.1	23.7
2.00	6.5	12.7	17.0	14.1	20.1	25.1

Table 4. Bending moments at “x” direction and transverse displacements – number 1 case

X (m)	Bending Moments $M_y$ (kNm/m)			Twisting Moments $M_{xy}$ (kNm/m)		
	$L_y = 4.0$ m	$L_y = 5.0$ m	$L_y = 6.0$ m	$L_y = 4.0$ m	$L_y = 5.0$ m	$L_y = 6.0$ m
0.00	0.0	0.0	0.0	11.9	14.3	15.7
0.50	7.5	7.3	7.1	10.3	12.8	14.3
1.00	11.6	11.2	10.8	7.3	10.0	11.6
1.50	13.6	13.2	12.6	3.8	6.8	8.7
2.00	14.1	14.1	13.3	0.0	3.4	5.7
2.50	***	14.3	13.6	***	0.0	2.8
3.00	***	***	13.6	***	***	0.0

Table 5. Bending Moments at “y” Direction and Twisting Moments – number 1 case



It may be observed that, in a general way, the fields object of this paper, Fig. 7 and Fig. 8, present shapes according to the traditional knowledge state about the theme approached.

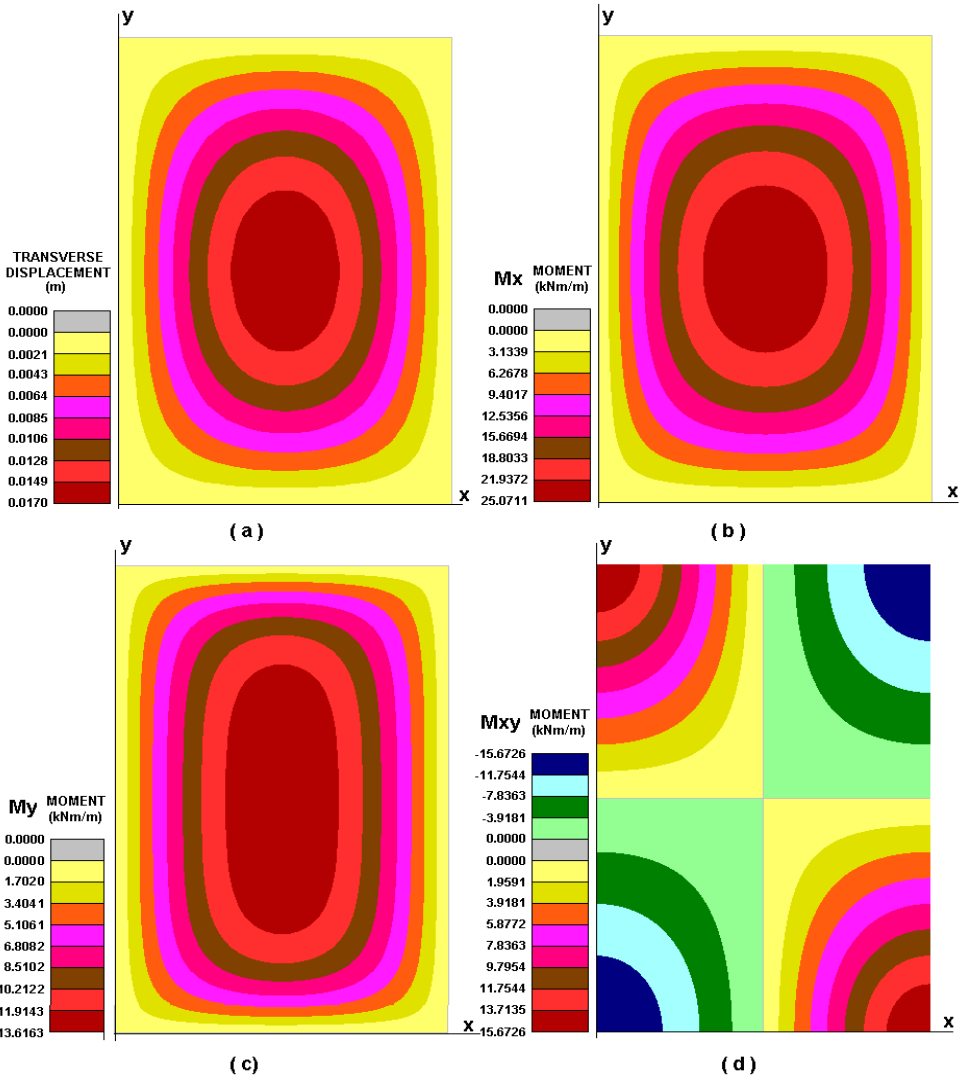


Figure 7. Displacements and Internal Forces Fields – Number one case – 4.00 m x 6.00 m Plate

The examination of the field of displacements of the Fig. 8 may induce the wrong idea that on the little width track near the clamped edge of the slab, namely, the track colored by grey chromatic nuance, the transverse displacements would be null. Nevertheless, that fact occurs because of the adopted precision by the algorithm results that was used in the numerical mapping to the image generation of the referring field.

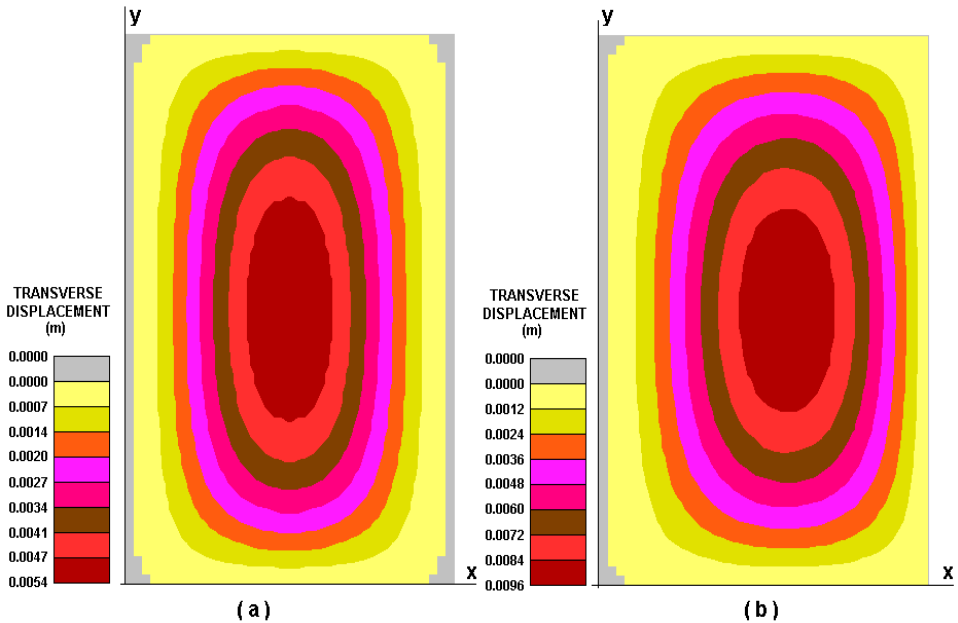


Figure 8. Displacements Fields: a. number 2 case; b. number 3 case

It may be noted that, the Barés tables data, refer themselves to the “ $M_y$ ” bending moment, correspond to that point of the slab placed at the middle span over the “ $y$ ” coordinate direction, points C and C’ in Fig. 9. However, for the cases involving clamped slabs, if the ratio between the span lengths assumes the highest values, the maximum bending moment over the “ $y$ ” coordinate direction occurs at points D and D’ deviated from that ones, Fig. 9.

Thereby, if “ $L_y = 6.00$  m”, the bending moment magnitude for the number 2 case, in the point C vicinity, is “ $M_y = 1.38$  kNm/m”, while its maximum value is about “ $M_y = 1.78$  kNm/m”, corresponding to a difference by approximately 29%. For the number 3 case, in the other hand, the bending moment magnitude close to the point C’, is “ $M_y = 2.40$  kNm/m” while “ $M_y = 2.61$  kNm/m” is its maximum value, corresponding to a difference by the order of 9%.

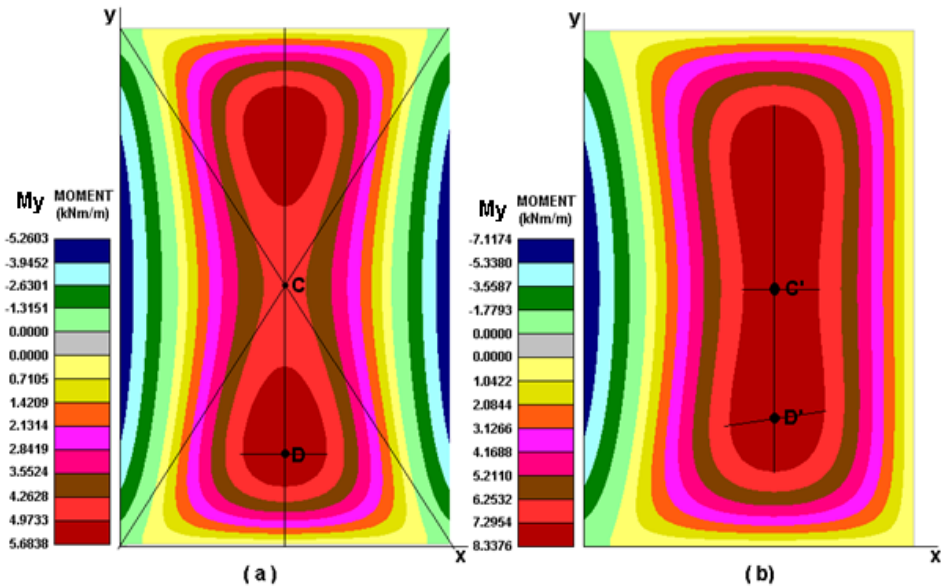


Figure 9.  $M_y$  Bending Moment Fields: a. number 2 case; b. number 3 case

## 71 CONCLUSIONS

The mechanical performance comparative analysis of slabs from the Kirchhoff's Theory, from the Grids Method, from the Marcus Method and from the Barés Table is carried out in this paper.

The analysis was performed upon three different types of slabs according its boundary conditions, namely, simple supported along its all four edge, clamped along one edge and simple supported in the remain ones, and, clamped along two opposite edges and simple supported along the others ones.

At first, it was considered 11 (eleven) different values for the ratio involving the span lengths along the two coordinate directions, namely, 1.0; 1.1; 1.2; 1.3; 1.4; 1.5; 1.6; 1.7; 1.8; 1.9 and 2.0, and then the dimensionless parameters referring to displacements and internal forces were calculated.

On a second stage of this work, for the same boundary condition already characterized above in these conclusions, the analysis from the consideration of three different span lengths in the "y" direction, namely: " $L_y = 4.00$  m"; " $L_y = 5.00$  m"; and " $L_y = 6.00$  m" was performed.

At the first stage of the analysis, it was found from the obtained results a close agreement between the Barés tables data and those results determined from the Kirchhoff's Theory.

The referring results also revealed that the displacement magnitudes and the positive bending moments calculated from the Grids Method have presented values greater than

those one determined from the Kirchhoff's Theory, because the Grids Method neglects the shear stiffness.

The differences between the displacement magnitudes reported above are as smaller as greater the ratio between the span lengths along the two coordinate directions and are too considerable if one paying attention to the reality that the displacement magnitudes by time, according to the Brazilian technical standard NBR 6118/2014 recommendation, are, already overrated.

In addition, it was observed that, the positive bending moments determined from the Grid-Marcus Method have presented the smallest values among those results obtained from all models that are being considered in this paper.

The differences referring in the last two paragraphs were as smaller as greater was the ratio between the span lengths and were as greater as smaller the slab flexure stiffness.

Due to the bending moment magnitude reduction in the "x" direction promoted by the plastic fitting process, the difference in their magnitude must be decreased, and then, the Marcus's Method may be considered suitable for their values determination.

On the other hand, the bending moment magnitude increase in the "y" direction, caused by the same process referred in the last paragraph, makes the difference mentioned above in this text higher, revealing, consequently, the needing for the Marcus's adjuster coefficients evaluation improvement.

The acquired results reveal a satisfactory agreement among all the adopted data sources on regard to the negative bending moments.

From the fields images, whose generation were the subject of the second stage of the analysis carried out in this paper, it may be observed a good agreement between the Navier's solution and the results obtained by the Lévi's series.

In addition, it may be observed that, the Barés table present the value of the bending moment in the "y" direction for a point placed on the center of the slab while for the number 02 and number 03 cases, the maximum values of such internal force, according to Lévi's solution, occurs at a deviate region apart from that point.

The resulting difference between the bending moment magnitude in the "y" direction obtained by Barés table and its corresponding maximum values calculated from Lévi's solution, may reach up to 29%, so that, if the design engineer uses the Barés tables data to perform design of slabs, such a procedure may promote the material failure risk.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This report is part of a research work on the numerical simulation of the mechanical performance of slabs supported by the Pró-Reitoria de Pesquisa of the Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN. This support is gratefully acknowledged.

## REFERENCES

- [1] S. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger. *Theory of Plates and Shells*. 2ª Edição. McGraw-Hill, Londres, 1989.
- [2] R. Szilard. *Theories and Applications of Plate Analysis*. John Willey & Sons, Inc., 2004.
- [3] J. M. Araújo. *Curso de Concreto Armado*. Volume 2. Editora Dunas. Rio Grande, 2014.
- [4] R. D. Cook, D. S. Malkus, and M. E. Plesha. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. John Wiley e Sons. Nova York, 1989.
- [5] E. L. Madureira and A. L. A. Silva. *Project1 – Programa para visualização de campos de tensões resultantes de análises não lineares de modelos bidimensionais de elementos finitos*. Versão 1.0, Rio Grande do Norte: DEC/UFRN, 2013.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6118/2014. Projeto de Estruturas de Concreto Armado - Procedimento*, 2014.
- [7] A. L. A. Silva and K. Cashell. *Ultimate Behaviour in Composite Floor Slabs*. Summer Project for Study Abroad Programmes. Londres. Brunel University, 2015.
- [8] E. L. Madureira, E. M. Medeiros and A. L. A. Silva. *Análise Numérica Comparativa de Modelos Aplicáveis ao Projeto de Lajes de Concreto*. 59 Congresso Brasileiro do Concreto. Bento Gonçalves, 2017.

## M-LEARNING E VIRTUAL REALITY NO ENSINO TÉCNICO DE AGROPECUÁRIA

*Data de aceite: 02/08/2021*

*Data de submissão: 06/07/2021*

### **Gabriel Pinheiro Compto**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia do Amazonas  
Tefé - Amazonas  
<http://lattes.cnpq.br/5432787843953143>

### **Jeconias Ferreira dos Santos**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia do Amazonas  
Manaus - Amazonas  
<http://lattes.cnpq.br/4701519063884910>

**RESUMO:** Esta pesquisa trata das potencialidades do M-Learning e Virtual Reality no curso técnico em Agropecuária, considerando que essas ferramentas tecnológicas podem potencializar o processo de ensino-aprendizagem na Amazônia. O objetivo desta pesquisa é contribuir para o processo de ensino-aprendizagem das disciplinas do curso técnico do ensino médio em Agropecuária, com os conceitos de M-Learning e Virtual Reality. A pesquisa evidenciou que o uso das TICs, em especial smartphones e Virtual Reality, pode ser inserido no processo ensino-aprendizagem do curso técnico do ensino médio em Agropecuária do Instituto Federal do Amazonas e que o aluno estando imerso em um ambiente virtual pode aprender a partir das interações de objetos dispostos.

**PALAVRAS-CHAVE:** M-Learning, Virtual Reality, TICs na Educação, Ensino técnico.

### M-LEARNING AND VIRTUAL REALITY IN AGRICULTURAL TECHNICAL EDUCATION

**ABSTRACT:** This research is about the potentialities of M-Learning and Virtual Reality in the technical course in Agricultural, considering that these technological tools can enhance the teaching-learning process in the Amazon. The object of this research is to contribute to the teaching-learning process of the subjects of the technical high school course in Agricultural, with the concepts of M-Learning and Virtual Reality. The research evidenced that the use of ICTs, in particular smartphones and Virtual Reality, can be placed in the teaching-learning process of the high school technical course in Agricultural at Federal Institute of Amazonas and that the student being immersed into a virtual environment can learn from the interactions of objects arranged.

**KEYWORDS:** M-Learning, Virtual Reality, ICTs in Education, Technical education.

## 1 | INTRODUÇÃO

As Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) estão inseridas em várias áreas da sociedade moderna, entre elas a educação. Vivemos em um mundo “conectado”, onde, a partir de um computador portátil na palma das mãos, é possível consultar uma infinidade de informações. Nesse contexto, está inserida a aprendizagem móvel, onde é possível atribuir ao aluno o papel de ator dinâmico no processo de ensino-aprendizagem.

Nesse sentido, no Plano do Curso

Técnico em Agropecuária na Forma Integrada do Instituto Federal do Amazonas (IFAM, 2015) tem como objetivo a oferta da educação profissional, considerando o avanço da tecnologia e a incorporação constante de novos métodos e processos de produção. Contudo, foi observado que o corpo docente não utiliza todas as ferramentas tecnológicas disponíveis no *Campus Tefé*, para o efetivo processo de ensino-aprendizagem nas aulas, uma vez que são poucos os professores que inserem TICs nos seus planos de ensino e que utilizam ferramentas adequadas para cada abordagem dos Componentes Curriculares.

As ferramentas tecnológicas podem potencializar o processo de ensino-aprendizagem na Amazônia, área geográfica onde está inserido o IFAM – *Campus Tefé*. Essa região com dimensões continentais abriga uma população que em sua grande maioria mora às margens dos rios, chamada de população ribeirinha.

Segundo dados da Avaliação do Curso Técnico em Agropecuária (IFAM, 2017), 77 (setenta e sete) alunos do Curso Técnico em Agropecuária do IFAM – *Campus Tefé* destacaram o fato de que há poucas visitas técnicas no período letivo, sendo que 31% consideraram “bom” o número de visitas técnicas; 22,5% consideraram “regular”; 16,9% consideraram “ótimo”; 12,7% consideraram “ruim”; 9,9% consideraram “péssimo” e 7% não souberam opinar.

Desta forma, este trabalho possui como hipótese a possibilidade da utilização de tecnologias de *M-Learning* e *Virtual Reality* (VR) para tornar mais atrativo e dinâmico o processo de ensino-aprendizagem do aluno do curso técnico em agropecuária no interior do Amazonas. Tais tecnologias possibilitam a “visitação” dos alunos a locais de produções agrícolas por meio de ambientes virtuais imersivos.

Diante destas considerações, este trabalho possui como objetivo: contribuir com o processo de ensino-aprendizagem das disciplinas do curso de nível médio técnico em Agropecuária, nas suas diversas séries, por intermédio do uso das técnicas de *M-Learning* e VR. Como objetivos específicos: 1- Propor o uso de aprendizagem móvel; 2- Propor um ambiente de VR; 3- Investigar o impacto da VR Imersiva, por meio de um ambiente virtual e óculos VR de baixo custo, no Curso Técnico em Agropecuária do IFAM – *Campus Tefé*.

## 2 | M-LEARNING

Os dispositivos móveis (*smartphones*, *tablets*, entre outros) proporcionam ao usuário o acesso a um grande volume de informação, independente de espaço e tempo, trazendo uma forma de liberdade. Desta forma, os dispositivos móveis podem facilitar o processo de ensino-aprendizagem, conceito intitulado Aprendizagem Móvel (do inglês *M-Learning*), considerado um ramo das TICs na educação (UNESCO, 2013).

Segundo dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua – PNADC, 93,2% dos lares brasileiros possuem telefone móvel celular (IBGE, 2018). Esse dado destaca a abrangência que essa tecnologia atinge na sociedade brasileira. Os

telefones móveis celulares, em particular os *smartphones*, possuem poder computacional elevado e custo baixo em comparação aos computadores da década de noventa.

O termo *M-Learning* pode ser definido como uma extensão do ensino mediado por tecnologias (*E-Learning*), em particular o *M-Learning* utiliza tecnologias móveis no processo de ensino-aprendizagem (Tarouco et al., 2004). Ferreira et al. (2016) afirmam que “O aprendizado móvel acontece quando a interação é realizada por meio de dispositivos móveis como *smartphones*, *notebooks*, *tablets*, entre outros”. A aprendizagem móvel, apesar de usar um dispositivo tecnológico criado para o entretenimento, possui um grande potencial que ainda é pouco explorado.

O *M-Learning* terá uma participação tão ativa na educação geral que não será mais usada como um termo isolado, mas será integralizada como apoio ao processo de ensino-aprendizagem, facilitando a oferta de cursos na educação a distância, bem como ferramenta de pesquisa, avaliação e reforço (UNESCO, 2014).

A resistência para a inserção de *M-Learning* deve ser reduzida com a formação de professores para uso dos dispositivos móveis na educação, a fim de realizar preparação pedagógica para os professores, a preparação se dará com a finalidade de incluir o *M-Learning* de forma correta na educação.

### 3 | VIRTUAL REALITY

A tecnologia de *Virtual Reality* encontra-se em forte crescimento, por meio dela podemos imergir em ambientes que proporcionam simulações diversas. A VR atua nas sensações do ser humano com a máquina, sensações que são obtidas por meio da experiência do homem com o ambiente virtual. A VR é substituição do mundo real por um mundo criado por computador (Cadoz, 1994). A imersão na VR utiliza-se do conceito intitulado estereoscopia. A estereoscopia define que os olhos direito e esquerdo não enxergam a mesma imagem, mas sim pedaços que juntos formam o nosso campo de visão. A estereoscopia tem como principal função transformar uma imagem 2D, em uma imagem 3D, trazendo aspecto de profundidade a imagem.

A VR é uma tecnologia que pode ser aplicada em várias áreas do mundo moderno, dentre elas, podemos destacar a sua aplicação na educação. Ela pode ser usada para aprofundar o conhecimento do aluno sobre determinado tema, podendo ser inserida como ferramenta no processo de ensino-aprendizagem, como apoio aos trabalhos desenvolvidos pelo professor e sua aplicação pode ser adaptada aos diversos Componentes Curriculares.

Diversos Componentes Curriculares podem ser abordados com o apoio da VR, por exemplo, no ensino das Ciências Biológicas, com a sua aplicação o aluno poderá ser inserido em diversos biomas. O uso da VR também pode ser aplicado nas aulas de Artes, onde o aluno poderá realizar um *tour virtual* em um museu. As barreiras como custo e deslocamento poderão ser quebradas com esse tipo de aplicação, facilitando o acesso à



cultura aos mais diversos perfis de alunos, independente de classe social que pertença e local que resida.

## 4 | METODOLOGIA

Esta pesquisa foi dividida em três etapas: 1ª Etapa – levantamento dos dados dos estudos referentes aos conceitos relacionados ao tema do projeto; 2ª Etapa – desenvolvimento do projeto e aplicação do projeto. Para tal foi utilizada a pesquisa-ação; 3ª Etapa – análise dos resultados. A pesquisa possui caráter qualitativo e quantitativo.

A primeira etapa consistiu na revisão bibliográfica, onde foram levantadas as principais pesquisas sobre *M-Learning*, VR e Educação mediada por TICs, por meio da pesquisa em bases de dados, foram utilizadas técnicas de Revisão Sistemática da Literatura (RSL).

A segunda etapa consistiu na coleta de dados por meio de questionários com perguntas abertas e fechadas, com a finalidade de identificar os principais Componentes Curriculares que os alunos sentem dificuldades de aprendizagem. Também foram identificadas as características dos dispositivos móveis dos alunos participantes da pesquisa, em particular dos *smartphones*. A seleção dos participantes foi realizada a partir do critério de voluntariado, limitadas 10 (dez) vagas para cada série do curso de Agropecuária do IFAM – *Campus Tefé*, totalizando 30 (trinta) alunos participantes da pesquisa.

De posse dos dados, foi iniciado o processo de desenvolvimento do aplicativo móvel de VR. Nesta etapa foi adotada a pesquisa-ação, pois facilitou o processo de desenvolvimento e avaliação do aplicativo criado para servir como ambiente virtual de aprendizagem móvel dos conceitos de Agropecuária. Em seu desenvolvimento foi utilizada a Engine Unity. No desenvolvimento do aplicativo de VR Imersiva seguiu-se o processo de desenvolvimento que se assemelha muito ao processo de desenvolvimento de jogos digitais. Desta forma, o processo de desenvolvimento do aplicativo de VR Imersiva seguiu um padrão de desenvolvimento dividido em quatro etapas: 1- Concepção, 2- Desenvolvimento, 3- Inserção das Imagens 360° e 4- Teste.

Na primeira etapa do processo de desenvolvimento, foi realizada a concepção onde foram levantadas as necessidades e as funcionalidades necessárias para o sistema de VR Imersiva, além de analisar como o sistema poderia englobar os conceitos relacionados aos Componentes Curriculares Técnicos de Agropecuária que os alunos, envolvidos na pesquisa, destacaram nas suas respostas. Nesta etapa também foi escolhido o nome para o aplicativo, batizado de “EduAgroVR”, acrônimo formado pela junção das palavras “Educação”, “Agropecuária” e “Virtual Reality”.

Na segunda etapa do processo de desenvolvimento, foi realizado o desenvolvimento do EduAgroVR, momento em que foi realizada a programação dos códigos-fontes para as funcionalidades do sistema, além da criação das esferas que serviram como ambientes

360° na Engine Unity, cada esfera foi criada para receber imagens 360° que se encaixaram nas extremidades das esferas, realizando o efeito de imersão no ambiente.

Na terceira etapa do processo de desenvolvimento, foi realizada a inserção das Imagens 360° nas esferas. A inserção das imagens foi realizada cuidadosamente para que elas ficassem organizadas, seguindo um padrão de percurso. Na coleta das imagens 360°, foram utilizados equipamentos específicos, como a câmera Samsung Gear360, versão 2017 e um tripé com altura de regulagem de até 1,80m. Na Figura 1, podem ser observados os equipamentos no local de coleta de uma imagem.



Figura 1. Coleta das imagens 360°

Na quarta etapa do processo de desenvolvimento, foi realizado o teste de operacionalidade do aplicativo móvel EduAgroVR, buscando-se descobrir falhas no desenvolvimento do aplicativo móvel, focando em falhas de programação do código-fonte, nas imagens 360° e nas transições entre esferas. Na realização do teste seguiu-se a divisão entre séries, sendo realizado o teste com 10 (dez) alunos por vez.

Na terceira etapa desta pesquisa, foi realizada a análise dos resultados, observando os pontos fortes e fracos. Os dados foram obtidos por meio das respostas dos questionários aplicados aos alunos, adotando-se metodologias quali e quantitativa para analisá-los. A análise qualitativa foi realizada para identificar, por meio das respostas abertas obtidas nos questionários, o impacto que o uso de *M-Learning* e VR pode ocasionar individualmente nos alunos envolvidos na pesquisa. Na análise quantitativa buscou-se analisar se *M-Learning* e VR poderiam apoiar, de forma pedagógica, o processo de ensino-aprendizagem.

## 5 | EDUAGROVR

O EduAgroVR possui a finalidade de proporcionar a imersão do aluno em um ambiente de aprendizagem virtual. A inserção do aplicativo no processo de ensino-aprendizagem foi realizada respeitando o processo formativo do aluno do Curso Técnico

em Agropecuária. Ele pode ser inserido como ferramenta de apoio ao processo de ensino-aprendizagem do Curso Técnico em Agropecuária, em dois momentos: durante ou antes da aula; sendo de responsabilidade do professor o acompanhamento e escolha do momento correto de sua inserção.

## 5.1 Percurso no sistema

O aluno, quando imerso no aplicativo de VR, poderá percorrer o ambiente por meio da navegação própria do Google Cardboard e interagir com pontos que estarão espalhados no ambiente. A finalidade dos pontos de interação é proporcionar paradas para explicações, conforme o conteúdo que se pretende abordar. Eles são compostos por recursos multimídias, como textos e imagens ilustrativas, com a finalidade de tornar mais dinâmica e de fácil compreensão os assuntos relacionados aos principais Componentes Curriculares Técnicos do Curso Técnico em Agropecuária, como: Solos, Produção Vegetal e Produção Animal.

## 5.2 Visão geral do sistema

Na visão geral do sistema podem ser observados 04 (quatro) elementos que compõem o sistema de VR e os seus fluxos, conforme Figura 2, sendo: 1- Usuário: responsável pela interação com o aplicativo; 2- Óculos VR: onde o *smartphone* será acoplado para que ocorra a estereoscopia; 3- App: O aplicativo móvel de VR; e 4- Base de imagens 360°: imagens do aplicativo móvel de VR.



Figura 2. Visão geral do sistema

## 5.3 Telas do sistema

O EduAgroVR possui 11 (onze) telas, cada uma é representada por uma esfera, conforme pode ser observado na Figura 3, onde cada esfera representa um ambiente 360°. A disposição das telas foi dividida em 05 (cinco) categorias: MENU, SOLOS, PRODUÇÃO VEGETAL, PRODUÇÃO ANIMAL e SOBRE. A interação é realizada por meio de um ponto, chamado de *gaze*, que acompanha o movimento da cabeça do usuário (Barboza et al., 2017), a principal interação que o usuário poderá realizar no EduAgroVR é a transferência entre esferas.

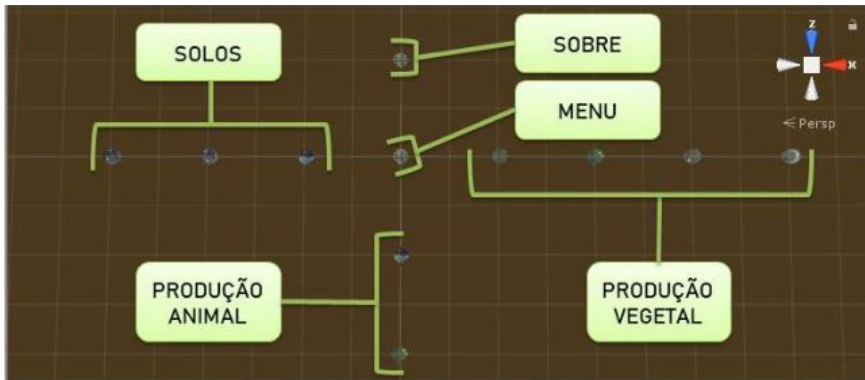


Figura 3. Esferas que compõem o EduAgroVR

A tela de MENU (a) é a tela principal do sistema e possui a finalidade de mostrar para o usuário as opções de conteúdos que o sistema possui, o usuário poderá navegar entre 03 (três) opções principais, sendo: SOLOS (b), PRODUÇÃO VEGETAL e PRODUÇÃO ANIMAL; conforme Figura 4.

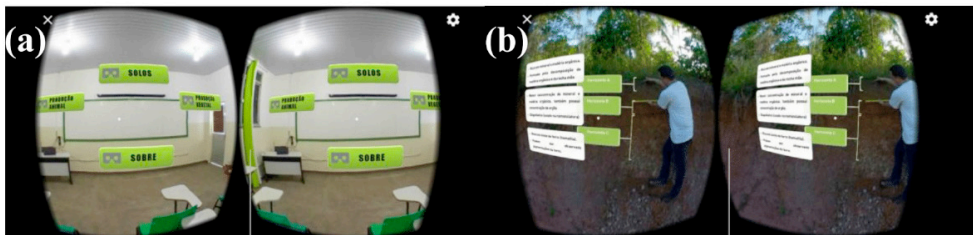


Figura 4. Telas do sistema (visão estereoscópica)

## 6 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados, obtidos a partir das respostas dos questionários aplicados aos 30 (trinta) alunos, foram analisados por meio da metodologia quantitativa, para as perguntas com respostas objetivas e qualitativas, para as respostas subjetivas. Na coleta foi utilizada a ferramenta digital Google Forms. Foram aplicados dois questionários: o primeiro teve a finalidade de coletar os dados do perfil do aluno e o segundo teve a finalidade de coletar dados sobre a experiência do aluno no ambiente VR.

### 6.1 Perfil do aluno

Na pergunta que identificava se o aluno possui *smartphone*: 83,3% responderam que possuem e somente 16,7% não possuem *smartphone*. Os dados comprovam que a maioria dos alunos possui uma ferramenta de tecnologia móvel. Nas respostas sobre os modelos dos *smartphones* dos alunos, foi identificado que 68% dos *smartphones* não eram

compatíveis com o aplicativo EduAgroVR, pois não possuíam giroscópio, tal informação pode ser relacionada com a renda per capita familiar, que em sua maioria é de 0 (zero) a  $\frac{1}{2}$  (meio) salário mínimo, pois o sensor de giroscópio é uma característica de *smartphones* com custos elevados.

## 6.2 A VR e os alunos

Os alunos das três séries destacaram que já ouviram falar sobre VR, sendo que 93,3% já ouviram falar sobre VR e 6,7% nunca ouviram falar. Os dados confirmam que os alunos possuem interesse por novas tecnologias como a VR.

## 6.3 M-Learning e os alunos

Sobre o uso de *smartphones* como apoio ao processo de ensino-aprendizagem, os alunos responderam da seguinte forma: 43,3% dos alunos das três séries consideram que o uso de *smartphones* pode ajudar no processo de ensino-aprendizagem; 43,3% dos alunos das três séries consideram que na maioria das vezes o uso de *smartphones* pode ajudar no processo de ensino-aprendizagem e 13,4% dos alunos das três séries consideram que algumas vezes o uso de *smartphones* pode ajudar no processo de ensino-aprendizagem. Os dados indicam a aceitação pela inserção no processo de ensino-aprendizagem e o entusiasmo dos alunos.

Os alunos também responderam sobre como o uso de *smartphones* pode ajudar no processo de ensino-aprendizagem, onde podemos destacar os seguintes fragmentos (usaremos letras para identificar os alunos, pois os nomes serão mantidos em sigilo):

- Aluno A: *“Através de conteúdos repassados por professores em forma de slides, para que os alunos revisem os conteúdos.”*

- Aluno B: *“Me ajudaria no caso assistindo vídeo aulas, iria ajudar a entender mais sobre aulas que tenho dúvidas e dificuldades!”*

As repostas dos Alunos A e B indicam que o uso dos *smartphones* ainda não está sendo explorado em todo o seu potencial, pois além de armazenar conteúdos de aulas, os *smartphones* também podem ser usados como ferramenta de apoio ao processo de ensino-aprendizagem, por meio do uso de aplicativos móveis educacionais.

## 6.4 Avaliação do EduAgroVR

Os alunos das três séries utilizaram o aplicativo EduAgroVR e analisaram o aplicativo da seguinte forma: 76,7% dos alunos consideraram o aplicativo excelente; 13,3% dos alunos consideraram muito bom; e 10% dos alunos consideraram bom. Os dados comprovam que o EduAgroVR atendeu aos anseios preliminares dos alunos, tal satisfação pode ser destacada pelo fato do EduAgroVR ser uma ferramenta tecnológica que usa uma metodologia inovadora para apoiar a aprendizagem dos alunos.

Os alunos também relataram sobre o uso do ambiente de VR como ferramenta de apoio ao processo de ensino-aprendizagem, da seguinte forma: 93,4% dos alunos

responderam que o aplicativo ajudaria no processo de ensino-aprendizagem; 3,3% dos alunos responderam que ajudaria na maioria das vezes; e 3,3% dos alunos responderam que ajudaria em alguns casos. Eles consideram que os professores deveriam usar recursos tecnológicos, como o Ambiente de VR, em suas aulas, e que as tecnologias digitais devem ser introduzidas nas metodologias de ensino dos professores, pois enriquecem a explicação de determinado conteúdo.

No uso do aplicativo de VR Imersiva EduAgroVR, os alunos relataram que ao usá-lo: 16,7% sentiram náuseas e 83,3% não sentiram. Os dados destacam que o uso de VR pode causar náuseas, quando usado em um longo período, mas como o aplicativo foi usado em um período curto, média de 30 (trinta) minutos, causou náuseas em apenas 05 (cinco) alunos, de um total de 30 (trinta) alunos, sendo que alguns desses usam óculos para corrigir problemas oftalmológicos.

## 7 | CONCLUSÕES

O potencial das TICs na Educação é gigantesco, grande parte ainda não está sendo explorado, como é o caso dos *smartphones*. O docente possui um papel importante neste cenário, pois ele deve estar preparado para inserir as TICs no processo de ensino-aprendizagem, essa preparação envolve pesquisa e planejamento em suas aulas.

A VR proporciona ao aluno a imersão em um ambiente que pode possuir diversas características facilitadoras da aprendizagem de determinado conteúdo, essa imersão pode ser considerada um transporte do real para o virtual, onde o aluno ao ser imerso nesse ambiente virtual pode aprender com as interações de objetos dispostos no ambiente de VR. Ela pode ser inserida em conjunto com o *M-Learning*, facilitando esse processo de imersão em qualquer lugar, também podemos destacar que a VR Imersiva é uma tecnologia em crescimento e que muitos modelos de óculos possuem um valor elevado, porém existem modelos de baixo custo, como é o caso dos óculos VR Google Cardboard.

O aplicativo móvel de VR Imersiva EduAgroVR, desenvolvido para servir como ferramenta tecnológica de apoio ao processo de ensino-aprendizagem, mostrou a potencialidade que o *M-Learning* com VR Imersiva pode proporcionar, ao inserir o aluno em um ambiente virtual que simula o local onde possam ser visualizados conceitos considerados complicados por eles. O uso do EduAgroVR pode alterar a forma da realização de visitas técnicas, quando o acesso aos locais de visita for considerado complicado, porém uma visita técnica presencial é considerada uma experiência mais completa, pois o aluno terá contato com outras sensações que não são alcançadas quando realizadas em um ambiente virtual.

Apesar de ser uma tecnologia que está em crescimento, a VR Imersiva que utiliza *smartphones*, ainda necessita de *smartphones* com requisitos mínimos, o que não é uma realidade de todos os alunos, causando um problema no momento da inserção. O uso da

VR Imersiva com *smartphones* deve ser realizado com cautela, pois pode proporcionar o aquecimento do *smartphone*, além de proporcionar náuseas para algumas pessoas, como foi verificado no uso pelos alunos. Para diminuir esse risco é aconselhado um período limitado para o uso.

## REFERÊNCIAS

BARBOZA, R. S.; BARBOSA, M. P.; SILVA JUNIOR, J. M. **Desenvolvimento rápido de ambientes para realidade virtual em Unity utilizando PhotoSphere e CubeMap**. In: Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Jogos e Entretenimento Digital. Curitiba, 2017.

CADOZ, C. 1994. **A Realidade Virtual**. Lisboa: Instituto Piaget – Biblioteca Básica de Ciência e Cultura. Lisboa, 1994.

FERREIRA, A.; DINIZ, J.; JÚNIOR, J. S. **EcoÁgua**: M-learning e gamification como estratégias de suporte ao desenvolvimento do consumo sustentável de água. In: Anais do V Congresso Brasileiro de Informática na Educação. Uberlândia, 2016.

IBGE. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Continuada (PNADC)**. 2018. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/10070/62922>>. Acesso em: 18 ago. 2020.

IFAM. **Avaliação do Curso Técnico em Agropecuária**. Tefé, 2017.

IFAM. **Plano de curso**: curso técnico de nível médio em agropecuária na forma integrada. Tefé, 2015.

TAROUCO, L. R.; FABRE, M. M.; KONRATH, M. P.; GRANDO, A. R. 2004. **Objetos de Aprendizagem para M-Learning**. In: Anais do Congresso Nacional de Tecnologia da Informação e Comunicação. Florianópolis, 2004.

UNESCO. 2014. **Reading in the mobile era**: A study of mobile reading in developing countries. UNESCO. Paris, 2014.

UNESCO. **Diretrizes de políticas para a aprendizagem móvel**. UNESCO. Paris, 2013.

*Data de aceite: 02/08/2021*

### **João B. de Aguiar**

Professor, Engenharia Aeroespacial,  
Universidade Federal do ABC  
Santo André

### **Júlio C.S. Sousa**

Engineer, Universidade Federal do ABC  
Santo André

### **José M. de Aguiar**

Professor, Departamento de Ensino, FATEC-SP  
Praça Col. Fernando Prestes, São Paulo

**ABSTRACT:** Jahu was the name of the first plane to cross the Atlantic with a Brazilian crew. The saga of such a voyage is described in the literature, being well documented, as the fact attracted large media coverage. It took place in the 1920 decade. The hydroplane itself is not well known, however, mostly due to modifications introduced for the journey. Particulars of Jahu like its high weight, the use of a pair of in-line external engines with propellers in opposite directions and large lateral floats, led people to call it the flying boat. Making an ocean cross with this airplane required a sequence of stops to solve problems; some caused by sabotage others by design and lots of courage. In this research, starting from the drawings of the plane, a model of the structure was constructed. Flight coupled to flow equations were solved to infer the lift and drag forces in the structure of the aeroboat. Finite element

equations were then employed to determine response of the structure. Results showed the plane as being very sound. Procedure used may help construct for similar problems.

**KEYWORDS:** Model, Flow Problem, Motion, Stress Problem, Reliability.

**RESUMO:** O Jahu foi o primeiro avião a cruzar o Atlântico com uma tripulação brasileira. A saga dessa viagem é descrita na literatura, documentadamente, uma vez que o fato atraiu uma grande cobertura dos meios de comunicação. Ocorreu nos anos 1920. O aeroplano, contudo, não é bem conhecido, principalmente por conta das modificações introduzidas para e durante a jornada. Particularidades da aeronave, como o elevado peso, uso de um par de motores alinhados, com pás de hélice girando em sentido contrário, e a presença de grandes flutuadores, levou as pessoas a chama-lo de barco voador. No cruzar do oceano, uma sequência de paradas, para resolver problemas, alguns causados por sabotagem, outros por erros de projeto, ocorreram. Nesta pesquisa, a partir dos desenhos da aeronave, um modelo da estrutura é construído. Equações de voo acopladas às de aerodinâmica são apresentadas a fim de estabelecer as resultantes de sustentação e arrasto na estrutura do “aerobote”. Da mesma forma as equações para as tensões na estrutura são formuladas. Discretização por elemento finito é utilizada para determinar a resposta da estrutura. Diversos resultados são apresentados e discutidos. Conclui-se ser bastante rígido o avião. O modelo desenvolvido pode ajudar na construção de uma réplica do hidroavião.

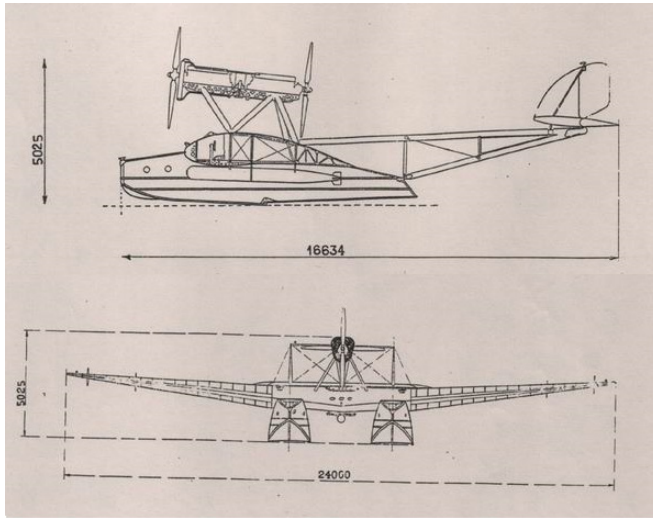


## 1 | INTRODUCTION

A hydroplane Savoia-Marchetti S.55, version C, constructed in Italy, reequipped with two 550 hp engines and enhanced floaters was used by João Ribeiro de Barros to cross the Atlantic South in 1927. Prior records of velocity and autonomy made the hidro a preferred choice of Barros and its three crew members. Jahu, as it was named was the first to cross in direct flight the ocean from Cape Verde, a Portuguese archipelago, to Fernando de Noronha, an island in northeast Brazil, non-stop.

The first crossing of the south Atlantic in 1922 by Gago Coutinho and Sacadura Cabral inspired João Ribeiro, natural of Jau, new graphy for the name of the city of Jahu, interior of São Paulo state, to organize a raid. In fact, Gago Coutinho and Sacadura Cabral also helped João Ribeiro to plan the trip. However distant, the idea became possible after another pioneer of aviation, *conde Casagrande* with a Savoia-Marchetti S-55C named Alcione, gave up a travel from Italy to Argentina, when only one fifth of the trip was completed. With the desistance, the Alcione was returned to the SIAI, the manufacturer of the plane.

João Ribeiro, after understanding be the S-55 the best plane to the endeavor, tried to buy a brand new one from SIAI, the maker of S-55, with no success. A selling offer for Alcione was presented, instead. The deal was set after some requested modifications to the S-55 were agreed upon. Jahu, Fig. 1, was delivered in October 1926. Voyage started when it took off from Genova, Italy towards Gibraltar. Five hours later, however, the engines of Jahu started to present problems, and an emergency stop in the bay of Valencia, Spain, extended to Alicante, took place. Jahu's crew ended up jailed, as landing was not authorized nor intended. Solved the case with diplomatic help, the plane flew to Gibraltar, where better conditions permitted repairing the engines, victims of sabotage. Direct distance to Gibraltar is about 496 km.



**Fig. 1.** Lateral and frontal view drawings of Jahu.

In the next stretch Canary Islands, in the Atlantic Ocean, distant some 1 324 km from Gibraltar, were reached, again at the cost of great efforts from the crew. Failures in the fuel system of the engines required manual feeding. This time the problem was in the pumping system. Solved, next stop was in *Praia*, city in *Cape Verde Islands*, distant 1 646 km of *Gran Canária*. A larger stop was taken then, as major changes had to be implemented to prepare the airplane for the most difficult part of the raid.

The stop in *Praia* was plagued by problems. Several mechanical modifications had to be tried and tested. Also a change in command: a lieutenant from São Paulo, Newton Braga had to be sent to *Praia* after the pilot refused to fly the plane again. After months on the stop, malaria fevers convalescences, general disbelief from public, João Ribeiro received an encouraging letter from his mother that made him proceed with the voyage.

Repaired, the hydro took off in April 1927. During 12 hours, it flew at an average velocity of 190 km/h and 250 m high to reach Fernando de Noronha, in a non-stop journey. Distance was record for an airplane on those days. It was a moment of great jubilee in Brazil. Trip followed then along the Brazilian coast: cities of Natal, 375 km, Recife, 254 km, Salvador circa of 672 km from Recife and Rio de Janeiro, 1209 km away, were reached. After another large stop in Rio in an ambient of fiesta, last part of raid took place, with arrival in São Paulo in August of 1927. After that, Jahu wouldn't fly again.

## 2 | MODEL

Determination of the stresses in the hydroplane, at any instant, requires knowledge of motion and aerodynamic equations as they set up the loading. To this end, the body of the plane was first drawn from construction blueprints. Next, a model, with the corresponding

equations, was considered having in mind unveil a solution procedure. Although several flight scenarios are possible, they all obey the same set of equations of conservation and some constitutive models. Even though a particular scenario, the level flight, is of interest here, a general look at the problem is important.

Hence, solution of the dynamic problem coupled to the pressure-velocity field is discussed first. Stresses in the airplane structure, which depend on the obtained results, are then computed and factors of safety in the elastic range computed.

## 2.1 Conservation Equations

Airflow around an airplane gives rise to contact stresses that actuate on its skin. The resultants of this interaction depend on plane configuration and relative velocity  $\mathbf{V}_r = \mathbf{V}_b - \mathbf{V}_a$ , where  $\mathbf{V}_b$  refers to airboat velocity and  $\mathbf{V}_a$  to the air velocity. Standard model procedure considers a control volume  $V_c$ , with border surface  $S_c$  used to include and move with the plane. Values of airflow variables, which include the velocity  $\mathbf{v}_a$ , the pressure  $p_a$  and temperature  $T_a$  of air, for every plane velocity, which obey the conservation equations, are sought. First equation, air mass conservation,  $M_a = 0$  says that [3]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \rho_a dV + \int_{S_c} \rho_a \mathbf{v}_a \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (1)$$

where density of air is denoted as  $\rho_a$ . Control surface contains an inner part that contacts the plane  $S_c^b$  and another external, the outer border  $S_c^a$ , where free flow conditions apply, being  $S_c = S_c^b \cup S_c^a$ . Control volume partition follows the same procedure.

Next pair of equations represents the conservation of the linear momentum  $L_a$  with  $\mathbf{l}_a = p_a \mathbf{v}_a$ , and conservation of the angular momentum  $H_a$  with  $\mathbf{h}_a = \rho_a \mathbf{r}_a \times \mathbf{v}_a$ , of the air surrounding the plane:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \mathbf{l}_a dV + \int_{S_c} \mathbf{l}_a \mathbf{v}_a \cdot \mathbf{n} dS = \int_{V_c} \mathbf{b}_a dV + \int_{S_c} \{-p_a \mathbf{n} + \tau_a \mathbf{t}\} dS \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \mathbf{h}_a dV + \int_{S_c} \mathbf{h}_a \mathbf{v}_a \cdot \mathbf{n} dS = \int_{V_c} \mathbf{r}_a \times \mathbf{b}_a dV + \int_{S_c} \mathbf{r}_a \times \{-p_a \mathbf{n} + \tau_a \mathbf{t}\} dS \quad (3)$$

In these equations, body forces denoted as  $\mathbf{b}_a$  include inertia forces. Surface tractions comprise normal  $p_a$  and tangential  $\tau_a$  components. Symbol  $\times$  is used to indicate the cross product between position vector  $\mathbf{r}_a$ , with respect to an inertial reference system  $\langle x, y, z \rangle$ , and velocity vector  $\mathbf{v}_a$  in the angular momentum expression. Scalar product is shown with a dot.

First integral in right hand side of Eq. (2) represents the resultant body force, whereas the second corresponds to the resultant surface force. In both integrals, resultants over the plane, inner border, are computed from the resultants in the outer border of control volume. Integration of the pressure and tangential stresses lead to the lift  $L$  and drag  $D$  forces. Likewise, integrals in the right hand side of Eq. (3) indicate the corresponding moments,

with respect to the reference system. These resultant forces and moments are required inputs for the structural problem. Energy conservation, that would couple the expressions, is not considered here.

## 2.2 Flight Equations

Motion of the airplane depends on the interaction of applied forces, propulsion included, with aerodynamics forces. Given the geometry of the plane, body and applied forces - instant weight  $\mathbf{W}$  and propellers thrust  $\mathbf{E}$ , established by settings of the engine group and control surfaces – solution of the dynamic problem will define the kinematics of the plane. Newton's second law constitutes the basic equilibrium equation to solve. It establishes that the rate of change of the linear momentum  $\int_{V_c^b} \mathbf{I}_b dV$  on the plane equals the summation of external forces applied to it  $\mathbf{I}_b = \mathbf{p}_b \mathbf{v}_b$ . Hence if  $b$ , with the subscript identifying the aeroboot, then [4]:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_c^b} \mathbf{I}_b dV = \mathbf{F}_a + \mathbf{W} + \mathbf{E} \quad (4)$$

being the air interaction resultant:

$$\mathbf{F}_a = \int_{V_c^b} \mathbf{b}_a dV + \int_{S_c^a} \{-p_a \mathbf{n} + \tau_a \mathbf{t}\} dS \quad (5)$$

This sum includes added mass plus lift  $L$  and drag  $D$  resultants. The set of components of the differential equation Eq. (4) -  $M_b a_b = \sum F$  - depends on time. However, loading on right hand side also depends on time, through the velocity components. Solution renders the linear acceleration of the plane. Rigid solid approximation will relate local accelerations to the center of mass acceleration, making it easier the solution. Successive integration of accelerations will establish the velocity field and trajectory. An iterative substitution procedure may be employed, taking an initial estimate of the aerodynamic resultant, Eq. (5).

In the same form, the rate of change of the angular momentum  $\int_{V_c^b} \mathbf{h}_b dV$ , where  $\mathbf{h}_b = \mathbf{r}_b \times \mathbf{v}_b$ , equals the summation of the moments of the external efforts:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c^b} \mathbf{h}_b dV = \sum_b \mathbf{M} \quad (6)$$

which comprises the moment resultant from air flux:

$$\mathbf{M}_a = \int_{V_c^p} \mathbf{r}_b \times \mathbf{b}_a dV + \int_{S_c^a} \mathbf{r}_b \times \{-p_a \mathbf{n} + \tau_a \mathbf{t}\} dS \quad (7)$$

plus the moment contributions from applied forces pair  $\langle \mathbf{W}, \mathbf{E} \rangle$ . This new set of equations -  $I_b \alpha_b = \sum_b M$  - will define the angular accelerations and their kinematic relatives.

## 2.3 Velocity and Pressure Field

At the instant tagging the flight scenario, solution of the fluid-structure interaction problem, and afterwards stress problem, may be attained by the principle of virtual work, PVW. One form of this principle sets the rate of internal work to the rate of external work exchange [5]:

$$\int_{V_c} \delta \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_a^T \boldsymbol{\sigma}_a dV = \int_{V_c} \delta \mathbf{v}_a^T \mathbf{b}_a dV + \int_{S_c} \delta \mathbf{v}_a^T \{-p_a \mathbf{n} + \boldsymbol{\tau}_a \mathbf{t}\} dS \quad (8)$$

where  $\boldsymbol{\sigma}_a$  represents the Cauchy stress tensor,  $\boldsymbol{\varepsilon}_a$  is the strain rate tensor:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_a = \frac{1}{2} \{\nabla \mathbf{v}_a + \nabla \mathbf{v}_a^T\} \quad (9)$$

being  $\nabla$  the gradient operator. Symbol  $\delta$  indicates virtual quantities and matrix notation is supposed.

Writing the air velocity field in terms of its Cartesian components,  $\mathbf{v}_a^T = \{\dot{u}_a, \dot{v}_a, \dot{w}_a\}$ , where the set  $\langle u_a, v_a, w_a \rangle$  identifies the components of the displacement field, renders the strain rate tensor  $\boldsymbol{\varepsilon}_a$  in terms of  $\mathbf{v}_a$  field. A linear operator  $\mathcal{L}_a$  relates both quantities as:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_a = \mathcal{L}_a \mathbf{v}_a \quad (10)$$

Additionally, if inertia forces are separated from the set of body forces,  $b_a = b_a^i + b_a^o$ , virtual work expression, Eq. (8), changes to the form:

$$\int_{V_c} \delta \mathbf{v}_a^T \mathcal{L}_a^T \boldsymbol{\sigma}_a dV - \int_{V_c} \delta \mathbf{v}_a^T \mathbf{b}_a^o dV - \int_{S_c} \delta \mathbf{v}_a^T (-p_a \mathbf{n} + \boldsymbol{\tau}_a \mathbf{t}) dS = \int_{V_c} \delta \mathbf{v}_a^T \rho_a \mathbf{a}_a dV \quad (11)$$

being the accelerations dependent of time and position:

$$\mathbf{a}_a = \mathbf{v}_{a,t} + \nabla \mathbf{v}_a \mathbf{v}_a \quad (12)$$

The specific constitutive equation relating stresses to strain rates may now be included [5]. For incompressible fluids, with moderate velocities involved, temperature coupling may be disregarded and Navier-Stokes relationship assumed. This equation relates deviatoric components of stress to strain rates:

$$\boldsymbol{\sigma}'_a = \mathbf{C}'_a \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_a; \quad \boldsymbol{\sigma}'_a = \boldsymbol{\sigma}_a + p_a \mathbf{I} \quad (13)$$

where the deviatoric part  $\mathbf{C}'_a$  of the constitutive tensor  $\mathbf{C}_a$  depends on viscosity. Pressure is the negative trace of stress tensor  $p_a = -tr \boldsymbol{\sigma}_a$  but it cannot be determined in the above equation, requiring hence, an additional constitutive expression. Upon introduction of the above relation, Eq. (9) into the expression of the PVW it results that:

$$\int_{V_c} \delta \mathbf{v}_a^T \rho_a \mathbf{a}_a dV = \int_{V_c} \delta \mathbf{v}_a^T \mathbf{L}_\alpha^T \mathbf{C}'_\alpha \mathbf{L}_\alpha \mathbf{v}_a dV - \int_{V_c} \delta \mathbf{v}_a^T \mathbf{L}_\alpha^T p_a \mathbf{I} dV - \int_{V_c} \delta \mathbf{v}_a^T \mathbf{b}_a^o dV - \int_{S_c} \delta \mathbf{v}_a^T \{-p_a \mathbf{n} + \boldsymbol{\tau}_a \mathbf{t}\} dS \quad (14)$$

being  $\mathbf{I}$  the identity tensor. This equation may be solved numerically using spatial discretization by finite elements with time marching algorithms. In the process, internal variables are written in terms of nodal quantities by means of interpolation functions, for velocity and pressure. Therefore, if the relations

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_a &= \mathbf{N}^v \hat{\mathbf{v}}_a \\ p_a &= \mathbf{N}^p \hat{p}_a \end{aligned} \quad (15)$$

are introduced into Eq. (10), with nodal quantities identified with the hat, it turns out that:

$$\mathbf{M}_a \frac{\partial}{\partial t} \hat{\mathbf{v}}_a + \{\mathbf{K}_l^v + \mathbf{K}_{nl}^v\} \hat{\mathbf{v}}_a + \mathbf{K}^p \hat{p}_a = \mathbf{R}_v + \mathbf{R}_s \quad (16)$$

where mass, velocity-stiffness – linear and non-linear, and pressure-stiffness matrices are, respectively:

$$\mathbf{M}_a = \int_{V_c} \mathbf{N}^{vT} \rho_a \mathbf{N}^v dV \quad (17)$$

$$\mathbf{K}_l^v = \int_{V_c} \mathbf{B}^{vT} \mathbf{C}'_\alpha \mathbf{B}^v dV \quad (18)$$

$$\mathbf{K}_{nl}^v = \int_{V_c} \rho_a \mathbf{N}^{vT} \{\nabla(\mathbf{N}^v \hat{\mathbf{v}}_a)^T\} \mathbf{N}^v dV \quad (19)$$

$$\mathbf{K}^p = \int_{V_c} \mathbf{B}^{vT} \mathbf{I} \mathbf{N}^p dV \quad (20)$$

being  $\mathbf{B}^v$  the strain-velocity interpolation matrix. Resultant vectors:

$$\mathbf{R}_v = \int_{V_c} \mathbf{N}^{vT} \mathbf{b}_a dV \quad (21)$$

$$\mathbf{R}_s = \int_{S_c} \mathbf{N}^{vT} (-p_a \mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}_a) dS \quad (22)$$

represent the overall resultants of the body and surface forces, in this order.

The discretized finite element system, Eq. (16), depends on the nodal velocities and pressures. Therefore, an additional equation has to be prescribed in order to complete the system to be solved in the flow problem. The remaining equation, conservation of mass, Eq. (1), may be used, in discretized form. Using the pressure as a virtual Lagrange multiplier, under steady state conditions, leads to the additional condition:

$$\int_{V_c} \delta p_a^T (\nabla^T \mathbf{v}_a) dV = 0 \quad (23)$$

because  $\text{div} \mathbf{v}_a = \nabla^T \mathbf{v}_a = 0$ . However as:

$$\begin{aligned} p_a &= \mathbf{N}^p \hat{p}_a \\ \nabla^T \mathbf{v}_a &= \mathbf{B}^v \hat{\mathbf{v}}_a \end{aligned} \quad (24)$$

so that the inclusion of these results into the restriction equation, Eq. (23), leads to:

$$\mathbf{K}^p \hat{\mathbf{v}}_a = 0 \quad (25)$$

which allows solution of the pressure-velocity field.

## 2.4 Iterative Substitution Procedure

Loading to the airplane could be approached in different manners. An iterative substitution procedure is an alternative. In such a case, initial estimate of linear and angular velocity of the airplane, set the applied loads, may be obtained from the above formulation using the pair of flight equations, Eqs, (4) and (6), with an initial guess for the pair  $\langle L_0, D_0 \rangle$ .

With the determined accelerations, and then velocity vectors, the aerodynamic problem may be solved using Eq. (16) with the condition Eq. (25) imposed, leading to a first fluid velocity-pressure distribution. Air may be supposed still. New integrated resultants for lift and drag are obtained  $\langle L_1, D_1 \rangle$ . Back substitution of the results brings a new plane velocity. At level flight, the convergence is fast.

## 2.5 Airplane Stresses

Once found the velocity field around the plane, loading at the tagged position is determined, stresses and deformations may be found. Application of the PVW to the plane in such a case leads to [6]:

$$\int_{V_b} \delta \mathbf{v}_b^T \boldsymbol{\sigma}_b dV = \int_{V_b} \delta \mathbf{v}_b^T \mathbf{b}_b dV + \int_{S_p} \delta \mathbf{v}_b^T \{-p_a \mathbf{n} + \boldsymbol{\tau}_a \mathbf{t}\} dS + \delta \mathbf{v}_b^T \mathbf{E} \quad (26)$$

This equation depends on the velocity field  $\mathbf{v}_b$ , on the contact stresses on aeroboot's surface, a function of the air velocity, body forces and thrust. Discretizing the space occupied by the airplane by volume elements - with required air and structure meshes coinciding at plane surface - by means of interpolation functions  $N^v$  give:

$$\mathbf{v}_b = N^v \hat{\mathbf{v}}_b \quad (27)$$

Taking the stress-strain relationship in the elastic range for the different materials of the boat as  $\mathbf{C}_b$  leave:

$$\boldsymbol{\sigma}_b = \mathbf{C}_p \boldsymbol{\varepsilon}_b; \quad \boldsymbol{\varepsilon}_b = \mathbf{B}^d \hat{\mathbf{d}}_b \quad (28)$$

with  $\hat{\mathbf{d}}_p$  referring to nodal displacements. Hence equilibrium in the sense of Eq. (26) requires that:

$$\mathbf{M}_b \frac{\partial^2}{\partial t^2} \hat{\mathbf{d}}_b + \mathbf{K}_b \hat{\mathbf{d}}_b = \mathbf{R}_b \quad (29)$$

Here  $\mathbf{R}_b$  stands for the sum of the external forces and  $\mathbf{M}_b$  for the consistent mass – derived from the separation of the body forces into inertia and all others effects,  $\mathbf{b}_b = \mathbf{b}_b^i + \mathbf{b}_b^o$  of the aeroboot. When accelerations are small, the quasi-static solution of the equation will render the displacement field, and the interpolation and constitutive equations, the stresses. Undamped dynamics effects may also be determined from Eq. (29) [7].

## 3 | RESULTS

### 3.1 Geometry

Jahu was designed with four main structural systems: a pair of wings, a pair of floating boats, as it was a hydroplane, and a truss structure to sustain the engines and the control surfaces located at the back of the plane. Very compact and heavy units set side by side with opening bays, like in the truss system, placed the center of mass of the hydroplane quite low, conferring stability. A part this fact, the plane required the constant use of horizontal stabilizer surfaces to acquire equilibrium in level flight conditions, making this system vital. Overall characteristics of the plane are included in Table 1.

Wings were designed with 3D lifting surfaces of variable section, cambered, with constant angle of attack, and laterally disposed about a frontal plane, perpendicular to the main longitudinal symmetry plane, Figures 2 and 3. Arching and thinning was provided along the span of the wings in order to create multiple curvature of the outer shell surface. Solid and open forms were used for the aerodynamic profile elements and stiffeners in the wing.

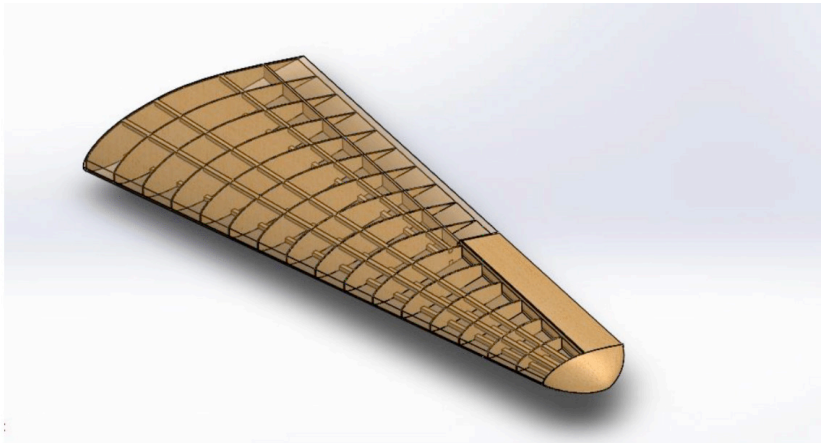
Maximum Wing Span	24 m
Maximum Length	16.75 m
Height	5.0 m
Wing Area	93.0 m <sup>2</sup>
Aileron Surface Area	3.60 m <sup>2</sup>
Horizontal Stabilizer Area	11.0 m <sup>2</sup>
Vertical Stabilizer Area	4.40 m <sup>2</sup>

Table 1. Main characteristics of Jahu.

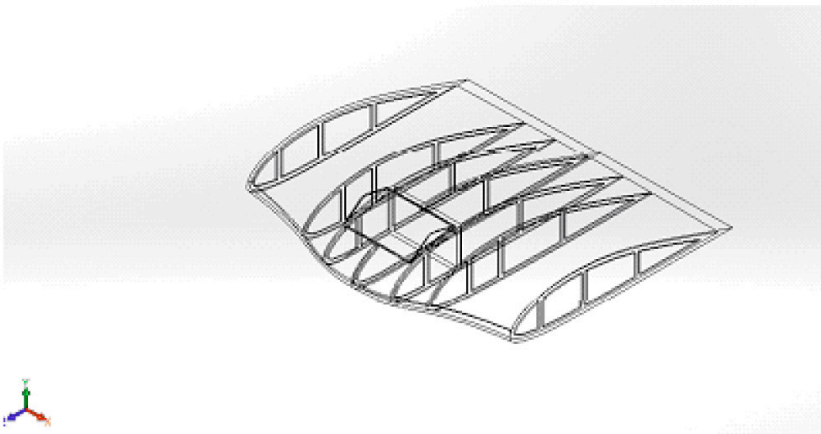
Transverse reinforcing beam elements were the central elements of the wing arrangement. In it, a primary rib structure supported the series of aerodynamic elements



responsible for flexural resistance of the wing. The plate structure of aerodynamic elements contained movable components. Tertiary structure included shell elements of skin that covers the wing. Arrangement was completed with movable – aileron and flap – as well as tail surfaces.

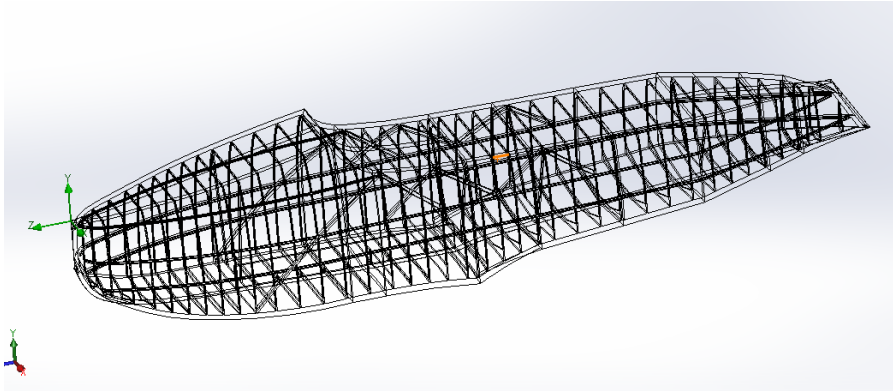


**Fig. 2.** External semi-wing structure drawing.



**Fig. 3.** Central part of the wing system.

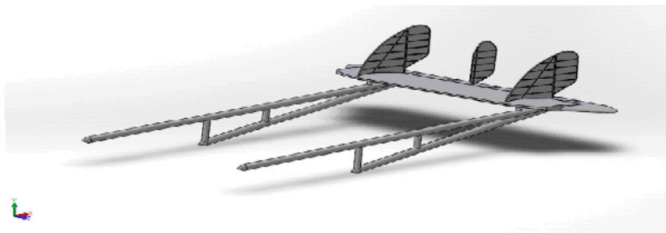
The floating boats, *scafos* as the Italians called them, were arranged with a system of transverse rings, supported by longitudinal stiffeners, covered by a quite rigid skin system, Fig. 4. Forms were chosen with two curvatures adjusted to diminish the drag with water and air. They were disposed symmetrically about the longitudinal plane, fixed to the wings and placed in a lower level. Each boat comported two crew members, one of them a pilot, as the plane required two pilots.



**Fig. 4.** Structural arrangement of the boats.

The longitudinal fuselage system comprised two complementary parts, one responsible for supporting the engines, set on top of the longitudinal plan, in symmetric form, and the other responsible for holding the control surfaces, located at the back of the plane, Fig. 5. Both structures were made of 1D structural elements, beams and bars. They were integrated with the wings and floating boats systems. The upper support system for the pair of engines comprised truss units with two bays. Crossing cables were included to avoid sway motion. Engines were centrally disposed with shaft axes placed inclined.

The control surfaces were disposed in horizontal and vertical planes in the tail of the plane. In the vertical plane, a small fin was used in conjunction with a pair of identical larger lateral units, for flow stability. Structural arrangement followed quite closely that one of the wings, using however much thinner elements for the rudder. Rotational motion was about a central post in the vertical direction. Part of the horizontal surface was capable of rotation with respect to a horizontal axis operated by means of linkages.

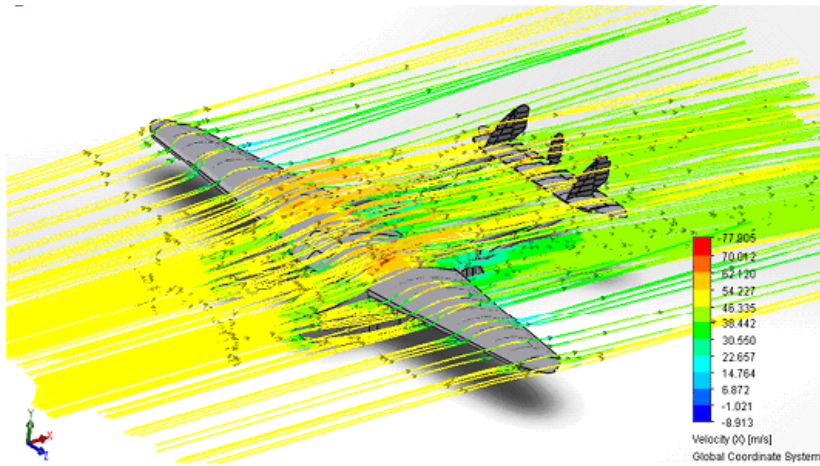


**Fig. 5.** Tail structure with supporting truss.

### 3.2 Flow Pattern

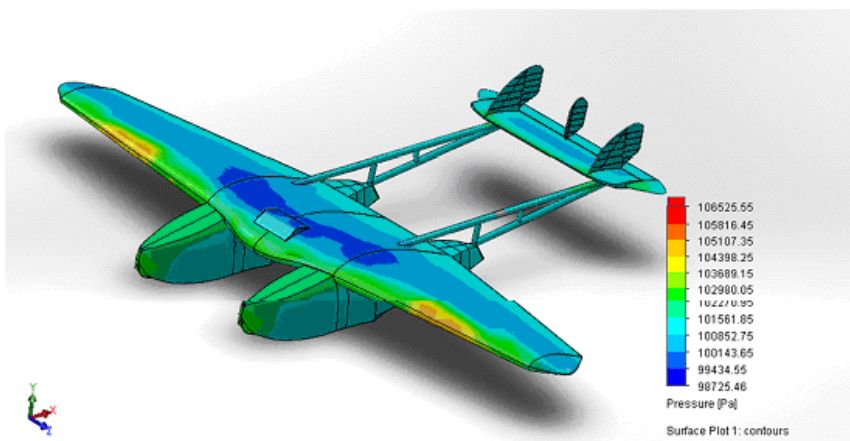
Velocity and height reached during trip trajectory by Jahu were quite low, reason why flow was approximately non-turbulent all over its skin. A part the region close to the

propellers of the engines, not taken into account in the simulation, laminar conditions were found in most of the flow field around of the body of the hydro, Fig. 6. Flow processor of program SolidWorks [8] was employed to the task. Level flight conditions were taken, under standard atmospheric conditions.



**Fig. 6.** Velocity field around the Jahu model.

Pressure distribution in the flow problem appears in Fig. 7, for the same conditions. From the plot, it is seen that borders of attack of the outer wings have higher pressures: peak values appear under these wings. Moreover, most of the drag in the plane comes out of the large boats; also, crew space.



**Fig. 7.** Pressure distribution over the hydroplane.

### 3.3 Stress Field

Most stressed parts in the airplane are the wings that support flexural loads. *Scafos* acted as landing gears in modern planes, having however structural function. Wing loading comes mostly from lift obtained in the flow analysis. Primary, secondary and tertiary stresses are present in this part. A plot of equivalent Mises stresses is shown in Fig. 8. As primary and secondary structural members of Jahu were made up of wood, and because of its shape, a quite robust structure resulted, with low stresses. Nonetheless, it was a heavy ship.

Stress analysis used prismatic 3D elements of the library of program SolidWorks, with relative velocity field. Solution procedure included Newton's method. No deformation correction to the loading was applied, as no solid-fluid interaction was pursued. This procedure is deemed unnecessary as the rigidity of the plane, a part its skin, so granted. Boat analyses under take off or sea descending were not considered as well. In this case skin friction with water, mostly, and air, less, would have to be considered with water surface effects.

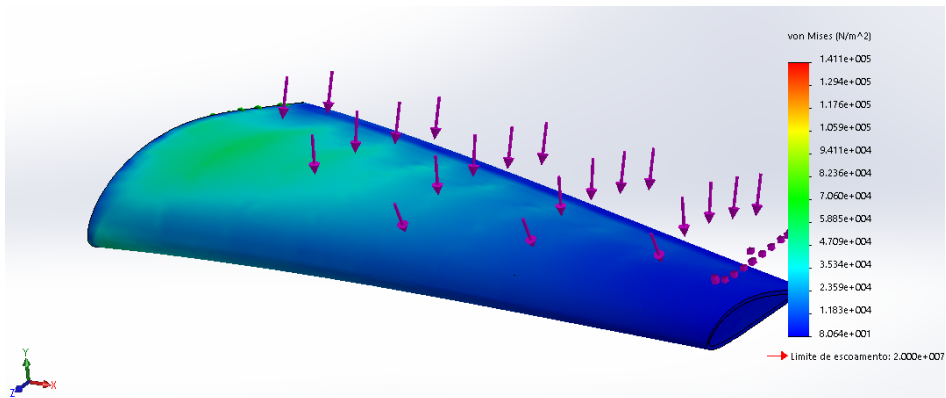


Fig. 8. Stress field in the outer wing model used for structural analysis.

Under level flight, but with stabilizers at 3 degrees, top Mises stresses in the body of the plane were in the range of 50% of the yield stress, with higher values appearing in the boat area, Fig. 9. Wing loads, engines thrusts and efforts transferred to the boats – scafos - by means of the central wing unit are responsible *for that*. Boats, acting as a double fuselage, also receive loading from the truss system of the tail stabilizers, Fig.5.

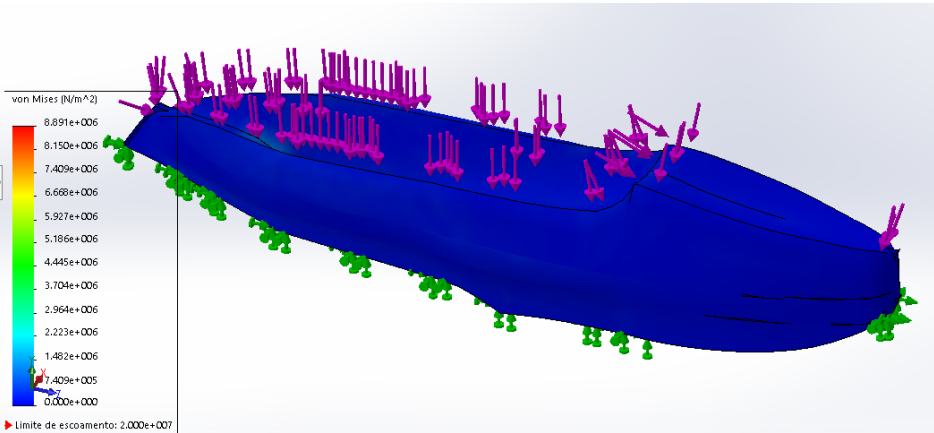


Fig. 9. Air-water loading and Mises stresses in the float unit.

### 3.4 Discussion

Jahu had an unusual configuration of wings as it had to be positioned inclined during flight. That resulted from its form, size and weight. Table 2 presents obtained results from lift and drag forces.

Variable	Symbol	Value
Drag Force, N	D	23.288 e+03
Lift Force, N	L	42.727 e+03
Drag Coefficient	$C_D$	0.055
Lift Coefficient	$C_L$	0.086

Table 2. Flow analysis results.

Values of the drag and lift coefficients,  $C_D$  and  $C_L$ , defined according to:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho_a A_f v_p^2} \quad (30)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho_a A_w v_p^2} \quad (31)$$

show large values but in the expected range for this type of plane. In the above expressions the areas used are the frontal  $A_f$  and projected  $A_w$  areas. Tail and main wings were considered. Values obtained for  $C_D$  are considered under estimated as the drag component  $D_E$  from the pair of engines was not taken into account.

## 4 | JAHU RELIABILITY

Voyages in the beginning of aeronautics age were characterized by a plague of failures, in part caused by the lack of guidance and control systems, infrastructure, incipient technology and in the case of Jahu, sabotage too. Even though the probability of structural failure of the Jahu was small, because it was a quite robust ship, mechanical failure possibility was appreciable. Here it is an exercise to foresee reliability based on the only flight of Jahu.

The probability of success in each stretch of the journey is based on per hour measures of engine failure probability, at constant speed. Weather conditions, altitude, fuel quality and maintenance, among others, affect this output however. As takeoff, level flight, maneuver and landing phases, have different engine and power rates, an average velocity, the cruise velocity, will be used in each stretch. This avoids integration of probability density functions. Therefore, it is plausible to assume that the probability of success depends on velocity and conditions for each stretch.

Jahu had two engines, working aligned. They were equal, even though they could be working under different conditions. It is assumed here, however, that both had the same service conditions, and obeyed then the same probability function. If the probability of survival of engine 1 after  $t$  hours at some cruise, velocity is  $p_1$ , and the one for the other, engine 2, is  $p_2$ , then necessarily  $p_1 = p_2 = p$ . As success  $S$ , in a stretch of the voyage requires that none of the engines fail,  $F$ , completion of the stretch occurs whenever:

$$p_{1\cap 2} = (F_1 \cup S_2) \cap (F_2 \cup S_1) \cap (S_1 \cup S_2) \quad (32)$$

takes place. The probability of failure is  $1 - p$ , success  $p$ . Therefore:

$$p_{1\cap 2} = p(1-p) + p(1-p) + (1-p)(1-p) = 1 - p^2 \quad (33)$$

Hence the probability of success is  $p^2$ . The function  $p = \hat{p}(t; C)$  that measures the probability of failure, affected by condition parameter  $C$ , is not known explicitly. If a two-parameter Weibull  $R = \hat{R}(t; b, q; C)$  reliability function for positive time, in hours, is assumed [9]:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^b\right]; \quad t \geq 0 \quad (34)$$

then the probability of life  $t$  of each engine is given by:

$$p(t) = \frac{b}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{b-1} R(t) \quad (35)$$

This distribution has an average value  $\mu_t$  and standard deviation  $\hat{\sigma}_t$  determined according to:

$$\mu_t = \theta \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right) \quad (36)$$

$$\hat{\sigma}_i = \theta \sqrt{\Gamma(1 + \frac{2}{b}) - \Gamma^2(1 + \frac{1}{b})} \quad (37)$$

being  $\Gamma$  the gamma function. The cumulative probability function  $F$  is determined from the reliability as  $F(t) = 1 - R(t)$ . In the above,  $\theta$  corresponds to the life, in hours, for which 63.2 percent of the observations lie below. The skewness parameter is  $b$ . Values around 3.3 indicate a symmetric distribution.

For the voyage of the Jahu in the first two stretches, where the engine was working in very adverse conditions, values of  $\theta = 15$ h and  $b = 3$  were chosen. They correspond to a 13.40 h average life of engines with standard deviation of 4.82 hours. After cleaning the tanks in Gibraltar, it is assumed that conditions improved and values of  $\theta = 20$ h and  $b = 3$  were, arbitrarily, taken for the next two stretches. Average engine life now was in the order of 18 h with standard deviation of 5 hours. From Praia on, much better performance of the engines were observed, and thus values of  $\theta = 25$ h and  $b = 3$  were assumed, with engines lasting in average 22.95 hours with deviations around 5.25 hours.

Table 3 lists each of the ten stretches used in the journey of Jahu from Genova, Italy to São Paulo, Brazil. For each step, consumed time was known, or computed from the straight distance between places [10], supposing flight under cruise velocity. The reliability measures the joint probability of success of the whole voyage. It is the conjunction of the fulfillment of the sequence of stretches. If for each step  $i$  of the trip, joint probability of success is  $p_i^2$  for the pair of engines, cumulative success probability is  $P_i = 1 - R_i$ . Supposing independency of the different stretches, joint probability of success is obtained from multiplication of the individual probabilities  $\prod_{i=1}^{10} p_i^2$ . Therefore, joint reliability computed from sequence in Table 3 gives a value of 0.985615

Stretch $i$	From/To	Distance $d_i$ km	Time $t_i$ h	Reliability $R_i$
1	Genova/Alicante	1 070.5	5.00	0.999847
2	Alicante/Gibraltar	495.6	2.98	0.999999
3	Gibraltar/Gran Canary	1 324.	7.25	0.999960
4	Gran Canary/Praia	1 646.	9.43	0.999457
5	Praia/Fernando de Noronha	2 307.	12.144	0.986947
6	Fernando de Noronha/Natal	375.	2.26	0.999999
7	Natal/Recife	254.5	1.53	0.999999
8	Recife/Salvador	672.6	4.05	0.999998
9	Salvador/Rio de Janeiro	1 209.2	7.28	0.999390
10	Rio de Janeiro/São Paulo	360.7	2.17	0.999999

**Table 3.** Success estimates of Jahu's voyage per step.

Evidently the voyage couldn't be completed in one stretch only, not even two. With three stretches, first one starting in Genova and ending in Praia, consuming a time of 24.66

hours, second from Praia to Fernando de Noronha, consuming the 12.144 hours realized, and finally the Brazilian coast stretch taking 17.28 hours was a possible journey with engines in good conditions. Reliability for this sequence would be of 0.896.

## 5 | CONCLUSIONS

Progetto S55 was under way in Italy by 2016 to construct and fly a replica of Savoia-Marchetti S-55 to South America [11]. This was in part due to the importance of Savoia-Marchetti to the history of aeronautics in Italy. Jahu, besides making part of that history, is one of the last of such planes still in good conditions. In the museum of TAM in São Carlos, Brazil, the complete airplane, after a restoration undertaken in São Paulo, is exposed. This work addresses the understanding of the design of such an important aircraft to the development of airplane industry.

It is seen that the airplane had some different concepts. Its aerodynamics shows large values of drag and lift coefficients that deemed the plane very consuming. Fact confirmed by the crew decision of dropping most of the equipment that came with it, in order to save space for the tanks of fuel. Lift obtained for zero angle of attack was smaller than the weight of the plane, what required “using wing at level flight”. Structural arrangement of wings and its analysis confirms that structurally speaking, Jahu was a sound plane. Repositioning structural components in the original arrangement, however, could make it easier to fly.

Additional work is necessary to finish the structural analysis of the plane, incomplete at this point, as different flight situations weren’t analyzed, neither the dynamic response produced. But so far it confirms the robustness of the plane. Investigations on alternative woods, if kept that option, for construction of a lighter replica are important as they lead to less power, even keeping the form of the plane. A hydroplane for conditions in Amazonia, well in demand nowadays, could also use results from the present study.

## ACKNOWLEDGMENTS

Making available some drawings used in the development of the model by Progetto S55 [12] is dully acknowledged.

## REFERENCES

[1] [https://pt.wikipedia.org/wiki/Jahu\\_\(hidroavião\)](https://pt.wikipedia.org/wiki/Jahu_(hidroavião))

[2] Idrovolante “Savoia Marchetti” tipo S. 55 X, Istbuzioni per il montaggio e per la regolaziche.

[3] Gurtin, E., *Continuum Mechanics*, John Wiley, 2002



[4] Stengel, Robert F., *Flight Dynamics*, Princeton University Press. Princeton, 2004, ISBN 0-691-11407-2.

[5] Zienkiewicz, O, Taylor, R. and Zhu, J.Z. "The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals", 7<sup>th</sup> edition, 2003, Elsevier

[6] Belytschko, T. and Fish, J., *A First Course in Finite Elements*, John Wiley, 2010

[7] Bathe, K. J., *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice-Hall, 2nd Edition, 1996

[8] SolidWorks, Student's Guide to Learning, Dassault Systemes, 2013

[9] Budynas. R.G. and Nisbett, J.K., *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 8<sup>th</sup> edition, SI Units, McGraw-Hill Companies, Inc., NY, USA, 2008

[10] <https://www.distancefromto.net>

[11] <https://www.progetto55.it/chi-siamo>

[12] Progetto S55, Study Program 55, Busto Arsizio (Va), Italy, 201

# CAPÍTULO 9

## MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE ENERGIA EM SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA - ANÁLISE DAS CAMPANHAS DE MEDIÇÃO DE TENSÃO E CORRENTE E CARACTERÍSTICAS DE INJEÇÃO DE HARMÔNICOS DOS SISTEMAS DE BAIXA, MÉDIA E ALTA TENSÃO

Data de aceite: 02/08/2021

Data de submissão: 25/06/2021

### **Nelson Clodoaldo de Jesus**

GSI - ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA  
Taubaté (SP)

### **João Roberto Cogo**

GSI - ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA  
Taubaté (SP)

### **Luiz Marlus Duarte**

GSI - ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA  
Taubaté (SP)

### **Jesus Daniel de Oliveira**

GSI - ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA  
Taubaté (SP)

### **Luis Fernando Ribeiro Ferreira**

GSI - ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA  
Taubaté (SP)

### **Éverson Júnior de Mendonça**

GSI - ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA  
Taubaté (SP)

### **Leandro Martins Fernandes**

GSI - ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA  
Taubaté (SP)

**RESUMO:** Este trabalho tem como objetivo apresentar uma avaliação da qualidade da energia elétrica em um sistema de geração de energia fotovoltaica. Serão apresentados os resultados obtidos nas campanhas de

medição no ponto de conexão em 138 kV, verificando o desempenho nas condições de pré e pós-operação. Resultados específicos das medições internas ao sistema de geração serão abordados, incluindo a subestação coletora em 138 e 34,5 kV e os inversores de frequência. Serão detalhados os comportamentos obtidos no monitoramento e a comparação dos resultados com os indicadores recomendados, bem como as principais características de desempenho e perfil harmônico do sistema elétrico.

**PALAVRAS - CHAVE:** Campanhas de Medição, Qualidade da Energia Elétrica, Geração Fotovoltaica, Harmônicos, Inter-Harmônicos.

### MONITORING OF ENERGY QUALITY IN PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEMS - ANALYSIS OF VOLTAGE AND CURRENT MEASUREMENT CAMPAIGNS AND HARMONICS INJECTION CHARACTERISTICS OF LOW, MEDIUM AND HIGH VOLTAGE SYSTEMS

**ABSTRACT:** This work aims to present an evaluation of the quality of electrical energy in a photovoltaic energy generation system. The results obtained in the measurement campaigns at the connection point at 138 kV will be presented, verifying the performance in pre- and post-operation conditions. Specific results of measurements internal to the generation system will be addressed, including the collector substation at 138 and 34.5 kV and frequency inverters. The behaviors obtained in the monitoring and comparison of results with the recommended indicators will be detailed, as well as the main performance characteristics and

harmonic profile of the electrical system.

**KEYWORDS:** Measurement Campaigns, Electric Power Quality, Photovoltaic Generation, Harmonics, Inter-Harmonics.

## 1 | INTRODUÇÃO

A geração centralizada de energia fotovoltaica, composta por projetos de usinas de grande porte, assim como tantas outras aplicações da tecnologia solar fotovoltaica no Brasil, tem se consolidado cada vez mais como uma fonte renovável de geração de energia elétrica (QEE) com alto valor agregado à sociedade brasileira (8).

A conexão de sistemas de geração de energia renováveis se apresenta cada vez mais presente em sistemas elétricos de um modo geral, sendo necessário o atendimento aos requisitos técnicos e regulatórios. Neste sentido, estudos e medições de qualidade de energia se constituem importantes ferramentas relacionadas aos aspectos de dimensionamento e análise do desempenho operacional do sistema frente a sistemas intermitentes. Este trabalho descreve as considerações associadas ao monitoramento da qualidade de energia, incluindo o ponto de conexão com a subestação de fronteira e internamente, por meio de campanhas de medição das tensões e correntes, de modo a apresentar o real comportamento harmônico do sistema sem e com a operação do complexo fotovoltaico.

## 2 | CAMPANHAS DE MEDIÇÃO DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

A avaliação dos indicadores em regime permanente foi realizada considerando um período de 7 (sete) dias consecutivos, adotando-se os limites estabelecidos pelo Submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede e os requisitos apresentados nas Instruções para Realização de Estudos e Medições de QEE relacionados aos Acessos à Rede Básica ou nos Barramentos de Fronteira com a Rede Básica para Parques Eólicos, Solares, Consumidores Livres e Distribuidoras, do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), conforme (5) e (6).

Os aspectos considerados na avaliação dos resultados obtidos durante as medições em regime permanente e indicadores de QEE referem-se ao comportamento das tensões e correntes eficazes, harmônicos, desequilíbrios de tensão, flutuações de tensão e potências, em função da análise de cada monitoramento, conforme apresentado a seguir.

Os resultados destas medições foram utilizados para verificar o comportamento das grandezas elétricas e o desempenho do sistema por meio da análise comparativa dos resultados obtidos entre as medições e os valores limites recomendados (5), (3) (2). As correntes no lado de 138 [kV] do banco de autotransformadores TR, instalado na Subestação de conexão, também foram medidas em ambas as campanhas de medição, a

título de comparação.

A Figura 1 apresenta o diagrama unifilar simplificado indicando os pontos onde foram realizadas as medições de QEE, relacionadas à configuração adotada durante as campanhas de medições das correntes injetadas pelos inversores de frequências instalados no complexo de geração fotovoltaica.

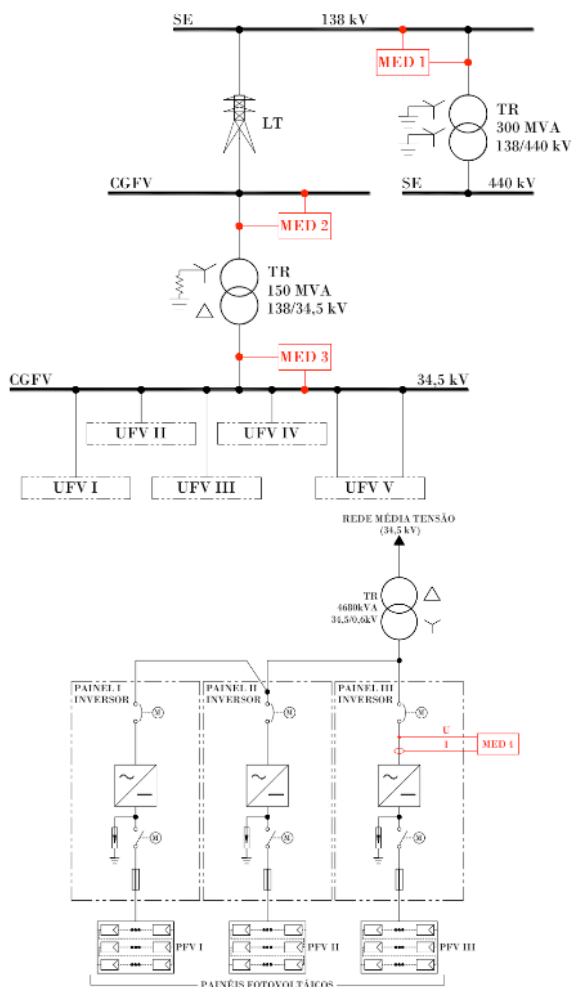


Figura 1 - Diagramas unifilares simplificados indicando os pontos de medição da QEE

O primeiro monitoramento foi realizado no ponto de acoplamento comum ao sistema interligado, utilizando os Transformadores de Potencial (TPs) e Transformadores de Corrente (TCs) associados ao “bay” de conexão de um banco de autotransformadores em 138 kV, com potência nominal de 300 MVA, no período compreendido entre as 14h de 08/12/2017 e 14h de 15/12/2017, portanto, antes da entrada em operação das usinas

fotovoltaicas.

As medições no ponto de acoplamento foram realizadas com o objetivo de verificar o comportamento dos indicadores em comparação aos valores recomendados (5). Após a instalação, comissionamento e entrada em operação de todas as 5 usinas do complexo fotovoltaico, realizou-se uma nova medição no intervalo entre as 08h de 23/04/2018 e 8h de 30/04/2018, adotando-se os mesmos ponto de conexão e medidor de qualidade da energia elétrica. Adicionalmente, serão apresentados os comportamentos das grandezas elétricas medidas internamente ao sistema de geração, incluindo a análise de harmônicos injetados pelos inversores de frequência utilizados na conversão de energia dos painéis fotovoltaicos. A Figura 2 ilustra o comportamento da potência demandada pela usina durante o mesmo período da segunda campanha de medição (pós-operação), observando-se, neste período de monitoramento, uma condição de geração de potência máxima com valor próximo a 130 MW.

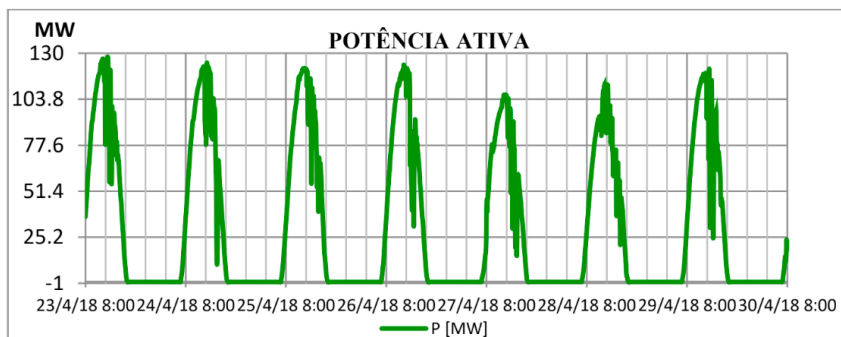


Figura 2 - Comportamento da potência ativa média gerada pela usina fotovoltaica

## 2.1 Medições na Subestação de Conexão com o Sistema Interligado (MED 1)

A Figura 3 mostra a comparação entre os indicadores relativos a Distorção Total de Tensão devido aos harmônicos, com ligeira redução observada na campanha de medição após a entrada em operação das 5 usinas fotovoltaicas. De qualquer modo, em ambos os casos os valores máximos dos indicadores permaneceram inferiores até mesmo ao limite individual de 1,5%, ou seja, apresentam-se totalmente adequados em relação à qualidade e conformidade das formas de onda das tensões do sistema. Na mesma Figura, apresentam-se os indicadores relacionados aos desequilíbrios das tensões, também com resultados adequados e valores bem inferiores aos limites recomendados.

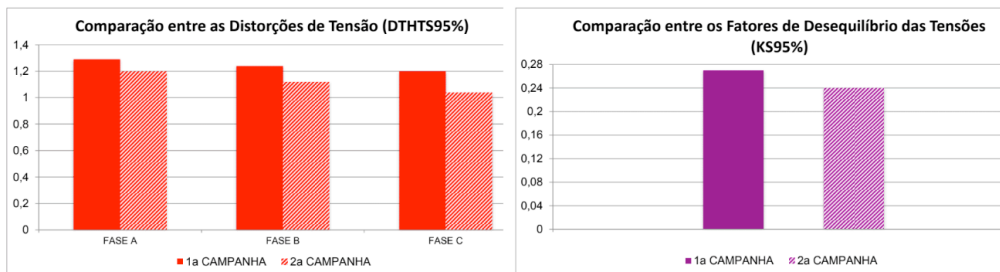


Figura 3 - Comparação entre os indicadores das distorções e desequilíbrios

Já em relação aos indicadores relacionados à flutuação de tensão quanto à cintilação luminosa (Flicker) de curta e longa duração (Pst e Plt), os valores permaneceram praticamente inalterados, conforme mostrado na Figura 4.

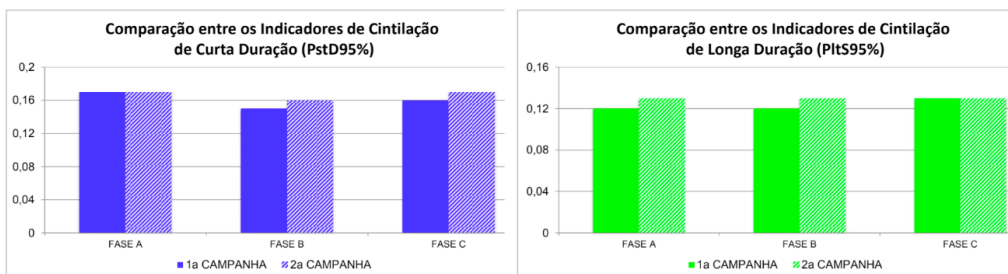


Figura 4 - Comparação entre os indicadores de flutuação de tensão

Como forma de demonstrar o comportamento harmônico das tensões do sistema, apresentam-se na Figura 5 as distorções das tensões durante as campanhas de medição, antes e após a entrada em operação do sistema de geração fotovoltaico, sendo que, em ambos os períodos das medições, as máximas distorções permaneceram inferiores a 1,4%, ou seja, inferiores aos limites recomendados (5).

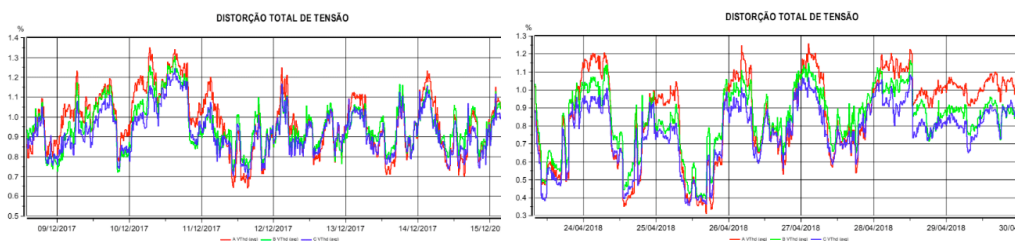


Figura 5 - Resultados das distorções das tensões nas campanhas de medição pré e pós-operação (AT)

A Figura 6 a seguir mostra a comparação por fase dos componentes harmônicos obtidos a partir dos percentis de 95% para cada ordem, na primeira (sem a operação da UFV) e na segunda campanha de medição de QEE (com a operação da UFV), mostrando novamente comportamentos similares em relação às distorções das tensões e componentes harmônicos individuais nos períodos analisados durante a realização das duas campanhas de medição de QEE. Os componentes preponderantes foram os de 3ª, 5ª e 7ª ordens, destacando-se ainda o componente de 48ª ordem, sendo registrado somente na segunda campanha de medição, ou seja, com a influência da conexão e operação do sistema de geração fotovoltaico.

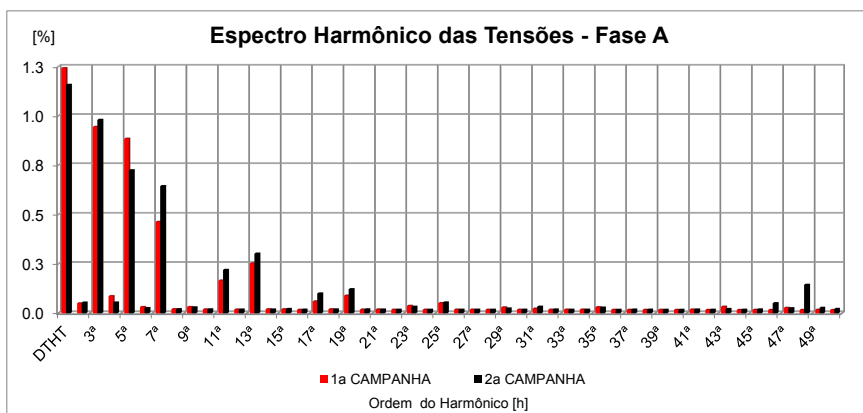


Figura 6 - Comparação entre os indicadores das distorções e componentes harmônicos das tensões da fase A

Outro parâmetro considerado nas medições foi as distorções das correntes medidas no mesmo ponto de análise, sendo inicialmente realizada uma comparação entre as distorções das correntes em pu da corrente máxima obtida em cada monitoramento (Total Demand Distortion - TDD) (3), (1), sendo que os valores máximos não apresentaram diferenças significativas, com valores máximos percentuais próximos a 4,5%. Por outro lado, a título de comparação, foram verificados os valores absolutos dos componentes harmônicos injetados (em A), sendo que na segunda campanha de medição ocorreu uma redução, conforme esclarece o gráfico da Figura 7.

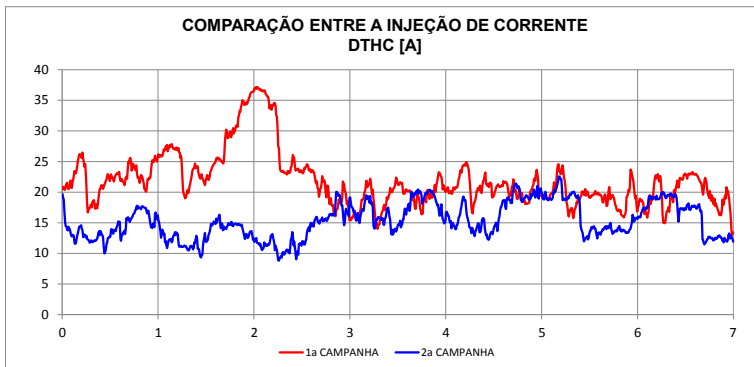


Figura 7 - Resultados das distorções das correntes nas campanhas de medição pré e pós-operação

## 2.2 Medições na Subestação Coletora da Usina Fotovoltaica

Este item apresenta uma análise das medições com base nos dados obtidos na subestação coletora, apresentando alguns resultados amostrais do comportamento das potências e distorções das tensões e correntes medidas na subestação interna do complexo formado pelas usinas fotovoltaicas. Deste modo, serão destacadas a seguir as potências, distorções e componentes harmônicos registrados nos lados de 138 kV e 34,5 kV.

### 2.2.1 Medições em 138 kV (MED 2)

As potências ativa e reativa obtidas durante a medição em 138 kV estão apresentadas na Figura 8, seguida conjuntamente com as respectivas distorções das tensões e correntes, comprovando novamente valores inferiores aos recomendados, cuja condição operativa não constava com a presença de quaisquer filtros de harmônicos.

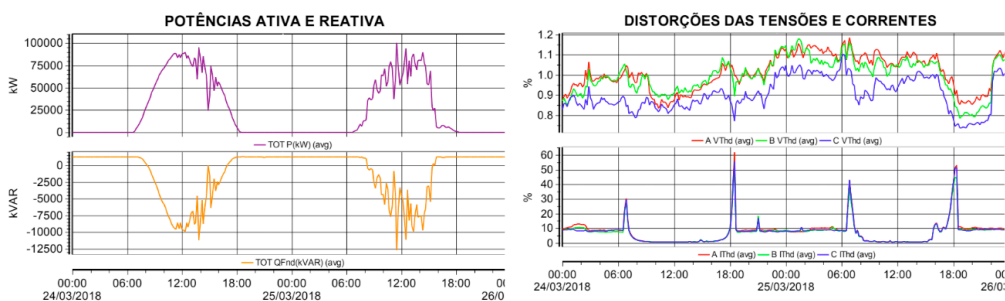


Figura 8 - Resultados das medições das potências e distorções na SE da Usina em 138 kV (AT)

As formas de ondas das tensões e correntes no lado de 138 kV durante os instantes coincidentes com os registros das maiores distorções das correntes (menor carregamento) e também para o instante de máximo carregamento estão apresentadas na Figura 9.



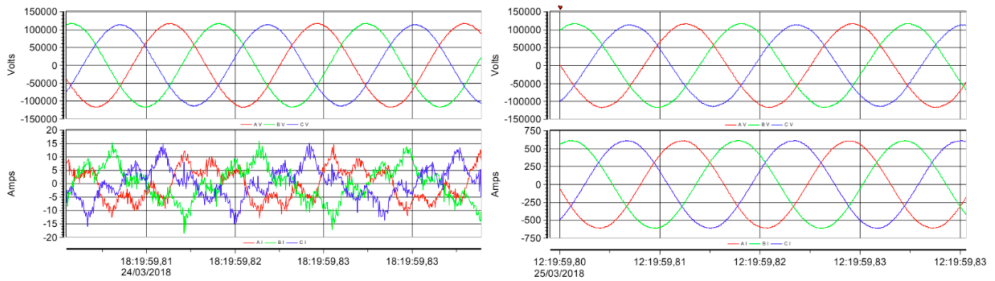


Figura 9 - Formas de onda das tensões e correntes em 138 kV nas condições de mínimo e máximo carregamento

As distorções e os espectros harmônicos associados às formas de onda apresentadas anteriormente estão destacados em seguida. Observa-se que enquanto as distorções das tensões se mantêm praticamente constantes, na medida em que as correntes de operação aumentam, as respectivas distorções são reduzidas significativamente, conforme pode se verificar com o auxílio da Figura 10.

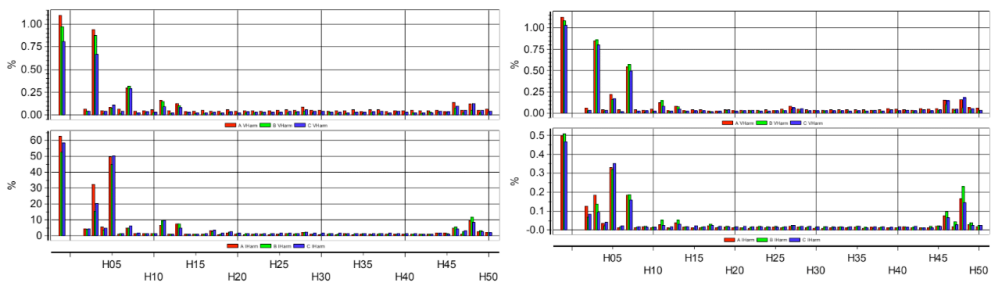


Figura 10 - Espectros harmônicos das tensões e correntes em 138 kV (mínimo e máximo carregamento)

### 2.2.2 Medições em 34,5 kV (MED 3)

De forma complementar para outra condição de operação do sistema, as potências e distorções devido aos harmônicos, registradas durante uma medição no lado de 34,5 kV da subestação coletora, estão ilustradas na Figura 11. A Figura 12 mostra as formas de ondas das tensões e correntes para dois instantes de operação, coincidindo com o ponto de maior distorção das correntes e, em seguida, equivalente à máxima geração de energia neste período do monitoramento.

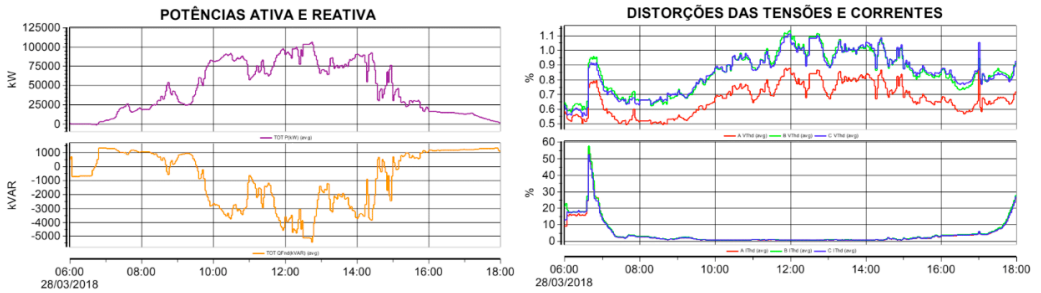


Figura 11 - Resultados das medições das potências e distorções na SE da Usina em 34,5 kV (MT)

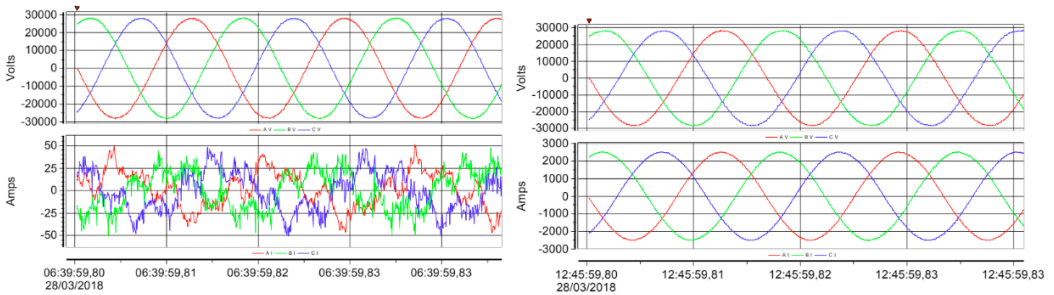


Figura 12 - Formas de onda das tensões e correntes em 34,5 kV nas condições de mínimo e máximo carregamento

Analisando-se os espectros harmônicos no lado de 34,5 kV verificam-se resultados com comportamentos similares aos obtidos no lado de 138 kV, sendo as distorções das tensões mantidas com valores inferiores a 1,5 %, além das variações das distorções das correntes em função da potência demandada. Os componentes harmônicos mais significativos registrados nas tensões foram os componentes de 48<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 46<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens. Já para as respectivas correntes, os componentes mais importantes registrados foram os de 5<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup> e 48<sup>a</sup> ordens.

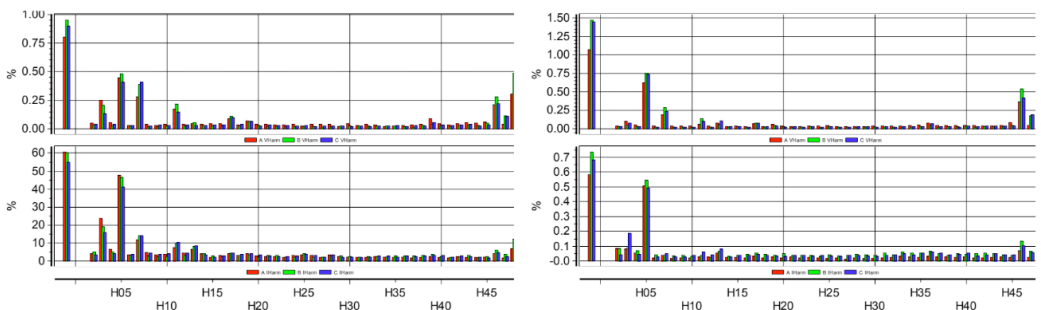


Figura 13 - Espectros harmônicos das tensões e correntes em 34,5 kV (mínimo e máximo carregamento)

### 2.2.3 Medições nos inversores de frequência das centrais de geração fotovoltaicas em 600 V (MED 4)

Foram realizadas diversas medições nos inversores de frequência instalados nas centrais de geração fotovoltaicas para as campanhas de medição das correntes, sendo realizadas amostras em pelo menos duas unidades em cada usina. Durante estas medições os inversores foram programados para atuarem com controle em modo de potência, variando-se cada patamar em 10%, por 10 minutos consecutivos desde a potência nula (P0) até a máxima de operação (Pmáx) (2). A Figura 14 apresenta os comportamentos registrados para as distorções das tensões e correntes no respectivo intervalo do monitoramento, bem como os resultados das potências ativas obtidas na saída de um dos inversores conectado em 600 V.

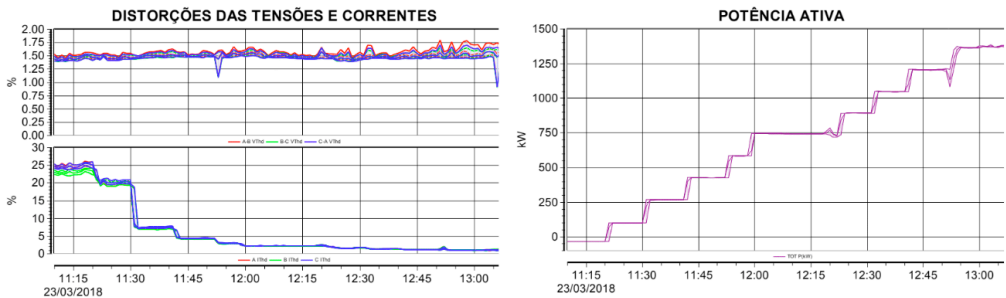


Figura 14 - Resultados das medições das distorções com controle da potência ativa do inversor (BT)

De modo a comparar o perfil harmônico das tensões e correntes para alguns patamares das potências dos inversores, a Figura 15 ilustra as formas de onda para referências de potência nula (P0) e 20% da nominal (P20).

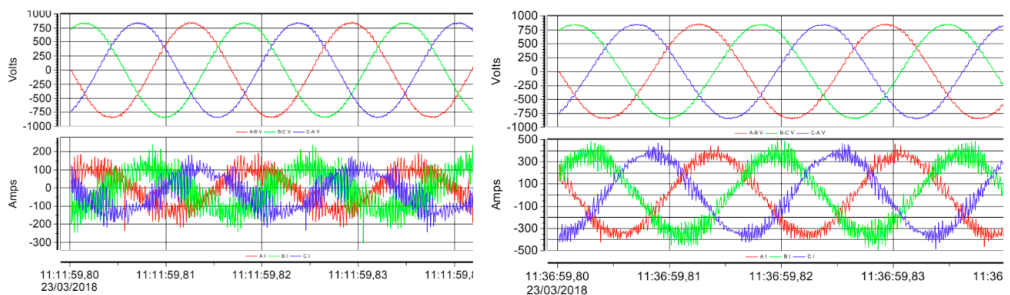


Figura 15 - Formas de onda das tensões e correntes com  $P = 0\%$  e  $P=20\%$  da nominal

A decomposição das formas de onda para uma potência nula de operação (11:11:59.80) indica a presença de componentes harmônicos mais significativos tanto para

as tensões quanto para as correntes, como sendo os harmônicos de 48a e 46a ordem, respectivamente.

Para as faixas de potências de referência (P0 e P20) os componentes harmônicos das tensões não sofrem alterações, mas para as respectivas correntes, ocorre uma redução significativa no valor da distorção total, mantendo-se os mesmos harmônicos individuais preponderantes, conforme ilustra a Figura 16.

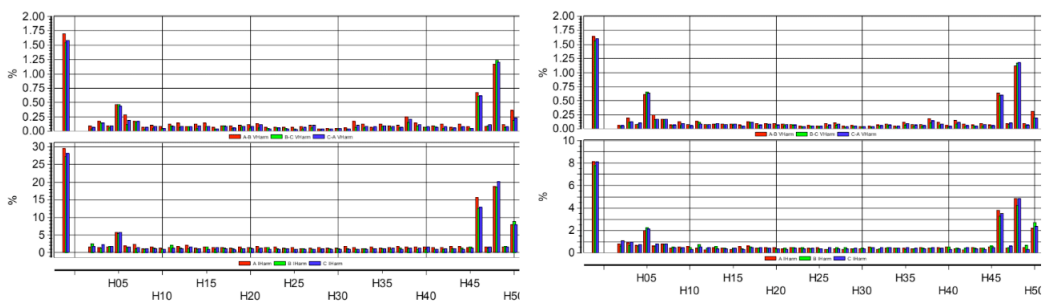


Figura 16 - Espectros harmônicos das tensões e correntes com P = 0% e P=20% da nominal

A Figura 17 apresenta as formas de onda das tensões e correntes obtidas para potências de referência de 50% (P50) e de 100% do valor nominal (P100). Com base na Figura 18, destaca-se, novamente, que os valores médios dos espectros harmônicos das tensões não sofrem alterações substanciais, mas, com o aumento do carregamento, as distorções das correntes são fortemente reduzidas, alterando inclusive os componentes característicos, pois para as condições de operação com as máximas correntes, o componente típico de 5ª ordem supera o componente de 48ª ordem, presente nas tensões do sistema, especialmente quando da operação com correntes equivalentes a carregamentos reduzidos.

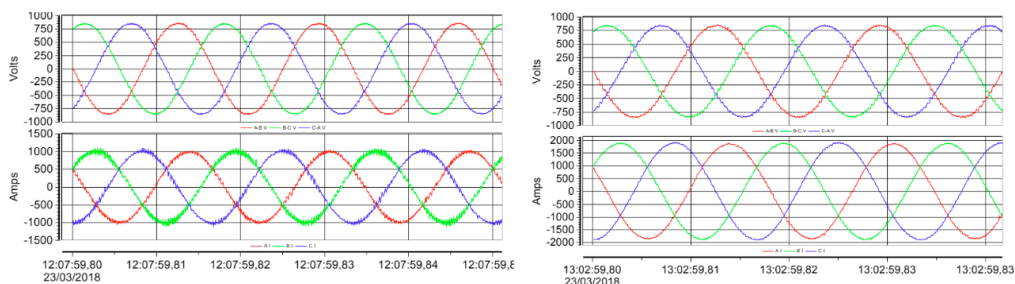


Figura 17 - Formas de onda das tensões e correntes com P = 50% da nominal (P50) e P=Máx (P100)

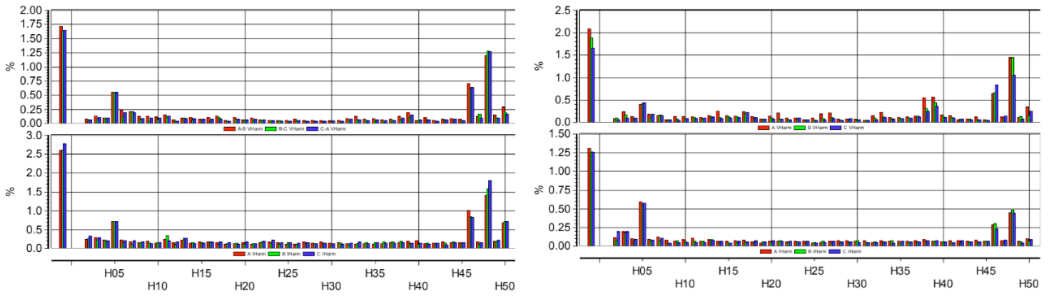


Figura 18 - Espectros harmônicos das tensões e correntes com P = 50% da nominal (P50) e P=Máx (P100)

De modo comparativo entre as amostras aquisitivas nas cinco usinas de geração fotovoltaica, a Figura 19 mostra os resultados das distorções das correntes para cada componente individual, considerando os valores equivalentes ao percentis de 95%, tomando-se com base as médias quadráticas das amostras obtidas nas campanhas de medição das correntes dos inversores, com valor em pu da base nominal, com resultados inferiores aos normalizados (3), (1).

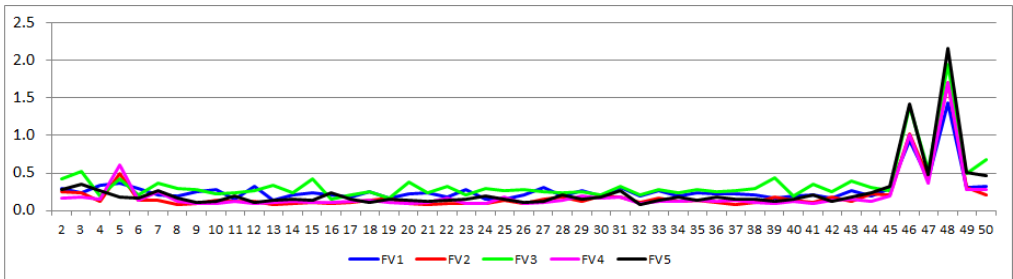


Figura 19 - Análise comparativa das distorções individuais das correntes entre cinco inversores de frequência

Finalmente, foi demonstrado que durante a realização do monitoramento da QEE, foram também observadas variações intermitentes nas formas de onda e distorções, com oscilações periódicas, incluindo a presença de inter-harmônicos de altas frequências, superiores a 50ª ordem, ou seja, além dos componentes preponderantes, próximos a 2,88 kHz, foram detectadas componentes com frequências próximas a 6 kHz, sendo então classificados como supra harmônicos em sua faixa inicial (7), (4). Portanto, estes componentes estão diretamente relacionados com as frequências de chaveamentos dos inversores, sendo que, em função do conjunto de diversos inversores, operando de forma independente e não sincronizada, tem-se uma modulação nas formas de onda das tensões equivalentes do sistema, em função das variações e da influência de componentes de altas frequências devido aos chaveamentos do tipo PWM. A Figura 20 mostra o espectro total

das correntes, obtido em determinado instante da medição e o registro de componentes inter-harmônicos de frequências elevadas.

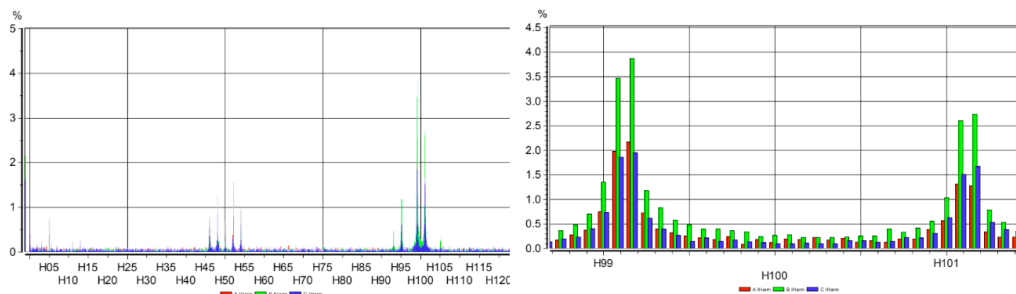


Figura 20 - Espectros harmônicos das correntes (*full spectra*) e detalhes dos inter-harmônicos de altas frequências

### 3 I CONCLUSÕES

Foram realizadas campanhas de medição das tensões no ponto de conexão com o sistema elétrico para as condições sem e com a operação do complexo de geração fotovoltaica, não sendo verificados impactos negativos ou quaisquer tipos de degradação da qualidade de energia. Portanto, o sistema se encontra plenamente apto à operação, estando em conformidade com os padrões e limites recomendados. Neste particular, durante as etapas das campanhas de medição, o sistema em análise não apresentava qualquer tipo de filtros de harmônicos no lado de média ou alta tensão. Resultados adequados também foram consolidados internamente, seja em termos das tensões em 138, 34,5 ou 0,6 kV, com tensões plenamente adequadas.

Para as campanhas de medição das correntes dos inversores, foram avaliados diversos equipamentos, resultando em dados representativos à análise do sistema e injeção de harmônicos. Além dos harmônicos característicos, ressalta-se a forte presença de componentes de altas frequências (48a e 46a ordens) nas tensões do sistema e, principalmente, para as correntes de operação sob condições equivalentes de baixos carregamentos.

Análises semelhantes e demais verificações detalhadas quanto aos possíveis impactos das distorções devem ser conduzidas e investigadas, visando à caracterização e comparação do perfil harmônico das tensões e correntes, bem como dos indicadores de QEE em sistemas fotovoltaicos, destacando-se a influência de componentes harmônicos de altas frequências, inter-harmônicos, além de variações cíclicas nas distorções e formas de onda, conforme observado durante o monitoramento deste sistema de geração com base na energia fotovoltaica.

## REFERÊNCIAS

- (1) IEC 61000-3-6 - **Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3: Limits, Section 6: Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems.**
- (2) IEC 61400-21 - **Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines.**
- (3) **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems** - IEEE STD 519-2014, IEEE Power and Energy Society - March 27, 2014.
- (4) Munoz, A.M.; Bollen, M.; Garrido, J.; **Solar PV Inverter Supraharmonics Reduction With Random PWM**; (<https://www.researchgate.net/publication/316612648>), 27/02/2018.
- (5) Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) - **Gerenciamento dos Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica da Rede Básica - Submódulo 2.8** - Revisão 2016.12 - Data de Vigência 01/01/17.
- (6) Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) - **Instruções para Realização de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Acessos à Rede Básica ou nos Barramentos de Fronteira com a Rede Básica para Parques Eólicos, Solares, Consumidores Livres e Distribuidoras** - ONS NT 009/2016 - Revisão 02, de março de 2018.
- (7) Roger C. Dugan; Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty - **Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill**; Second edition; 2003.
- (8) Villalva, M.G.; Gazoli, J.R.; **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações - Sistemas Isolados e Conectados à Rede**, 1ª Edição, Editora Érica, São Paulo, 2012.

## OTIMIZAÇÃO MULTI-LIMIAR PARA SEGMENTAÇÃO DE MRI POR ALGORÍTIMO GENÉTICO

Data de aceite: 02/08/2021

Data de submissão: 05/05/2021

### **Tiago Santos Ferreira**

Universidade Estadual do Maranhão - UEMA  
São Luís, Maranhão  
<https://orcid.org/0000-0002-5016-2222>

### **Paulo Fernandes da Silva Júnior**

Universidade Estadual do Maranhão - UEMA  
São Luís, Maranhão  
<http://orcid.org/0000-0001-6088-6446>

### **Ewaldo Eder Carvalho Santana**

Universidade Estadual do Maranhão - UEMA  
São Luís, Maranhão  
<http://orcid.org/0000-0002-8894-5353>

### **Mauro Sérgio Silva Pinto**

Universidade Estadual do Maranhão - UEMA  
São Luís, Maranhão  
<http://orcid.org/0000-0003-3740-7819>

### **Jayne Muniz Fernandes**

Universidade Federal da Paraíba - UFPB  
São Luís, Maranhão  
<https://orcid.org/0000-0002-8686-8278>

### **Ana Flávia Chaves Uchôa**

Universidade Federal da Paraíba - UFPB  
João Pessoa, Paraíba  
<https://orcid.org/0000-0001-6872-082X>

### **Jarbas Pinto Monteiro Guedes**

Centro Universitário de João Pessoa - UNIPE  
São Luís, Maranhão  
<https://orcid.org/0000-0003-3029-9720>

**RESUMO:** A segmentação de imagens é uma tarefa essencial no processamento de imagens que visa simplificar e / ou mudar sua representação para uma análise mais simples. Imagens médicas do cérebro, por exemplo, são importantes na detecção e diagnóstico de doenças e são relevantes em pesquisas na área biológica. Neste trabalho, é proposta uma abordagem para a segmentação de imagens cerebrais, utilizando o método baseado em algoritmos genéticos pelo método de múltiplos limiares, a fim de encontrar limiares que separam de forma otimizada a matéria cinza, matéria branca e líquido cefalorraquidiano em imagens cranianas. Os parâmetros, valores de limiar, mais apropriados para os limiares foram identificados a fim de obter a melhor solução possível para a segmentação de imagens, sendo então capaz de a partir da imagem original encontrar as outras imagens que representam seus respectivos tecidos de interesse. A ressonância magnética de 10 pacientes foi obtida do *National Center for Image Guided Therapy Database* (NCIGT). Em seguida, um pré-processamento foi estabelecido para melhorar as imagens de entrada no algoritmo de segmentação. Os resultados da implementação do algoritmo genético na detecção por limiar demonstraram eficiência, isto é, sendo capaz de separar a imagem inicial, apresentando baixo custo computacional, na segmentação com variação máxima de tempo de 11,15 segundos.

**PALAVRAS - CHAVE:** Processamento de imagens, algoritmo genético, imagem por ressonância magnética, método multi-limiar.



# MULTI THRESHOLD OPTIMIZATION FOR MRI SEGMENTATION BY GENETIC ALGORITHMS

**ABSTRACT:** Image segmentation is an essential task in image processing that aims to simplify and/or change its representation for simpler analysis. Medical images of the brain, for example, are important in the detection and diagnosis of diseases, as well as relevance in biological research. This work proposes the segmentation of brain images, using the genetic algorithms by multi-thresholds method, in order to find thresholds that optimally separate gray matter, white matter, and cerebrospinal fluid into cranial images, with the evaluation of timely execution. The most appropriate parameters, threshold values, for the thresholds were identified in order to obtain the best possible solution for image segmentation, then starting with the original image, be able to find the other images that represent their respective tissues of interest. Magnetic resonance imaging of 10 patients was obtained from the National Center for Image-Guided Therapy Database. Then, a pre-processing was established to improve the input images in the segmentation algorithm. The results of the implementation of the genetic algorithm in the detection by threshold demonstrated efficiency, that is, being able to separate the initial image, with low computational cost, in the segmentation with a maximum time variation of 11.15 seconds.

**KEYWORDS:** Image processing, genetic algorithm, magnetic resonance imaging, multi threshold method.

## 1 | INTRODUCTION

According to (ANUBHA, 2015), segmentation subdivides an image into its constituent regions or objects, in which the level of detail depends on the problem being solved. This way, the segmentation of nontrivial images is one of the most difficult tasks in image processing, being an important aspect of medical image processing, as its accuracy determines the eventual success or failure of computerized analysis procedures (Kavitha and Chellamuthu, 2016).

Magnetic Resonance Imaging (MRI) is a medical image exam that uses the relationship between the frequency of energy that a proton absorbs and the magnetic field strength that it experiences, using the field dependence to localize these proton frequencies to different regions of space (DALE, BROWN, AND SEMELKA, 2015). MRI can be used in several applications, from the detection of tumors, infections, and treatment in radiotherapy in several human body parts (DALE, BROWN, AND SEMELKA, 2015), (LINEY AND HEIDE, 2019).

Brain MRI segmentation is often the first step in many clinical applications, and it's commonly used for measuring and visualizing the anatomical structures, for analyzing brain changes, for delineating pathological regions, and for surgical planning and image-guided interventions. The accuracy of image segmentation stage would have a great impact on the effectiveness of subsequent stages of the image processing. Image segmentation problem has been studied by many researchers for several years; however, due to the characteristics

of the images, such as their different modal histograms, the problem of image segmentation is still an open research issue, therefore, further investigation is needed (DESPOTOVIC, GROOSSENS, AND PHILIPS, 2015).

Providing ideal solutions for many practices applications, genetic algorithms have recently been used in order to find optimal solutions to the image problem segmentations. In general terms, a Genetic Algorithm (GA) is a computational model that simulates the biological evolutionary process of natural selection (GONZALEZ et al., 2008).

Thermographic inspection has been widely applied to non-destructive testing and evaluation with the capabilities of rapid, contactless, and large surface area detection. Image segmentation is considered essential for identifying and sizing defects. To attain a high-level performance, specific physics-based models that describe defects generation and enable the precise extraction of target region are of crucial importance. The GA is then used to maximize the entropy in order to segment efficiently the image into object and background. The experimental results show the approach maximizes efficiently the entropy and generates better image segmentation quality compared to the classical thresholding technique (GONZALEZ et al., 2008).

Several works used GA, and its variations, in the MRI segmentation. ABDEL-KHALEK et al. (2017), propose a novel tow-dimensional image segmentation approach based on the flexible representation of Tsallis and Renyi entropies and employing the Genetic Algorithm (GA). From the information theory point of view, the entropy is used here to measure the amount of information contained in the two-dimensional histogram of the image. GAO et al. (2017), propose an effective genetic first-order statistical image segmentation algorithm for quantitative crack detection. The proposed method automatically extracts valuable spatial-temporal patterns from unsupervised feature extraction algorithm and avoids a range of issues associated with human intervention in laborious manual selection of specific thermal video frames for processing. In the work of Yeh, and Fu (2008), several clustering techniques for human-brain MRI were implanted, such as k-means, fuzzy c-means (FCM), learning-vector quantization (LVQ) and fuzzy algorithms for LVQ (FALVQ), with the comparison of the results.

This work proposes the segmentation of brain images, using the method based on genetic algorithms by multi-thresholds method, in order to find thresholds that optimally separate gray matter, white matter, and cerebrospinal fluid into cranial images, with the evaluation of timely execution. The proposed method aims to maximize intra-class variation between object(s) and background, as well as the minimization of inter-class variation, i.e., between background pixels among pixels of objects. This work comprises three more parts besides this introduction. Section 2 deals with materials and methods with the theoretical basis used in the project's development. The section 3 shows the results and discussions of the work are presented and in section 4 the final considerations.

## 2 | MATERIAL AND METHODS

A digital image can be viewed as a two-dimensional matrix of discrete points called pixels. In a gray level image, each element is an approximation of the gray level of the image at the point sampled to a value in the set  $0, 1, \dots, L-1$ . Pixels with values between 0 and  $L-1$  will be displayed in different shades of gray, which will be darker the closer to zero their values are (BANIMELHEM et al., 2011). Many image processing problems use gray level images because of their simplicity over color images and, for that reason, color images are converted to grayscale images before the processing algorithm is applied. The most adopted gray level is 256, i.e., each pixel has a value between 0 and 255.

Multi thresholding is a process that determines more than one threshold for a given image, in order to segment a gray level image into one background and several objects. The method works very well with objects with complex background which is our case since we are analyzing the brain structure. A histogram shows the pixel intensity graph of image, it helps to select the threshold level to separate the image into groups (BANIMELHEM et al., 2011).

However, for multi-threshold segmentation, the possible combinations that follow the calculation:  $L \times (L-1) \times \dots \times (L-t + 1)$ . It is obvious that the naivety of trying all the thresholds is not computationally efficient or feasible as the value of  $t$  increases. In fact, a computational question of the naive approach is the use of faster algorithms to find  $t$  thresholds.

In natural images, one can see that the same objects have similar pixels and different objects pixels, this will be taken into consideration the inter-class variance and intra-class variance; that is the variance in gray level between the pixels belong to one object and variance between pixels in different objects. Such variance represents higher values than the mean. Generally, the pixels that represent an object in the image tend to have the color level, having their minimum variance. Thus, if it is a greater variance, it is not an object. In the proposed algorithm, the calculation of the fitness based on variance in the color intervals. For example, with 2 thresholds, values 75 and 150, the variation of color levels between 0 and 75, 75 and 150, 150 and 255 is calculated. Taking the first interval, and its variance to the low, the probability of having an object there is great. The genetic algorithm searches for the best thresholds that minimize variance.

The computational complexity of naïve approach, and the existence of goodness measure in the case of multiple thresholds motivated the use of an efficient search algorithm, being the bioinspired algorithms a possibility of low computational cost. Among the various bioinspired algorithms, the genetic algorithm, and its variations have been used in several studies.

### 2.1 Genetic Algorithms

Genetic algorithm (GA) is a natural inspired metaheuristic that mimics genes. A genetic algorithm is used to search for near optimal solutions when no deterministic method exists or

if the deterministic method is computationally complex, GA is a population-based algorithm (, it generates multiple solutions each iteration) (BANIMELHEM et al., 2011). According Chabrier, *et. al.* (2008) the GA can be defined considering five essential data: genotype, that uses the segmentation results of an image; initial population, that is characterized by their genotypes; fitness function, that quantify an individual of the population, considering their genotype; operators on genotypes, that define alterations on genotypes; and the stopping criterion.

The search is done in a way that mimics evolution, in the method a “population” of possible solutions is formed, and a set of new solutions are formed by “breeding” the best solutions from the population’s members, to form a new generation, the population evolve in many generations; till the best solution is returned.

Those proposed solutions are called a chromosome and each chromosome is built up from genes, the number of solutions is the population size. The representation a chromosome has need to suit the problem, bad representation may cause false positive solutions to the problem. To choose the best solution a function is used, the fitness function evaluates the population in order to select the best chromosomes, the way fitness its calculated changes with different representations of the chromosome.

In the reproduction part two of the chosen solutions, merge their genes to form new solutions, two good parents produce good children, creating in this way, an entirely new population, this part it’s also called crossover. to overcome the problem of local minima, that the crossover may cause, the mutation is used, where a gene is selected randomly and its value is changed.

The iteration of the algorithm stops when a certain criterion is met, the most used stopping criteria is number of iterations. When a defined number of iterations is reached, the algorithm stops, and the best solutions are showed. The process is illustrated in Figure 1.

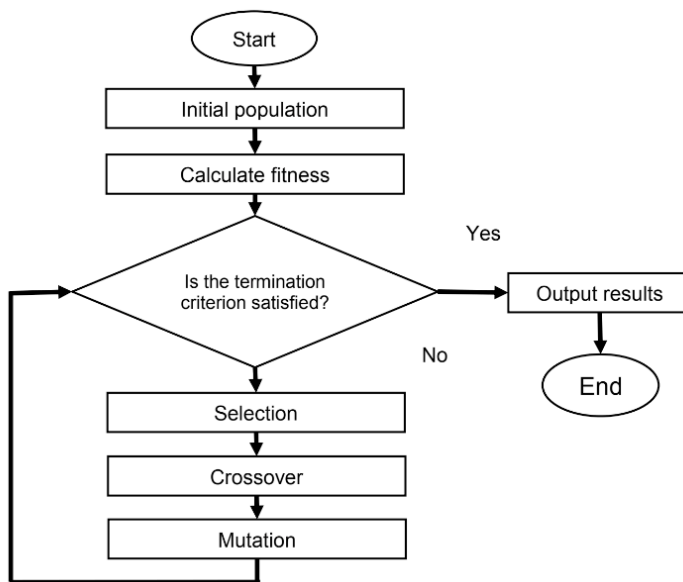


Figure 1. Flowchart of GA (GONZALEZ, et al. 2008).

## 2.2 The Proposed Algorithm

This work uses the algorithm adapted by BANIMELHEM (et al., 2011), where the chromosomes are represented as a vector of bits. Each vector has  $L \cdot n$  bits where  $L$  is the logarithm of the number of gray levels, and  $n$  is the number of thresholds used. Each value of  $L$ , it's a bit that represents a threshold value, as show in Figure 2.



Figure 2. Chromosome structure (BANIMELHEM et al., 2011).

First, is found the histogram of the image. The histogram gives information that will be used to evaluate the fitness function. Then, they are generated randomly  $K$  initial chromosomes. After that, the genetic algorithm iterates for fixed number of iterations, and finally the best chromosome will be selected as the solution. The pseudo code for the proposed algorithm uses:

**Inputs**, image  $I_m$ , population size, crossover rate, mutation rate, number of iterations, number of thresholds.

**Outputs**, segmented image, with the results.

The pseudocode of the genetic algorithm used can be observed in the Figure 3 (BANIMELHEM et al., 2011).

```
1.Im = Read Image
2.Hist = image histogram(Im)
3.Pop = initial K chromosomes
4.for i = 1 to number of iterations
5.    while (size(Pop) > size(NewPop))
6.        Ch1, Ch2 <- Select two chromosomes by rolletwheel
7.            if(rand < crossover rate) then
8.                ChNew1, ChNew2 <- crossover(ChNew1)
9.                if(rand < mutation rate) then
10.                    ChNew1 <- mutate(ChNew1)
11.                if(rand < mutation rate) then
12.                    ChNew2 <- mutate(ChNew2)
13.            if(fit(ChNew1)>max(fit(Ch1),fit(Ch2))) then
14.                NewPop.add(ChNew1)
15.            if(fit(ChNew2)>max(fit(Ch1),fit(Ch2))) then
16.                NewPop.add(ChNew2)
```

**Figure 3.** Genetic algorithm pseudo code (BANIMELHEM et al., 2011).

In general, the pixel variance between pixels from different objects is large, while between pixels within the same object is small. For measure the fitness of a given threshold the fitness function is (GONZALEZ, et al. 2008):

$$F = S_{\text{between objects}} / S_{\text{within objects}} . \quad (1)$$

## 2.3 Database

In this project, images from the database available at <https://www.slicer.org/> were used, using the 3D medical image viewer program Slicer, with an MRI of the ten patients of the National Center for Image Guided Therapy Database (NCIGT). In the program the brain can be viewed in the three anatomical planes: coronal, transverse or horizontal and sagittal. The images used in this article are views from the horizontal plane of the brain. There are two types of images, from ten different patients: MRI scan acquired before surgery and MRI scan acquired during tumor resection. The Dataset was obtained in the Database of the Surgical Planning Laboratory - Brigham & Women's Hospital - Boston, Massachusetts USA - the data set is called SPL Brain Tumor Resection Image Datasets. (SPL, 2021)

## 3 | RESULTS AND DISCURSIONS

The algorithm was implemented in GNU Octave. The initial population size is twenty chromosomes, number of iterations is 50, mutation and crossover rates are 0.1 and 0.8, respectively and three thresholds are used since the segmentation aims to find three tissues

in MRI of our database. It was run on 2.27 GHz core i3 processor.

The algorithm showed ability segment image with high quality and was capable to segment the image and find the anatomical structures of interest. The results shown below were obtained with the limits thresholds values: 37, 67, 127 in a patient image of the database (Figure 4), validating all the applied process, because for each limit a specific object was found, as shown in the histograms separately (Figure 5). The threshold values are divided into T1 for the indication of the cerebrospinal fluid (Figure 4b), T2 for the gray matter (Figure 4c), and T3 for the white matter (Figure 4d).

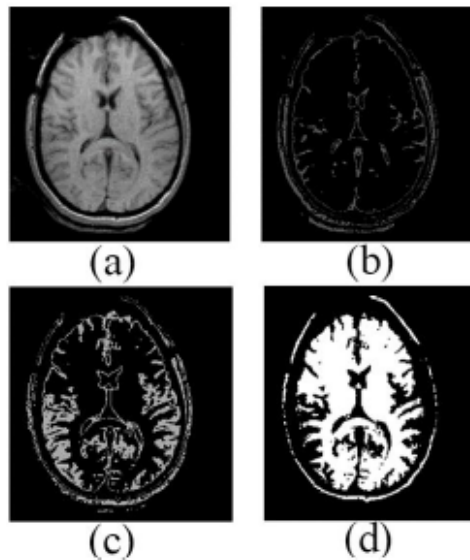


Figure 4. Images of MRI obtained from the database. (a) Patient MRI during in tumor resection (b) cerebrospinal fluid. (c) grey matter. (d) white matter.

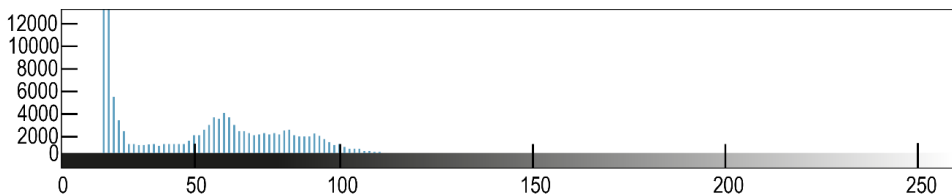
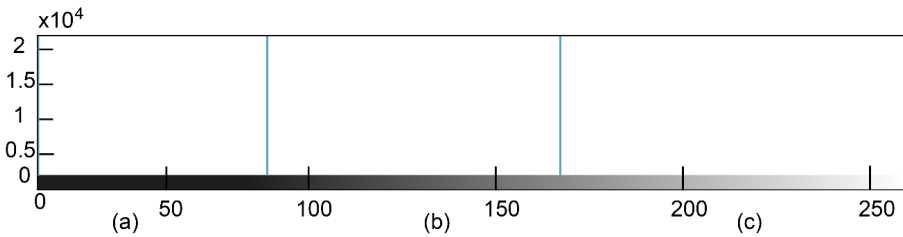


Figure 5. Histogram of original image.

Above is the histogram showing the probability distribution of the gray level pixels of the original image, for the Threshold T1, T2, and T3. In this distribution, there are pixels that belong to the object and the background. Figure 6 shows the subsequent images show 3 histograms, one for each threshold value: 37, 67 and 127. From 0 to 37 is the first object shown in histogram, T1 (Figure 6a). In the range from 37 to 67, another object is found,

evidenced in histogram, T2 (Figure 6b). Finally, between 67 and 127 is the last object, which is shown in the histogram, T3 (Figure 6c). The background is in the other pixel values from 127 to 255.



**Figure 6.** Histogram image and multi-threshold GA: (a) at 37 levels; (b) at 67 levels; (c) at 127 levels.

Table1 shows the multi-threshold GA results for 10 MRI images, as well as their execution time. As observed the values of the time are modified by the relationship of the thresholds of T1, T2 and T3, indication maximum variation of 11.15s (of 31.70s – 42.85s). From these results, it is possible to observe the efficiency of the algorithm in the segmentation by the threshold of the parts of the brain, with the ability to be implemented in auxiliary programs and with low computational cost.

The algorithm displays some difficulty in finding the thresholds in image with high or low contrast, which reduces the observation of details, the limits of the brain tissues appear with little differentiation being difficult to separate them even by a person, causing the threshold limits to end up overlapping, thus, leaving the result images inaccurate. To a certain extent, it can be solved by pre-processing this aspect of the image, enabling it to be processed by the algorithm.

Patients	Thresholds			Time(seconds)
	T1	T2	T3	
P1_T2	36	70	104	37.45
P2_T1	39	97	209	32.71
P3_T2	50	93	120	31.40
P4_T2	33	63	93	30.40
P5_T2	45	166	205	33.25
P6_T2	72	131	193	42.85
P7_T1	59	112	158	35.54
P8_T2	55	89	120	35.17
P9_T2	43	95	146	35.46
P10_T2	50	80	126	31.70

**Table 1.** Thresholds selected by the proposed Multi-Threshold GA.



## 4 | FINAL CONSIDERATIONS

In this project was presented the segmentation of brain images, using the method based on genetic algorithms with multiple thresholds, in order to figure out the thresholds that optimally separate gray matter, white matter, and cerebrospinal fluid of cranial images. The work used the Magnetic Resonance Imaging of 10 patients was obtained from the National Center for Image-Guided Therapy Database. Then, a pre-processing was established to improve the input images in the segmentation algorithm. The results of the implementation of the genetic algorithm in the detection by threshold demonstrated efficiency with low computational cost, in the segmentation with a maximum time variation of 11.15 seconds.

## REFERENCES

ABDEL-KHALEK, S. et al. **A two-dimensional image segmentation method based on genetic algorithm and entropy**. *Optik*, v. 131, p. 414-422, 2017.

ANUBAH, R. B. Dubey, A Review on MRI Image Segmentation Techniques. **International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering**, p. 1451-1455. 2015.

BANIMELHEM, Omar; YAHYA, Yahya Ahmed. Multi-thresholding image segmentation using genetic algorithm. In: **Proceedings of the International Conference on Image Processing, Computer Vision, and Pattern Recognition (IPCV)**. The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing (WorldComp), 2011.

DALE, Brian M., BROWN, Mark A., SEMELKA, Richard C. **MRI Basic Principles and Applications**. 5nd. Wiley, 2015.

Despotović, I., Goossens, B., Philips, W. **MRI Segmentation of the Human Brain: Challenges, Methods, and Applications**. *Computation and Mathematical Methods in Medicine*, p.1-23. 2015.

GAO, Bin et al. **Physics-based image segmentation using first order statistical properties and genetic algorithm for inductive thermography imaging**. *IEEE Transactions on Image Processing*, v. 27, n. 5, p. 2160-2175, 2017.

GONZALEZ, Rafael, et al. **Digital Image Processing**, 3nd, Pearson Prentice Hall, 2008, p. 738-761.

KAVITHA, A. R., CHELLAMUTHU, C. Brain tumour segmentation from MRI image using genetic algorithm with fuzzy initialization and seeded modified region growing (GFSMRG) method. *The Imaging Science Journal*, vol.64, No.5, p. 285-297, 2016.

LINEY, Gary, HEIDE, U. Van Der. **MRI for Radiotherapy, Planning, Delivery, and Response Assessment**. Springer, 2019.

RUI, Yong; SHE, Alfred C.; HUANG, Thomas S. Modified Fourier descriptors for shape representation-a practical approach. In: **Proc of First International Workshop on Image Databases and Multi Media Search**. Citeseer, 1996. p. 22-23.

SPL, Surgical Planning Laboratory. **Software and Data Sets**, 2021. Disponível em: < <https://spl.harvard.edu/software-and-data-sets>>. Acesso em: 05, mai de 2021.

YEH, Jinn-Yi, Fu, J.C. Fu, A hierarchical genetic algorithm for segmentation of multi-spectral human-brain MRI, **Expert Systems with Applications**, Vol. 34, No. 2, p. 1285-1295, 2008.

## ANÁLISE NUMÉRICA DA CAPACIDADE DE CARGA DE ÂNCORAS TORPEDO CONSIDERANDO EFEITOS DE SETUP

Data de aceite: 02/08/2021

Data de submissão: 05/05/2021

### Guilherme Kronemberger Lopes

Department of Civil Engineering, Federal University of Rio de Janeiro  
Rio de Janeiro – Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/5270566094871046>

### José Renato Mendes de Sousa

Department of Civil Engineering, Federal University of Rio de Janeiro  
Rio de Janeiro – Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/3211660196134627>

### Gilberto Bruno Ellwanger

Department of Civil Engineering, Federal University of Rio de Janeiro  
Rio de Janeiro – Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/2639351643523334>

**RESUMO:** A âncora torpedo possui formato de “foguetete” e sua instalação é dada através de queda livre, utilizando seu próprio peso como energia cinética de cravação. O processo de cravação induz a geração de um excesso de poro-pressões e causa perturbações e cisalhamentos excessivos, afetando as tensões, deformações e propriedades de resistência do solo no entorno da âncora. Imediatamente após a instalação, a capacidade da carga da âncora é significativamente reduzida. No entanto, após a cravação, observa-se que a capacidade de carga aumenta com o tempo, num processo conhecido como setup. Este artigo apresenta um estudo

numérico de uma âncora torpedo sem aletas cravada em solo isotrópico puramente coesivo, utilizando um modelo axissimétrico não-linear em elementos finitos. O modelo de plasticidade de “Cap” foi escolhido para descrever o comportamento constitutivo do solo. A interação solo-âncora é simulada usando pares de contato do tipo superfície-superfície, com propriedade de contato do tipo penalidade. As análises numéricas foram conduzidas utilizando o software Abaqus/CAE. Os resultados obtidos com este modelo indicaram que a permeabilidade do solo tem um papel importante no processo de setup. Além disso, os parâmetros investigados do modelo constitutivo do solo apresentaram um padrão de comportamento na resposta da estrutura.

**PALAVRAS - CHAVE:** Âncoras torpedo, Elementos finitos, Setup.

### NUMERICAL ANALYSIS OF THE HOLDING CAPACITY OF TORPEDO ANCHORS CONSIDERING SETUP EFFECTS

**ABSTRACT:** The torpedo anchor has a “rocket” shape, and its installation is given by free fall using heavyweights as the driving kinetic energy. Its driving process induces an excess pore water pressure generation and causes significant shearing and disturbance, which affects the stress, strain, and strength characteristics of the soil surrounding the anchor. Immediately after installation, the holding capacity of the torpedo anchor is significantly reduced. Although, after the anchor driving, holding power is observed to increase with time in a process referred to as

setup. This paper presents a numerical-based study of a finless torpedo anchor embedded in a purely cohesive isotropic soil using an axisymmetric nonlinear finite element model. The plasticity Cap model was chosen to describe the mechanical behavior of the soil. Anchor-soil interaction is simulated using surface-to-surface contact pairs with a penalty-type contact property. Several analyses are conducted using the software Abaqus/CAE. The results obtained with this model indicated that soil permeability plays an essential role in the setup process. Furthermore, plasticity parameters are also investigated, and the results present a pattern of behavior of the structure's response.

**KEYWORDS:** Torpedo anchors, Finite element, setup.

## 1 | INTRODUCTION

The world's great demand for oil and gas has stimulated new researches focused on offshore structures design. Due to the innovative nature of the equipment employed by the offshore oil industry, the exploitation of oil and gas is available for water depths over 3,000 meters. According to Ehlers *et al.* (2004), some typical foundations employed by the offshore industry are suction anchors, vertical load anchors (VLAs), and suction embedded plate anchors (SEPLAs). Although, the installation costs of these anchors surprisingly increases with water depth.

In this scenario, Wodehouse *et al.* (2007) describe that the torpedo anchor has proven to be an outstanding alternative in Brazilian offshore fields. Additionally, according to Medeiros Jr. (2002), this type of anchor has low construction and installation costs, not dependent on water depth, and withstands high vertical loads. The torpedo anchor (Fig. 1) belongs to the group named dynamically installed anchors (DIAs). Besides the torpedo anchors, the existing DIAs also include OMNI-Max anchors and deep penetrating anchors (DPAs).

The torpedo anchor has a rocket shape with a varying number of flukes. Its installation is given by free fall from a designated height above the seabed using heavyweights as the driving kinetic energy. Its structure usually comprises four different components: a padeye that connects the first chain segment of the mooring line to the anchor; a ballasted shaft of carbon steel; a varying number of flukes, usually from 0 up to 4; and a conical tip that is designed to help the embedment of the anchor. Typical torpedo anchor's weight varies from 35 tons up to 98 tons (Sousa *et al.*, 2011).



Figure 1. Typical torpedo anchor with four flukes: conical tip (left) and top view with detail of the padeye (right) (Sousa *et al.*, 2011).

After a torpedo anchor is driven in saturated soil, the pullout resistance is often observed to increase with time. This phenomenon is referred to as setup. Although the exact mechanism is not entirely understood (Komurka *et al.* 2003, Simulia 2007, Houssain *et al.*, 2014), two processes are believed to play an important role. The first of them corresponds to an increase in the soil's effective stresses associated with the dissipation of the excess pore pressure built up around the anchor during installation. The other one is related to thixotropic bonding between the soil grains and some aging effects.

Some investigations about the setup process of driven DIAs have been carried out in the past few years. Hossain *et al.* (2015) performed centrifuge tests for torpedo anchors and reported that approximately 80% of the long-term anchor capacity would be available within one year after anchor installation. Raie and Tassoulas (2016) and Radgahar *et al.* (2015) performed numerical analyses of finless torpedo anchors. They observed that the time needed to achieve a consolidation ratio of 90% is considerably lower than the total time required to achieve complete consolidation of the soil. Richardson *et al.* (2009) reported that 50% of the holding capacity of the DIA is achieved over 35 to 350 days after installation. Moreover, 90% of the operational holding capacity is achieved over 2.4 to 24 years. In general, the authors emphasize that these values are highly dependent on the soil properties where the anchor have been installed.

Regarding the project and design of torpedo anchors, setup effects are not directly incorporated. Sousa *et al.* (2011) mention that, in practice, a typical torpedo anchor is first loaded approximately three months after its installation. Still, the imposed loads are much lower than its load capacity, as safety factors between 1.5 and 2.0 are employed in the anchor's design. Hence, there is still a gap of information concerning the setup mechanism in the anchor's design.

Therefore, to contribute to this task, a nonlinear axisymmetric finite element (FE) model is proposed. A finless torpedo anchor embedded in a purely cohesive isotropic soil

is analyzed. The anchor is assumed to be “wished in place,” and that soil initial stress conditions can be obtained immediately after installation, using the Cavity Expansion Method (CEM). All analyses were carried out using Abaqus/CAE® (2013). The proposed FE model is described in detail before presenting the results of a parametric study obtained using this model.

## 2 | FINITE ELEMENT MODELING

### 2.1 Soil Modeling

The soil is modeled by a conventional approach that considers the porous medium as a multiphase material and adopts the effective stress principle (Terzaghi, 1936) to describe its behavior. The soil is considered fully saturated, and the wetting liquid is seawater. The porous medium is modeled by attaching the finite element mesh to the solid phase, and the fluid present inside the medium can flow through this mesh.

A continuity equation is required for the fluid inside the soil, equating the rate of increase in the liquid mass stored to the rate of mass of liquid flowing into the point within the time increment. This continuity statement is written in a variational form as a basis for finite element approximation, which is defined as:

$$\int_V \frac{1}{J} \frac{d}{dt} (J \rho_w n_w) dV = - \int_S \rho_w n_w \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}_w dS \quad (1)$$

where  $J$  is the ratio of the medium’s volume in the current configuration to its volume in the reference configuration,  $\rho_w$  is the density of seawater,  $n_w$  is the volume ratio of free wetting liquid at a point,  $\mathbf{n}$  is the outward normal to  $S$ , and  $\mathbf{v}_w$  is the seepage velocity.

The seawater flow through the solid phase of the soil is supposed to be described by Darcy’s law. Darcy’s law states that, under uniform conditions, the volumetric flow rate of the wetting liquid through a unit area of the medium,  $snv_w$ , is proportional to the negative of the gradient of the piezometric head, thus:

$$snv_w = -\hat{\mathbf{k}} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{x}} \quad (2)$$

where  $s$  is the saturation,  $n$  is the porosity of the porous medium,  $\hat{\mathbf{k}}$  is the permeability of the medium, and  $\phi$  is the piezometric head.

The modified Drucker-Prager (DP) plasticity model, commonly referred to as Cap model, was chosen to represent the nonlinear material behavior. According to Helwany (2010), this model is appropriate to describe soil behavior because it can consider the effects of stress history, stress path, dilatancy, and the intermediate principal stress. The yield surface of this plasticity model consists of three parts: a DP shear failure ( $F_s$ ), an elliptical cap ( $F_c$ ), and a smooth transition region between the shear failure and the cap ( $F_t$ ),

as shown in Fig. 2.

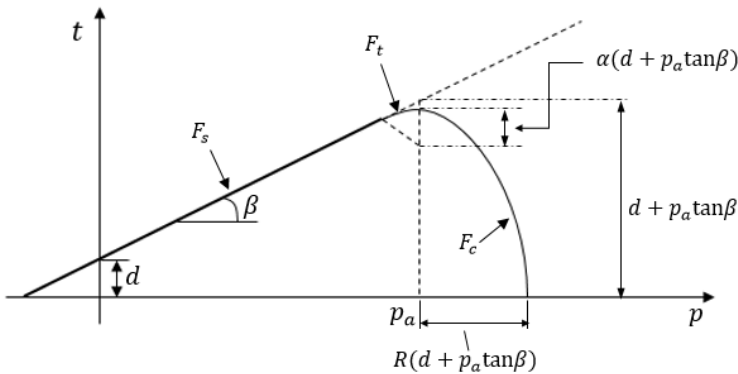


Figure 2. Yield surfaces of the Cap model in the  $p$ - $t$  plane.

In this study, the hardening-softening behavior of the Cap model is simply described by a piecewise linear function relating the mean effective (yield) stress,  $p'$ , and the volumetric plastic strain,  $\varepsilon_v^p$ . More details about this constitutive model are described by Helwany (2010) and Abaqus Online Documentation (2013).

## 2.2 Soil FE Mesh Characteristics

The undrained response of a torpedo anchor embedded in clay is a classical elastoplastic problem. It requires no locking for incompressible materials and good bending behavior to obtain acceptable answers (Sousa *et al.*, 2011). Therefore, it was chosen to use 8-noded solid isoparametric axisymmetric elements to represent the soil. Additionally, these elements can account for an extra degree of freedom to save pore pressure values.

An overview of the main dimensions of the soil mesh is shown in Fig. 3. The height of the cylinder is given by the sum of the embedment depth of the anchor ( $H_p$ ), the length of the anchor ( $H_c$ ) and the distance of the tip of the torpedo to the bottom of the FE mesh ( $H_a$ ). According to Sousa *et al.*, a diameter of  $20D_a$  for the soil cylinder and a distance of 5 m for  $H_a$  dimension was enough to simulate an “infinite” media. Hence, these values were also considered in all analyses performed throughout this study.

The elements have dimensions varying between 0.10m and 0.25m in the regions where high plastic strains are expected to occur (close to the anchor) and between 0.25m and 0.50m in the areas far from the anchor shown in Fig. 3. These dimensions were adopted after a mesh study was performed, where the results indicated that a more refined mesh did not present significant differences in the anchor response.

Regarding the boundary conditions, the vertical and horizontal displacements of the soil cylinder are restrained at the nodes associated with its base. Displacements in the

radial direction of the nodes associated with the outer wall of the cylinder are restrained.

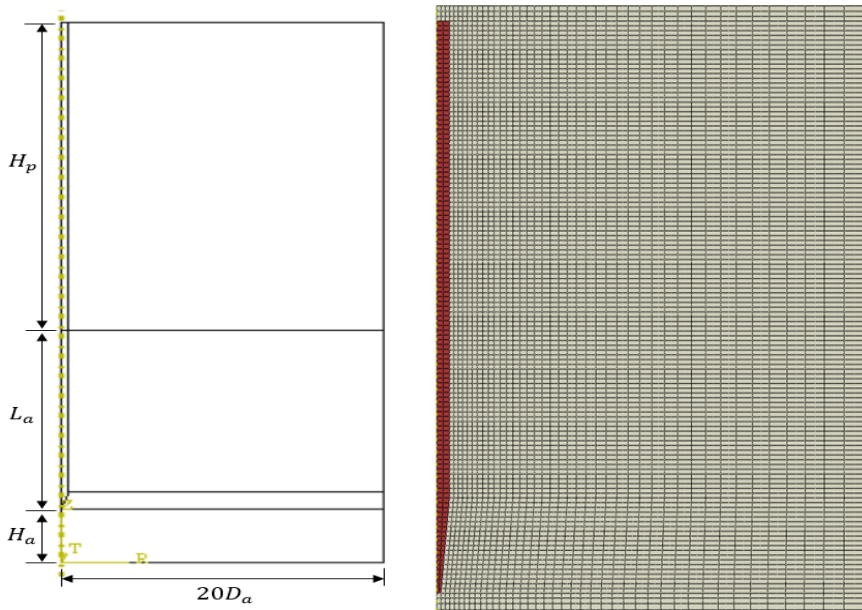


Figure 3. General view of the FE model.

### 2.3 Anchor modeling

The torpedo anchor is modeled with isoparametric solid elements analogous to the ones used to represent the soil but without the pore pressure degree of freedom. It is worth mentioning that neither the padeye at the top of the anchor nor the mooring line are represented in the proposed model. Hence, the load from the mooring line is applied at a node placed 1m above the top of the anchor, and it is rigidly connected to the top of the anchor by rigid bars using the beam MPC (Multiple Point Constraint) options in Abaqus (2013), as presented in Fig. 4.



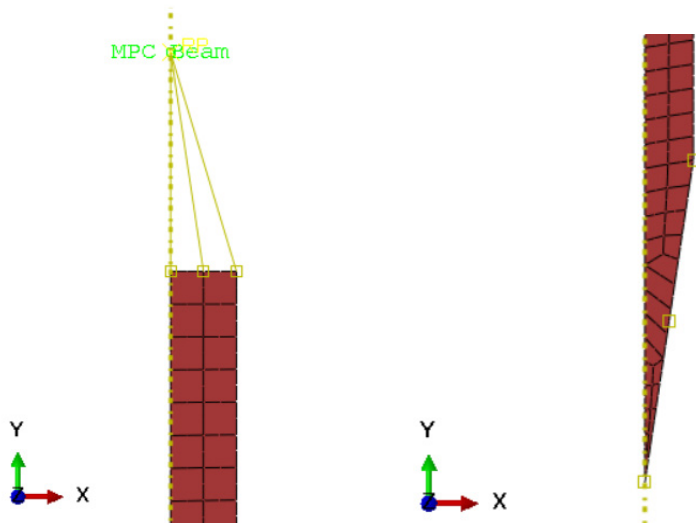


Figure 4. FE mesh details of the finless torpedo anchor: top view and load application (right) and bottom part of the tip (left).

Anchor loading is simulated by applying a concentrated force on the reference node at a rate of 10,000 kN/s. This extremely high rate of loading is employed to ensure that the soil will behave in undrained conditions.

## 2.4 Anchor-soil interaction

The anchor-soil interaction is simulated using the surface-to-surface master/slave contact pairs. The slave surface is constrained against penetrating the master surface and, usually defined as the softer one. In the proposed model, as the anchor is much stiffer than the surrounding soil, all master elements are placed on the outer wall of the anchor, and all slave elements are on the surrounding soil contact surface.

Another critical aspect of the analysis is permeation between the materials: if there will be or not fluid flow between them. As the pore pressure degree of freedom is only active on the soil elements, the FE program automatically considers the contact surface as impermeable; hence, no fluid flow will occur between the materials.

The interaction between the anchor and the soil is simulated using a penalty-type interface, in which the main parameter is the friction coefficient between the surfaces in contact. According to Helwany (2010), this kind of interface can describe the frictional interaction between the anchor surface and the surrounding soil in touch.

Karlsrud (2012) states that pile axial loading capacity can be obtained by calculating the shear resistance over the pile shaft concerning time and effective radial stress. The author assumes that the effective radial stress over the pile can be multiplied by a factor,  $f'_{cons}$ , varying between 0.2 and 0.4, according to the following equation:

$$f_{cons} \cdot \sigma'_r(U) = s_u(U) \quad (5)$$

where  $\sigma'_r(U)$  is the effective radial stress as a function of the soil degree of consolidation and  $s_u$  is the soil undrained shear strength.

However, during the analyses, it was observed that when a factor equals 0.2 was applied to the results corresponding to effective radial stress at 100% consolidation, the values obtained were much higher than those of the soil with intact undrained shear strength. Thus, to bypass this problem, the factor was calibrated against the undrained shear strength corresponding to the soil fully reconsolidated. In this case, it was assumed that the undrained shear strength of the fully reconsolidated soil is equal to the one recommended by the  $\alpha$ -method from API (2005). Hence, the calibrated friction factor is given by:

$$f_{cons\_calib} = \frac{\alpha \cdot s_u}{\sigma'_r(U = 100\%)} \quad (6)$$

## 2.5 Initial stress state of the soil

An essential aspect of the torpedo anchor analysis is the simulation of the initial stress state of the soil, *i.e.*, the stresses before the application of any structural load. As the proposed FE model does not simulate the anchor penetration in the soil, stress changes in the soil surrounding the anchor are therefore claimed to be similar to those produced from the expansion of an ideal cylindrical cavity.

The Cavity Expansion Method (CEM) assumes that the strains induced from the anchor installation come from an ideal expansion of a cylindrical cavity. Randolph and Wroth (1979) present a solution based on the assumption of a cylindrical cavity in a perfectly elastoplastic (EP) type soil model. They assume axial symmetry and plane strain conditions, implying that only radial displacement of soil particles will occur.

Hill (1950) and Gibson and Anderson (1961) demonstrate the expressions for the stresses around an expanded cavity. For a cavity expanded from zero radii to a radius  $r_o$ , the radial and circumferential stress changes within the plastic zone are given respectively by:

$$\Delta\sigma_r = s_u \left[ 1 + \ln \left( \frac{G_{50}}{s_u} \right) \right] \quad (7)$$

$$\Delta\sigma_\theta = s_u \left[ -1 + \ln \left( \frac{G_{50}}{s_u} \right) \right] \quad (8)$$

The relationship between  $G_{50}$  and  $s_u$  can be estimated by the following empirical expression (Keaveny and Mitchell, 1986):

$$\frac{G_{50}}{s_u} = \frac{e^{\left(\frac{137-IP}{23}\right)}}{\left[1 + \ln\left(1 + \frac{(OCR-1)^{3.2}}{26}\right)\right]^{0.8}} \quad (9)$$

where  $IP$  is the plasticity index of the soil and  $OCR$  is the overconsolidation ratio of the soil.

Further, Randolph and Wroth (1979) estimate the excess pore pressure by assuming that the mean effective stress remains constant under undrained conditions. This initial distribution is such that the pore pressure is maximal at the anchor-soil interface and diminishes exponentially with radial distance from the center of the anchor. The distribution of the initial excess pore pressure can then be written as:

$$\Delta u_0 = \begin{cases} 2s_u(z) \ln\left(\frac{r_p}{r}\right), & r_0 \leq r \leq r_p \\ 0, & r > r_p \end{cases} \quad (10)$$

where  $s_u(z)$  is the soil undrained shear strength varying with depth,  $r_p$  is the plasticized radius of the disturbed soil after anchor driving, and  $r_0$  is the anchor radius.

In theory, the expansion of a cylindrical cavity is modeled with an initial radius of zero. In contrast, numerical calculations must begin with a finite cavity radius to avoid infinite circumferential strains. Carter *et al.* (1979) found that doubling the cavity radius is adequate for EP and modified Cam Clay models. Thus expanding a cavity from  $a_0$  to  $a_0$  can approximate the cavity expansion from  $r = 0$  to  $r_0$ , i. e. model the installation of an anchor with a shaft radius of  $r_0$ . Though, for the analyses conducted in this study, it was considered a relationship of  $a_0 = 0.5r_0$ .

## 2.6 Solution procedure

A typical FE mesh to predict the load capacity of a finless torpedo anchor considering setup effects has approximately 15,000 elements and 100,000 degrees of freedom. Complete setup analysis is run, basically, in three consolidation steps. In the first one, the initial stress state of the soil is imported to the present model from a previous analysis where the CEM is simulated following the steps described by Lopes [23]. Briefly, the process consists of modeling the undisturbed soil with the in situ stress, removing part of the soil, and placing a rigid bar into it, creating a cylindrical cavity. Thus, the bar is forced to move against the soil wall, as shown in Fig. 5, simulating the expansion of a cylindrical cavity.

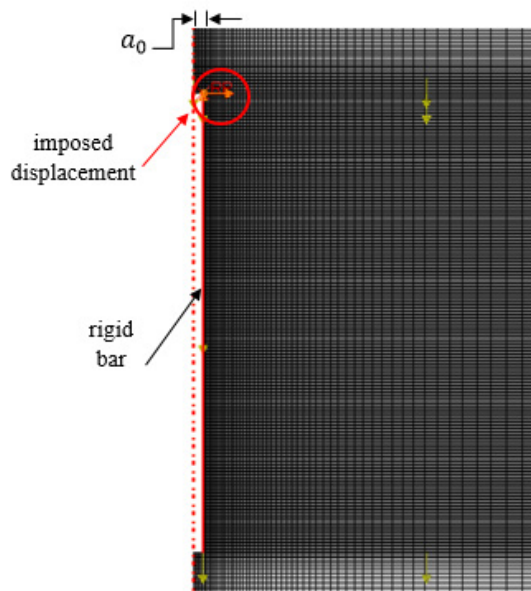


Figure 5. Detail of the rigid bar and its imposed displacement represents the CEM simulation (adapted from Lopes, 2019).

The first step is kept short to properly simulate the soil conditions immediately after anchor driving, not allowing the soil to consolidate (0.001s, for instance). The second step involves continuing consolidation analysis for lengths of time varying from 10 seconds up to 100 million seconds (approximately 3.2 years). In this step, the excess pore pressure dissipates as time progresses while the soil simultaneously consolidates. Finally, the third step involves assessing the pullout strength by applying a concentrated force at the reference node positioned above the top of the anchor and monitoring the vertical motion.

## 3 | PARAMETRIC STUDY

### 3.1 Description

In this paper, various FE analyses were performed to study the importance of setup effects on the holding capacity of a finless torpedo anchor. Additionally, four parameters were varied to understand their influence on setup analysis: (i) permeability coefficient of the soil, (ii) cap eccentricity parameter, (iii) cap transition surface parameter, and (iv) flow stress ratio.

The soil has an elastic modulus of 68.9 MPa, a Poisson ratio of 0.3, and a dry density of 1100 kg/m<sup>3</sup>. Cap model, with cohesion ( $c$ ) of 0 kPa, friction angle ( $\beta$ ) of 50.2°, cap eccentricity ( $R$ ) of 0.4, transition surface radius ( $\alpha$ ) of 0.5, and flow stress ratio ( $K$ ) of 1.0, is used for describing soil plasticity. The existence of a cap limits the amount of dilation when

the soil gets deformed in shear. Permeability of the soil was set initially to  $2.5 \times 10^{-10}$  m/s, and an initial void ratio of 1.5 was considered in all analyses.

The finless torpedo anchor is considered to behave elastic with a Young modulus of 15 GPa and a Poisson ratio of 0.3. The main dimensions of the torpedo anchor analyzed are presented in Fig. 6, and, for all analyses, the submerged weight of the torpedo anchor was assumed to be equal to 650 kN.

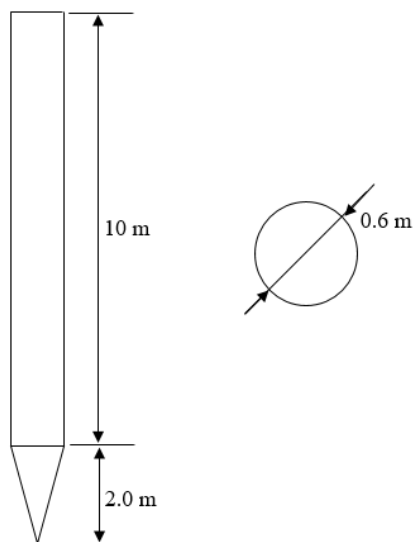


Figure 6. Main dimensions of the finless torpedo anchor.

It is worth mentioning that in this work, the anchor is supposed to be installed perfectly vertically, while, in practice, inclinations concerning the horizontal plane are often observed. Moreover, a unique embedment depth of 15 m was assumed in all analyses. A further investigation on these assumptions is presented by Lopes (2019).

### 3.2 Setup effects

The influence of setup effects on the holding capacity of torpedo anchors can be observed in Fig. 7. The anchor's pullout resistance is plotted for different instants of time after driving, varying from 10 seconds (simulating the scenario right after installation) and 10 years. Force vs. displacement curves are normalized concerning anchor's weight,  $W_a$ , and anchor's external diameter (shaft diameter),  $D_a$ , respectively.

As expected, the anchor experiences an increase in its holding capacity, whereas setup time increases. In general, the holding capacity of the finless torpedo anchor analyzed increases at a high rate for the first days after anchor installation, and this rate decreases as time progresses. Notice that the relationship between the holding capacity of the anchor,  $Q$ , and the anchor's weight had an increase of approximately 32% comparing the results for setup times of 0 days and 10 years.

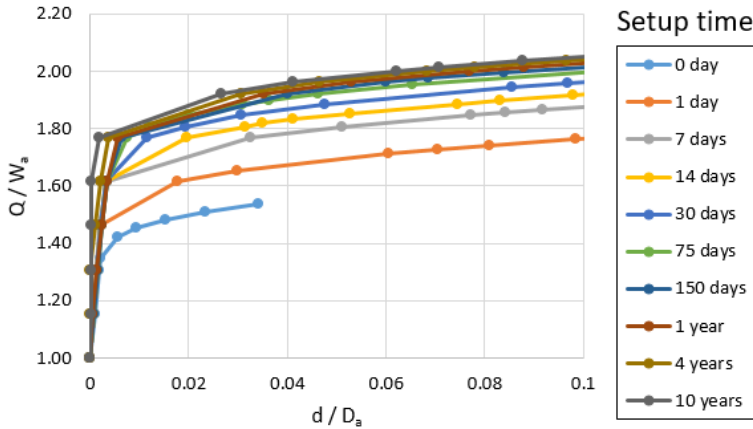


Figure 7. Torpedo anchor's normalized pullout capacity considering setup effects.

Fig. 8 presents the setup curve for the torpedo anchor analyzed. The vertical axis shows the values of the normalized holding capacity of the anchor, which is the holding capacity at a time  $t$  after driving to the holding capacity immediately after driving ( $t = 0$ ). Two main phases of setup can be observed in Fig. 8. The first one, with a linear rate of dissipation of excess pore pressure to the log of time, comprising consolidation times ranging from 1 to 150 days after driving; and the second, for consolidation times over 150 days.

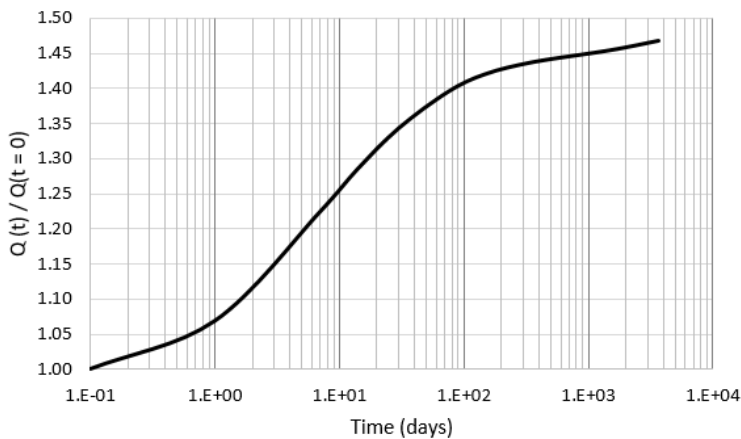


Figure 8. Torpedo anchor's setup curve.

The exact influence of the first instants of time of setup was not well reproduced by the numerical analyses. Hence, no further conclusions could be made concerning this phase.

The results shown in Fig. 8 indicate that, for the present problem, the holding

capacity of the torpedo anchor will be almost 50% higher after complete soil consolidation when comparing to the holding power at the end of driving. These results emphasize the importance of considering the setup effects on the project of torpedo anchors.

### 3.3 Permeability coefficient effects

Fig. 9 shows soil consolidation ratio curves considering different permeability coefficients for an element of soil located on the soil-anchor interface corresponding to the midpoint of the anchor shaft (5 m above the top of the anchor). Soil consolidation ratio is defined as:

$$U(t) = 1 - \frac{\Delta u(t = 0)}{\Delta u(t)} \quad (11)$$

where  $\Delta u(t = 0)$  is the excess pore pressure immediately after anchor installation and  $\Delta u(t)$  is the excess pore pressure at a time  $t$ .

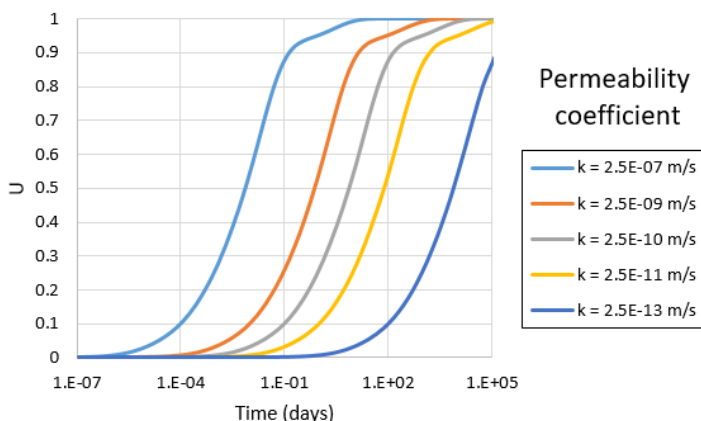


Figure 9. Consolidation ratio curves for different soil permeability coefficients.

Looking through the results presented in Fig. 9, it can be noticed that the time needed to achieve a higher consolidation ratio of the soil increases exponentially as time progresses. Also, comparing the different soil consolidation curves, it can be observed that if the permeability coefficient of the soil is decreased by one order of magnitude, then the soil consolidation ratio increases an order of magnitude. The same behavior can be observed when increasing or decreasing more than one order of the permeability coefficient. It is essential to observe that the values are not precisely the same as those multiplied by a factor of 10, but the expected results are very close to that.

### 3.4 Cap model parameters effects

According to Helwany (2010), to ensure convexity of the yield surface, the range

$0.778 \leq K \leq 1.0$  should not be violated. Effects of different values of  $K$  on anchor's holding capacity are presented in Fig. 10. The results indicated that the parameter  $K$  has a low influence on the anchor response. It is emphasized that analysis convergence is achieved with fewer iterations when a value of  $K = 1.0$  is used.

The transition surface parameter,  $\alpha$ , is generally a small number used to define a smooth transition surface between the Drucker-Prager shear failure surface and the cap surface. Fig. 11 shows the effects of different values of the transition surface parameter on anchor's holding capacity.

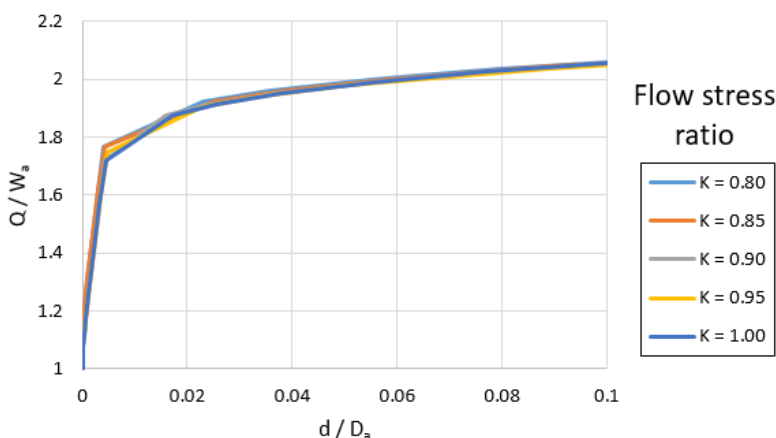


Figure 10. Influence of different flow stress ratios on pullout capacity.

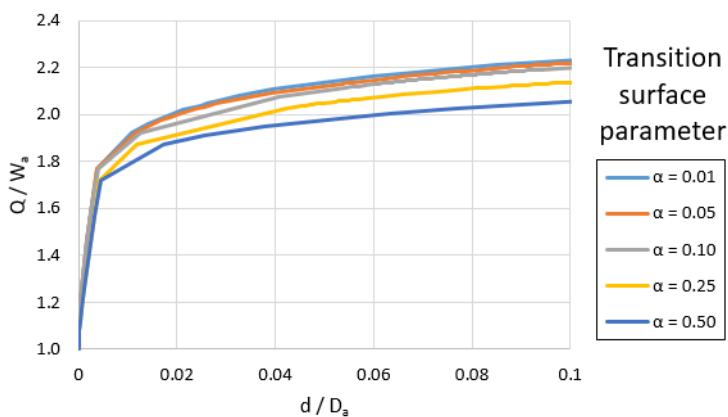


Figure 11. Influence of transition surface parameter on pullout capacity.

Fig. 11 indicates that the curves converge for small values of the cap transition surface parameter. On the other hand, when higher values of this parameter are adopted,



the response seems more conservative. In addition, it is emphasized that numerical convergence is achieved with fewer iterations for small values of this parameter (0.01 and 0.05).

Fig. 12 presents plots of the holding capacity of the torpedo anchor, considering different values of the eccentricity parameter. This parameter was varied downwards and upwards from the value used on the main analysis (). The influence of this parameter on the determination of the anchor's holding capacity is notable through simple observation of the curves in Fig. 12. In general, as the value of the cap eccentricity parameter increases, the holding capacity estimated is more conservative. Furthermore, it can be noted that the curves converge to a "lower limit" for the pullout capacity as the eccentricity increases.

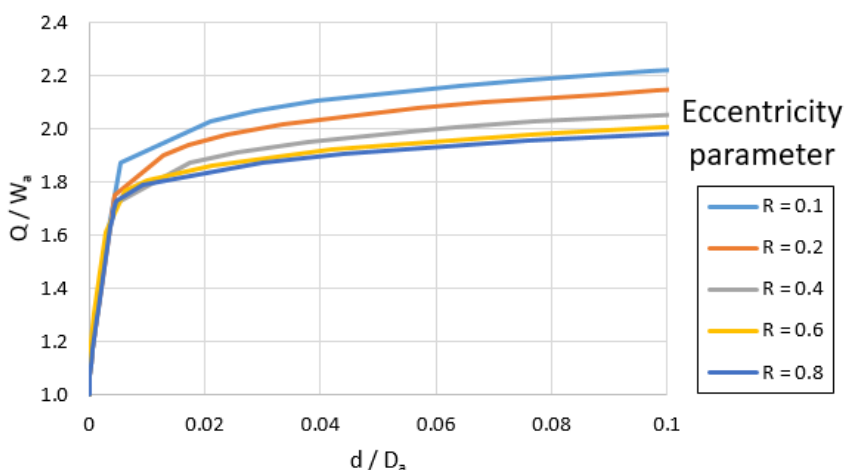


Figure 12. Influence of eccentricity parameter on pullout capacity.

## CONCLUSIONS

Numerical analyses were conducted in this study to evaluate the importance of considering setup effects on predicting the holding capacity of torpedo anchors. The investigations showed that the excess pore pressure dissipation represents the most crucial mechanism associated with the setup process, as was expected. During soil reconsolidation, a considerable increase in the effective stress at the anchor-soil interface could be observed and, consequently, an increase in shaft friction and anchor holding capacity.

The holding capacity of the finless torpedo anchor analyzed was found to be approximately 32% higher than its initial value, which is a considerable increase. Although the time needed for complete soil reconsolidation be over ten years, a reasonable amount of recovery is noticed after 150 days after anchor installation. Thereby, regarding the design phase, considering five months after anchor driving is somewhat found to be adequate for this kind of structure while being conservative.

The total time required to complete the setup process depends mainly on the coefficient of permeability of the soil, as shown in Fig. 9. Soils with very low permeability, such as clayey soils, total setup time can be orders of magnitude larger than for soils with high permeability, which is the case of sandy soils. In addition, when approximately 80% of the setup is complete, the time range needed to get an increase on the anchor response is substantially more extensive than the time required at the beginning of the process.

Another critical aspect observed about the influence of the permeability coefficient is that when increasing its value in one order of magnitude (multiplying by a factor of 10), the time needed to achieve a specified consolidation ratio of the soil decreases in the same proportion. The obtained value is not precisely the one received by applying a factor of 10, but it is very close to that.

The constitutive plasticity behavior of the soil was also analyzed through this study. Some of the cap model parameters were varied to understand their influence on structure's response. The flow stress ratio has almost no impact on the results, as shown in Fig. 10. On the other hand, transition surface and eccentricity parameters appear to have a more substantial influence on predicting the holding capacity of the torpedo anchor. Nevertheless, the results obtained are in good agreement, and the application of a safety factor could easily cover this influence.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study described in this paper results from a partnership between Petrobras and UFRJ and was carried out with resources from the R&D program of the Electricity Sector regulated by ANEEL, under the PD-00553-0045/2016 project titled "Planta Piloto de Geração Eólica Offshore".

The authors would also like to express their gratitude to "Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro" (FAPERJ) and to "Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior" (CAPES), for the resources destined to the production of this research.

## REFERENCES

Abaqus/CAE 6.13-1. Dassault Systèmes. 2013.

Abaqus 6.13 Online Documentation. Theory manual. Dassault Systèmes. 2013.

API. **Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design (RP 2A-WSD)**. American Petroleum Institute, 20th ed., USA, 2005.

CARTER, J. P.; RANDOLPH, M. F.; WROTH, C. **Stress and pore pressure changes in clay during and after the expansion of a cylindrical cavity**. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 3, pp. 305-322, 1979.

- EHLERS, C. J. Ehlers; YOUNG, A. G.; CHEN, J. H. **Technology assessment of deepwater anchors**. Proceedings of the 36th Offshore Technology Conference, Houston, TX, 2004.
- GIBSON, R.; ANDERSON, W. **In situ measurement of soil properties with the pressurimeter**. Civil engineering and public works review, vol. 56, pp. 615-618, 1961.
- HELWANY, S. **Applied soil mechanics with Abaqus applications**. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2010.
- HILL, R. **The mathematical theory of plasticity**. Oxford University Press, 1950.
- HOUSSAIN, M. S.; KIM, Y.; GAUDIN, C. **Experimental investigation of installation and pullout of dynamically penetrating anchors in clay and silt**. Journal of Geotech. and Geoenviron. Eng., 140(7), 2014.
- HOUSSAIN, M. S.; O'LOUGHLIN, C. D.; KIM, Y. **Dynamic installation and monotonic pullout of a torpedo anchor in calcareous silt**. Géotechnique, 65(2), pp. 77-90, 2015.
- KARLSRUD, K. **Prediction of load-displacement behavior and capacity of axially loaded piles in clay based on analyses and interpretation of pile load test results**. Doctoral thesis at NTNU, Trondheim, 2012.
- KEAVENY, J. M.; MITCHELL, J. K. **Strength of fine-grained soils using the piezocone**. Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering (GSP 6), ASCE, Reston/VA, pp. 668-699, 1986.
- KOMURKA, V. E.; WAGNER, A. B. **Estimating soil/pile setup**. Final Report, University of Wisconsin-Madison, 2003.
- LOPES, G. K. **Análise numérica da capacidade de cargas de âncoras torpedo considerando efeitos de setup**. Master thesis, Federal University of Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2019.
- MEDEIROS JR., C. J. **Low cost anchor system for flexible risers in deep waters**. Proceedings of the 34th Offshore Technology Conference, Houston, TX, 2002.
- RADGAHAR, E.; RAIE, M. S.; MOTAMANI, N. **Simulation of torpedo-shaped anchor (without fins) for submersible offshore platforms under tensile force**. Journal of Appl. Environ. Biol. Sci., 5(8S), pp. 107-111, 2015.
- RAIE, M. S.; TASSOULAS, J. L. **Simulation of torpedo anchor setup**. Marine Structures, 49, pp. 138-147, 2016.
- RANDOLPH, M. F.; WROTH, C. **An analytical solution for the consolidation around a driven pile**. International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 3, pp. 217-229, 1979.
- RICHARDSON, M. D.; O'LOUGHLIN, C. D.; RANDOLPH, M. F.; GAUDIN, C. **Setup following installation of dynamic anchors in normally consolidated clay**. Journal of Geotech. Geoenviron. Eng., 135(4), pp. 487-496, 2009.

SIMULIA. **Analysis of driven pile setup with Abaqus/Standard**. Abaqus Technology Brief, 2007.

SOUSA, J. R. M. de; AGUIAR, C. S.; ELLWANGER, G. B. Ellwanger; PORTO, E. C.; FOPPA, D. **Undrained load capacity of torpedo anchors embedded in cohesive soils**. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 133 (2), 2011.

TERZAGHI, K. **The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear**. Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 1, pp. 54-56, 1936.

WODEHOUSE, J.; GEORGE, B.; LUO, Y. **The development of a FPSO for the deepwater Gulf of Mexico**. Proceedings of the 39th Offshore Technology Conference, Houston, TX, 2007.

## ANÁLISE NUMÉRICA DE PLACAS EM ESTRUTURAS AEROESPACIAIS POR DIFERENÇAS FINITAS

*Data de aceite: 02/08/2021*

*Data de submissão: 06/05/2021*

**Júlio César Fiorin**

Federal University of ABC  
São Bernardo do Campo-SP  
<http://lattes.cnpq.br/1824952255013498>

**Reyolando Manoel Lopes Rebello da  
Fonseca Brasil**

Federal University of ABC  
São Bernardo do Campo-SP  
<http://lattes.cnpq.br/1886098993540794>

**RESUMO:** O presente trabalho apresenta um estudo acerca da análise numérica de placas retangulares por meio do método das diferenças finitas, obtendo soluções aproximadas para o campo de deslocamentos transversais bem como os correspondentes momentos fletores, para problemas envolvendo uma série de condições de contorno, utilizando-se o software Matlab® para simulação. Ainda nesse contexto, realizou-se uma análise comparativa das aproximações obtidas por meio do método das diferenças finitas, com relação às aproximações obtidas via método dos elementos finitos - para malhas de mesma dimensão - por meio do software comercial Abaqus™. Em ambos os casos, comparações são feitas com resultados encontrados na literatura por séries trigonométricas. Os resultados obtidos nos permitem inferir que, para determinados problemas, o método das diferenças finitas pode ser empregado com melhor eficácia, precisão e

simplicidade - do ponto de vista computacional - quando comparado com o método dos elementos finitos.

**PALAVRAS - CHAVE:** Diferenças Finitas, Lagrange, Placas, Deslocamentos Transversais, Momentos Fletores.

### NUMERICAL PLATES ANALYSIS BY FINITE DIFFERENCES IN AEROSPACE STRUCTURES

**ABSTRACT:** The solution of the most varied types of structural problems, in general, in the aerospace engineering field, requires the use of adequate numerical methods and the knowledge of their main characteristics and limitations. The present work presents a study on the numerical analysis of rectangular plates using the finite differences method, using Matlab® software for simulation. We obtain approximate solutions for the field of transversal displacements, as well as the corresponding bending moments. We consider problems involving a series of boundary conditions, especially aerospace engineering applications. Also, in this context, we perform a comparative analysis of the approximations obtained using the finite difference method with those with the finite element method, using commercial software Abaqus™, for the same meshes. In both cases, comparisons are made with results found in the literature derived from trigonometric series. The results allow us to infer that, for certain problems, the finite difference method can be used with better efficiency, precision, and simplicity - from the computational point of view - when compared with the finite

element method.

**KEYWORDS:** Finite Differences, Lagrange, Plates, Transversal displacements, Bending moments.

## 1 | INTRODUCTION

In structural analysis in general, most of the problems require an appropriate numerical method. In this context, the present work approaches the plates behavior by the Finite Differences Method. As a first step, we present the Sophie-Germain and Lagrange differential equation for plates and corresponding boundary conditions that we must consider in each type of problems. As a second step, we present a methodology for the Finite Differences Method application, looking for an approximated solution to the problems here discussed. That way, it was possible to obtain the displacement fields and the corresponding bending moments in the  $x$  and  $y$  directions as well. For this, the Matlab® software was utilized for the Finite Differences modeling and numerical simulation and, in parallel, the Abaqus™ software was employed on the Finite Elements Method simulations for the same kind of problems.

Plates have large application in the industries in general, whether automotive, naval or aerospace areas. At the aerospace sector, particularly in aeronautics, plates are very usual, because it's a fundamental element in aircraft structures. Depending on the type of aircraft, it is possible to find different structural component arrangements, as well as the wings that usually consists of a *spars*, *ribs*, *stringers* and *skins* arrangement, which are – basically – mounted from a combination of several thin plates. All these components cited before, together, have as their main function resist and transmit the loads applied due the operation, providing aerodynamic shapes, security for the passengers, for the payload and for all the integrated systems as well.

The primary function of a wing *skin* is to form an impermeable surface to support the aerodynamic pressure distribution due to the lift forces at the wings. These aerodynamic forces are transmitted to the *ribs* and *stringers* by the *skin*, via the forces action on the plates. The resistance to the shear and the torsion loads is provided by shear forces due the interaction of skin and spar webs, while the axial and torsion loads are resisted by the combination of the *skin* and *stringers* action. Although the *skin* is efficient to resist shear and torsion, it can be easily bent, even under no significant compressible loads. A possible solution could be increase the plate thickness, which can lead to overweight problems.

## 2 | SOPHIE-GERMAIN LAGRANGE EQUATION

The purpose of the discretization methods is reducing a continue problem in a system with a finite degrees of freedom number. In general, there is a physic phenomenon governed by a differential equation or a system of them, involving one or more functions. The solution

of these equations, for general boundary conditions, by finding a closed form function is usually not possible. But a good approximation can be obtained by a limited number of parameters, if the analyst has a good sensitivity. These approximations, basically, involve exchanging a continue domain by a mash, with discrete points inside the domain. Instead of taking the continue function to these domain, we provide approximations to the value which this function assumes in each isolated point. In plates, the differential equation that govern the phenomenon is the Sophie-Germain and Lagrange equation:

$$\nabla^4 w = \frac{P}{D} \quad (1)$$

where

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

The sought for function,  $w=w(x,y)$ , is the transversal displacement of the surface points, and the *fourth order degree nabla operator* can be written as:

$$\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \quad (2)$$

In addition, the boundary conditions should be imposed at the plate faces. For example, if there is a simple support, the bending moments are equal zero and, therefore, the second derivative is also zero on this extremity. But, when there is a totally clamped face, rotation there does not exist, that is, the first derivative is zero.

### 3 | FINITE DIFFERENCES METHOD

In the Finite Differences Method, all the derivates present in the differential equations inside the domain and the boundary conditions, are approximated by difference expressions, obtained by Taylor series, in general. The procedure was applied, for the first time, in two-dimensional domains, as in this case, by C. Runge, in 1908. The necessary expressions, for the purpose of this work are shown in what follows, for a point pertaining to a  $j$  line and a  $k$  column, from a rectangular mash with  $h_x$  spacing at the  $x$  direction and  $h_y$  at the  $y$  direction.

$$\left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)_{j,k} = \frac{w_{j,k+1} - w_{j,k-1}}{2h_x} \quad (3)$$

$$\left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)_{j,k} = \frac{w_{j+1,k} - w_{j-1,k}}{2h_y} \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)_{j,k} = \frac{w_{j,k+1} - 2w_{j,k} + w_{j,k-1}}{h_x^2} \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)_{j,k} = \frac{w_{j+1,k} - 2w_{j,k} + w_{j-1,k}}{h_y^2} \quad (6)$$

$$\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}\right)_{j,k} = \frac{w_{j,k+2} - 4w_{j,k+1} + 6w_{j,k} - 4w_{j,k-1} + w_{j,k-2}}{h_x^4} \quad (7)$$

$$\left(\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right)_{j,k} = \frac{w_{j+2,k} - 4w_{j+1,k} + 6w_{j,k} - 4w_{j-1,k} + w_{j-2,k}}{h_y^4} \quad (8)$$

$$\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2}\right)_{j,k} = \frac{w_{j+1,k-1} - 2w_{j+1,k} + w_{j+1,k+1} - 2w_{j,k-1} + 4w_{j,k} - 2w_{j,k+1} + w_{j-1,k-1} - 2w_{j-1,k} + w_{j-1,k+1}}{h_x^2 h_y^2} \quad (9)$$

### 3.1 Square Plate Example

Consider a square plate simply supported in its four borders, with  $2 \times 2 \text{ m}$  sides,  $t = 2 \text{ cm}$  thickness, transversally loaded - from top to bottom - by uniformly distributed load  $p = 2 \text{ KPa}$ , modulus of elasticity  $E = 200 \text{ GPa}$  and Poisson ratio  $\nu = 0.3$ , so that it is possible to obtain the flexural stiffness  $D = 146.52$ . For comparison, the transversal displacement will be calculated for two meshes, one with  $h_x = h_y = 1 \text{ m}$  and another one with  $h_x = h_y = 0.5 \text{ m}$ . For the coarser mesh, Fig. 1, there is just one point at the interior domain and is necessary to consider external points, outside the domain, for applying the differential equation in terms of finite differences.



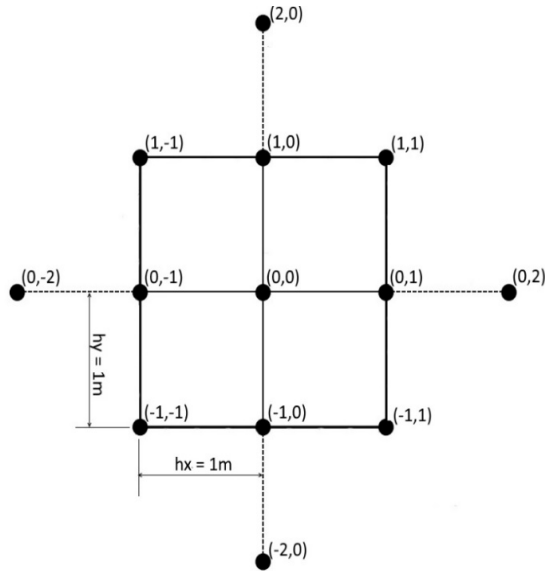


Figure 1: Simple supported square plate with two subdivisions mesh

At the simple supported border lines, the transversal displacements are zero and, the bending moment (second derivative), is also zero. It means that the external point displacements are equal to minus the internal point displacement. That way is obtained:

$$16w_{0,0} = 2/146.52 = 0.01365 \qquad w_{0,0} = 0.8531 \text{ mm}$$

For the refined mesh, Fig. 2, there's nine points at the interior domain. Considering symmetry, is sufficient applying the differential equation based on the finite differences in just three internal points.

Point 0,0

$$w_{0,2} - 8w_{0,1} + 20w_{0,0} - 8w_{0,-1} + w_{0,-2} + w_{2,0} - 8w_{1,0} - 8w_{-1,0} + w_{-2,0} + 2(w_{1,1} + w_{1,-1} + w_{-1,1} + w_{-1,-1}) = 0.5^4 \frac{P}{D}$$

Point 0,1

$$w_{0,3} - 8w_{0,2} + 20w_{0,1} - 8w_{0,0} + w_{0,-1} + w_{2,1} - 8w_{1,1} - 8w_{-1,1} + w_{-2,1} + 2(w_{1,2} + w_{1,0} + w_{-1,2} + w_{-1,0}) = 0.5^4 \frac{P}{D}$$

Point 1,1

$$w_{1,3} - 8w_{1,2} + 20w_{1,1} - 8w_{1,0} + w_{1,-1} + w_{3,1} - 8w_{2,1} - 8w_{0,1} + w_{-1,1} + 2(w_{2,2} + w_{2,0} + w_{0,2} + w_{0,0}) = 0.5^4 \frac{P}{D}$$

Considering the boundary conditions and symmetry, is possible to obtain the linear algebraic system with 3 equations and 3 unknowns.

$$\begin{bmatrix} 20 & -32 & 8 \\ -8 & 24 & -16 \\ 2 & -16 & 20 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_{0,0} \\ w_{0,1} \\ w_{1,1} \end{Bmatrix} = 0.5^4 \times 0.01365 \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

$$w_{0,0} = 0.8798 \text{ mm}$$

For comparison, the result obtained by Timoshenko (1956) using trigonometric series was  $w_{0,0} = 0.8867 \text{ mm}$ .

### 3.2 Rectangular Example

Consider the rectangular plate, displayed in Fig. 2, simply supported at the  $x$  parallel borders and clamped on the other 2 sides, with  $8 \times 4 \text{ m}$  dimensions,  $t = 5 \text{ cm}$  thickness, transversally loaded - from top to bottom - by uniformly distributed load  $p = 0.1 \text{ kPa}$ , modulus of elasticity  $E = 3 \text{ GPa}$  and Poisson ratio  $\nu = 0.25$ .

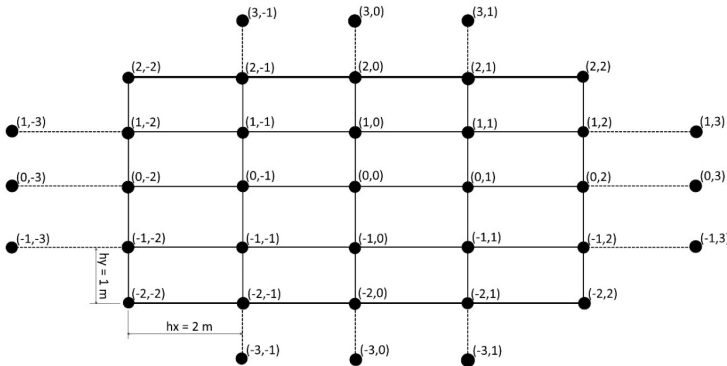


Figure 2: Rectangular plate with four subdivisions mesh

Through the symmetries in Fig. 2, it is enough to apply the differential equation in four points, named  $(0,0)$ ,  $(0,1)$ ,  $(1,0)$  and  $(1,1)$ .

Point 0,0

$$\begin{aligned} & \frac{1}{16}(w_{0,2} - 4w_{0,1} + 6w_{0,0} - 4w_{0,-1} + w_{0,-2}) + \frac{1}{1}(w_{2,0} - 4w_{1,0} + 6w_{0,0} - 4w_{-1,0} + w_{-2,0}) + \\ & + \frac{2}{4}(w_{1,1} - 2w_{1,0} + w_{1,-1} - 2w_{0,1} + 4w_{0,0} - 2w_{0,-1} + w_{-1,1} - 2w_{-1,0} + w_{-1,-1}) = \frac{p}{D} = 0.003 \end{aligned}$$

Point 0,1

$$\begin{aligned} & \frac{1}{16}(w_{0,3} - 4w_{0,2} + 6w_{0,1} - 4w_{0,0} + w_{0,-1}) + \frac{1}{1}(w_{2,1} - 4w_{1,1} + 6w_{0,1} - 4w_{-1,1} + w_{-2,1}) + \\ & + \frac{2}{4}(w_{1,2} - 2w_{1,1} + w_{1,0} - 2w_{0,2} + 4w_{0,1} - 2w_{0,0} + w_{-1,2} - 2w_{-1,1} + w_{-1,0}) = \frac{p}{D} = 0.003 \end{aligned}$$

Point 1,0

$$\frac{1}{16}(w_{1,2} - 4w_{1,1} + 6w_{1,0} - 4w_{1,-1} + w_{1,-2}) + \frac{1}{1}(w_{3,0} - 4w_{2,0} + 6w_{1,0} - 4w_{0,0} + w_{-1,0}) + \frac{2}{4}(w_{2,1} - 2w_{2,0} + w_{2,-1} - 2w_{1,1} + 4w_{1,0} - 2w_{1,-1} + w_{0,1} - 2w_{0,0} + w_{0,-1}) = \frac{P}{D} = 0.003$$

Point 1,1

$$\frac{1}{16}(w_{1,3} - 4w_{1,2} + 6w_{1,1} - 4w_{1,0} + w_{1,-1}) + \frac{1}{1}(w_{3,1} - 4w_{2,1} + 6w_{1,1} - 4w_{0,1} + w_{-1,1}) + \frac{2}{4}(w_{2,2} - 2w_{2,1} + w_{2,0} - 2w_{1,2} + 4w_{1,1} - 2w_{1,0} + w_{0,2} - 2w_{0,1} + w_{0,0}) = \frac{P}{D} = 0.003$$

Considering the boundary conditions and symmetry, is possible to obtain a linear algebraic system with 4 equations and four unknowns.

$$\begin{bmatrix} 8.375 & -2.5 & -10 & 2 \\ -1.25 & 8.5 & 1 & -10 \\ -5 & 1 & 8.375 & -2.5 \\ 0.5 & -5 & -1.25 & 8.5 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_{0,0} \\ w_{0,1} \\ w_{1,0} \\ w_{1,1} \end{Bmatrix} = 0.003 \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

The solution is

$$\begin{Bmatrix} w_{0,0} \\ w_{0,1} \\ w_{1,0} \\ w_{1,1} \end{Bmatrix} = 0.001 \begin{Bmatrix} 7.09 \\ 5.20 \\ 5.09 \\ 3.74 \end{Bmatrix} m$$

It means that, for the central node, the transversal displacement is  $w_{0,0} = 0.00709m$ . Now, from the displacement field, it is possible to obtain the bending moments field in the  $x$  and  $y$  directions – respectively – in terms of finite differences.

$$M_x = -D \left( \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (10)$$

$$M_y = -D \left( \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (11)$$

Equations 10 and 11 can be applied for any points at the interior plate domain to get the bending moments field. Applying these equations, in terms of finite differences, is possible to obtain:

$$M_{x_{0,0}} = 0.0649752 \frac{kNm}{m}$$

$$M_{y_{0,0}} = 0.1415714 \frac{kNm}{m}$$

## 4 | NUMERICAL RESULTS

As proposed for the present work, after presentation of the theoretical foundation, the analyses become a quantitative object of study, in the computational point of view. That way, is possible to compare the results obtained by finite differences method and the finite elements method, and with the exact solutions obtained by Timoshenko (1956) using trigonometric series. Thus, an algorithm has been developed based on the finite differences method, using the Matlab® software. The inputs are the plate dimensions, material properties and the boundary conditions. The outputs are the displacement and the bending moments fields, as well as 3D deformed surface plot.

For the same problems and boundary conditions, the *Abaqus*<sup>TM</sup> software has been used to obtain the finite elements method approximations, enabling a quantitative and qualitative analyses between the results, and comparing these with the values found in the literature, obtained by Timoshenko.

### 4.1 Geometry Adopted For Simulations

For the simulations, a plate with the same dimensions of the plate shown in Fig. 3 has been adopted, with  $8 \times 4$  m sides,  $t = 5$  cm thickness, transversally loaded - from top to bottom - by uniformly distributed load  $p = 0,1$  kPa, modulus of elasticity  $E = 3$  GPa and Poisson ratio  $\nu = 0.3$ .

### 4.2 Boundary Conditions Adopted

The models, as well as the boundary conditions adopted for simulations were the same examples used and tabulated by Timoshenko, for thin plates under uniform load. We used rectangular plate models with the edges simply supported, all edges clamped, one edge clamped with the rest of them simply supported and, finally, a rectangular plate with two edges clamped with another two simply supported edges. The results for each boundary conditions, tabulated by Timoshenko, and used in this work, can be found in the table presented on the Table 1.

## 5 | RESULTS

After the reference values were calculated, for the boundary conditions used by Timoshenko, we carried out the computational simulations for the same models and

performed a comparative analysis between the outputs in each case. For the analysis, four decimal places and up to six significant digits were adopted, with truncation rules for the last digit.

### 5.1 Plates With Edges Simply Supported

For the plate with the edges simply supported and mesh with four subdivisions, it was possible to obtain with our algorithm approximations as shown by the Fig. 3. Obviously, that is a “coarse” approximation, and has been obtained the following displacement and bending moments values:

$$w_{max} = 0.007512 \text{ m}$$

$$M_{x_{max}} = 0.073271 \frac{kNm}{m}$$

$$M_{y_{max}} = 0.155022 \frac{kNm}{m}$$

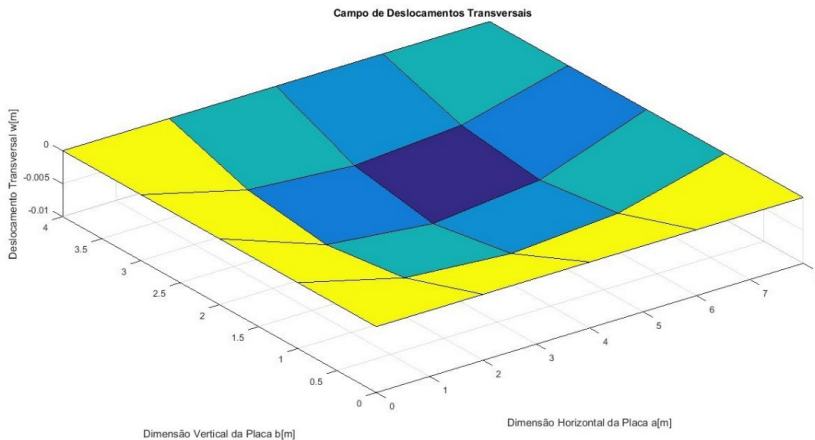


Figure 3: The transversal displacement field and mesh with four subdivisions

Using a mesh with more subdivisions, is possible to obtain a better approximation for the displacement fields and the bending moments, as shown in Fig. 4.

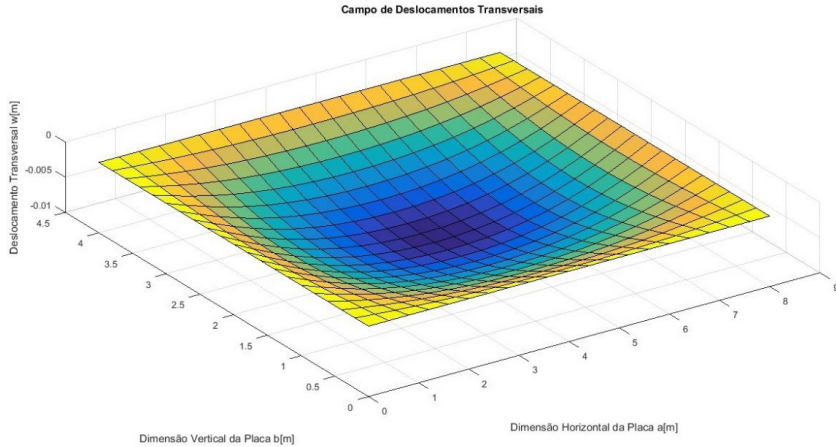


Figure 4: The transversal displacement field and mesh with twenty subdivisions

For the mesh with the twenty subdivisions, we obtained the following approximations by finite differences:

$$w_{max} = 0.007549 \text{ m}$$

$$M_{x_{max}} = 0.07412 \frac{kNm}{m}$$

$$M_{y_{max}} = 0.162359 \frac{kNm}{m}$$

For the simulations executed by finite elements and mesh with four subdivisions, we obtained the following approximations:

$$w_{max} = 0.007760 \text{ m}$$

$$M_{x_{max}} = 0.070770 \frac{kNm}{m}$$

$$M_{y_{max}} = 0.143400 \frac{kNm}{m}$$

The graphical representations for the displacement fields and the bending moments can be seen in the Figs. 5, 6 and 7 – respectively.

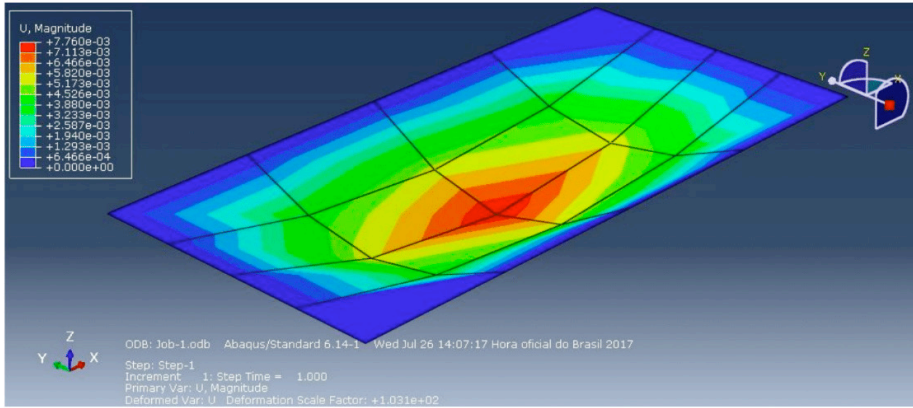


Figure 5: The transversal displacement field and mesh with four subdivisions

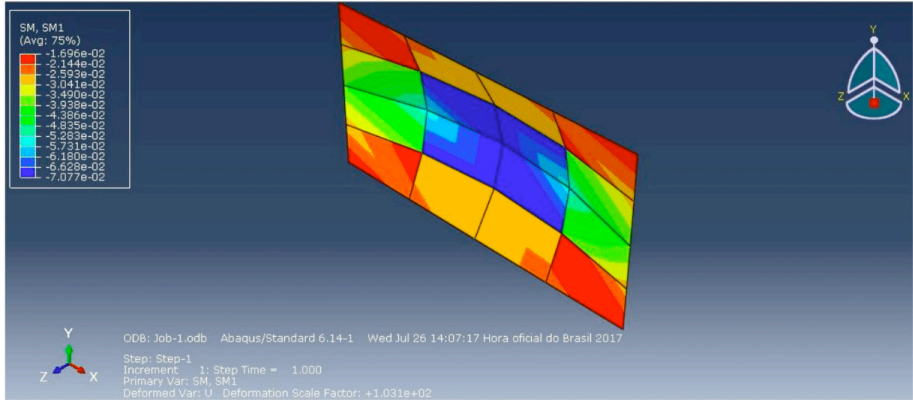


Figure 6: The bending moment field at the x direction and mesh with four subdivisions

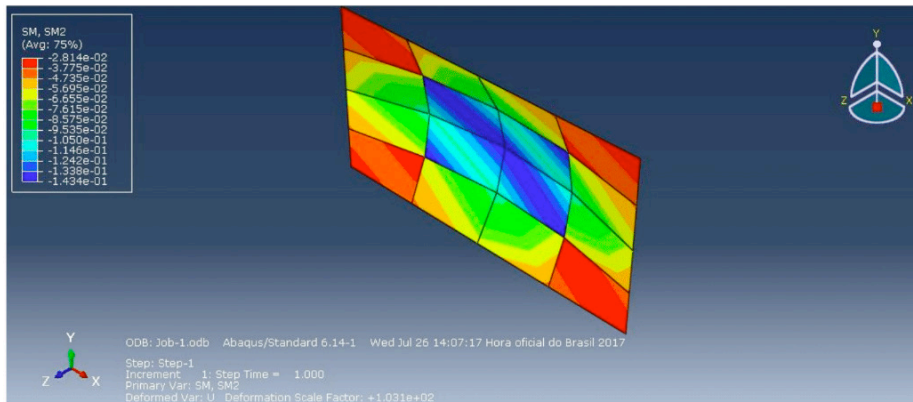


Figure 7: The bending moment field at the y direction and mesh with four subdivisions

For the simulations executed by finite elements and mesh with twenty subdivisions, we obtained de following approximations:

$$w_{max} = 0.007570 \text{ m}$$

$$M_{x_{max}} = 0.074320 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

$$M_{y_{max}} = 0.162200 \frac{\text{kNm}}{\text{m}}$$

The graphical representations for the displacement fields and the bending moments can be seen in the Figs. 8, 9 and 10 – respectively.

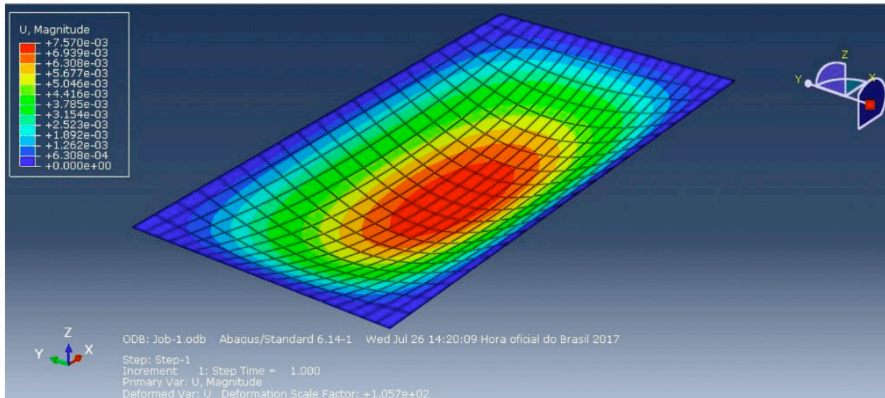


Figure 8: The transversal displacement field and mesh with twenty subdivisions

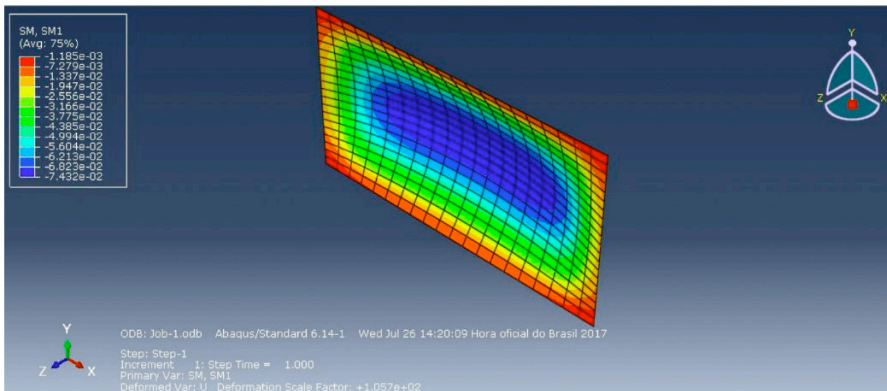


Figure 9: The bending moment field at the x direction and mesh with twenty subdivisions



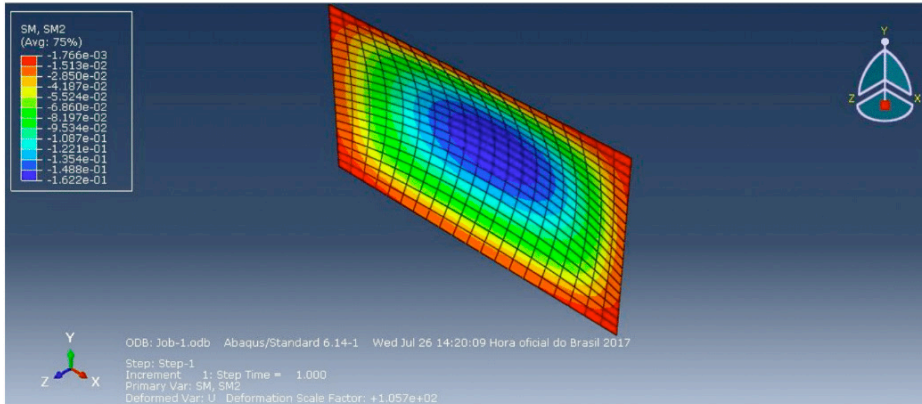


Figure 10: The bending moment field at the y direction and mesh with twenty subdivisions

## 5.2 Other Boundary Conditions

In addition to the case where the plate was in four simply supported edges, simulations for the cases where the plate was with all edges clamped, one edge clamped with the rest of them simply supported and, finally, a rectangular plate with two edges clamped with another two simply supported edges, were also made. The results for these simulations can be seen in Table 1.

SIMPLY SUPPORTED EDGES					
	FINITE ELEMENTS		FINITE DIFFERENCES		TIMOSHENKO
MESH SUBDIVISIONS	4	20	4	20	
W [m]	0.007760	0.007570	0.007512	0.007549	0.007516
Mx [kNm/m]	0.070770	0.074320	0.073271	0.074124	0.074240
My [kNm/m]	0.143400	0.162200	0.155022	0.162359	0.162472
ALL EDGES CLAMPED					
	FINITE ELEMENTS		FINITE DIFFERENCES		TIMOSHENKO
MESH SUBDIVISIONS	4	20	4	20	
W [m]	0.002000	0.001880	0.002704	0.001924	0.001893
Mx [kNm/m]	0.028280	0.028580	0.029729	0.025360	0.025280
My [kNm/m]	0.055240	0.065350	0.071153	0.066080	0.065920
ONE EDGE CLAMPED WITH THE REST OF THEM SIMPLY SUPPORTED					
	FINITE ELEMENTS		FINITE DIFFERENCES		TIMOSHENKO
MESH SUBDIVISIONS	4	20	4	20	
W [m]	0.003533	0.003757	0.004315	0.003667	0.003653
Mx [kNm/m]	0.035270	0.037950	0.043214	0.037823	0.036800

My [kNm/m]	0.081660	0.082950	0.099547	0.096381	0.09600
TWO EDGES CLAMPED WITH ANOTHER TWO SIMPLY SUPPORTED					
	FINITE ELEMENTS		FINITE DIFERENCES		TIMOSHENKO
MESH SUBDIVISIONS	4	20	4	20	
W [m]	0.001741	0.001939	0.002775	0.001982	0.001938
Mx [kNm/m]	0.020300	0.026110	0.029134	0.022934	0.022720
My [kNm/m]	0.055450	0.066790	0.072816	0.067548	0.067200

Table 1. Results

SIMPLY SUPPORTED EDGES				
%	FINITE ELEMENTS		FINITE DIFERENCES	
MESH SUBDIVISIONS	4	20	4	20
W [m]	3.25	0.72	0.05	0.44
Mx [kNm/m]	4.67	0.11	1.31	0.16
My [kNm/m]	11.74	0.17	4.59	0.07
ALL EDGES CLAMPED				
%	FINITE ELEMENTS		FINITE DIFERENCES	
MESH SUBDIVISIONS	4	20	4	20
W [m]	5.65	0.69	42.84	1.64
Mx [kNm/m]	11.87	13.05	17.60	0.32
My [kNm/m]	16.20	0.86	7.94	0.24
ONE EDGE CLAMPED WITH THE REST OF THEM SIMPLY SUPPORTED				
%	FINITE ELEMENTS		FINITE DIFERENCES	
MESH SUBDIVISIONS	4	20	4	20
W [m]	3.28	2.85	18.12	0.38
Mx [kNm/m]	4.16	3.13	17.43	2.78
My [kNm/m]	14.94	13.59	3.69	0.40
TWO EDGES CLAMPED WITH ANOTHER TWO SIMPLY SUPPORTED				
%	FINITE ELEMENTS		FINITE DIFERENCES	
MESH SUBDIVISIONS	4	20	4	20
W [m]	10.17	0.05	43.19	2.27
Mx [kNm/m]	10.65	14.92	28.23	0.94
My [kNm/m]	17.49	0.61	8.36	0.52

Table 2. Percentage Errors

## 6 | DISCUSSION

According to the present work, it is possible to conclude that the finite differences method presented better approximations for the displacement fields  $w$  and bending moments  $M_x$  and  $M_y$ , when compared with the approximations obtained by finite elements method, for

the same mesh and boundary for *simply supported edges*. These results are shown in Table 2, where it can be seen the percentage errors obtained in the simulations. In Table 2, it is also possible to observe that for the mesh with the lower resolution – four subdivisions, the finite differences method shows better convergence when compared to the finite elements method with 0.05%, 1.31% e 4.59% in percentage errors for the approximations to the displacement fields and bending moments – respectively. At the same time, the finite elements method – for the same mesh – presented 3.25%, 4.67% e 11.74% in percentage errors for the displacement fields and bending moments – respectively.

For the same problem, the subdivisions number were increased, resulting in a mesh with twenty subdivisions which provided a better convergence for the approximations in both methods. However, the finite difference method presented lower percentage errors (0.44%, 0.16%, 0.07%), when compared to the finite elements method (0.72%, 0.11%, 0.17%). Is also possible to observe that when the subdivisions mesh increases, the maximum displacement field approximation obtained by finite differences increased slightly, compared to the mash with just four subdivisions, also by finite differences.

The situation also changes as the boundary conditions is changed, especially when some edge is clamped or even all of them. An example of this case is when the plate is with all of the edges clamped and, as it is possible to observe in the Table 2, the approximations by finite differences are considerably worse, with 42.84%, 17.60% e 7.94% percentage errors compared to the finite elements method, with 5.65%, 11.87% e 16.20% percentage errors. Is also possible to observe that the percentage errors for both methods were reduced as the subdivisions mesh number were increased. In this case, it can be noticed that the  $M_y$  approximation presented highest percentage error to the twenty subdivisions mesh compared to the four subdivisions mesh. As the same way, the  $M_x$  approximation presented lower percentage error by finite differences to the twenty subdivisions mesh while the  $M_y$  approximation for the both mashes have presented lower percentage errors by finite differences.

In the case where just the lower edges were clamped, all the approximations were better in terms of the convergence as the subdivisions mesh number were increased. For the four subdivisions mesh, the  $w_{center}$ , and  $M_{xcenter}$  approximations for the central mesh node were better in terms of convergence to the finite elements method, however, the  $M_y$  approximation presented lower percentage error by finite differences. In this context, when the subdivisions mesh number were increased, the finite differences method presented better approximations (0.38%, 2.78% e 0.40%) compared to the finite elements method (2.85% 3.13% e 13.59%), to the  $w_{center}$ ,  $M_{xcenter}$  e  $M_{ycenter}$  – respectively.

Finally, for the case in which the plate is with higher and lower edges clamped and the other two edges simple supported, for the mesh with four subdivisions, the finite element method presented better approximations to the transversal displacement  $w_{max}$  and the  $M_{xcenter}$  bending moment, presenting percentage errors around 10.17% e 10.65%,

respectively. However, the finite differences method presented a better approximation to the  $M_{y_{max}}$  bending moment, with percent error around 8.36%, compared to the 17.49% by the finite elements method. For the mesh with twenty subdivisions, the  $M_{x_{center}}$  e  $M_{y_{max}}$  approximations were better by the finite differences method, with percentage errors around 0.94% e 0.52%, however, the  $w_{max}$  approximation were better by the finite element method, with 0.05% percentage error.

## REFERENCES

Crandall, Stephen H., 1956. **Engineering Analysis**, McGraw-Hill Book Co.

Cholfe, Luiz, 1988. **Resolução de lajes pelo método das diferenças finitas com a aplicação de técnicas de transformação**, Dissertação de mestrado, PEFF/EPUSP, São Paulo.

Federal Aviation Administration, **Aviation Maintenance Technician Handbook**, Volume 1.

Megson, T.H.G., 2007. **Aircraft Structures for engineering students**, Fourth Edition.

Timoshenko, S. 1956, **Theory of Plates and Shells**, Second Edition.

## NUMERICAL SIMULATION OF LABYRINTH SEALS FOR PULSED COMPRESSION REACTORS (PCR)

Data de aceite: 02/08/2021

Data de submissão: 01/05/2021

### Hermann Enrique Alcázar Rojas

Universidad Catolica de Santa Maria,  
Department of Mechanical, Mechanical  
Electrical and Mechatronics Engineering  
Arequipa – Arequipa  
<https://orcid.org/0000-0002-7651-9269>

### Briam Rudy Velasquez Coila

Universidad Catolica de Santa Maria,  
Department of Mechanical, Mechanical  
Electrical and Mechatronics Engineering  
Arequipa – Arequipa  
<https://orcid.org/0000-0001-7169-8045>

### Arioston Araújo de Moraes Júnior

Federal University of the Paraiba, Department  
of Chemical Engineering  
João Pessoa – Paraiba  
<https://orcid.org/0000-0002-5856-0276>

### Leopoldo Oswaldo Alcázar Rojas

Universidad Catolica de Santa Maria,  
Department of Mechanical, Mechanical  
Electrical and Mechatronics Engineering  
Arequipa – Arequipa  
<https://orcid.org/0000-0003-0621-8281>

**ABSTRACT:** A sealing system is proposed using labyrinth seals to minimize gas leaks, for which triangular, rectangular, and trapezoidal geometric parameters are evaluated. For each one of the geometries a group of parameters were optimized minimizing the gas leakage, using the multi-

objective genetic algorithm (MOGA), updating in each step the geometry employing a user defined Ansys SpaceClaim Python algorithm. For a new set of parameters (height, width, and angle of the shape, space between cavities, and piston length) the script creates the boundary geometry and meshing. The CFD analysis evaluates the gas leakage for the given geometry and constant boundary conditions (10 MPa inlet pressure, 25 m/s piston speed, 40  $\mu\text{m}$  piston/cylinder gap, and ideal methane gas), and uses this data as input to MOGA. The input set values were reduced to manufacturable quantities, so finite or discrete values can be used across the iterations. The analysis of distributed properties such as velocity, temperature, and pressure, inside the cavity, showed a steady laminar regime with an energy loss due to entropy increment. The most sensitive parameters are the piston length and height cavity for all shapes. The trapezoidal shape presented the best performance in minimizing the mass flow leakage.

**KEYWORDS:** Labyrinth seals, pulsed compression reactor, CFD simulation, Ansys Fluent.

**RESUMO:** Um sistema de vedação é proposto usando selos de labirinto para minimizar vazamentos de gás, para o qual parâmetros geométricos triangulares, retangulares e trapezoidais são avaliados. Para cada uma das geometrias foi otimizado um conjunto de parâmetros minimizando o vazamento de gás, utilizando o algoritmo genético multi-objetivo (MOGA), atualizando em cada etapa a geometria empregando um algoritmo Ansys SpaceClaim

Python definido pelo usuário. Para um novo conjunto de parâmetros (altura, largura e ângulo da forma, espaço entre cavidades e comprimento do pistão), o script cria a geometria de limite e a malha. A análise CFD avalia o vazamento de gás para a geometria dada e as condições de contorno constantes (pressão de entrada de 10 MPa, velocidade do pistão de 25 m / s, folga do pistão / cilindro de 40  $\mu\text{m}$  e gás metano ideal) e usa esses dados como entrada para MOGA. Os valores definidos de entrada foram reduzidos a quantidades fabricáveis, portanto, valores finitos ou discretos podem ser usados nas iterações. A análise das propriedades distribuídas como velocidade, temperatura e pressão, no interior da cavidade, mostrou um regime laminar estável com perda de energia devido ao incremento de entropia. Os parâmetros mais sensíveis são o comprimento do pistão e a altura da cavidade para todos os formatos. O formato trapezoidal apresentou o melhor desempenho em minimizar o vazamento do fluxo de massa.

**PALAVRAS - CHAVE:** Selos de labirinto, reator de compressão pulsado, simulação CFD, Ansys Fluent.

## 1 | INTRODUCTION

Pulsed compression reactor (PCR) have many applications, such as: production of alkenes by dehydrogenation of paraffins; gas and hydrogen synthesis; thermal destruction of impurities that are discharged in industrial process exhaust (air cleaning) and toxic compounds; production of acetylene, nitric oxide, hydrogen cyanide; controlled generation of mono dispersed ceramic, metallic and amorphous nanoparticles by thermal decomposition of appropriate precursors (carbonyl and organometallic compounds, salts, etc.), (KRONBERG, 2008).

Many efforts have already been made to develop a commercial chemical reactor based on the principle of pulsed compression. Authors who carried out detailed investigations are (LONGWELL et al., 1958), (KOLBANOVSKIY; SHCHIPACHEV; CHERNYAK, 1982), (MORRISON; REIMER, 1989); however, single shot compression machines are not suitable for industrial applications, (KRONBERG, 2008). On the other hand, many researchers as (VON SZESZICH, 1956), (JAN; VAN DIJCK, 1957), (VAN DIJCK, 1957), (OBERDORFER; WINCH, 1961), (YAMAMOTO et al., 1963), (KARIM; MOORE, 1963), (KARIM; MOORE, 1990), (LOWTHER; BOHON, 1990), and (DOLINSKIJ et al., 1997), tried to use internal combustion engine designs or similar as reactors. However, the commercial applications of internal combustion engines as reactors are limited for a variety of reasons: because it uses oil lubrication, high losses due to cooling (up to 30%), relatively low maximum inlet and outlet pressures, possible sharp decrease in volumetric efficiency with size, inability to continuously adjust the compression ratio as the composition of the reactant's changes, (KRONBERG, 2008).

Engineering and reactor design problems for large-scale production of PCRs are thermal control and necessary stabilization for long-term operation, effective start-up

methods, gas exchange in chambers (geometry of the chambers, position, size and shape), piston and cylinder materials, and effective lubrication and sealing (KRONBERG, 2008). The objective is to provide stable and wear-free of the piston and sealing, and to prevent gas leakage through the space between cylinder and piston (gap).

The problem that will be addressed here is the lubrication and sealing, and therefore an effective sealing. (SCHALLER; DARVISHSEFAT; SCHLÜCKER, 2018) and (WANG et al., 2019) stated that oil-free lubrication carries the gas completely dry and avoids gas contamination due to oil. Also, if PCRs are equipped with a non-contact seal it would have no wear and almost unlimited service life. The distinctive feature of the piston compressor with labyrinth seals is that it does not produce friction between the cylinder-piston, (KLÄY, 1975). So, the method for minimizing leakage, lubrication and sealing is to use a labyrinth seal in the piston, cylinder, or both.

## 2 | PCR LABYRINTH SEAL

A labyrinth seal is a structure that consists of multiple cavities where the flow circulates inside them and due to the friction with the walls, the kinetic energy of the fluid is dissipated, thus reducing the leakage flow. The advantages of labyrinth seals are simplicity, robustness, and suitability for high pressures, (SCHALLER; DARVISHSEFAT; SCHLÜCKER, 2018). Instead of piston rings, the labyrinths in the piston are provided with a large number of grooves that produce a labyrinthic sealing effect against the cylinder wall, which is also grooved; the piston moves with enough free space so that there is no contact between the piston and the cylinder wall, (KLÄY, 1975).

Graunke and Ronnert (1984) showed that the first labyrinth seal equipped compressor was built in 1935. They explained the sealing action of the labyrinth as due to pressure differences from one chamber to another, the throttle point acts as a nozzle for the gas. Part of the pressure energy in the previous chamber is converted into kinetic energy at the nozzle. In the next chamber, the velocity lags almost to zero, and the kinetic energy dissipates in part as heat and in part as vortex energy. By providing a succession of these throttle point and chamber systems, the pressure is reduced from the high level before the piston to the low level after it. The flow process in the labyrinth can be described theoretically by some differential equations as the ideal gas state equation, the continuity equation, the equation of motion or the law of momentum, and the law of conservation of energy.

Most of the research related to labyrinth seals study the rotor-stator system, that is, for rotating elements, and those that study the cylinder-piston system basically focus on the effects of geometric parameters, (WANG et al., 2019). (CANGIOLI et al., 2017), and (VERMES, 1961) explored the labyrinth seal flow calculation method. Currently the main research methods for labyrinth leaks are the analysis of thermodynamic theory, numerical analysis method, leak measurements, flow visualization method. Other studies investigated

the mechanism in rotating machines and combined the CFD method, and theoretical analysis to study the flow pattern within the labyrinth seal and analyze the effect of the structural arrangement and the pressure relationship on the sealing efficiency, (WANG et al., 2019).

(“Pulsed compression reactor for nanoparticles manufacturing”, [s.d.]) uses a free piston pulsed compression reactor to achieve adiabatic compression. If gas compression is achieved without heat loss, this is accompanied by increases in gas temperature, and if the compression is fast enough, the process approaches an adiabatic one. When using this method, a complete cycle does not exceed 0.01 seconds, the period of time with extreme temperatures and pressures is around 0.001, this short period makes minimal the heat exchange between the gas and the cylinder walls, (GLOUCHENKOV; KRONBERG; VERINGA, 2002). In this method, a mixture of reactive gases in a tube is compressed by a free piston that moves at a speed of 5-40 m/s, (KRONBERG, 2008).

### 3 I MODEL

The main objective of this study is the parameter’s optimization of a PCR labyrinth seal. As seen in Figure 1, three different geometries will be analyzed, with triangular, rectangular, and trapezoidal shapes. The parameters needed to define each shape are the piston diameter, piston length, gap between piston and cylinder, cavity length, cavity depth, cavity angle, initial free length, and distance between cavities. The piston diameter and gap are considered constants through the present work and stated as 60 mm and 40  $\mu\text{m}$ , respectively. The remaining parameters can vary within the limit values given in Table 1.

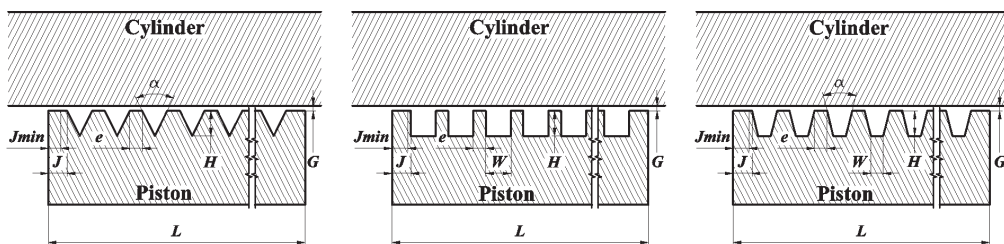


Figure 1 – Geometry definition for triangular, rectangular, and trapezoidal shapes



Piston diameter*	Gap between piston and cylinder*	Piston length	Cavity length	Cavity depth	Cavity angle	Initial free length	Distance between cavities
$d$ [mm]	$G$ [ $\mu$ m]	$L$ [mm]	$W$ [ $\mu$ m]	$H$ [mm]	$\alpha$ [ $^\circ$ ]	$J_{min}$ [mm]	$e$ [mm]
60	40	30 - 150	0.5-5.0	0.5-5.0	30 - 75	2.0	1.0 – 5.0

\*Constant values

Table 1 - Constant and limit values for given cavity geometry

The generation of the parametric geometries is crucial to carry out the optimization process. For this, it was decided to automate this process using scripts, because it reduces the time used to modify the geometry. The CAD program Ansys SpaceClaim was chosen for this study because it presents a user-friendly development environment, a script in the Python programming language will be developed for each of the shapes of the labyrinth seals. Each of the parameters is defined within the limits shown in Table 1, which will for manufacturable values.

The geometries returned by the scripts are two-dimensional geometries that represent the fluid domain. It was decided to use two-dimensional geometries for the study, because it is expected that the fluid presents an axisymmetric behavior. This behavior reduces the computational resources, compared to a three-dimensional study.

Meshing represents an important aspect within the study since an inadequate meshing can cause convergence problems during the simulation process. The criteria to generate the meshing were: aspect ratio  $AR \approx 1$ ; orthogonal quality  $OQ \approx 1$ , and dimensionless wall distance  $y^+ \approx 30-300$ . The meshing was carried out using triangular and quadrilateral elements.

Gas model	Turbulence Model	$C_2$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$
Ideal gas (piecewise-polynomial)	Realizable $k-\epsilon$	1.9	1.0	1.2

Table 2 – Ansys Fluent model parameters

Gas	Inlet BC	Outlet BC	Piston speed
Methane, $CH_4$ (compressible gas)	<b>10 MPa @300 K</b>	Atmospheric 0 MPa @300 K	<b>25 m/s</b>

Table 3 – Boundary conditions of the model

Ansys Fluent software was used for the fluid analysis of the three proposed labyrinth seal shapes. Within the software, the simulator type was configured as based on pressure and axisymmetric analysis. The Realizable k-epsilon viscosity model was chosen, as it showed better convergence compared to the other variations of k-epsilon model and

k-omega models. Also, the software Theory Guide recommends this model in cases where the flow characteristics includes vortices (ANSYS, 2020). Table 2 shows Ansys Fluent’s parameters values for this model. Table 3 shows the boundary conditions. This research project is mainly focused on the compression of methane, whereby methane is used as a compressible gas, inlet gauge static pressure being 10 MPa, outlet gauge pressure 0 MPa (atmospheric), and a piston speed of 25 m/s.

## 4 | RESULTS

For the case of the boundary inlet pressure condition, it was seen that the fluid within the domain exhibited supersonic behavior for the given conditions. It is for this reason that an initial static pressure “Supersonic / Initial Gauge Pressure” was used, with a value of 0.95 times the gauge static pressure of 10 MPa. For the definition of the gauge total inlet pressure, equation (1) was used to define it as a function of the inlet static pressure, the coefficient  $a$  was set as 1. In addition, the “Prevent Reverse Flow” condition was placed at the input. The number of iterations for each simulation was limited to 1500 iterations, which shows that for this number the convergence was acceptable.

$$P_o = P_o(n - 1) - a(P_s(n - 1) - P_{s\ target}) \quad (1)$$

Where:  $n$ , iteration

$P_o$ , gauge total pressure

$a$ , coefficient

$P_s$ , gauge static pressure

$P_{s\ target}$ , target gauge static pressure

A parameter correlation study was carried out. This study was based on the leakage mass flow as output parameter. The Spearman method was chosen, with a range of 50 samples per cavity shape. Each of the samples were determined based on the limits of each geometric parameter. Each parameters sensitivity was obtained, and their values are shown in Figure 2. For all shapes, the piston length is the most sensitive parameter, and the other parameters differ in dependence on the shape. The quadratic regression’s coefficient of determination  $R^2$  of leakage mass flow obtained was 0.97 in triangular, 0.78 in rectangular and 0.79 in trapezoidal shape.

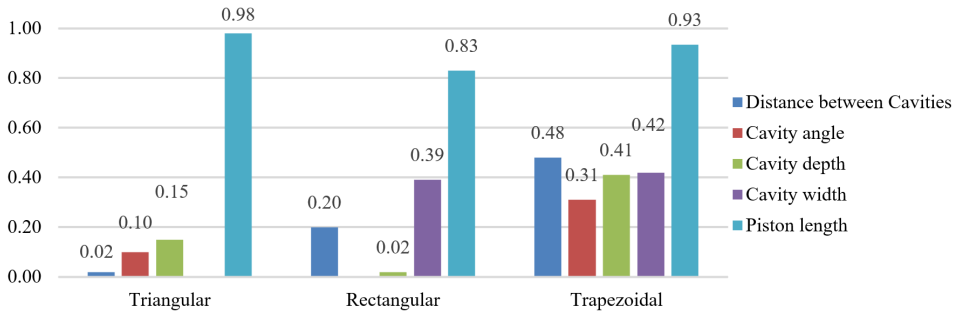


Figure 2 – Parameter's sensibility

To determine an approximate leakage mass flow mathematical model, with the geometric parameters as input variables, a surface fitting was carried out. The Ansys Response Surface Type's Genetic Aggregation method was used, where the previous 50 samples, used in the parameter correlation, were taken as a basis. Figure 3 shows the mass flow leakage surface for the piston length and space between cavities as input variables, respectively, for the three shapes. These surfaces were obtained by surface fitting, as stated previously, with a Coefficient of Determination  $R^2$  of Learning Points (quality of the interpolation) and Cross-Validation on Learning Points (stability or reliability of the response surface) on Learning Points, 1-1 respectively in triangular, 1-0.98 in rectangular and 1-0.99 in trapezoidal shape.

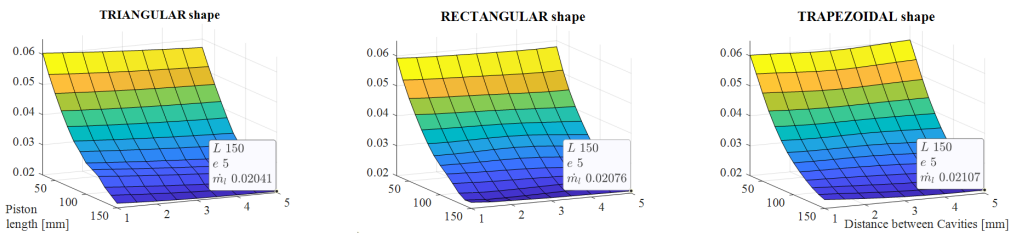


Figure 3 – Mass Flow leakage for optimal triangular, rectangular, and trapezoidal shape

The flow streamlines for the three shapes are plotted in Fig. 4. For the triangular one, the primary vortex generates minor secondary ones near the vertex. In all cases is seen a centered main vortex displaced slightly to the flow direction. Turbulence is generated at the shape inlet and outlet, caused by the abrupt gas expansion and compression, respectively. The reduction in kinetic energy is greatly influenced by piston speed. The velocity profile is more distorted at the trapezoidal shape, causing higher friction at the walls and therefore higher pressure drop than the other two cavities. Also is seen at the velocity profile along the gap, that the velocity is zero at the cylinder wall (which remains static) and negative at the piston wall (which moves opposite the flow).

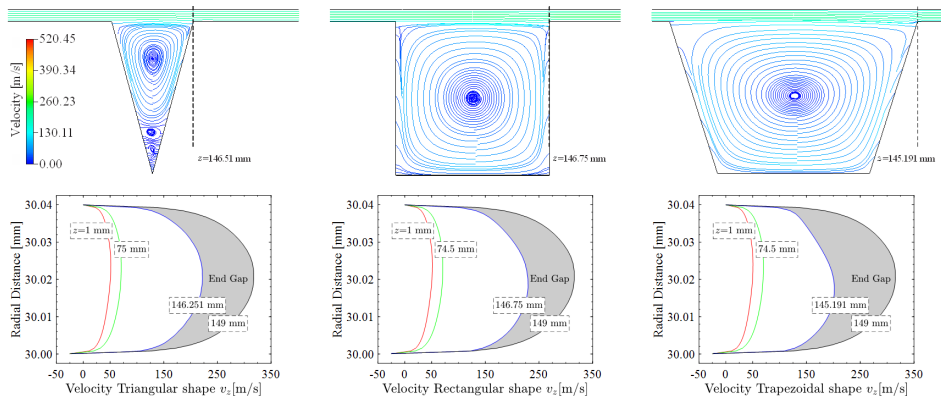


Figure 4 – Flow streamline and velocity profile for optimal triangular, rectangular, and trapezoidal shape

Figure 5 shows the pressure drop along the piston, as well as the increase in the kinetic energy of turbulence. As shown in the figure the pressure drop begins to increase from 90 mm and represents approximately the 59.86% of the total pressure drop, in the four cases that includes the 3 shapes of labyrinth seals proposed and the case in which there is no labyrinth seals. Along the turbulence kinetic energy curve there are some peaks for each case, these peaks represent the effect it has on the fluid at the entrance to each cavity. In the same way, can be seen peaks of less size over the pressure curve. It is clearly seen in the figure that the curves of the case without labyrinth seals do not present these peaks, so this confirms the effect that the cavities have on the fluid.

To explain the behavior of the cavity, the distribution profile of temperature (TD), pressure (PD), total energy (TED) and turbulent kinetic energy (TKED), and entropy (ED) were calculated. What occurs in TED is a decrease in the energy in the cavity in relation to the energy in the gap, being less in the center and increased towards the extremes. This means that there is energy consumption, which is what it seeks, which will be responsible for the rotation of the fluid within the cavity. To explain this, we see that the PD and TD follow approximately the same distribution. A decrease in temperature and pressure leads to an increase and decrease in entropy, respectively. As the pressure variation is greater, then there is a liquid increase in entropy that is transformed into irreversibility (heat), which is precisely what is seen in the ED.

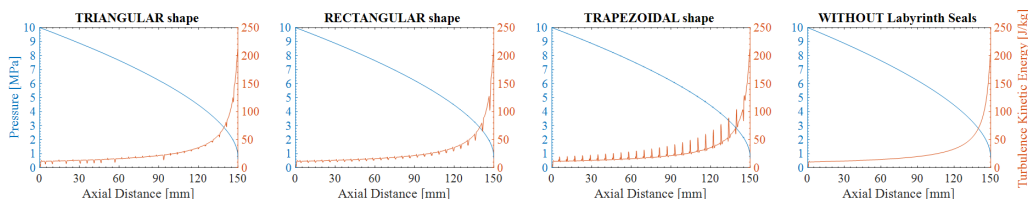


Figure 5 - Drop pressure and increase Turbulence kinetic energy along the piston

For the optimization of the geometric parameters minimizing the gas leakage, the multi-objective genetic algorithm MOGA method was used. The maximum allowable pareto percentage MAPP and converge stability percentage CSP conditions were set at 70% the 2%, respectively. The optimization was carried out based on the surface fitting using the ANSYS Design Exploration tool. Three optimization candidates were considered, after which a verification was made, simulating then each of the three candidates. This process was repeated for each of the proposed labyrinth seal shapes, i.e., for triangular, rectangular, and trapezoidal shapes.

The leakage mass flow for the trapezoidal shape is 0.02007 kg/s (1% with respect the smooth piston), which represents the lowest value of all shapes, Tab. 4. Triangular and rectangular shapes have more leakage mass than smooth piston configuration. This behavior has also been observed by (SCHALLER; DARVISHSEFAT; SCHLÜCKER, 2018), who studied a hydrogen compressor with rectangular labyrinth shape for pressure differences of up to 1 MPa and 50  $\mu\text{m}$  gap, pointing out a critical gap value below which the smooth or linear seal shape performs better than the caved ones. A better understanding of the gap effect, and the influence on the type of flow regime (laminar / turbulent) is required.

Parameters	Without Labyrinth Seals	Triangular	Rectangular	Trapezoidal
Distance between cavities, [mm]	-	5	5	5
Cavity angle, [deg.]	-	30	-	35
Cavity length, [mm]	-	-	0.5	0.5
Cavity depth, [mm]	-	0.5	0.5	0.5
Piston Length, [mm]	150	150	150	150
Mass Flow Leakage, [kg/s]	0.02027	0.02049	0.02050	0.02007

Table 4 - Optimal parameter values for given cavity geometry

## 5 | CONCLUSIONS

The simulation and optimization of the labyrinth seal for PCR with triangular, rectangular, and trapezoidal shapes was carried out successfully, for all cases a set of optimal values of geometry parameters was found. For a 60 mm piston length, 40  $\mu\text{m}$  gap and methane gas at 10 MPa as fluid source. The dimension parameters of the shapes were optimized, and the piston length resulted as the most sensitive. Because of this, other cavity parameters as angle, depth, width and spacing were less important, so consequently, results for a smooth cylinder piston presented a similar performance that those caved.

The analysis of distributed properties such as velocity, temperature, and pression, inside the cavity, showed a steady laminar regime with an energy loss due to entropy increment, greater variation (peaks) of TKE and vorticity was observed in the inlet and outlet of cavities. Also, the reduction in kinetic energy is greatly influenced by piston speed. The trapezoidal shape presented the best performance to minimize the mass flow leakage,

with a cavity angle of 35 °, cavity depth of 0.5 mm, distance between cavities of 5 mm and a piston length of 150 mm, on the other hand that least performance presented was the rectangular shape.

## ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank the Mechanical Engineering Department Chair and the Research Vice-President of the Universidad Católica de Santa María del Perú, for their support in the development of this work.

## AUTHORSHIP STATEMENT

The authors hereby confirm that they are the sole liable persons responsible for the authorship of this work, and that all material that has been herein included as part of the present paper is either the property (and authorship) of the authors or has the permission of the owners to be included here.

## REFERENCES

ANSYS, Inc. **ANSYS Fluent Theory Guide**. 2020 R1 ed. [s.l.: s.n.].

CANGIOLI, F. et al. **On the Thermodynamic Process in the Bulk-Flow Model for the Estimation of the Dynamic Coefficients of Labyrinth Seals**. Volume 7A: Structures and Dynamics. **Anais...** American Society of Mechanical Engineers, 26 jun. 2017Disponível em: <<https://asmedigitalcollection.asme.org/GT/proceedings/GT2017/50923/Charlotte, North Carolina, USA/242709>>

CANGIOLI, F. et al. Effect of energy equation in one control-volume bulk-flow model for the prediction of labyrinth seal dynamic coefficients. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 98, p. 594–612, 1 jan. 2018.

DOLINSKIJ, Y. L. et al. **Method of generating synthesis gas**Rússia, 1997.

GLOUCHENKOV, M.; KRONBERG, A.; VERINGA, H. Free piston pulsed compression reactor. **Chemical Engineering Transactions**, v. 2, p. 983–988, 2002.

GRAUNKE, K.; RONNERT, J. **Dynamic behaviour of labyrinth seals in oilfree labyrinth-piston compressors**. Proceedings of the Purdue Compressor Technology Conference. **Anais...**Purdue Univ, Ray W. Herrick Lab, 1984

HODKINSON, B. Estimation of the Leakage through a Labyrinth Gland. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 141, n. 1, p. 283–288, 7 jun. 1939.

JAN, B. J.; VAN DIJCK, W. J. **Method and reciprocating compressionreactor for short period, high temperature and high pressure chemical reactions**Estados Unidos, 1957.

KARIM, G. A.; MOORE, N. P. W. The production of synthesis gas and power in a compression ignition engine. **Journal of the Institute of Fuel**, v. 105, 1963.

KARIM, G. A.; MOORE, N. P. W. **The Production of Hydrogen by the Partial Oxidation of Methane in a Dual Fuel Engine**. SAE Technical Papers. **Anais...**1 ago. 1990Disponível em: <<https://www.sae.org/content/901501/>>

KLÄY, H. R. Reciprocating compressors with labyrinth pistons for helium. **Cryogenics**, v. 15, n. 10, p. 569–571, 1975.

KOLBANOVSKIY, Y. A.; SHCHIPACHEV, V. S.; CHERNYAK, N. Y. **Pulse compression of gases in chemistry and technology**. URSS: [s.n.].

KRONBERG, A. **Technology Report - Pulsed compression reactorEuropean Roadmap of Process Intensification**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[www.creative-energy.org](http://www.creative-energy.org)>.

LONGWELL, P. A. et al. Ballistic Piston for Investigating Gas Phase Reactions. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 50, n. 4, p. 603–610, abr. 1958.

LOWTHER, F. E.; BOHON, W. M. **Integrated product generation and catalytic product synthesis in an engine-reactor**Estados Unidos, 1990.

MILNE-THOMSON, L. M. **Theoretical Hydrodynamics**. [s.l.] Courier Corporation, 1996.

MORRISON, P. W.; REIMER, J. A. Silane pyrolysis in a piston reactor. **AIChE Journal**, v. 35, n. 5, p. 793–802, maio 1989.

OBERDORFER, P. E.; WINCH, R. F. Chemicals from Methane in a High Compression Engine. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 53, n. 1, p. 41–44, jan. 1961. **Pulsed compression reactor for nanoparticles manufacturing**. EnschedeEncontech B. V., , [s.d.]. Disponível em: <[http://www.encontech.nl/papers/Nanoparticles manufacturing.pdf](http://www.encontech.nl/papers/Nanoparticles%20manufacturing.pdf)>

SCHALLER, A.; DARVISHSEFAT, N.; SCHLÜCKER, E. Simulation and Experimental Investigation of Labyrinth Seals for Reciprocating Piston Compressors. **Chemical Engineering and Technology**, v. 41, n. 5, p. 1043–1050, 2018.

VAN DIJCK, W. J. **Reciprocating compression-Reactor for Short Period, High Temperature and High Pressure Chemical Reactions**Estados Unidos, 1957.

VERMES, G. A fluid mechanics approach to the labyrinth seal leakage problem. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 83, n. 2, p. 161–169, 1 abr. 1961.

VON SZESZICH, L. Herstellung von Synthesegas im Otto-Motor bei gleichzeitiger Arbeitsgewinnung. **Chemie Ingenieur Technik - CIT**, v. 28, n. 3, p. 190–195, mar. 1956.

WANG, L. et al. Leakage characteristic identification of labyrinth seals on reciprocating piston through transient simulations. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2019, 2019.

YAMAMOTO, I. et al. **Production of Synthesis Gas by Internal Combustion Engine**. Sixth World Petroleum Congress. **Anais...**1963

## PRÁTICAS E CONTROLE DA CORRUPÇÃO NO MERCADO SEGURADOR: UMA PROPOSTA DE DADOS PARA SISTEMAS DE CONTROLE E COMPLIANCE

*Data de aceite: 02/08/2021*

**Lucas Cristiano Ferreira Alves**

<http://lattes.cnpq.br/6925811843250826>

**Melissa Mourão Amaral**

<http://lattes.cnpq.br/9706918353629673>

**Liza Dantas Noguchi**

<http://lattes.cnpq.br/8970754008664196>

**RESUMO:** O presente artigo tem como objetivo identificar as práticas corruptas que ocorrem no mercado segurador, demonstrar a importância da SUSEP e os mecanismos de controle para mitigar essas práticas. Por meio da realização de entrevistas semiestruturadas com corretores e gerentes comerciais de grandes seguradoras e corretoras e, posteriormente, por meio da análise temática e de conteúdo, foi realizado levantamento das principais práticas corruptas que acontecem neste mercado.

**PALAVRAS - CHAVE:** Práticas Corruptas. Contrato. Mercado Segurador.

### PRACTICES AND CONTROL OF CORRUPTION IN THE INSURANCE MARKET: A PROPOSED DATA FOR CONTROL AND COMPLIANCE SYSTEMS

**ABSTRACT:** This article aims to identify the corrupt practices that occur in the insurance market, demonstrate the importance of SUSEP and the control mechanisms to mitigate these

practices. Through semi-structured interviews with brokers and commercial managers of large insurance companies and brokerage firms, and subsequently, through the thematic and content analysis, a survey of the main corrupt practices taking place in this market was carried out.

**KEYWORDS:** Corrupt Practices. Contract agreement. Insurance Market.

## 1 | INTRODUÇÃO

O presente estudo visa identificar as práticas corruptas executadas no ambiente segurador, fornecer dispositivos para o controle dessas atividades e, apresentar a relevância da Superintendência de Seguros Privados (SUSEP). O contrato é o instrumento utilizado em tais práticas, é caracterizado pela forma organizada e imperativa em que duas partes sejam elas físicas ou jurídicas, além seus estímulos para atingirem um objetivo comum. Por ser um objeto jurídico, o contrato deve ter entrelaçamento entre as vontades de ambas as partes, tendo como intenção central algo permitido por lei.

O contrato de seguro é definido pela obrigação do segurador de zelar de forma indenizatória o patrimônio do segurado, sendo esse responsável por pagamento, para execução de tal atividade, tendo como objetivo a proteção dos bens do segurado em possíveis e futuros sinistros. Conflitando a noção de decência que deve haver nos contratos de



seguros, a existência de fraudes nesse setor, é destacada pela sua assiduidade.

O Seguro se apoia no princípio de beneficiamento mútuo, e é destinado a proteger prejuízos consideráveis, mas incertos. Segundo Tzirulnik (1999), as fraudes que atingem o mercado de seguros, podem ser consideradas como qualquer comportamento que tenha como foco reproduzir um incidente, para o posterior ganho de indenização de forma imprópria, lesando a empresa de seguros, na tentativa de recebimento de vantagem própria. As ações fraudulentas dificultam as atividades desse sistema, uma vez que, esgotam os recursos que muitos clientes honestos investem para a resolução de problemas verídicos. A fraude enfraquece não somente as seguradoras, mas também os clientes que por consequência pagam prêmios mais altos. A sociedade também sofre com a violação, levando em consideração que muitos dos crimes em seguradoras são investidos em outros crimes dentro do corpo social.

Diante do quadro apresentado, o presente estudo tem como objetivo principal evidenciar as práticas corruptas para o possível controle de tais atos desonestos e ilícitos. O presente estudo é expressivo, já que busca por meio de proposta, a governança de um problema que atinge o mercado segurador, assegurando a possibilidade de redução dessa adversidade.

A relevância do estudo é devido à preocupação com a ocorrência de fraudes praticadas ao longo da história do mercado segurador. Apesar da escassez de estatísticas que comprovem a veracidade dessas ações, é notório que isso aconteça com frequência no mercado de seguros por ser um crime muitas vezes silencioso e por não possuir uma coibição totalmente operativa e persistente.

## 2 | REFERENCIAL TEÓRICO

Neste ponto, são abordados os temas que envolvem a origem e importância dos Seguros Privados no Mercado Brasileiro, os princípios das práticas corruptas, a importância da SUSEP e suas características gerais.

### 2.1 Origem dos Seguros

Segundo Alvim (1999), a eventualidade de fatos danosos aos interesses do homem sempre existiu. O risco é inerente à luta de integração dos seres vivos ao meio ambiente. A expectativa de sua ocorrência acabou gerando a atitude permanente de vigilância que constitui um dos privilégios do espírito humano.

Para reduzir a condição de constante alerta, o homem progressivamente utilizou de ferramentas de precaução dos danos de seus bens. O princípio da solidariedade se tornou o responsável por mover o apoio entre os homens, sendo essa característica o fundamento essencial dos seguros, onde os prejuízos são partilhados entre os membros do grupo.

Na Idade Média e no período marítimo as relações de ajuda mútua se tornaram mais

fortes e mais disciplinadas, sendo o segundo período marcado por conexões mais taxativas e com pouca durabilidade na formação grupal. Para Alvim (1999), a convivência entre os navegantes durava apenas o tempo de viagem, não existindo razões para desenvolver apoio afetivo entre os integrantes. Os auxílios mútuos ocorriam de forma egoísta e com foco no lucro obtido posteriormente.

Muitos estudiosos, afirmam que essas antigas relações de suporte entre pessoas que buscavam uma segurança para seus bens, deram origem as atuais organizações de seguros, mesmo que em tal período as alianças usassem como base a solidariedade.

Segundo Alberti (1992, *apud* BONAVIDA, 2012):

Desta tradição descende toda uma filiação de organismos comunitários de seguros e de previdência: guildas, corporações, sindicatos profissionais, movimentos mutualistas. Esta tradição mutualiza os riscos: cada indivíduo suporta um custo relativamente independente da probabilidade de ocorrência dos riscos que lhe é própria. De tal maneira que existe uma solidariedade e finalmente uma transferência redistributiva no interior da comunidade. Esta tradição conservou sua marca na área geográfica em que nasceu: a Suíça, a Alemanha... e, para além, nos países de sensibilidade comparável sobre este ponto, como por exemplo, o Japão (ALBERT, 1992, *apud* BONAVIDA, 2012).

A evolução das companhias de seguro está associada ao sistema “mediterrâneo” em que se soma a estruturação do sistema capitalista e o direito. O direito é parte integrante e fundamental das obrigatoriedades contratuais, da liberdade de contratar e dos bens colocados como foco de proteção. Essa evolução se transfigurou em ferramenta responsável por maior segurança e previsibilidade. (ALBERT, 1992, *apud* BONAVIDA, 2012).

É importante ressaltar que o desvirtuamento da estrutura criada ao longo dos anos pelas companhias de seguro, não ocorre pelo sistema em si, mas pela natureza perversa humana que com má-fé deturpa o sistema existente.

## 2.2 Importância dos Seguros Privados no Mercado Brasileiro

O negócio de Seguros privados é uma esfera muito importante na economia nacional. Em 1966 foi editado o Decreto-Lei no 73/1996, que organizou o Sistema Nacional de Seguros Privados (SNSP) e nomeou os órgãos que ficariam responsáveis por fiscalizar o mercado de seguros. A criação e a consolidação do negócio de seguros possuíam como argumento a sua capacidade de elevação e sustentação da economia brasileira. O DL n. 73/66 é responsável por regular as ações de seguros no Brasil.

Art. 192. O sistema financeiro nacional, estruturado de forma a promover o desenvolvimento equilibrado do País e a servir aos interesses da coletividade, em todas as partes que o compõem, abrangendo as cooperativas de crédito, será regulado por leis complementares que disporão, inclusive, sobre a participação do capital estrangeiro nas instituições que o integram (BRASIL, 1988).

Por esse último diploma, criou-se o Sistema Nacional de Seguros Privados,

medida de suma importância para o funcionamento ordenado e orgânico da previdência privada, já que assim se elimina a dispersão operacional, multifária e desarmônica, cuja presença no quadro segurador brasileiro tantos efeitos prejudiciais vinha causando. Tal Sistema, dotado de instrumental adequado à expansão do Seguro, pode tornar a Instituição apta ao pleno aproveitamento das potencialidades do mercado interno e até do nosso intercâmbio comercial com o exterior, passando a ter, no progresso econômico nacional, um desempenho financeiro até aqui ainda não alcançado. Unificado e fortalecido, o Sistema Nacional de Seguros Privados terá também, como uma das vigas-mestras do seu desenvolvimento, um rigoroso conjunto de normas éticas, que o decreto-lei no 73 não se descurou de instituir. (BRASIL, 1966).

No mercado existem diversos tipos de seguros, mas os mais corriqueiros são os seguros de automóvel, de imóveis, de vida e acidentes pessoais. Todos possuem uma interferência contratual responsável por regulamentar o acordo entre a seguradora e o segurado. O custo de ser arrecadado é designado de “prêmio”, que é o que se paga a empresa para receber em caso de sinistros a cobertura e proteção de algum bem. É necessário salientar que a cobertura deve cobrir as necessidades do segurado, sendo este o responsável por acordar de acordo com sua vontade e não a do segurador.

Os seguros tem sua importância entrelaçada aos cuidados do patrimônio do cliente, que na dúvida da ocorrência de riscos e incertezas procura uma fonte de segurança para suas propriedades. Para o resguardo dos serviços prestados pelas seguradoras, a SUSEP investe em procedimentos de supervisão e contenção de possíveis inconvenientes na sociedade seguradora.

### **2.3 A importância da Superintendência de Seguros Privados**

A SUSEP é o órgão responsável por fiscalizar e controlar os riscos no mercado de seguros. Sua responsabilidade se encontra na proteção de economia popular, destinada ao mercado de seguros, prevenção de riscos aos consumidores do serviço e o aperfeiçoamento das seguradoras que integram esse corpo econômico. Essa autarquia constitui de normas para o manejo de prováveis adversidades desse setor e é um mecanismo de controle das ações indevidas nas seguradoras. A Susep possui importância tanto para o consumidor quanto para as empresas, garantindo que as corporações de seguros possuam reservas financeiras que atesta a efetivação dos pagamentos em caso de sinistros envolvendo o segurado (SUSEP, 2017).

No entanto, mesmo com esse órgão fiscalizador, muitos crimes continuam a acontecer, o que traduz a necessidade de investimento em segurança interna das seguradoras (SUSEP, 2017).

### **2.4 Práticas Corruptas**

Segundo Sodré (2004), as fraudes são situações corriqueiras nas seguradoras, e são praticadas através da simulação de acidentes, com uma somatória de apresentação de registros falsificados, ocultação de informações importantes e utilização de artifícios

maliciosos para a obtenção de indenização indevida através da seguradora.

Para Kirchner (2009), as ações corrompidas acontecem de duas maneiras, sendo a primeira oriunda de preparação, e a segunda executada por meio de chances e oportunidades. A premeditação, desse crime é caracterizada pela já intenção primária do contratante de cometer o delito contra a seguradora. A segunda forma é concedida no momento de preenchimento do contrato, onde ao observar lapsos nas exclamações da seguradora, o segurado aproveita da situação para camuflar importantes informações e receber financeiramente após a existência de um acidente, mais do que o cabível. O seguro de Danos Pessoais por Veículos Automotores Terrestres (DPVAT), é talvez o mais exposto a fraude profissional, pois as relações burocráticas são simples, o que facilita esse processo.

Para a prática de fraude nas seguradoras são necessários quatro importantes componentes:

- Um contrato, assinado por qualquer uma das partes;
- Inexistência de trâmites burocráticos eficientes nas seguradoras;
- Falta de vigilância, por parte das seguradoras no sentido de segurança contra fraudes;
- E um conselho judicial nacional permissivo.

Na perspectiva da empresa seguradora, as fraudes têm impacto em vários pontos, tais como:

- Redução do mercado consumidor, devido à necessidade da seguradora de elevar os preços;
- Cadastro de acidentes inverídicos, que oferecem tomadas de decisões no ponto de vista estratégico, inadequadas, com investimentos desnecessários;
- Imagem negativa da seguradora;
- Negócio instável.

## *2.4.1 Tipos de Práticas Corruptas*

### *2.4.1.1 Prevaricação*

Segundo Teles (2006), prevaricação é deixar de praticar ou praticar ato de ofício são ações que caracterizam a prevaricação. Na primeira conduta, o agente apenas pretende adiar a realização do ato para momento posterior. Na omissão, ele simplesmente não o realiza porque não deseja, em tempo algum, fazê-lo. Ato de ofício é aquele inserido no âmbito das atribuições conferidas ao funcionário ou de sua competência que para se caracterizar como prevaricação, deve ser praticada contrariando dispositivo legal expresso.

Enquadra-se como exemplo desse crime o funcionário que trai seja por interesse ou má-fé as responsabilidades correspondentes ao seu cargo (TELES, 2006).

#### *2.4.1.2 Desvio de Finalidade*

O conceito de desvio de finalidade está associado às ações utilizadas para satisfazer determinados benefícios pessoais. Bandeira de Mello (2006) faz uso de outra expressão – “desvio de poder” - para compreender os atos que descrevem desvio de finalidade:

[...] entende-se por desvio de poder a utilização de uma competência em desacordo com a finalidade que lhe preside a instituição ou há desvio de poder, e, portanto, invalidade, quando o agente se serve de um ato para satisfazer finalidade alheia à natureza do ato utilizado (BANDEIRA DE MELLO, 2006, *apud* ALVES, 2014).

#### *2.4.1.3 Desvio Funcional*

O desvio funcional ocorre quando o empregador modifica as funções originais pertinentes ao cargo do empregado, destinando-lhe novas tarefas incompatíveis e de grau qualitativamente superior ao cargo originário, sem o pagamento do salário respectivo. (FERREIRA, 2013, *apud* ALVES, 2014).

Verifica-se o desvio de função naquelas situações em que as funções exercidas pelo funcionário se desvirtuam daquelas previstas no plano de carreira ou plano de cargos e salários. Segundo Rocha (2007), o desvio funcional se traduziria naquelas atividades que se distanciam da função a ser desempenhada na organização e que criam o direito à reposição das diferenças salariais, ainda que não haja, no mesmo estabelecimento, atos anteriores praticados nessa direção.

#### *2.4.1.4 Informação Privilegiada*

Entende-se por informação privilegiada toda informação que deveria seguir os critérios de publicidade e que não é tornada pública, seja ela relacionada a valores mobiliários ou outros instrumentos financeiros, e que influencia de maneira sensível o seu preço no mercado (COSTA; RAMOS, 2006, *apud* ALVES, 2014).

De acordo com Costa e Ramos (2006), a infração existe para proteger o bem jurídico supraindividual expresso no valor que a livre concorrência de mercado representa. As pessoas que podem ser atingidas pelo uso da informação privilegiada vão desde acionistas da empresa até todo o universo de investidores que procuram determinado mercado.

#### *2.4.1.5 Tráfico de Influência*

Segundo Semeraro (2000), o tráfico de influência consiste na prática ilegal de uma pessoa se aproveitar da sua posição privilegiada dentro de uma empresa ou entidade,

ou das suas conexões com pessoas em posição de autoridade, para obter favores ou benefícios para terceiros, geralmente em troca de favores ou pagamento. O art. 332 do Código Penal estabelece que o agente que solicitar, exigir, cobrar ou obter, para si ou para outro, vantagem ou promessa de vantagem a pretexto de influir em ato praticado no exercício da função estará sujeito à pena prevista, que é de reclusão de dois a cinco anos e multa.

Conforme Teles (2006), solicitar refere-se a pedir, propor, postular, rogar; exigir é constringer, ordenar, impor; cobrar consiste em manifestar a intenção de receber de modo imperioso, e obter é receber efetivamente o que se propôs com o ato de tráfico de influência.

O objeto da conduta visa angariar vantagens de natureza econômica ou moral, em que o indivíduo, ao realizar a solicitação, exigência ou cobrança sobre o conteúdo de seu interesse, alega gozar de prestígio com outrem, para alcançar seus objetivos pessoais (TELES, 2006, *apud* ALVES, 2014).

#### *2.4.1.6 Fraude*

Num sentido amplo, a fraude é um ato pelo qual o criminoso obtém um benefício ou vantagem ilegal implicando prejuízo de outra pessoa. Como exemplo se tem a quebra de segurança lógica ou captação. (GIL, 1998, *apud* ALVES, 2014).

Segundo Parodi (2013), as fraudes podem ser especificadas em dois tipos: Fraudes do tipo “*Advance Fee*” e “*Capital Vanish*”. O primeiro tipo caracteriza-se quando com alguma desculpa, o fraudador pede algum tipo de sinal ou adiantamento, a qualquer título, para conseguir o benefício pretendido. O segundo se manifesta quando o fraudador toma posse de um valor de propriedade da vítima, através da promessa de conseguir uma vantagem relevante e por fim faz com que esse montante desapareça.

#### *2.4.1.7 Nepotismo*

Conforme Garcia (2006), a palavra nepotismo tem origem no latim *nepos*, que significa neto, descendentes, a posteridade, e *nepotis*, sobrinho. O surgimento do termo se deu para expressar as relações de concessão de privilégios entre o Papa e seus familiares. No período do Renascimento, os papas e outras autoridades da Igreja Católica, por não terem filhos, protegiam seus sobrinhos, nomeando-os para cargos importantes dentro da Igreja. Atualmente o termo, em sentido amplo, significa favorecimento e abrange qualquer concessão de benesses a parentes ou a outras pessoas ligadas ao beneficente por laços de amizade ou confiança. Para esse autor, o nepotismo, em alguns casos, está relacionado à lealdade e à confiança existentes entre o benemérito e o favorecido, sendo praticado com o fim precípua de resguardar os interesses daquele.

#### 2.4.1.8 Suborno

O suborno consiste em prometer, oferecer ou pagar a uma autoridade, governante, funcionário público ou profissional da iniciativa privada qualquer quantidade de dinheiro ou quaisquer outros benefícios para que a pessoa em questão deixe de se portar eticamente quanto aos seus deveres profissionais. Trata-se de uma prática que constitui crime na maior parte dos quadros jurídico-legais de todo o mundo. O crime de suborno pode ser iniciado pelo pagador, que tem interesse financeiro no resultado da transação e a controla. Pode também ser cometido ativamente por aquela pessoa que detém determinado poder social de interesse na relação, geralmente um funcionário público ou um comprador de uma empresa. No caso em que o agente que inicia o crime de suborno exige dinheiro ou propriedades, o crime passa a ser tipificado como extorsão (CGU, 2012).

#### 2.4.1.9 Peculato

Peculato é o crime de roubo ou desvio de dinheiro, valor ou qualquer outro bem móvel, público ou particular, realizado por funcionário público, em proveito próprio ou de outra pessoa. A palavra peculato tem origem no latim *peculatus*, que significa “desvio de dinheiro ou propriedade pública”. No Brasil, tal tipo de crime é previsto nos artigos 312 e 313 do Código Penal – os dois primeiros do Título XI – que trata dos crimes praticados por funcionário público contra a administração em geral (DIREITONET, 2013, *apud* ALVES, 2014).

Segundo Nucci (2007), essa prática é bastante similar à apropriação indébita e ao furto. As diferenças estão nos personagens, ou seja, quem comete e quem é vítima do crime: o peculato é cometido somente por servidor público, contra o Estado (a vítima), ou seja, os bens desviados ou roubados são de propriedade do Estado. Na apropriação indébita e no furto, não estão envolvidos bens ou valores pertencentes ao estado.

#### 2.4.1.10 Mercado Negro

Segundo Costa (2013), “Mercado Negro” ou “Economia Subterrânea” são os termos usados para descrever venda clandestina e ilegal de bens, produtos ou serviços, buscando violar preços ou racionamento impostos pelo governo. O fenômeno do mercado negro, geralmente, surge em tempos de crise ou, segundo os neoliberais, em períodos de controle do governo sobre a economia. É quando a escassez de bens essenciais exige que os governos imponham controle de preços ou racionamento de mercadorias. Nessas circunstâncias, os vendedores estariam dispostos a ignorar as leis, a fim de obter maiores lucros, enquanto os compradores estariam dispostos a pagar preços mais elevados, já que eles não têm escolha, para obter um ativo que é proibido ou restrito, ou seja, há mais demanda do que oferta (COSTA, 2013, *apud* ALVES, 2014).

#### 2.4.1.11 Extorsão

O delito de extorsão, previsto no art. 158 do Código Penal, consiste em constranger alguém mediante violência ou grave ameaça e com o intuito de obter, para si ou para outrem, indevida vantagem econômica (MIRABETE, 2001, ALVES, 2014). A pena para quem comete o crime de extorsão é reclusão de quatro a dez anos e multa (BRASIL, 1940).

O crime de extorsão é muito parecido com o roubo. A diferença entre eles é que, no roubo, não importa a cooperação da vítima: o criminoso sempre poderia conseguir seu objetivo (tomar a coisa) sem que a vítima cooperasse; na extorsão, o criminoso apenas consegue subtrair a coisa alheia se a vítima cooperar (JESUS, 2001, ALVES, 2014).

### 3 | METODOLOGIA

Com o objetivo de identificar as principais práticas corruptas que ocorrem no contrato de seguro, utilizou-se uma metodologia qualitativa. A complexidade das ações corruptas, além das dificuldades na apuração e mensuração dos dados, contribuíram para que a investigação tomasse, também, um rumo mais exploratório. Segundo Gil (1989), pesquisas exploratórias têm como principal finalidade desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, com vistas à formulação de problemas mais precisos ou hipóteses para estudos posteriores.

Para identificar essas práticas foram realizadas 07 entrevistas, sendo 05 gerentes comerciais e 02 corretores. Nas entrevistas, procurou-se assegurar a diversidade das funções exercidas e dos setores em que atuam os entrevistados.

Na entrevista semiestruturada foram explorados os significados de corrupção, as práticas corruptas presenciadas no contrato de seguro. Para analisar o material extraído das entrevistas, adotou-se a análise temática, que segundo Bardin (1979) compreende o tipo de técnica mais utilizado pela análise de conteúdo, que consiste em operações de desmembramento do texto em unidades (categorias), segundo reagrupamentos analógicos.

O desenvolvimento da análise temática do trabalho deu-se de acordo com as orientações de Minayo (2000), onde os dados coletados nas entrevistas foram transcritos, lidos, revisados e estruturados em núcleos temáticos, subnúcleos temáticos e núcleos de sentido. A análise primária dos dados coletados deu origem ao núcleo temático Práticas Corruptas que dividido em subnúcleo, que deram origem a diversos núcleos de sentidos. Levantou-se o posicionamento de cada entrevistado referente às questões abordadas, e foram realizadas ilações e interpretações a partir dos núcleos de sentido extraídos das entrevistas.



## 4 | ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste tópico são descritas as práticas corruptas no mercado segurador. A análise dos resultados foi realizada desvendando os núcleos de sentido do tema “Tipo de Práticas Corruptas”. As práticas corruptas no mercado segurador, diz respeito aos tipos de práticas que podem ser utilizadas durante o processo de contratação de uma apólice de seguros.

O Seguro Automotivo cobre perdas e danos ocorridos aos veículos terrestres automotores e possui coberturas básicas como: colisão, incêndio e roubo que podem ser contratadas separadamente ou agrupadas. De acordo com os entrevistados as práticas corruptas nesse seguimento podem ocorrer de várias formas. Conforme o Corretor 01, relata que “No seguro veicular o indivíduo altera o CEP referente à região onde atua e circula, uma vez que existem variações entre valores de prêmios conforme áreas”.

Ainda para o Corretor 01, a alteração de CEP ocorre porque existem regiões em que a tarifa é mais barata sendo assim, o custo do seguro é menor.

Sobre sinistros, foram extraídos os seguintes depoimentos:

Altera-se a responsabilidade do provocador do acidente, uma vez que quem bateu não possui seguro (Corretor 01).

Pede-se que batidas antigas sejam consertadas junto com as mais atuais, ou que, o dono da oficina justifique um valor maior para o conserto, para que ambas as partes possam receber determinada quantia disponibilizada pela seguradora (Gerente Comercial 01).

Troca dos condutores de veículos na hora do acionamento do seguro, caso o real condutor esteja impedido de dirigir por determinados motivos (menor de idade, não habilitado, após o uso de bebidas alcoólicas, com habilitação suspensa) Gerente Comercial (02).

Os entrevistados relataram práticas relacionadas à responsabilidade, batidas antigas e situações na quais menores de idade batem automóveis e seus pais ou responsáveis assumem a responsabilidade pela batida.

No Seguro Saúde que objetiva garantir o reembolso das despesas médico-hospitalares, dentro dos limites estabelecidos na apólice, decorrentes de acidentes ou doenças, efetuados pelo segurado titular e respectivo dependentes, uma das práticas mais recorrentes segundo o Gerente Comercial 03, e quando o Segurado dispõe passar o cartão de seguro para que outra pessoa possa utilizar o recurso. Já o Gerente Comercial 04, expõe que a “tentativa de passar cartão de seguro para que outra pessoa possa utilizar o recurso. Tal fraude é considerada falsidade ideológica”.

Outra prática bastante recorrente ocorre quando o segurado omite seu estado de saúde atual para conseguir preços mais competitivos. De acordo com o Gerente Comercial 04, existem “registros de casos que, ao fazer o seguro, o indivíduo omite informações sobre seu estado de saúde atual para que o valor seja mais baixo”.

Em relação ao seguro residencial que é destinado a residências individuais, como

casas e/ou apartamentos utilizados como moradia habitual ou de veraneio algumas das práticas mais recorrentes segundo o Gerente Comercial 05 são: “troca de eletrodomésticos, provocação de danos intencionais para que seja acionado o seguro, simulação de arrombamentos e assaltos e alteração de cena do crime”.

No Seguro de Vida, que em caso de algum sinistro garante ao beneficiário ou ao próprio segurado um capital ou renda determinada no caso de morte, ou no caso do segurado sobreviver em um prazo convencionado. Possui coberturas adicionais que pode cobrir invalidez permanente e também, em certos casos, acidentes ou situações de desemprego. Os extratos abaixo apresentam as práticas identificadas:

O indivíduo simula a própria morte e apresenta uma certidão de óbito falsa. Quando na verdade, a pessoa não faleceu e está escondida. O interessado tenta receber a indenização de uma morte que muitas vezes não aconteceu. (Corretor 02)

Uma pessoa mutila o próprio corpo para receber a indenização. (Corretor 02).

Ao tomar uma pancada na cabeça durante um acidente, o fraudador afirma estar surdo. “O sujeito faz a reclamação, alegando que está surdo, e se no teste for comprovado à deficiência, o sujeito pode receber a indenização”. (Gerente Comercial 03).

Quando ao Seguro DPVAT que é um seguro de responsabilidade civil obrigatório, pago anualmente pelo proprietário de automóvel juntamente com o IPVA, existem práticas de que acordo com o Gerente Comercial 01, quando a pessoa apresenta uma reclamação de um sinistro de um acidente de veículo, quando na verdade não houve acidente. O depoimento a seguir do Gerente Comercial 01, apresenta essa fraude: “Uma pessoa toma uma queda e cai em algum lugar. E o fraudador apresenta uma reclamação, como se o dano tivesse sido provocado por um acidente de trânsito.”

Pode-se observar na TAB. 1, a seguir, as recorrências encontradas nos depoimentos:

NÚCLEOS DE SENTIDO	FREQUÊNCIA	% SUBTEMA
Alteração do CEP	1	7,69%
Altera-se a responsabilidade do provocador do acidente	1	7,69%
Certidão de óbito falsa	1	7,69%
Documentos falsos	1	7,69%
Falsa comunicação de sinistro	1	7,69%
Mutilação do próprio corpo	1	7,69%
Omissão de informações sobre o estado de saúde atual	1	7,69%
Omissão de informações	1	7,69%
Pede-se que batidas antigas sejam consertadas junto com as mais atuais	1	7,69%
Perfil falso do condutor	1	7,69%
Tentativa de passar cartão de seguro para que outra pessoa possa utilizar o recurso	1	7,69%
Troca de eletrodomésticos e provocação de danos intencionais	1	7,69%
Troca dos condutores de veículos na hora do acionamento do seguro	1	7,69%
<b>TOTAL</b>	<b>13</b>	<b>100%</b>

Tabela 1 - Frequência dos Núcleos de Sentido do Subtema “Tipos de práticas corruptas”

Fonte: Dados da pesquisa.

De acordo com as frequências calculadas nos depoimentos, os perfis alteração do CEP, altera-se a responsabilidade do provocador do acidente, certidão de óbito falsa, documentos falsos, falsa comunicação de sinistro, mutilação do próprio corpo, omissão de informações sobre o estado de saúde atual, omissão de informações, pede-se que batidas antigas sejam consertadas junto com as mais atuais, perfil falso do condutor, tentativa de passar cartão de seguro para que outra pessoa possa utilizar o recurso, troca de eletrodomésticos e provocação de danos intencionais e troca dos condutores de veículos na hora do acionamento do seguro apresentaram 7,69% cada uma. As frequências acima se referem aos tipos de práticas corruptas encontradas nos depoimentos dos entrevistados referente aos Seguros Auto, Residencial, Saúde, Vida e DPVAT.

## 5 | CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi evidenciar as práticas corruptas e mecanismos de controle da corrupção no mercado segurador e propor a estruturação de dados necessários para um sistema de controle e *compliance*.

Por meio das entrevistas, foi possível identificar as principais causas da corrupção nos contratos de seguros. A forte presença dessas práticas no mercado segurador tem levado a sociedade a compreender que somente a aplicação de normas externas que alicerçam a jurisprudência, não são suficientes para coibir tais práticas. Motivo pelo qual se deve investir em mecanismos de controle mais eficazes que sejam capazes de proporcionar

a contenção de crimes tão prejudiciais para a evolução de um dos mercados responsáveis pela evolução da economia do país.

Desta forma, é necessária a utilização frequente de dados por parte das seguradoras, que através do uso interno dessas informações, poderão desenvolver técnicas preventivas de crimes associados às ações corruptas. É preciso que esse problema seja resolvido em sua raiz, e que as seguradoras participem no processo de desenraizamento de transgressões corruptas.

Decisivamente, cumpre afirmar que o movimento para a redução de crimes no mercado de seguros, depende da busca incessante por conhecimentos e estudos que instiguem os órgãos e atores responsáveis, a buscarem por projetos que atuem incisivamente sobre o espaço fraudulento que cerca as seguradoras. Desta forma será possível alcançar a segurança e ordem do mercado.

Esta pesquisa contribui ao desvendar as práticas corruptas que devem ser combatidas no mercado segurador e para futuros estudos sugere-se investigações em outros setores, buscando alinhar, por exemplo, tipos de práticas corruptas e meios de controle em fundos de pensão, celeiro de muitas transações decorrentes de desvios de recursos.

## REFERÊNCIAS

*A importância dos Seguros*. Disponível em: <https://www.portaleducacao.com.br/conteudo/artigos/administracao/a-importancia-dos-seguros/63521>> Acesso em: 24 ago. 2017.

ALVES, L.C.F. *Práticas e controle da corrupção no processo de análise e concessão de crédito: uma proposta de base de dados para sistema de apoio à decisão (sad)*. 2014. 162 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Informação e Gestão em Conhecimento)- Faculdade de Ciência Empresariais, Universidade FUMEC, Belo Horizonte. 2014.

ALVIM, Pedro. *O Contrato de Seguro*. 3ª Edição. Rio de Janeiro: Editora Forense, 1999.

ALVIM, Pedro. *O Contrato de Seguro: Esboço Histórico*. Cadernos de Seguros: Edição Especial (20 anos), Vol. 02. Rio de Janeiro: Editora Fundação Escola Nacional de Seguros, 2001.

*Apresentação* - SUSEP. Disponível em <<http://www.susep.gov.br/menu/a-susep/apresentacao>>. Acesso em: 07 mar. 2017.

BANDEIRA DE MELLO, Celso Antônio. *Discricionariedade e controle jurisdicional*. 2. ed. São Paulo: Malheiros, 2006.

BARDIN, L.. *Análise de conteúdo*. Lisboa: Edições 70, 1979.

BONAVITA, Renan. *Pequenas cooperativas de seguros no Brasil: Uma análise dos fundamentos jurídicos da cooperação dos segurados no setor de seguros privados no Brasil*. 2012. 119 f. Tese de Láurea- Faculdade de Direito da Universidade de São Paulo, Departamento de Direito Comercial, São Paulo 2012.

BRASIL. Presidência da República. Exposição de motivos Decreto-Lei n. 73, de 21 de novembro de 1966. Dispõe sobre o Sistema Nacional de Seguros Privados, regula as operações de seguros e resseguros e dá outras providências. Brasília: a Presidência, 1966.

CLÁUDIO, C. *A fraude no seguro: aspectos Econômicos*. R. Bras. Risco e Seg., Rio de Janeiro, v.7, n.13, p. 87-104, abr./set.2011.

COSTA, Fernando Nogueira da *Mercado negro ou economia subterrânea. corrupção privada*. Disponível em: <http://fernandonogueiracosta.wordpress.com/2013/07/16/mercado-negro-ou-economia-subterranea-corrupcao-privada/>. Acesso em: 4 ago. 2017.

COSTA, José de Faria; RAMOS, Maria Elizabete. *O crime de abuso de informação privilegiada*. Antanol: Coimbra, 2006.

DINIZ, M.H. *Curso de direito civil brasileiro: teoria das obrigações contratuais e extracontratuais*. São Paulo: Saraiva, 2004.

FERREIRA, Márcia. *Do desvio de função, equiparação e enquadramento salarial*. Disponível em: <http://www.meuadvogado.com.br/entenda/do-desvio-de-funcao/>. Acesso em: 30 jul. 2017.

*Fraude em seguros pode ter desviado R\$ 1,8 bilhão por ano*. Disponível em <http://exame.abril.com.br/revista-exame/fraude-bilionaria/>. Acesso em: 07 mar. 2017.

GARCIA, Emerson. *O nepotismo*. Jam Jurídica, Salvador, ano 11, n. 4, p. 19, abr. 2006.

GIL, Antônio de Loureiro. *Como evitar fraudes, pirataria e convivência*. São Paulo: Atlas, 1998.

GIL, A. C. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1989.

JESUS, Damásio Evangelista de. *Código Penal anotado*. 11. Ed. São Paulo: Saraiva, 2001.

KIRCHNER, J.J. *As fraudes nos contratos de seguros no Brasil. Monografia- Universidade Regional de Blumenau*, Blumenau, 2009.

*Mais da metade das suspeitas de fraude em seguro de vida fica sem solução*. Disponível em: <http://economia.ig.com.br/financas/2014-01-26/mais-da-metade-das-suspeitas-de-fraude-em-seguro-de-vida-fica-sem-solucao.html>> Acesso em: 07 mar. 2017

MINAYO, M. C. S. *O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde*. 7. ed. São Paulo: Hucitec, 2000.

MONTES, B. *A Fraude nos Contratos de Seguros e suas Consequências*. Ponta Grossa. (Curso em Administração de Empresas). Faculdade Educacional de Ponta Grossa.

MAXIMINIANO, A.; DIONÍSIO, M. *Contrato social e seus aspectos*. R. Jornada de In. Científica do Curso de Direito das Faculdades Integradas de Santa Cruz de Curitiba. v.8, n.8 (2016).

NUCCI, Guilherme de Souza. *Manual de Direito: parte geral e parte especial*. 3. Ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2007.

PARODI, Lorenzo. *Monitor das fraudes*. Disponível em: <<http://www.fraudes.org/showpage1.asp?pg=6>>. Acesso em: 30 jul. 2017.

ROCHA, Andréa Presas. *Igualdade salarial e regras de proteção ao salário*. Jus Navigandi, Teresina, ano 12, n. 1597, 15 nov. 2007. Disponível em: <http://jus.com.br/artigos/10660>. Acesso em: 15 set. 2017.

SCHMITT, Daniel. *Condicionantes para a aplicação da sanção administrativa de multa sobre o infrator pessoa física, no mercado de seguros privados fiscalizado pela SUSEP*. 2016. 125 f. Dissertação (Mestrado em Direito da Regulação)- Escola de Direito da Fundação Getúlio Vargas do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2016.

SEMERARO, Pietro. *I delitti di millantato crédito e traffico di influenza*. Milano: Giuffrè, 2000.

SODRÉ, L.M. *A fraude contra o seguro e as suas consequências econômicas na sociedade*. Blumenau: Leonardo Pós, 2004.

TELES Ney Moura. *Direito Penal III – Prevaricação*. Disponível em: <[www.neymourateles.com.br/direito-penal](http://www.neymourateles.com.br/direito-penal)>. Acesso em: 30 jul. 2017

TZIRULNIK, E. *Seguro e fraude*. São Paulo: Max Limonad, 1999.

*Você sabe o que é Susep?* Disponível em: <<http://blog.carcheck.com.br/carcheck/voce-sabe-o-que-e-susep>> Acesso em: 10 out. 2017.

## PREDICTING EFFECTIVE CONSTITUTIVE CONSTANTS FOR WOVEN-FIBRE COMPOSITE MATERIALS

*Data de aceite:* 02/08/2021

*Data de submissão:* 06/05/2021

### **Jonas Tieppo da Rocha**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
Departamento de Engenharia Mecânica,  
Porto Alegre, Rio Grande do Sul  
<http://lattes.cnpq.br/1870373075054314>

### **Tales de Vargas Lisbôa**

Departamento de Mecânica e Materiais  
Compósitos, Instituto Leibniz de Pesquisa de  
Polímeros,  
Alemanha, Dresden  
<http://lattes.cnpq.br/4912297259321602>

### **Rogério José Marczak**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
Departamento de Engenharia Mecânica,  
Porto Alegre, Rio Grande do Sul,  
<http://lattes.cnpq.br/5773989861369461>

**ABSTRACT:** A meso-scaled finite element model is developed aiming at the study the mechanical properties of woven- fibre composites regarding different weave pattern. A Representative Volume Element (RVE) is constructed and the Uniform Displacement Boundary Conditions (UDBC) are applied in order to obtain the stiffness tensor of such composites. Two different types of woven-fibre composites are evaluated by the introduced model - E- glass/Vinylester plain-weave and 2/2 Twill E-glass/Epoxy. The results from computational homogenization are compared to both experimental and numerical works from

literature, showing good agreement. It is verified that the boundary conditions applied to the RVE play a significant role in the homogenization results.

**KEYWORDS:** Woven composites, Computational homogenization, Finite Element Method, Heterogeneous structures.

### PREDIÇÃO DAS PROPRIEDADES ELÁSTICAS EFETIVAS PARA MATÉRIAS DE FIBRA TECIDA

**RESUMO:** Um modelo de elementos finitos em mesoescala é desenvolvido com o objetivo investigar as propriedades mecânicas de compósitos de fibra tecida em relação a diferentes padrões de trama. Constrói-se um Elemento de Volume Representativo (RVE) e as Condições de Contorno de Deslocamento Uniforme (UDBC) são aplicadas, obtendo-se o tensor de rigidez dos compósitos estudados. Dois tipos diferentes de compósitos de fibra tecida serão avaliados pelo modelo introduzido: E-glass / Vinylester padrão simples, e E-glass / Epoxy padrão sarja. Os resultados da homogeneização computacional serão comparados com trabalhos experimentais e numéricos da literatura, em que se notará congruência nos valores obtidos. Verificar-se-á a influência das condições de contorno nos resultados de homogeneização.

**PALAVRAS - CHAVE:** Compósitos tecidos, Homogeneização computacional, Método dos Elementos Finitos, Estruturas heterogêneas.

## 1 | INTRODUCTION

The woven-fibre modelling, aiming at mechanical properties, can be divided in two main approaches: numerical methods and analytical solutions. Regarding to analytical solutions, Ishikawa (1981) and Ishikawa and Chou (1982a) proposed the one-dimensional Mosaic Model, the first well-known solution for woven-fiber composites, primarily for satin weaves and hybrid composites. The Mosaic Model treats the woven either as a parallel or serial asymmetric cross-ply laminates assemblage. It leads to upper and lower bounds of stiffness matrix. This first approach has the disadvantage of neglecting interweaving effects, as the undulation of warp and fill strands is not modelled. With Fiber Undulation Model, Ishikawa e Chou (1982b) overcame this Mosaic Model disadvantage. This last model was idealized to predict plain-weave composites, being an extension of Mosaic Model.

Further developments were made by Sankar and Marrey (1997) who presented the Selective Averaging Method (SAM), which dealt with three-dimensional and two-dimensional textile composites and proposed a formulation to estimate stiffness and thermal expansion coefficients. Three-dimensional composites were divided into three microstructure levels: unit cell, slice and element, which correspond, respectively, to macro, meso and micro stiffness. In order to obtain the coefficients of the stiffness tensor, it is assumed macro uniform strain states in the entire domain - six states in total, encompassing each strain alone. This macro strain state is assumed to be approximately equal in meso and micro scales, permitting an easy integration of the stiffness between micro and meso-scales. Later, the meso scale slices are averaged assuming an isotress condition. Finally, the macrostresses are averaged in the volume, what lets to express each column of the stiffness matrix in terms of meso and micro strains. In case of two-dimensional composites, the textile composite is divided into repeating cells in in-plane directions, being modelled as an homogeneous Kirchoff's plate in macro-scale. The procedure to estimate the plate stiffness coefficients is analogous to the three-dimensional case.

Scida et al. (1998) presented a model based in Classical Laminate Theory to predict mechanical properties of woven- fibre composites (hybrid and non-hybrid). This model, called MESOTEX (Mechanical Simulation of Textile), treats the woven composite as a combination of two homogeneous phases: orthotropic strands and isotropic matrix. The undulation of strands are geometrically described by sinusoidal functions, while in other parts the path are considered straight. Similar approach was done by ming Huang (2000), who proposed a method to estimate mechanical properties for woven and braid composites. In it, the composite was divided into subelements and it was applied an isostrain condition in each division so as to obtain their stiffness. The subelements corresponded to four layered unidirectional composites, with two inner layers being the homogenized strands, and the two outer layers matrix. Later, in order to assemble the subelements, isotress condition is applied.



The analytical models are really useful for a fast estimation of the (homogenised) mechanical properties. However, numerical models can evaluate stresses distributions along the geometry, therefore giving insights about the mechanical performance of the composite. One of the most important aspects of this approach is the correct modeling of the composite geometry. Barbero et al. (2006) used photomicrograph measurements to model geometry correctly. The photomicrograph data was fitted with sinusoidal functions, and finally the geometry was totally built in a commercial CAD. Although such type of approach is valid, some composite-specialized software were developed in the recent years. Verpoest and Lomov (2005) developed WiseTex, an software able to calculate 2D and 3D composites, which composite geometry is described by analytical models. Furthermore, Lin et al. (2011) presented TexGen, an open-source composite modelling software. TexGen can model 2D and 3D woven fabrics, as well any user-defined geometry, as the software accepts Python scripts to define the geometry paths.

In this article, TexGen will be used to model the geometry of woven-fibre composites, with data available in Scida et al. (1999). Two woven-fibre classes will be treated - E-glass/vynilester plain-weave and E-glass/Epoxy 2/2 Twill- weave. The homogenization is performed by choosing a set of boundary conditions that respect the Hill's Energy Condition. Hence, Uniform Displacement Boundary Conditions (UDBC) are applied, which leads to a linear system that allows the complete determination of the homogenized stiffness matrix of the woven-fibre composite.

## **2 | 3D FINITE ELEMENT MODELING OF RVE**

### **2.1 Geometric Modelling**

Woven-fibre composites geometry exhibits periodicity, which allows the designer to analyse only a representative element volume (RVE) in order to obtain the mechanical behaviour of the entire component/domain. The Repetitions Unity Cell (RUC) can then be used to construct such RVE. Fig. 1 presents two examples of RUCs that are also studied in the present work.

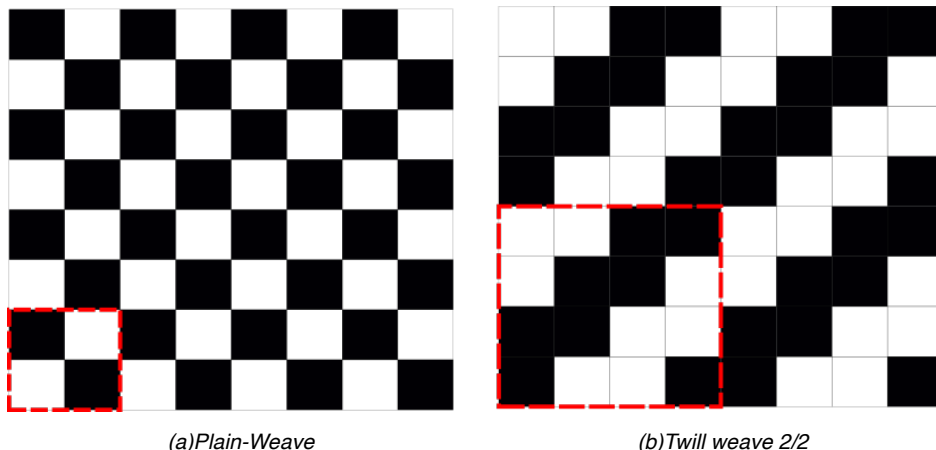


Figure 1. Weave pattern draft and RUC adopted (dashed red square)

The RVE geometry is built in Texgen (see Lin et al. (2011); Long e Brown (2011)) using composite data from Scida et al. (1999) (see Table 1). In the model, there are three volume fractions to be considered, as showed in Fig. 3. The first one,  $V_0$ , refers to dry volume fraction. This is the volume occupied by fibers inside the whole composite volume. The second volume fraction,  $V_m$ , meso-scale volume fraction, is the portion occupied by strands (fills and warps with impregnated resin). By last, the strand volume fraction,  $V_s$ , is the volume occupied by fibers in strands. Figure 2 shows the geometry created in TexGen.

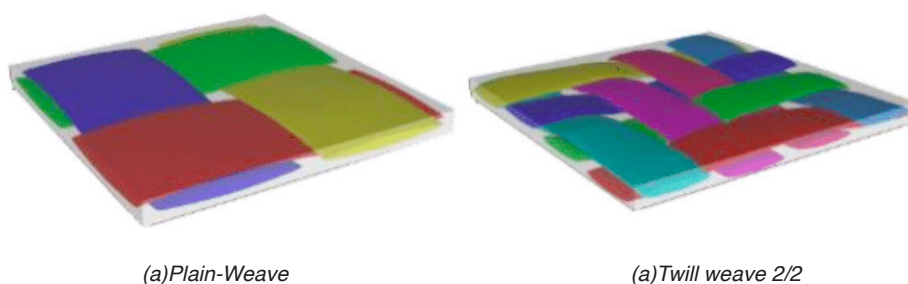


Figure 2. Weave-fibre composite models created in TexGen.

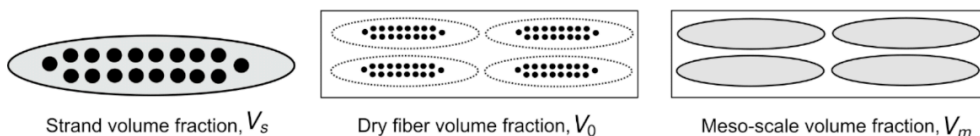


Figure 3. Composite Volume fractions

Material	Weave Class	Strand width (mm)	Comp. thickness (mm)	Yarn Spacing* (mm)	$V_0$	$V_s$	$V_m$
E-glass/Vynilester	Plain Weave	0.6	0.1	0.625	0.55	0.8	0.6875
E-glass/Epoxy	2/2 Twill weave	0.83	0.2275	1	0.38	0.75	0.5067

\*This parameter does not appear in Scida et al. (1999). However, it is a mandatory parameter for TexGen. Therefore, the values used in this work were selected to reproduce experimental  $V_m$  closest as possible.

\*\*Calculated by  $V_s = \frac{V_0}{V_m}$ , as stated in Barbero et al. (2006).

Table 1. Weave geometry parameters, Scida et al. (1999)

The correct  $V_m$  representation of the composite might be a difficult task in woven-fibre analysis. In TexGen, if one performs the model creation, a default increase of 10% of matrix in height is applied to the composite, creating a shallow film of matrix in lower and upper faces of the composite. Such additional matrix volume incurs that  $V_m$  decreases in the model. If one constricts such resin surplus, the thickness of matrix above (and below) strands would become excessively thin, requiring a finer mesh to avoid errors in modeling. As a consequence, the  $V_m$  considered in the presented model does not agree with experimental values. Following Barbero et al. [2006] methodology, one needs to carry out a meso scale volume fraction correction. Namely, the Compliance Matrix is corrected through eq. (1).

$$[S] = [S]^\alpha \frac{V_m}{V_m^\alpha} \quad (1)$$

where  $V_m$  and  $V_m^\alpha$  correspond to experimental and model meso scale volume fractions, respectively, and  $[S]^\alpha$  defines the compliance matrix  $[S]$  prior eq. (1) application. The table 2 shows the  $V_m$  obtained in this work and the correction factor applied.

Material	Weave Class	$V_m^\alpha$	$\frac{V_m}{V_m^\alpha}$
E-glass/Vynilester	Plain Weave	0.6	0.1
E-glass/Epoxy	2/2 Twill weave	0.83	0.2275

Table 2.  $V_m$  in Texgen and  $V_m$  correction

## 2.2 Boundary Conditions

The Average Strain Theorem establishes an equivalence between a boundary condition as showed in eq. (2) and strain average in the volume, as showed in Zohdi (2002). Such condition is known as uniform displacement boundary conditions (UDBC), in which  $\varepsilon_{ij}^A$  denotes an strain state applied, and  $x_j$  an position vector. If the coordinate system is in the geometrical center of the body with dimensions  $(2a_1, 2a_2, 2a_3)$ , the Fig. 4 is a representation of a uniform strain in pure extension. This type of boundary condition satisfies the Hill's Energy Condition, as stated in Zohdi (2002), which means that the model presents an equivalence between macro and micro energy measurements, being a necessary condition for a heteronegenous composite homogenization.

$$u|_{\partial V} = \varepsilon_{ij}^A x_j \quad (2)$$

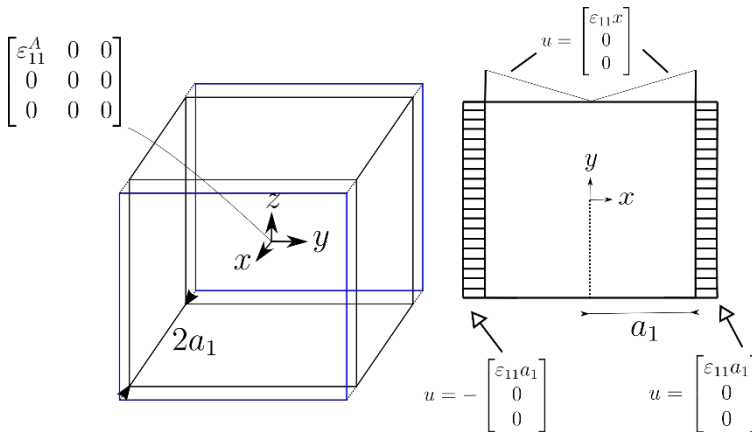


Figure 4. Boundary conditions scheme for a pure-extension state

## 2.3 Stiffness Tensor and Engineering Constants

Let the symbol  $\langle \cdot \rangle$  represent a quantity averaged in volume. The stress-strain relationship of averages is

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = C_{ij} \langle \varepsilon_{ij} \rangle \quad (3)$$

In the current work, the  $C_{ij}$  in eq. (3) is considered with 36 independents terms. Following Zohdi (2002) methodology, six independent  $\varepsilon_{ij}^A$  are applied in the model, as illustrated in Fig. 4, through eq. (2). Each  $\varepsilon_{ij}^A$  applied in model, used together with eq. (3), generates six linear set of equations. The six  $\varepsilon_{ij}^A$  cases, consequently, allow the complete computation of  $C_{ij}$  terms. Finally, the engineering constants are obtained through the compliance matrix  $S_{ij}$ .

## 3 | RESULTS

### 3.1 Mesh Influence in Stiffness Matrix

Firstly, one evaluates the effect of mesh size in mechanical properties. The finite element analysis was carried out in ANSYS APDL (2018), with a 3-D 10-Node Tetrahedral Structural Solid element. The mesh is generated by TexGen, through a general seed parameter, which corresponds to element edge size. The stiffness tensor  $C_{ij}$  is obtained as explained in subsection 2.3. The Frobenius norm of  $C_{ij}$  is evaluated in each mesh size, represented by  $|C|$  in Fig. 5. The  $|C|$  was normalized by  $|C|_{avg}$ , which is the average of  $|C|$  in computed in reference of all meshes. The largest difference in Fig. 5 is lower than 2.80% among the evaluated meshes. Comparing to  $|C|_{avg}$ , the largest deviation is 1.52%. Due the small advantage of using the finest meshes, the seed size applied in this study is 0.05.

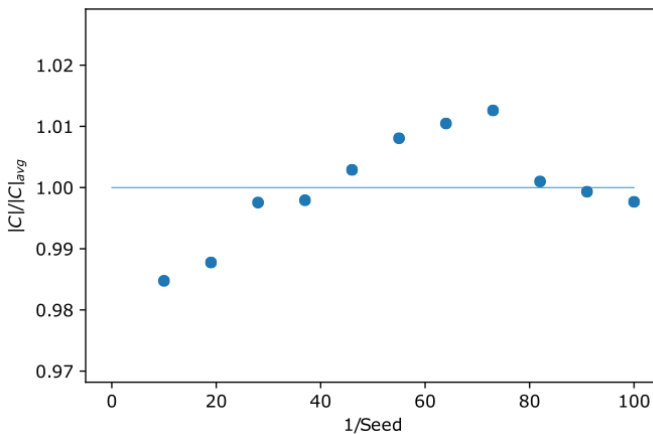


Figure 5. Mesh size influence in stiffness matrix  $|C|$

### 3.2 Comparison With Results From Literature

The introduced methodology is then compared with Barbero et al. (2006) numerical results and Scida et al. (1999) experimental and analytical results. The boundary conditions applied in this work, as discussed by Espadas-Escalante et al. (2017), overestimated  $E_1$  and  $E_2$  in general, as showed in table 3a and 3b.

Barbero et al. (2006) applied periodic boundary conditions (PBC), which is a distinct set of boundary conditions from those applied herein (explained in eq. (2)). PBC estimates the properties of an infinite periodic structure, assuming that both strain and stress are periodic. Such approach requires a full coupling between the degrees of freedom of nodes lying on boundaries, as proposed by Luciano et al. (1998). Another requirement of PBC is mesh periodicity. The main advantage of PBC approach is to simulate strain and stress fields

of an infinite body by just modeling one RUC. On other hand, the methodology applied here only imposes a set homogenized strains fields without any periodicity requirements. It has a great advantage of using a mesh-free approach in the model, but the results were slightly different from experimental data, as showed in table 3a. However, the model could not reproduce the geometry with precision. The table 2 shows that the current model reached  $V_m^\alpha$  with 16.5% of difference from  $V_m$ , which influenced the results, as the eq. (1) is not exact.

In contrast, the results from this work showed good agreement with experimental data for 2/2 Twill E-glass twill weave, as can be see in table 3b. In this particular case, it was possible to reach a  $V_m^\alpha$  closer to  $V_m$  from experimental data. The geometry, therefore, could be reproduced with quite good accordance with Scida et al. (1999) data, leading to a stress distribution that was closer to what is encountered in real woven-fibre.

### 3.3 Resulting Stress Fields in Woven Composite

One of the main advantages of developing a numerical tool to generate the stiffness matrix of a RUC / RVE is the possibility of observing the stresses on the domain. However, rather than evaluating the absolute stress value, it is important to study the stress relationships between resin and strand regions. In both Fig. 6 and Fig. 7 the stress field  $\sigma_{xz}$  in resin increases in regions where the distance between strands decreases. The stresses in this areas are 4 times greater to the center of resin elements group. It is clear that this stress jumps follow the weave pattern, as demonstrated in Fig. 6 and Fig. 7. Such stress increase does also appears in strands elements group. The stresses jumps, however, are less severe ( 200% larger). The maximum stress, in other hand, is dominant in strand elements. In both cases, the stress peak is larger – about 200% – in comparison to the resin elements group.

(a) E-glass/vinylester plain-weave

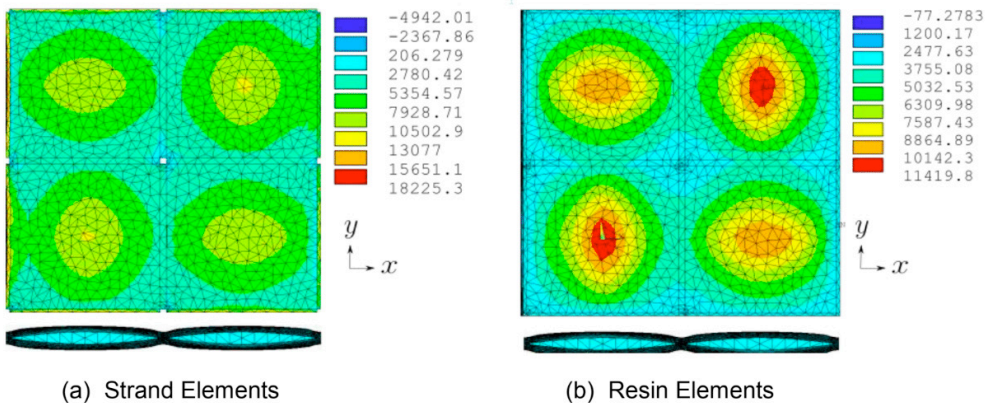
Properties	Present work	Barbero [7]	Scida [10]
$E_1[GPa]$	26.135	24.439	24.8
$E_2[GPa]$	26.718	24.534	24.8
$E_3[GPa]$	10.872	10.253	8.5
$G_{12}[GPa]$	5.132	5.515	6.5
$G_{23}[GPa]$	3.043	3.151	4.2
$G_{31}[GPa]$	3.335	3.159	4.2
$\nu_{13}$	0.366	0.382	0.28±0.07
$\nu_{23}$	0.305	0.380	0.28±0.07
$\nu_{12}$	0.141	0.126	0.11±0.01

(b) 2/2 twill E-glass/epoxy woven fabric

Properties	Present work	Scida [10]
$E_1[GPa]$	19.223	19.2±0.2
$E_2[GPa]$	19.337	19.2±0.2
$E_3[GPa]$	8.290	10.92*
$G_{12}[GPa]$	3.464	3.6±0.1
$G_{23}[GPa]$	2.071	3.78*
$G_{31}[GPa]$	2.222	3.78*
$\nu_{13}$	0.440	0.33*
$\nu_{23}$	0.392	0.33*
$\nu_{12}$	0.134	0.13±0.007

\*Analytical solution results from Scida et al. [1999]

Table 3. Comparison with experimental and numerical studies

Figure 6. Stress  $\sigma_{xz}$  distributions of E-glass/vinylester plain-weave under  $\epsilon_{xz}$  strain state

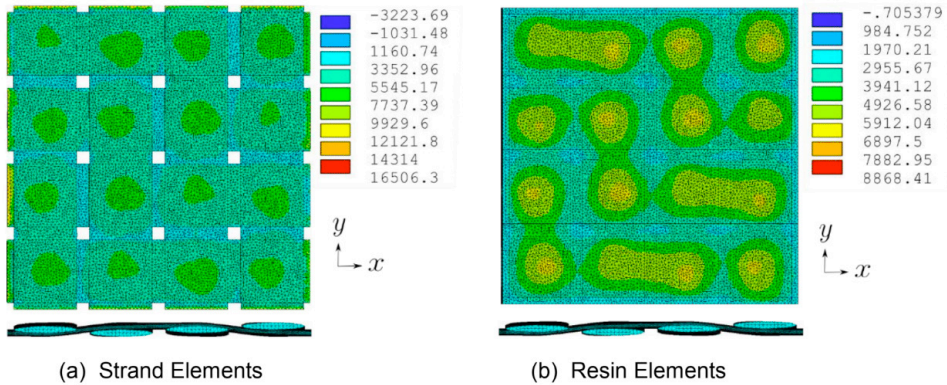


Figure 7. Stress  $\sigma_{xz}$  distributions of 2/2 twill E-glass/epoxy plain-weave under  $\epsilon_{xz}$  strain state

## 4 | CONCLUSIONS

In this article, Uniform Displacement Boundary Conditions (UDBC) were applied in order to obtain mechanical properties of two woven-fibre composites: E-glass/vinylester plain weave and 2/2 Twill E-glass epoxy weave. The properties obtained showed good agreement with results from literature. It was verified that both boundary conditions and geometry had influenced the results. Therefore, it must be further investigated how to overcome the difficulty of real woven-fibre geometry representation, as well how others boundaries conditions types can perform the same task. An important point highlighted by the present work is that the use of Classical Laminare Theory hides loss of information that happens due to the reduction of the constitutive tensor, and many analytical models are based on it. In the literature, these models showed good performance for in-plane mechanical properties, although they present inferior performance for out-of-plane properties. As a consequence, further investigation may be carried applying distinct plate theory in analytical models. Namely, first or higher-order shear deformation plate theories could possibly lead to good results in out-of-plane properties.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to CNPq (Universal project no. 310649/2017-0), CAPES (PRO- BRAL project no. 88881.198774/2018-01) and DAAD (PROBRAL project no. 57447163) for funding the development of this research.

## AUTHORSHIP STATEMENT

The authors hereby confirm that they are the sole liable persons responsible for the authorship of this work, and that all material that has been herein included as part of the



present paper is either the property (and authorship) of the authors, or has the permission of the owners to be included here.

## REFERENCES

Ansys, I. ANSYS ® **Academic Research Mechanical**, vol. Release 18.1, 2018.

Barbero, E., Trovillion, J., Mayugo, J., e Sikkil, K. **Finite element modeling of plain weave fabrics from photomicrograph measurements**, Composite Structures, vol. 73(1), p. 41–52, 2006.

Espadas-Escalante, J. J., van Dijk, N. P., e Isaksson, P. **A study on the influence of boundary conditions in computational homogenization of periodic structures with application to woven composites**, Composite Structures, vol. 160, p. 529–537, 2017.

Hazanov, S. e Amieur, M. **On overall properties of elastic heterogeneous bodies smaller than the representative volume**, International Journal of Engineering Science, vol. 33(9), p. 1289–1301, 1995.

Ishikawa, T. **Anti-symmetric elastic properties of composite plates of satin weave cloth**, Fibre Science and Technology, vol. 15(2), p. 127–145, 1981.

Ishikawa, T. e Chou, T.-W. **Elastic behavior of woven hybrid composites**, Journal of composite materials, vol. 16(1), p. 2–19, 1982a.

Ishikawa, T. e Chou, T.-W. **Stiffness and strength behaviour of woven fabric composites**, Journal of Materials Science, vol. 17(11), p. 3211–3220, 1982b.

Lin, H., Brown, L. P., e Long, A. C. **Modelling and simulating textile structures using TexGen**. In Advanced Materials Research, vol. 331, p. 44–47. Trans Tech Publ, 2011.

Long, A. e Brown, L. **Modelling the geometry of textile reinforcements for composites: TexGen. In Composite reinforcements for optimum performance**, p. 239–264. Elsevier, 2011.

Luciano, R. e Sacco, E. **Variational methods for the homogenization of periodic heterogeneous media**, European Journal of Mechanics-A/Solids, vol. 17(4), p. 599–617, 1998.

Huang, Z. **The mechanical properties of composites reinforced with woven and braided fabrics**, Composites science and technology, vol. 60(4), p. 479–498, 2000.

Sankar, B. V. e Marrey, R. V. **Analytical method for micromechanics of textile composites**, Composites Science and Technology, vol. 57(6), p. 703–713, 1997.

Scida, D., Aboura, Z., Benzeggagh, M., e Bocherens, E. **Prediction of the elastic behaviour of hybrid and non-hybrid woven composites**, Composites science and technology, vol. 57(12), p. 1727–1740, 1998.

Scida, D., Aboura, Z., Benzeggagh, M., e Bocherens, E. **A micromechanics model for 3D elasticity and failure of woven-fibre composite materials**, Composites Science and Technology, vol. 59(4), p. 505–517, 1999.

Verpoest, I. e Lomov, S. V. **Virtual textile composites software WiseTex: Integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis**, Composites Science and Technology, vol. 65(15-16), p. 2563–2574, 2005.

Zohdi, T. **Computational modeling and design of new random microheterogeneous materials**, CISM Course Notes, vol. 1, 2002.

## PREVENTING SPURIOUS ARTIFACTS WITH CONSISTENT INTERPOLATION OF PROPERTIES BETWEEN CELL CENTERS AND VERTICES IN TWO- DIMENSIONAL RECTILINEAR GRIDS

*Data de aceite:* 02/08/2021

*Data de submissão:* 05/05/2021

### **Alexandre Antonio de Oliveira Lopes**

Instituto de Pesquisa Aplicada Alan Turing -  
INPETU  
Rio de Janeiro – RJ  
<http://lattes.cnpq.br/1198850576474283>

### **Flávio Pereira Nascimento**

Instituto de Pesquisa Aplicada Alan Turing -  
INPETU  
Rio de Janeiro – RJ  
<http://lattes.cnpq.br/2008465521813427>

### **Francisco Ismael Pinillos Nieto**

Instituto de Pesquisa Aplicada Alan Turing -  
INPETU  
Rio de Janeiro – RJ  
<http://lattes.cnpq.br/2103255850464292>

### **Túlio Ligneu Santos**

Instituto de Pesquisa Aplicada Alan Turing -  
INPETU  
Rio de Janeiro – RJ  
<http://lattes.cnpq.br/1567326115449983>

### **Alberto Barbosa Júnior**

Instituto de Pesquisa Aplicada Alan Turing -  
INPETU  
Rio de Janeiro – RJ  
<http://lattes.cnpq.br/0054057764475323>

### **Luca Pallozzi Lavorante**

Instituto de Pesquisa Aplicada Alan Turing -  
INPETU  
Rio de Janeiro – RJ  
<http://lattes.cnpq.br/3336253353916716>

**ABSTRACT:** The finite element method (FEM) has been an essential tool in computational structural dynamics (CSD) as much as the finite volume method (FVM) has been in the field of computational fluid dynamics (CFD). These numerical methods and many other scientific applications (such as sedimentary process simulations, reservoir modelling, digital terrains) rely on cell-centered (CC) or cell-vertex (CV) meshes. For two-dimensional meshes, it is rather simple to interpolate property values from CV to CC maintaining local property coherence and continuity. However, the opposite is not valid. When applying the same interpolation approach on properties from CC to CV, spurious artifacts may emerge due to the topologically independent characteristic of the interpolation. In this study, we discuss how to interpolate property values from CC to CV for two-dimensional rectilinear grids and present an algorithm which produces property value distributions that are numerically exact, locally coherent and smooth.

**KEYWORDS:** Interpolation, Rectilinear grids, Artifact prevention, Value projection.

PREVENÇÃO DE ARTEFATOS ESPÚRIOS  
ATRAVÉS DE UMA INTERPOLAÇÃO  
CONSISTENTE ENTRE AS  
PROPRIEDADES NOS CENTROS E NOS  
VÉRTICES DAS CÉLULAS EM GRIDS  
RETILÍNEOS BIDIMENSIONAIS

**RESUMO:** O método de elementos finitos (MEF) tem sido uma ferramenta essencial na dinâmica de estruturas computacional (DEC) tanto quanto o método dos volumes finitos (MVF) tem sido no campo da dinâmica de fluido computacional

(DFC). Esses métodos numéricos e muitas outras aplicações científicas (como simulações de processos sedimentares, modelagem de reservatório, terrenos digitais) dependem de malhas onde propriedades situam-se no centro de células (CC) ou sobre os vértices (CV). Para malhas bidimensionais, é bem simples interpolar valores de propriedade de CV para CC mantendo a coerência e continuidade da propriedade local. Entretanto, o oposto não é válido. Aplicando a mesma abordagem de interpolação de propriedades de CC para CV, artefatos espúrios podem surgir por conta da característica topologicamente independente da interpolação. Nesse estudo é discutido como interpolar valores de propriedade de CC para CV para malhas retilíneas bidimensionais e apresentar um algoritmo que produz distribuições de valores de propriedade que são numericamente exatos, localmente coerentes e suaves.

**PALAVRAS - CHAVE:** Interpolação, Malhas retilíneas, Prevenção de artefatos, Valor de projeção.

## 1 | INTRODUCTION

The finite element method (FEM) is a numerical technique used to solve engineering problems, such as fluid flows, mass transport phenomena and computational structural dynamics (CSD). It considers the discretization of the studied region and the problem's inherent governing equations using *finite elements*. In this sense, local element contributions are assembled into a global linear system that can be solved with the usual methods. This system of algebraic equations approximates the unknown function over the domain (Logan [1]). In turn, the finite volume method (FVM) is a method for representing and evaluating partial differential equations using algebraic equations (LeVeque [2], Toro [3]). Similar to the finite difference method (FDM) or the FEM, values are calculated at discrete places on a meshed geometry. Here, the term *finite volume* refers to the small volume surrounding each node point on a mesh. This method has been traditionally applied to solve computational fluid dynamics (CFD) problems. As exposed by Reddy [4], the subdivision of a whole domain into simpler parts has several advantages as follows: accurate representation of complex geometry, inclusion of dissimilar material properties, easy representation of the global solution and capture of local effects.

Grids underlie a wide variety of natural and familiar structures. Chessboards are grids. City blocks are typically arranged on a grid. The system of latitude and longitude defines a grid over the Earth, albeit on a surface of a sphere instead of a plane. Grids are ubiquitous because they are the most natural way to subdivide space into regions so that locations can be identified. Pushing to the limit, the cells of a grid can be individual points, although, for computational applications, these cells should be big enough to have a shape. In regular grids, each of these shapes is identical and they occur in a regular pattern. Triangle-based hexagonal grids have their importance for specific industry applications, but rectangular and rectilinear subdivisions are the most common grids, due to their simplicity (Skiena and Revilla [5]). These types of grid have an intuitive implicit topology and they

are memory efficient, which makes them a nice fit for FEM, FVM and many other scientific applications, such as petroleum reservoir modelling, aerodynamics, digital terrain and geological sedimentation simulation.

Each cell in a regular grid can be addressed by index  $(i, j)$  in two dimensions or  $(i, j, k)$  in three dimensions, and each vertex has coordinates  $(i \cdot dx, j \cdot dy)$  in 2D or  $(i \cdot dx, j \cdot dy, k \cdot dz)$  in 3D for some real numbers  $dx$ ,  $dy$ , and  $dz$  representing the grid spacing. Figure 1 shows an example of 2D regular grid indexing for cells and vertices, while Fig. 2 shows the indexing for an individual arbitrary cell.

Though regular grids have been used in so many different ways, it's not always easy or safe to move them directly from one application to another without incurring compatibility, positioning and/or numerical errors. Depending on the application, different schemes of data storage are used to represent physical properties in these grids (Carvalho [6]). Conversions from one type of data storage to another may incur a few errors. There are many techniques that could be used to solve these numerical errors, but most of them may also introduce unusual data behaviors, resulting in spurious artifacts. Figure 3 shows an example of a rectilinear grid representing a height map. This grid stores data at the centers of its cells, thus all values at vertices are extracted from these centers to render the height map as a smooth surface.

Figure 4 shows the same rectilinear grid from Fig. 3 after data storage conversion from centers to vertices and several steps of numerical errors minimization. Although the errors were successfully minimized, the resulting surface is no longer smooth and now presents artificial artifacts.

These issues are the subject of this study. Therefore, in Section 3.3, we propose an algorithm that avoids compatibility problems and numerical errors as well as prevents the appearance of spurious artifacts after data storage conversion of two-dimensional rectilinear grids.

## 2 | MODELLING

In geological sedimentation simulations, two-dimensional rectilinear grids are intensively used for modelling, visualization and calculation on different methods, such as Navier-Stokes equations for fluid flow (Carvalho et al. [7]) and stratigraphic sedimentary inversion for mass transport (Raymond [8]). Some of these methods use the rectilinear grids taking into account that values are stored at the centers

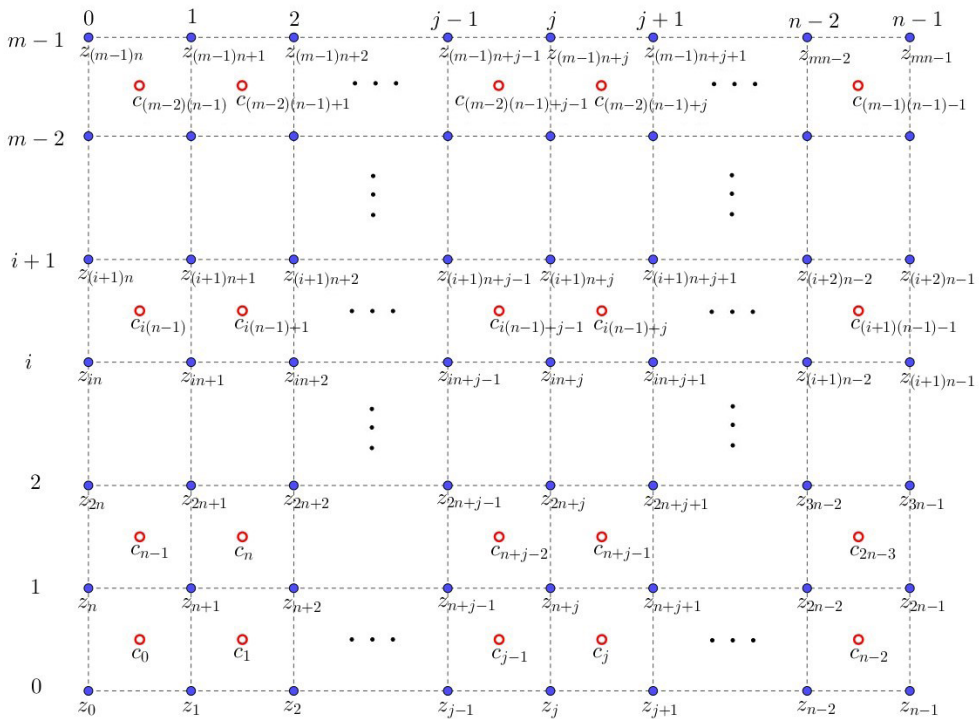


Figure 1. Indexing of two-dimensional rectilinear grid.

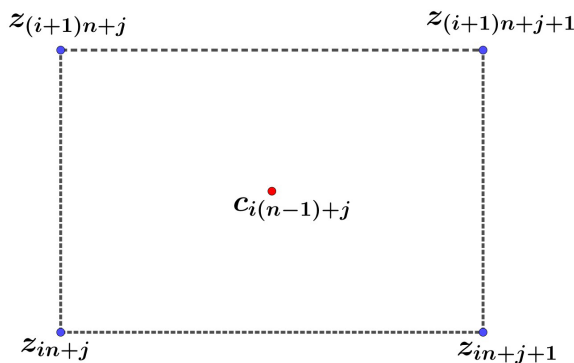


Figure 2. A closer look at the indices of an arbitrary grid cell.

of the cells, which is known as the cell-centered (CC) approach. A few other methods consider the values at the vertices of the grids, which is known as the cell-vertex (CV) (Demirdzic and Muzafjerija [9]) or node-centered (NC) (Delis et al. [10]) approach. Blazek [11] discussed the pros and cons of cell-centered and cell-vertex formulations regarding spatial discretization. For some scientific applications, it is important to inter-operate between these

two approaches and converting from one kind of grid to the other should not add numerical errors to the data.

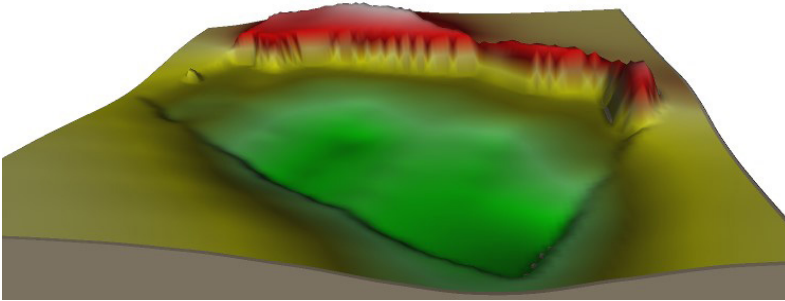


Figure 3. An example of a rectilinear grid representing a height map with data at the centers of grid cells.

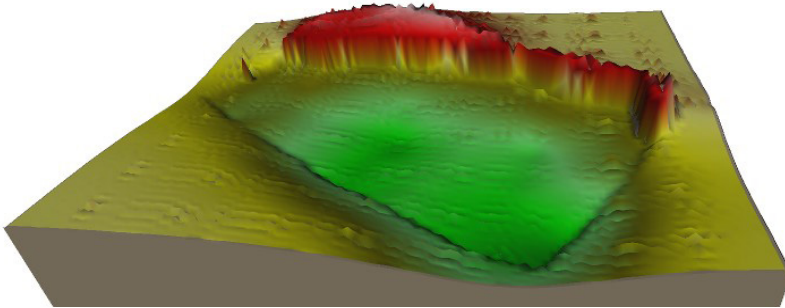


Figure 4. An example of height map presenting artifacts after data storage conversion.

## 2.1 Data positioning

The two data positioning approaches can be distinguished as:

- Cell-centered scheme (Fig. 5): property values are stored at the centroids of the grid cells. Thus, in FVM, the control volumes are identical to the grid cells.

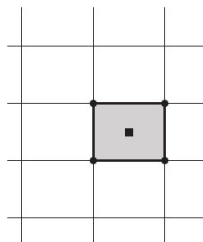


Figure 5. The gray area represents a single control volume of cell-centered scheme on a grid.

- Cell-vertex scheme (Fig. 6): property values are stored at the grid points. In FVM, the control volume can then either be the union of all cells sharing the grid point, or some volume centered around the grid point. In the former case, we speak for overlapping control volumes, in the second case of dual control volumes.

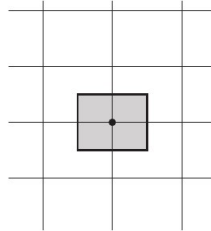


Figure 6. The gray area represents a single dual control volume of cell-vertex scheme on a grid.

The cell-centered approach has been the common method in CFD and it can efficiently support most of the computational codes for the simulation of fluid flows in an accurate and efficient manner. A continuum field which undergoes motion is governed by the Cauchy's equations, which is valid for both structural and fluid dynamics. The fact that the form of equations of Stokes flows is similar to the form of isotropic incompressible linear elastic solids has motivated many researchers to implement CFD methods, developed for the solution of incompressible fluids flows, for modelling displacement in solids (Demirdzic and Muzafferija [9], Henry and Collins [12]).

Unlike cell-centered approach, the origin of cell-vertex idea in CSD comes from traditional FEM, which uses shape functions for spatial discretization. In this approach, the solution points are the vertices of the numerical grid and the control volumes enclosing them are the median dual of the mesh (Hejranfar and Azampour [13]).

Although CV and CC methods have been largely developed, there are no extensive investigations in literature on the assessment of these two different approaches in terms of accuracy and performance. Fallah [14]'s study examined these aspects for CSD, while Delis et al. [10] and Diskin et al. [15] investigated it for CFD. However, the main goal of this study isn't to compare cell-centered and cell-vertex approaches or to determine which one is better for CSD, but to offer an algorithm to safely convert a cell-centered grid to a cell-vertex one without adding numerical error to the data and without generating artificial artifacts on the mesh.

## 2.2 Interpolation

Given a number of data points, obtained by sampling or experimentation, which represent the values of a function for a limited number of values of the independent variable, the interpolation is the estimation of the value of that function for an intermediate value of



the independent variable. This is an essential tool for engineering and many of its aspects are relevant on the outcome of a method or a simulation, and are especially significant on data visualization, data interpretation and decision making. The choice of the interpolation to be used must consider the numerical error associated to it, the desired smoothness and the fact that several estimations may produce undesirable data behavior. There are cases where numerical errors are less important than smoothness (3d visualization). There are cases where numerical errors aren't tolerated at all and smoothness isn't even considered (well boring). Each field of study has its own characteristics and there isn't an interpolation method which can solve elegantly all estimation problems.

There are various techniques to perform these estimations and each one of them have their pros and cons. In the industry, the most common techniques are based upon a mathematical function (constant, linear, polynomial, spline) associated to a distance criterion between the location to be estimated and the sampled data set. The simplest interpolation method is to locate the nearest data point and assign its value. This method is unlikely to be used as it incurs a considerable numerical error and because linear interpolation is almost as easy, but in higher-dimensional multivariate interpolation, this could be a favorable choice for its speed and simplicity. Linear interpolation is intuitive, fast and easy to implement, but it is not very precise. Another disadvantage is that the interpolant is not differentiable at the sampled points. Polynomial interpolation is a generalization of linear interpolation where the interpolant is a polynomial and thus infinitely differentiable. However, polynomial interpolation also has some disadvantages. Calculating the interpolating polynomial is computationally expensive compared to linear interpolation. Furthermore, polynomial interpolation may exhibit oscillatory artifacts, especially at the end points like the ones seen on Runge's phenomenon (Schlomilch et al. [16]). Spline interpolation uses low-degree polynomials in each of the points intervals and chooses the polynomial pieces such that they fit smoothly together. The resulting function is called a *spline*. For instance, the natural cubic spline is piecewise cubic, twice continuously differentiable and its second derivative is zero at the end points. Like polynomial interpolation, spline interpolation is less efficient but incurs a smaller error than linear interpolation and the interpolant is smoother. Also, the interpolant is easier to evaluate than the high-degree polynomials used in polynomial interpolation. However, the global nature of the basis functions leads to ill-conditioning, though this effect can be mitigated by using splines of compact support (Kress [17]).

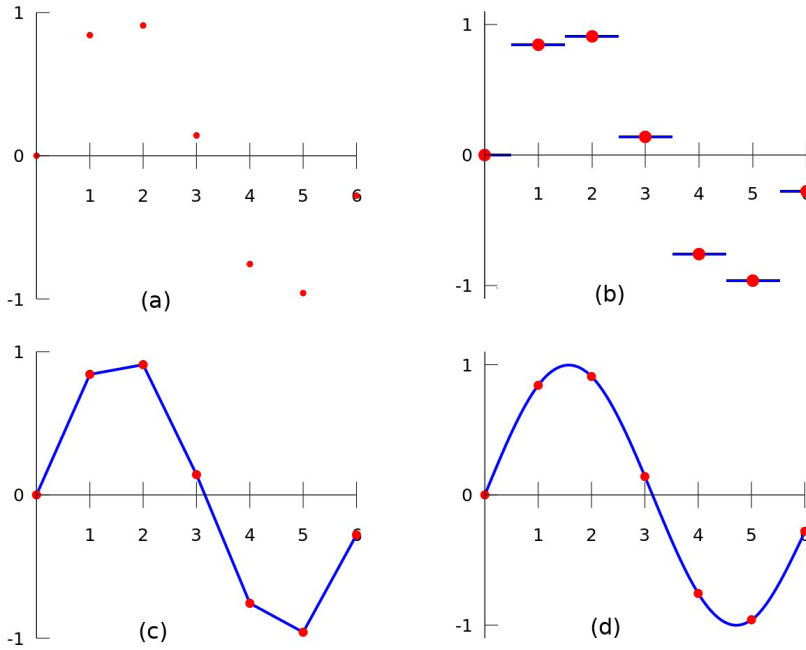


Figure 7. Three examples of interpolations using a given point set (a): nearest neighbor approximation (b), linear interpolation (c) and spline (d).

Converting a property values grid from CC to CV or vice-versa requires estimations of several values in different, usually internal, locations of the two-dimensional grid. In geological sedimentation simulations, every aspect of interpolation is taken into account when choosing the interpolation method. It is crucial to this sort of applications to have small numerical errors and to show natural surface smoothness, as well as it is mandatory to not present artifacts, once their appearances may ruin some patterns found in nature and lead to erroneous data interpretation. In this field, grids have high resolution and conversions are made over a considerable number of grids in various steps of the simulation process.

This means that interpolation is intensively used, thus it is also imperative that the chosen interpolation must be computationally efficient.

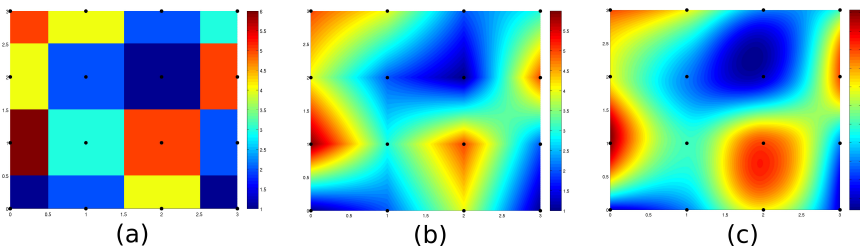


Figure 8. Interpolations in higher dimensions: nearest neighbor (a), bilinear (b) and bicubic (c).

For two-dimensional meshes, it is rather simple to interpolate property values from CV to CC maintaining local property coherence and continuity. For rectilinear grids, the centers of the cells correspond to the dual mesh vertices of CV grid, where each center lies at the same distance to each of the four cell's vertices. So, an estimated property value located at a cell center is simply the average value of the four property values correspondent to the cell's vertices. This interpolation generates a smooth and coherent distribution, maintaining local features and avoiding numerical errors.

However, the opposite operation doesn't generate a numerically exact distribution of property values for grid vertices. In previous conversion, all centers have necessarily four vertices to address when performing the interpolation. In this case, when converting from cell-centered to cell-vertex positioning scheme, the vertices on the borders of the CV grid don't have four cell centers to address, which implies a natural numerical error on the border. The border error could be eliminated by eroding the resulting grid, which is not always a satisfactory solution, depending on the grid resolution, the problem statements and the number of conversions to be realized. The numerical error in the border vertices could also be mitigated by spreading it through the whole grid, adjusting vertices values from outside in, degenerating local features and probably invalidating the entire grid for most cases. In addition to this border issue, when applying the same interpolation approach on data values from cell-centered to cell-vertex scheme and vice-versa, the values at vertices cannot be used to continuously convert from CV to CC to CV and so on in such a way that the same two grids are alternately produced. A different interpolation approach must be used to allow continuous conversions, grid structural maintenance and local property coherence.

### 3 | CONVERSION STRATEGIES

In this study, we present three conversion strategies for interpolating property values from CC to CV on two-dimensional rectilinear grids: a minimalist strategy, an iterative approximation strategy and an iterative analytic strategy. We also analyze their numerical errors, convergence, performance and visual results. For simplicity and visual evaluation purposes, we use two-dimensional rectilinear grids with cartesian z coordinate mapped as the property value for cell centers and vertices, although any physical scalar property could be used to produce similar results. Doing this allows us to visualize in three dimensions the surface smoothness and eventually some spurious artifacts that may emerge from the conversion process.

Figure 9 shows the rectilinear grid used on our examples. In this grid, the property data (z coordinates) are stored at cell centers and we perform conversions to vertices data according to the aforementioned strategies. Note that all grid cells are axis-aligned, but not all of them are valid. The invalid cells are not even drawn and they are treated separately from the valid ones during data storage positioning conversion. Every vertex adjacent to an

invalid cell is treated the same way the vertices at the border of the grid. This feature allows us to simulate grid rotations while keeping all advantages of an axis-aligned grid, but it also implies that any border problems could occur in any grid position.

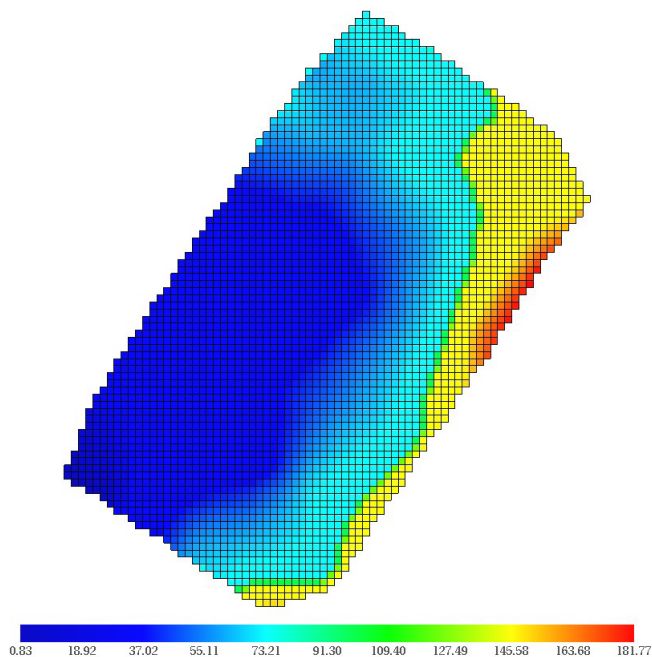


Figure 9. Two-dimensional rectilinear grid with data (height values) stored at cell centers.

### 3.1 Minimalist strategy

This strategy consists in calculating a vertex value based on closest cell center values. Each inner vertex has four adjacent cells whose centers are equidistant to it in a two-dimensional rectilinear grid. Corner vertices have only one adjacent cell, while other border vertices have two adjacent cells each, also equidistant to them. Considering this location property, the estimated vertex value is the average of all adjacent cell center values. No further processing is performed in this strategy. This estimation provokes slight numerical errors at the interior of the grid, as shown in Fig. 10, and coarse numerical errors on borders and near slopes, as illustrated on Fig. 11.

Figure 10 displays two surfaces with different colors. The green surface is the result of the minimalist strategy conversion from CC to CV scheme. The blue surface is the original surface with values stored at cell centers. Both surfaces should coincide, but they just overlap at a few certain spots.

Figure 11 shows the magnitude of this minimalist estimation approach's problems: near slopes, where the function gradient is very high, the algorithm introduces a considerable

error to vertices data.

### 3.2 Iterative approximation strategy

This strategy is based on an error minimization technique. It is composed by an early processing phase and an iterative process with three steps in each iteration. Initially, the algorithm calculates all vertices values the same way minimalist strategy does, regarding the rectilinear grid's location property. Then, three steps of value adjustment are executed repeatedly until the error criterion is satisfied. The first step creates a cell-centered grid based on current estimated vertices values. Since all cells have four corresponding vertices on CV grid, the estimated value of a cell center is the average value of these four vertices values. The second step determines the errors by subtracting the original CC grid by newly created CC grid. The third step calculates and applies value adjustment on each vertex of CV grid based exclusively on both cell adjacency and the errors resulting from the second step.

This strategy offers fair convergence rate, minimizes both border problems and inner numerical errors, and produces smooth surfaces in most cases. Nevertheless, spurious artifacts may emerge re-

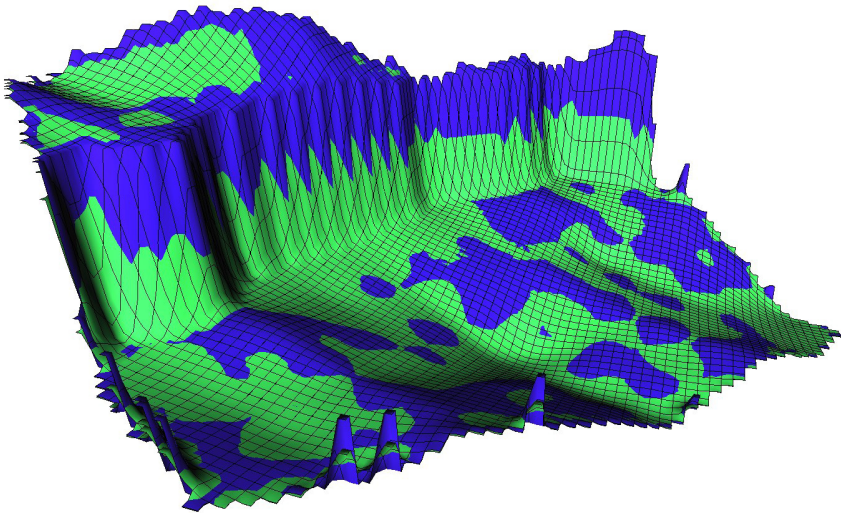


Figure 10. The result of minimalist strategy conversion from CC to CV compared to the original surface with values at cell centers. This image shows models scaled up vertically by 100 times.

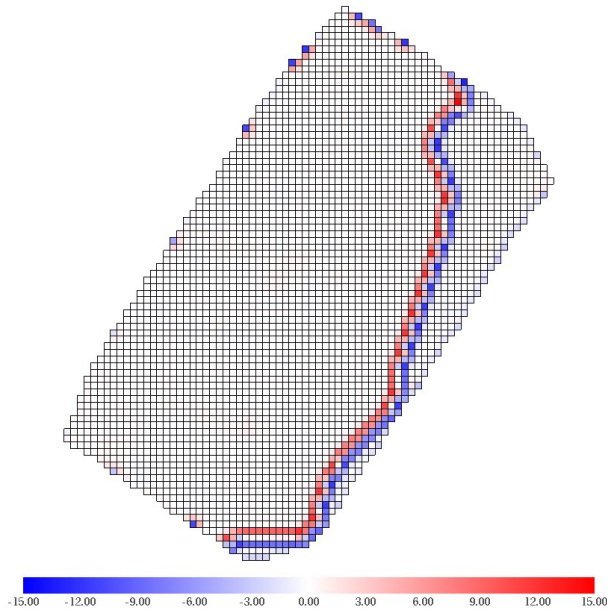


Figure 11. Error map from minimalist strategy conversion.

sulting from the topologically independent characteristic of the interpolation. Once the algorithm tries to approximate the vertex property values independently, two neighbor vertices may have their values adjusted in opposite ways. If this behavior occurs alternately along any direction, artifacts emerge in just a few iterations. This effect can be seen as wave patterns in Fig. 12.

In spite of spurious artifacts appearing in the grid data, this strategy produces low errors after a few iterations. These errors are spread over the whole grid, as one can see in Fig. 13.

In this example, we used 1024 iterations and its convergence is depicted in Fig. 14. The algorithm performance is acceptable, despite of its complicated nature for parallel design and development in the vertices' adjustment step.

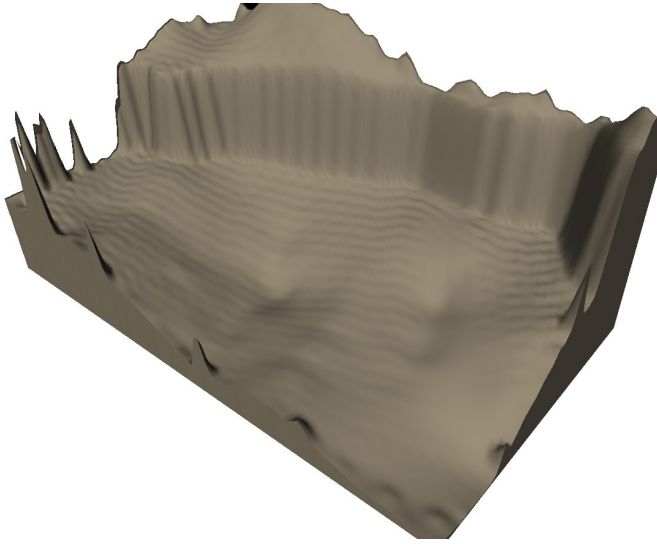


Figure 12. Result of iterative approximation strategy conversion from CC to CV scheme. This image shows a model scaled up vertically by 100 times.

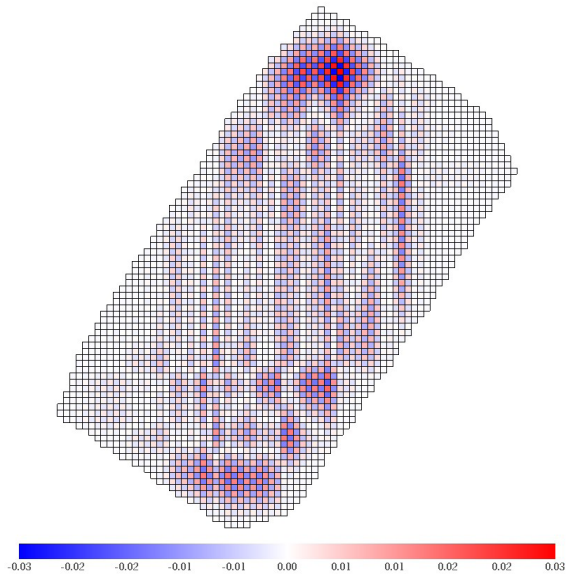


Figure 13. Error map from iterative approximation strategy conversion.

Artifacts become more evident when consecutive conversions are performed. To illustrate this undesirable effect, we executed three consecutive conversions on our example grid and the result can be seen in Fig. 15.

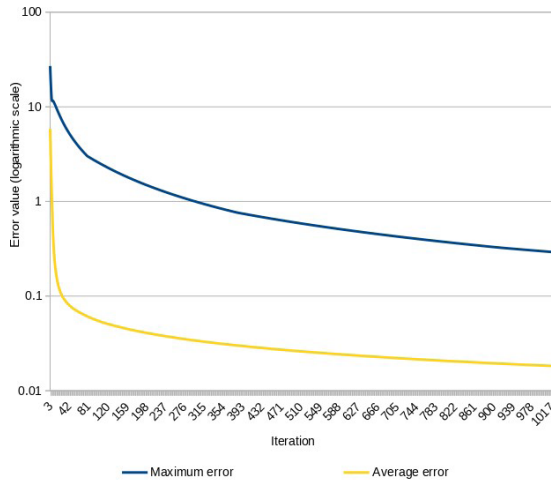


Figure 14. Iterative approximation strategy convergence chart.

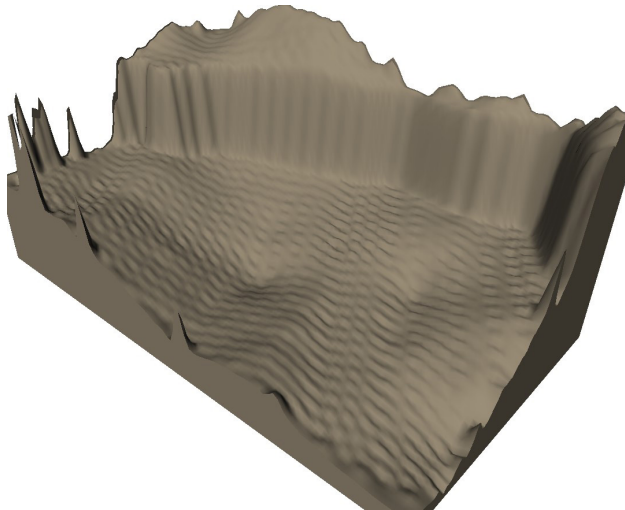


Figure 15. Result of three iterative approximation strategy conversions from CC to CV and vice-versa. This image shows a model scaled up vertically by 100 times.

### 3.3 Iterative analytic strategy

Previous strategies perform values estimations for grid vertices aiming to reach a scenario where calculated values at cell centers approximate the original cell-centered stored data as good as possible. It is an intuitive way to solve the problem and different algorithms may be used to achieve that. Unlike these approaches, the analytic strategy does not try to calculate the values at the vertices directly or by iterative approximation. Instead, it will use vertices/centers relations to create a system of linear equations and solve it.



There are two main relations among the vertices of a cell and its center. The first one dictates that a value at the cell center is composed by the average of the values at the four cell's vertices. This *locality property* is valid for every grid cell. Given the vertices and cells represented on Fig. 16, the following equations are obtained according to the mentioned relation:

$$\begin{aligned} 4c_0 &= z_0 + z_1 + z_3 + z_4, \\ 4c_1 &= z_1 + z_2 + z_4 + z_5, \\ 4c_2 &= z_3 + z_4 + z_6 + z_7, \\ 4c_3 &= z_4 + z_5 + z_7 + z_8. \end{aligned}$$

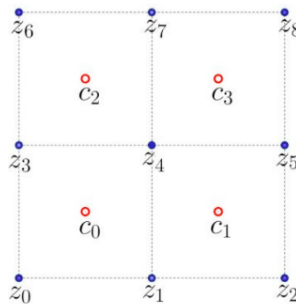


Figure 16. Indexing of two-dimensional rectilinear cell-centered grid.

The same relation and equations were used by previously described strategies on Section 3.1 and Section 3.2 to determine the value at vertex  $z_j$  using values  $c_i$  at cell centers. Generically, for a grid with dimensions  $m \times n$ , the system of equations is:

$$4c_k = z_{(k+i-1)} + z_{(k+i)} + z_{(\bar{k}+i-1)} + z_{(\bar{k}+i)} \quad (1)$$

for  $i = (0, 1, \dots, m - 1)$  and  $j = (0, 1, \dots, n - 1)$ ,

$$Az = 4\mathbf{c}, \quad (2)$$

where  $A \in \mathbb{R}^{m_1 \times n_1}$ , the variables vector  $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^{n_1}$  and the centers vector  $\mathbf{c} \in \mathbb{R}^{m_1}$ , and  $m_1 = m \times n$ ,  $n_1 = (m + 1) \times (n + 1)$ .

The second relation among grid vertices and cell centers can be seen as the *smooth criterion*, and it suggests that values at vertices can be calculated by values of neighboring centers. For corner vertices, we consider only the closest center. For other border vertices, we consider just two closest centers. For other grid vertices, we consider the four centers of the cells containing the vertex. Applying this relation to the grid depicted on Fig. 16 results in the following equations:

$$\begin{aligned}
z_0 &= c_0, \\
z_1 &= \frac{c_0 + c_1}{2}, \\
z_2 &= c_1, \\
z_3 &= \frac{c_0 + c_2}{2}, \\
z_4 &= \frac{c_0 + c_1 + c_2 + c_3}{4}, \\
z_5 &= \frac{c_1 + c_3}{2}, \\
z_6 &= c_2, \\
z_7 &= \frac{c_2 + c_3}{2}, \\
z_8 &= c_3.
\end{aligned}$$

Similar equations were also used by the strategy describe on Section 3.2 when trying to approximate the values at grid vertices using an iterative technique. However, in the analytic strategy, the system of linear equations is created by combining the locality property to the smooth criterion, and it is constructed not to compute the values at grid vertices, but to compute the set of values at cell centers which satisfies both relations. In other words, using the smooth criterion equations, we calculate an artificial cell-centered grid whose values produce a CV grid which satisfies the locality property. The artificial grid equivalent to the CC grid illustrated of Fig. 16 can be seen on Fig. 17.

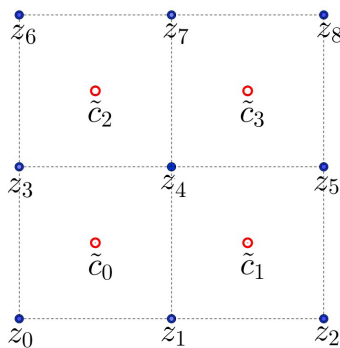


Figure 17. Indexing of two-dimensional rectilinear artificial cell-centered grid.

To accomplish the analytic strategy proposal, the original CC values are used only to satisfy the locality property, i. e. the average of all values at one cell's vertices will be equal to the original value stored in that cell. The smooth criterion is used to determine the system's variables, i. e. the set of cell-centered values which produce smooth values at vertices when applying the locality property equations. This approach generates the following equations:

$$\begin{aligned}
16c_0 &= 9\bar{c}_0 + 3\bar{c}_1 + 3\bar{c}_n + \bar{c}_{n+1}, \\
16c_i &= 3\bar{c}_{i-1} + 6\bar{c}_i + 3\bar{c}_{i+1} + \bar{c}_{n+i-1} + 2\bar{c}_{n+i} + \bar{c}_{n+i+1}, \text{ for } i = (1, 2, \dots, n - \\
&\quad 2), \\
16c_{n-1} &= 3\bar{c}_{n-2} + 9\bar{c}_{n-1} + \bar{c}_{2n-2} + 3\bar{c}_{2n-1}, \\
\tilde{A} \tilde{c} &= 16 \mathbf{c} \tag{3}
\end{aligned}$$

Matrix  $\tilde{A}$  from the system of linear equations is positive and symmetric. This means that more elegant methods could be used to solve this system using the matrix  $\tilde{A}$ 's spectral characteristics, but initially we used a simple iterative approach to solve it. The analytical result of this system is the cell-centered grid whose vertices/centers locality property is assured. To retrieve the desired CV grid, we just apply the resulting solution to the smooth criterion equations.

As illustrated in Fig. 18, the resulting surface is very smooth and do not present artifacts.

As we didn't solve the system of linear equations analytically, but using an iterative processing, the resulting CV grid presented a few low errors as seen on Fig. 19. Once the purely analytic solution is provided, this strategy will produce exact solutions.

Although not producing exact solutions, the current iterative method utilized to solve the system has great convergence rate as shown in Fig. 20 and its performance is even better than the one seen on Section 3.2.

## 4 | CONCLUSION AND FUTURE WORK

Engineering applications make use of algorithms and data structures to represent real world events and elements. The data structures typically store data originated from sampling or experimentation, and they are the basics for most of current methods. Robust and reliable manipulation of these data structures

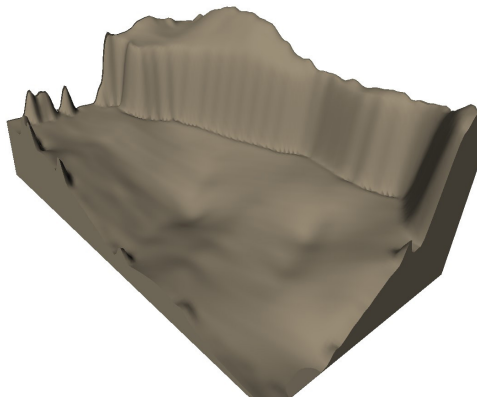


Figure 18. Result of iterative analytic strategy conversion from CC to CV scheme. This image shows a model scaled up vertically by 100 times.

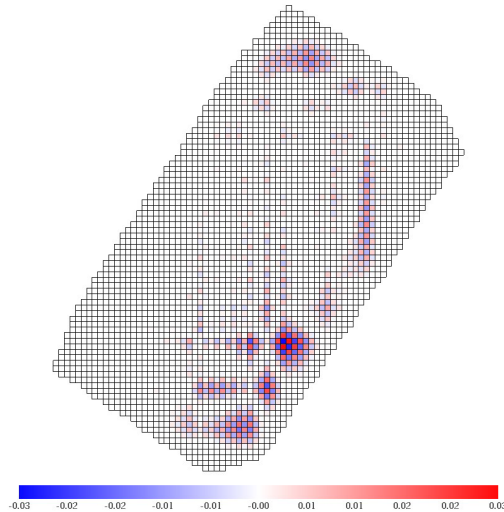


Figure 19. Error map from iterative analytic strategy conversion.

are fundamental, especially in areas where data precision is critical and visual results support natural events interpretation, such as Oil & Gas exploitation, geologic simulations and reservoir modelling. In this scenario, interpolation methods arise as significant mechanisms for data estimation over regions uncovered by sampled data.

We presented a new method for data positioning conversion on two-dimensional rectilinear grids. This new strategy solves complications created by either direct algorithms or purely mathematical methods. It minimizes numerical errors, presents good convergence rate and generates smooth values distribution, proving to be a valuable tool for scientific applications.

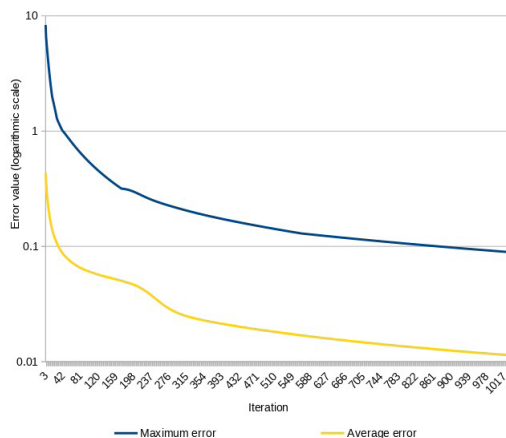


Figure 20. Iterative analytic strategy convergence chart.

The next natural step is to provide an analytic solution to the system of linear equations presented on Section 3.3. Although subjective and deeply related to data peculiarities, further artifact appearances could be avoided by using different smooth criteria which generate distinct systems of linear equations.

## REFERENCES

- Logan, D. L., 2011. ***A First Course in the Finite Element Method***. CL Engineering.
- LeVeque, R. J., 2002. ***Finite-Volume Methods for Hyperbolic Problems***. Cambridge University Press.
- Toro, E. F., 2013. ***Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics: a practical introduction***. Springer Science & Business Media.
- Reddy, J. N., 2009. ***An Introduction to the Finite Element Method***. McGraw-Hill Medical Publishing.
- Skiena, S. & Revilla, M., 2003. ***Programming Challenges: The Programming Contest Training Manual***. Texts in Computer Science. Springer.
- Carvalho, C. V. A., 2002. ***Simulação de transporte e deposição de sedimentos siliciclásticos em ambientes de plataforma, talude e bacia***. PhD thesis, Civil Engineering Department, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro (PUC-RIO).
- Carvalho, C. V. A., Lopes, A. A. O., Martha, L. F., & Faccion, J. E., 2003. **Simulation of transport and deposition of siliciclastic sediments in platform, slope, and basin environments**. In *Proceedings of 23<sup>rd</sup> GOCAD Meeting, Nancy, France*, pp. 13–28.
- Raymond, A. S., 2017. **Stratigraphic sedimentary inversion using paths in graphs**. Master's thesis, Alberto Luis Coimbra Research Institute, Federal University of Rio de Janeiro (COPPE-UFRJ).
- Demirdzic, I. & Muzaferija, S., 1994. **Finite volume method for stress analysis in complex domains**. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 37, n. 21, pp. 3751–3766.
- Delis, A., Nikolos, I., & Kazolea, M., 2011. **Performance and comparison of cell-centered and node-centered unstructured finite volume discretizations for shallow water free surface flows**. *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 18, pp. 57–118.
- Blazek, J., 2015. ***Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications***. Butterworth-Heinemann.
- Henry, F. S. & Collins, M. W., 1993. **Prediction of transient wall movement of an incompressible elastic tube using a finite volume procedure**. *Transactions on Biomedicine and Health*, vol. 1.
- Hejranfar, K. & Azampour, M.-H., 2015. **Assessment of cell-centered and cell-vertex finite volume approaches for computation of 2d structural dynamics on arbitrary quadrilateral grids**. *CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences*, vol. 106, n. 6, pp. 395–439.

Fallah, N., 2004. **A cell vertex and cell centred finite volume method for plate bending analysis.** *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering - COMPUT METHOD APPL MECH ENG*, vol. 193, pp. 3457–3470.

Diskin, B., Thomas, J., J. Nielsen, E., Nishikawa, H., & White, J., 2010. **Comparison of nodecentered and cell-centered unstructured finite-volume discretizations part i: Viscous fluxes.** *Aiaa Journal - AIAA J*, vol. 48.

Schlomilch, O. X., Witzschel, B., Cantor, M., Kahl, E., Mehmke, R., & Runge, C., 1907. **Zeitschrift fur Mathematik und Physik**, volume 54. B. G. Teubner.

Kress, R., 1998. **Numerical analysis / Graduate texts in mathematics.** Springer, New York :, 1<sup>a</sup> ed. edition.

# CAPÍTULO 17

## REALIDADE VIRTUAL APLICADA COMO FERRAMENTA DE AUXÍLIO AO ENSINO

*Data de aceite: 02/08/2021*

*Data de submissão: 05/06/2021*

### **Simone Silva Frutuoso de Souza**

Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT), Departamento de Matemática  
Tangará da Serra, Mato Grosso  
<http://lattes.cnpq.br/1722951514394531>

### **Everton Welter Correia**

Instituto Federal do Mato Grosso (IFMT),  
Departamento de Computação  
Tangará da Serra, Mato Grosso  
<http://lattes.cnpq.br/5557653959344725>

### **Gabrielly Chiquezi Falcão**

Instituto Federal do Mato Grosso (IFMT),  
Departamento de Computação  
Tangará da Serra, Mato Grosso  
<http://lattes.cnpq.br/7059149599794572>

### **Leonardo Plaster Silva**

Instituto Federal do Mato Grosso (IFMT),  
Departamento de Computação  
Tangará da Serra, Mato Grosso  
<http://lattes.cnpq.br/6197098601365748>

### **Érica Baleroni Pacheco**

Instituto Federal do Mato Grosso (IFMT),  
Departamento de Computação  
Tangará da Serra, Mato Grosso  
<http://lattes.cnpq.br/4822911830797546>

### **Fábio Roberto Chavarette**

Universidade Estadual Paulista (UNESP),  
Departamento de Matemática  
Ilha Solteira, São Paulo  
<http://lattes.cnpq.br/5723359885365339>

### **Fernando Parra dos Anjos Lima**

Instituto Federal do Mato Grosso (IFMT),  
Departamento de Computação  
Tangará da Serra, Mato Grosso  
<http://lattes.cnpq.br/7511905330795162>

**RESUMO:** Neste capítulo tem-se como proposta o desenvolvimento e aplicação da Realidade Virtual (RV) como Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC) para auxiliar no processo de ensino-aprendizado de disciplinas do Ensino Médio. A RV permite a interação e navegação de usuários em ambientes 3D mantidos por computador, utilizando de canais de mapeamento e análise do comportamento dos usuários, possibilitando a troca de informação entre o ambiente virtual e o usuário, afetando um ou vários sentidos humanos. É uma tecnologia de interação e entretenimento que pode ser aplicada com êxito para auxiliar nas estratégias de ensino em disciplinas do ensino médio. Com a evolução da educação, isto é, o aperfeiçoamento dos processos de exploração, descoberta, observação e construção de conhecimento, novas ferramentas de ensino vêm surgindo, de onde destacam-se os ambientes virtuais de aprendizagem por permitirem de uma maneira nova e diferente que pessoas possam fazer e realizar experimentos ou tarefas que elas não poderiam fazer no mundo físico/real, como voar, visitar lugares que não existem ou de difícil acesso através da manipulação e análise do próprio objeto de estudo. Assim a RV será fundamental nesse processo de evolução educacional, onde busca-se cada vez mais o uso

de ferramentas digitais como TICs para a aplicação bem-sucedida de metodologias ativas de ensino em sala de aula, e principalmente neste momento de pandemia. Por conseguinte, o objetivo deste artigo refere-se ao desenvolvimento de um sistema interativo de RV por óculos, projetado, modelado e renderizado usando o software livre Blender, para auxiliar no ensino de disciplinas do ensino médio, especificamente nas aulas de biologia, podendo ser estendido a outras disciplinas.

**PALAVRAS - CHAVE:** Realidade Virtual; Tecnologia de Informação e Comunicação; Blender; Ensino; Metodologias Ativas.

## VIRTUAL REALITY APPLIED AS A TEACHING AID TOOL

**ABSTRACT:** This chapter proposes the development and application of Virtual Reality (VR) as Information and Communication Technology (ICT) to assist in the teaching-learning process of high school subjects. VR allows the interaction and navigation of users in 3D environments maintained by a computer, using channels for mapping and analyzing user behavior, enabling the exchange of information between the virtual environment and the user, affecting one or several human senses. It is an interaction and entertainment technology that can be successfully applied to support teaching strategies in high school subjects. With the evolution of education, that is, the improvement of the processes of exploration, discovery, observation and construction of knowledge, new teaching tools have emerged, from which virtual learning environments stand out for allowing in a new and different way that people can do and carry out experiments or tasks that they could not do in the physical/real world, such as flying, visiting places that do not exist or difficult to access through the manipulation and analysis of the object of study itself. Thus, VR will be fundamental in this educational evolution process, where the use of digital tools such as ICTs is increasingly sought for the successful application of active teaching methodologies in the classroom, and especially at this time of pandemic. Therefore, the objective of this paper refers to the development of an interactive system of VR by glasses, designed, modeled and rendered using Blender free software, to assist in the teaching of high school subjects, specifically in biology classes. extended to other disciplines.

**KEYWORDS:** Failures Diagnosis, Experimental Analysis, Mechanical Structures, Negative Selection Algorithm, Artificial Immune Systems.

## 1 | INTRODUÇÃO

Ao longo de toda a história humana, houve diversas mudanças e avanços tecnológicos, seja na dominação do fogo, na invenção da roda, na construção de ferramentas ou mesmo, e principalmente, na criação da internet. Tais mudanças impactam também os processos de aprendizagem e como o ser humano se relaciona com tais processos (SILVA, 2009). Muito embora, em alguns momentos, haja um distanciamento metodológico entre o ensino e a tecnologia, os estudantes das sociedades contemporâneas estão imersos em tecnologia (internet, smartphones, tablets, notebooks, etc.) a todo momento. Desde muito cedo, os bebês já estão em contato com jogos que estimulam a coordenação motora e,



de certa forma, entretêm as crianças enquanto os pais fazem suas atividades cotidianas.

Desta forma, a educação vem incorporando recursos tecnológicos nas didáticas de ensino. Mesmo que seja de forma tímida. Nas últimas décadas houve um crescimento exponencial no uso de tecnologia nas diversas temáticas de ensino. Na maioria dos casos, a escola não detém recursos ou infraestrutura suficientes para atender a demanda atual de ensino com uso de tecnologias (ANDRADE, 2019). Uma pesquisa realizada com base no senso escolar 2013 (MEC/INEP, 2013) pela Organização Não Governamental (ONG) “Todos Pela Educação” (2014) demonstrou o uso de tecnologias aplicadas ao ensino, bem como a disponibilidade de recursos nas escolas brasileiras. O resultado apontou que apenas 44,3% das escolas possuem laboratório de informática e 50,3% possuem acesso à internet.

A disponibilidade de acesso à internet influencia diretamente nos recursos que podem ser empregados na escola, uma vez que atua como fator limitante na utilização de várias tecnologias. Como resposta à falta de recursos, como a internet, alguns professores optam por utilizar o próprio celular em sala de aula e utilizar os celulares dos alunos em atividades. Numa pesquisa realizada em 2016 pelo Centro de Estudos sobre as Tecnologias da Informação e da Comunicação (CETIC), foram obtidos dados quanto ao envolvimento dos alunos e seus celulares em ambiente escolar. O celular dos alunos, que antes era malvisto, hoje tende a ser mais uma ferramenta incorporada pelo professor em sala de aula, onde 52% das escolas utilizavam o aparelho em atividades com os alunos (CETIC, 2016). No momento atual, em que se vive uma pandemia, as tecnologias, o celular e todo recurso são necessários para driblar as adversidades do dia a dia e atrair a atenção dos alunos para o ensino.

Dentre os recursos tecnológicos atuais, surge o uso da Realidade Virtual (RV). A RV é um dos destaques dessa era, tomando espaço e criando possibilidades presentes no cotidiano infantil: os ambientes gerados apresentam recursos lúdicos e atraentes que retêm a atenção de seus usuários (MALBOS et al., 2014; BURDEA, COIFFET, 2003). A tecnologia RV apresenta uma interface computadorizada que simula interações em tempo real, por meio de vários sensores entre máquina e usuário.

Neste sentido, a proposta deste projeto é o desenvolvimento e aplicação da Realidade Virtual (RV) como Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC) para auxiliar no processo de ensino-aprendizado de disciplinas do Ensino Médio, especificamente biologia, podendo se estender a outras disciplinas. Isto é, a tecnologia a serviço da educação. Esta tecnologia pode contribuir para atividades remotas como é o caso hoje, onde os alunos e professores não possuem acesso aos laboratórios e salas de aula.

A educação é um processo de exploração, descoberta, observação e construção de conhecimento, que deve ser apoiado por metodologias de ensino. As Metodologias Ativas de ensino são práticas pedagógicas capazes de ultrapassar os limites do treinamento puramente técnico e tradicional, para efetivamente alcançar a formação do sujeito como

um ser ético, histórico, crítico, reflexivo, transformador e humanizado. (LUZ et al., 2018). A metodologia ativa estimula processos construtivos de ação-reflexão-ação, em que o estudante é o ponto central do seu próprio aprendizado, vivenciando experiências práticas através de desafios que proporcionam a pesquisa e descoberta de soluções aplicáveis à realidade, e pode-se relacionar essas características às dos ambientes de aprendizagem que fazem uso da RV: imersão, navegação e interação.

Neste sentido, torna-se necessário desenvolver novas tecnologias para o ensino-aprendizado usando RV. O potencial destes ambientes virtuais está no fato de permitir, de uma maneira nova e diferente, que pessoas possam fazer e realizar experimentos ou tarefas, que elas não poderiam fazer no mundo físico/real, como voar, visitar lugares que não existam ou de difícil acesso, através da manipulação e análise do próprio objeto de estudo, conforme exemplificado nos trabalhos de Byrne (1995), Kalawsky (1996), Kirner (1996), Kirner e Siscoutto (2017) e Pinho (1996).

Segundo Pantelides (1995) e Edwards (1996) existem várias razões para usar a RV na Educação, onde destacam-se: Aumento da motivação dos usuários; permite que pessoas portadoras de alguma deficiência realizem tarefas que de outra forma não seriam possíveis, inclusão; permite ao aprendiz que desenvolva sua atividade no seu próprio ritmo; não restringe o prosseguimento de experiências ao período da aula regular; promove a interação, e desta forma estimula a participação ativa do estudante.

Desta forma, este projeto visa contribuir com este problema através da proposta de um sistema de RV interativo para auxiliar no ensino-aprendizado em disciplinas do ensino médio, especificamente na disciplina de biologia, podendo ser estendido a outras disciplinas posteriormente.

## 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O processo de aprendizagem possui dois importantes fatores, que são a forma como o conhecimento que será aprendido é colocado à disposição do aluno (por recepção ou descoberta) e o modo como essa informação é absorvida (VASCONCELOS et al., 2003; GAETA, MASETTO, 2010). A utilização de ambientes baseados em RV pode contribuir para aumentar a motivação do aprendizado, conforme observado por Johnsen et al. (2007), cuja pesquisa verificou o aprendizado efetivo e a transferência do aprendizado a partir destes ambientes.

Braga (2001) apresentou três características básicas da RV ao relacioná-la com a educação, são elas: Imersão, Interação e Envolvimento. Estas características, se bem conduzidas na educação trazem diversas vantagens, como expõe a autora:

- Maior motivação dos estudantes (usuários);
- O poder de ilustração da Realidade Virtual para alguns processos e objetos é muito maior do que outras mídias;

- Permite uma análise de muito perto;
- Permite uma análise de muito longe;
- Permite que as pessoas deficientes realizem tarefas que de outra forma não são possíveis;
- Dá oportunidades para experiências;
- Permite que o aprendiz desenvolva o trabalho no seu próprio ritmo;
- Não restringe o prosseguimento de experiências ao período da aula regular;
- Permite que haja interação, e desta forma estimula a participação ativa do estudante.

Destacam-se a seguir diversos trabalhos onde a RV foi utilizada com sucesso para fins educacionais e de treinamento técnico:

Em Kanehira e Shoda (2008), a partir de um modelo virtual de um corpo humano, criou-se um ambiente de treinamento para acupunturistas com realidade virtual, que considera a posição e a profundidade dos pontos de contato relevantes neste tipo de terapia. Utilizou-se aqui um dispositivo proprietário com sensores que simulam uma agulha real, a aplicação fornece um feedback dos procedimentos executados durante a realização da simulação.

Delingquette e Ayache (2005) criaram um sistema computacional baseado em RV para treinamento de procedimentos cirúrgicos, onde deram como exemplo a cirurgia hepática minimamente invasiva. O sistema compreende desde o planejamento cirúrgico até a simulação dos movimentos necessários para o procedimento. O sistema se destaca pelo realismo oferecido nas reações às interações do usuário. Sorensen e Mosegaard (2006) também desenvolveram um sistema para treinamento de cirurgias, e citaram como exemplo cirurgias cardíacas. Este sistema possui uma função para auxílio do planejamento dos procedimentos cirúrgicos em função do prontuário de um paciente.

Um estudo sobre a utilização de Realidade Virtual como ferramenta de aprendizagem no combate da dengue, foi apresentado em Schmitz et al., (2004). O trabalho traz um ambiente virtual que simula uma situação onde o aprendiz lida com situações referentes ao combate e tratamento de focos que possam estar contaminados com dengue. Ao fim do processo o usuário recebe um feedback sobre sua avaliação dentro do mesmo.

Já em Marçal et al., (2005) é apresentado um ambiente de desenvolvimento para a construção de aplicações educacionais em dispositivos móveis com recursos de realidade virtual. Este ambiente tem como objetivo principal fornecer ao desenvolvedor uma arquitetura consistente para implementação de programas em dispositivos móveis, com foco na aprendizagem. Para a validação deste ambiente de desenvolvimento foi desenvolvido um protótipo que demonstra sua interatividade, usabilidade e portabilidade, além de permitir uma experimentação da integração das tecnologias de realidade virtual e

computação móvel.

Vendruscolo et al. (2005) traz um Ambiente Virtual como Ferramenta de Apoio ao Ensino Fundamental através de Jogos Educacionais. Este trabalho apresenta a Escola TRI-Legal, um ambiente de ensino-aprendizagem utilizando representações em três dimensões e Realidade Virtual. O ambiente simula uma escola virtual, onde os estudantes, navegando no ambiente, poderão ter acessos a diversos jogos como instrumentos de educação. Os jogos foram desenvolvidos de forma a encorajar a participação dos alunos na formação de seu conhecimento, oportunizando dicas e auxílio quando necessário, voltados para o ensino de Geografia e História para alunos do ensino fundamental.

Meiguins et al. (2015) propõem um ambiente virtual para prática de experiências de circuitos elétricos, denominado Laboratório Virtual de Experiências de Eletrônica (LVEE), cuja interface permite a construção de circuitos utilizando componentes tridimensionais, e que podem ser simulados local ou remotamente, utilizados pelos alunos de graduação do curso de Computação e Engenharia Elétrica. O uso da Realidade Virtual (RV) na educação como ferramenta auxiliar no processo de desenvolvimento cognitivo, através do desenvolvimento de um laboratório virtual 3D de redes de computadores, foi proposto por Hassan (2003). O espaço virtual é composto de cinco salas, sendo um hall de entrada e quatro laboratórios de aprendizagem, os quais contém os recursos cognitivos para proporcionar o aprendizado de conceitos, tipos, funcionamento físico e lógico de uma rede de computadores utilizando objetos interativos tridimensionais.

Em Buccioli et al., (2015) descreve-se o uso da Realidade Virtual e Realidade Aumentada na Visualização e Simulação de Sistemas Industriais Automatizados, discutindo as técnicas relacionadas e mostrando exemplos de simulações apoiadas por Realidade Virtual e Realidade Aumentada. A solução desenvolvida consiste na simulação de uma máquina automatizada para o envase de laticínios. Esta implementação traz desafios no campo da simulação e animação, como sincronização entre os estágios, animação hierárquica, animação cíclica e animações na malha de objetos. O usuário neste caso pode observar de diversos ângulos todo o processo de envasamento, inclusive ângulos inacessíveis numa máquina real, o que facilita muito a compreensão do processo.

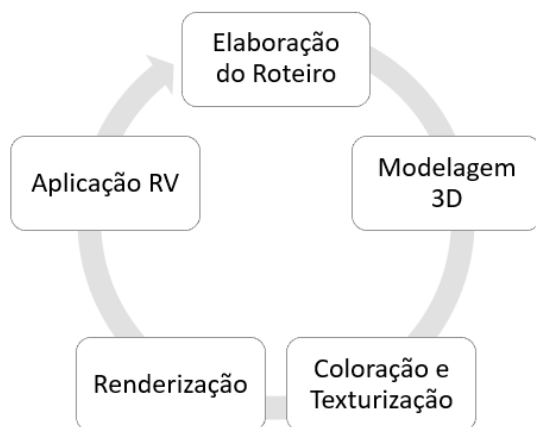
Em Sant'Ana et al., (2019) foi apresentada uma proposta para a educação imersiva em um tour virtual 360°, analisando os percursos pedagógicos e computacionais iniciais na elaboração de uma proposta de objeto de aprendizagem.

Já Xavier et al., (2020) apresentou uma proposta que utiliza realidade virtual e aumentada como métodos de ensino. Também discute o uso da Realidade Aumentada (RA) e da Realidade Virtual (RV) como ferramentas facilitadoras do processo de ensino e aprendizagem em um cenário interdisciplinar e apresenta experiências recentes como os aplicativos FDT-VR e Mohr2D-VR, utilizados no ensino em disciplinas de engenharia.

### 3 | MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção se descrevem as ações que foram realizadas para a modelagem, renderização e desenvolvimento de uma animação gráfica em 3D aplicada em RV para auxiliar no ensino.

A pesquisa foi desenvolvida conforme o ciclo de tarefas ilustrado na figura 1.



**Figura 1.** Fluxograma de Desenvolvimento da metodologia.

Fonte: Os próprios autores.

#### 3.1 Elaboração do Roteiro

A primeira etapa do desenvolvimento prático da metodologia foi a elaboração de um roteiro para desenvolver uma animação gráfica 3D e usa-la como uma ferramenta de ensino. Para tal processo foi escolhido como tema o processo de fecundação, tema clássico das aulas de biologia.

Neste sentido foi criado um roteiro com as informações, dados e planejamento para o desenho, visando elaborar um vídeo animado composto pelos desenhos e uma narração. Este roteiro seguiu os preceitos de um plano de aula. Abordando uma introdução, a explicação do conceito e conclusão.

#### 3.2 Modelagem 3D

Para o desenvolvimento da modelagem 3D foi utilizado o software Blender, também conhecido como Blender 3D, que é um programa de computador de código aberto, desenvolvido pela Blender Foundation, para modelagem, animação, texturização, composição, renderização, e edição de vídeo. A preferência por esta ferramenta se dá pela sua altíssima qualidade e simplicidade em seu funcionamento. Na figura 2, ilustra-se a interface do Blender com a modelagem 3D.

Para animar o ambiente, foi utilizado a ferramenta key frame, o mesmo foi utilizado na câmera, que foi configurada em modo panorâmico 360°.



**Figura 2.** Ambiente de modelagem 3D.

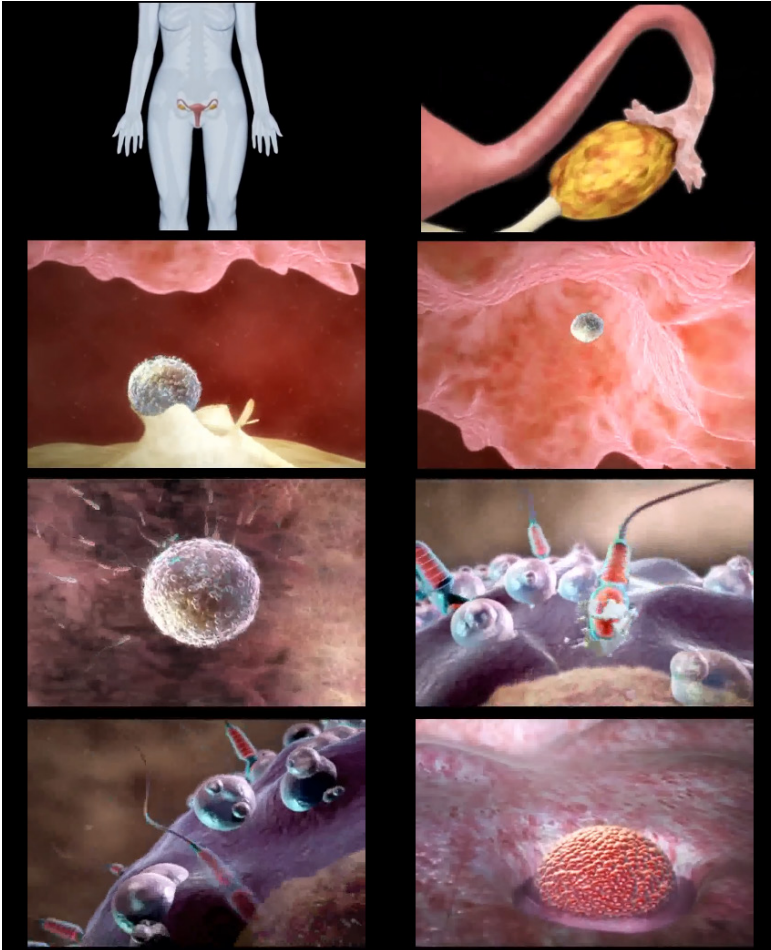
Fonte: Os próprios autores.

Para o vídeo animado foi criado um ambiente que se representa o que ocorre no interior do útero, no processo de fecundação. Para a criação deste ambiente, foram desenhados e modelados todos os objetos.

### **3.3 Coloração, Texturização e Renderização**

Para a coloração das imagens e texturização foi utilizado o Blender em conjunto com o GIMP.

Na figura 3 ilustra-se algumas fotos tiradas do vídeo animado, demonstrando o processo de coloração, textura e principalmente a renderização final. Nesta figura pode-se observar uma navegação pelo corpo humano, adentrando no útero, demonstrando o processo de liberação do óvulo nas trompas, e deslocamento para o interior do útero. Na sequência mostra-se os espermatozoides em busca do contato com o óvulo até ocorrer o processo de fecundação. Por fim, demonstra-se o óvulo fecundado se alojando nas paredes do útero, iniciando o processo de geração do feto, no processo de reprodução.



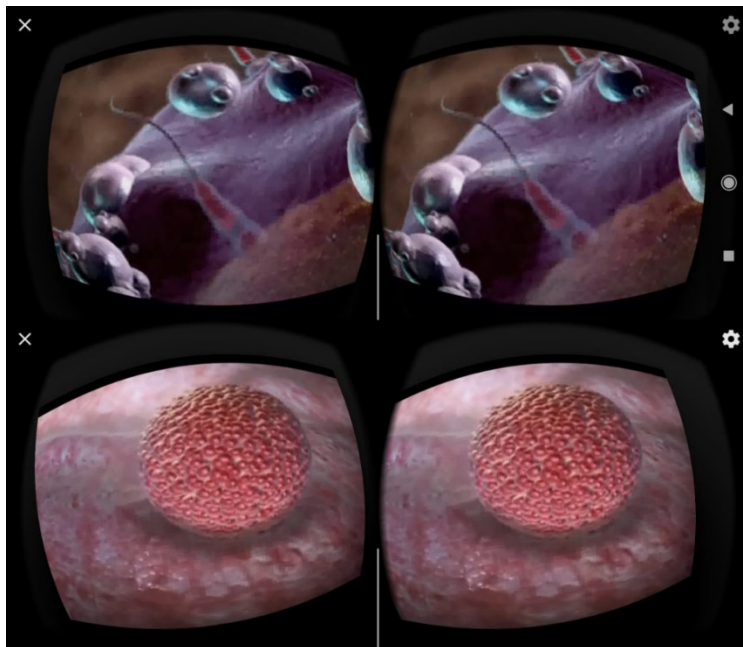
**Figura 3.** Animação 3D renderizada.

Fonte: Os próprios autores.

### 3.4 Aplicação para RV

Após elaborado o modelo de animação renderizado, foi feito um processo de aplicação para RV. Neste caso foram utilizados os mesmos modelos 3D colorizados e texturizados, no entanto foram utilizadas câmeras 360°. Esta utilização permite que quando o vídeo for animado em reprodução RV, o usuário possa olhar em todas as direções e ver o cenário em que está inserido. Assim foi desenvolvido esta aplicação e gerado um vídeo animado em 360° com aplicação para RV. Esta aplicação em RV já faz a preparação do vídeo para os óculos RV, onde a visualização é dividida em duas partes, uma para cada olho, proporcionando a sensação de imersão.

A figura 4 ilustra a animação renderizada para RV, já preparada para utilização em óculos RV.



**Figura 4.** Animação 3D renderizada para RV.

Fonte: Os próprios autores.

### 3.5 Interface de Utilização

Para testar a animação desenvolvida e apresentar o vídeo a alunos, professores, e experimentar a tecnologia de ensino foi utilizado um óculos de realidade virtual do tipo VR-Box. O modelo utilizado foi o multilaser js080, ilustrado na figura 5.



**Figura 5.** Óculos js080.

Fonte: Os próprios autores.



## 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a elaboração da animação gráfica RV e a utilização do óculos, foi possível fazer diversos tipos de análises quanto aos resultados.

A partir desta ferramenta para a disciplina de biologia, foi possível perceber que o conhecimento adquirido com ele é visual, sonoro e espacial, gerando uma imersão e fixação incrível do que está sendo aprendido, fazendo com que o aluno sinta um maior interesse para aprender. Ademais, trata-se de uma tecnologia que, por ser multifuncional pode ser também incluída para alunos com algum tipo de deficiências como a audição, já que esta suscetível a mudanças sendo possível a adição de legendas.

Essa ferramenta de auxílio ao ensino consegue estender as fronteiras do aprendizado de maneira natural, por se tratar de tecnologias com as quais os estudantes já estão acostumados a interagir e a grande vantagem é que essa interação se dá de maneira produtiva e educativa.

O protótipo desenvolvido foi testado com alunos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Mato Grosso através de uma demonstração para testes e análise quantitativa da aula, conforme ilustrado na figura 6.



**Figura 6.** Testes e Apresentação do protótipo.

Fonte: Os próprios autores.

Após realizar dos testes e demonstração do protótipo foi constatado que a tecnologia de realidade virtual pode contribuir significativamente, ao cativar e motivar os alunos a aprenderem disciplinas que no modo tradicional talvez não sejam tão motivantes. A maior parte das pessoas que testaram o protótipo para uma aula de biologia, gostaram dos resultados, e destacaram que a tecnologia combinada com as atividades de ensino,

proporcionaram maior vontade em estudar o tema que estava sendo exposto no vídeo.

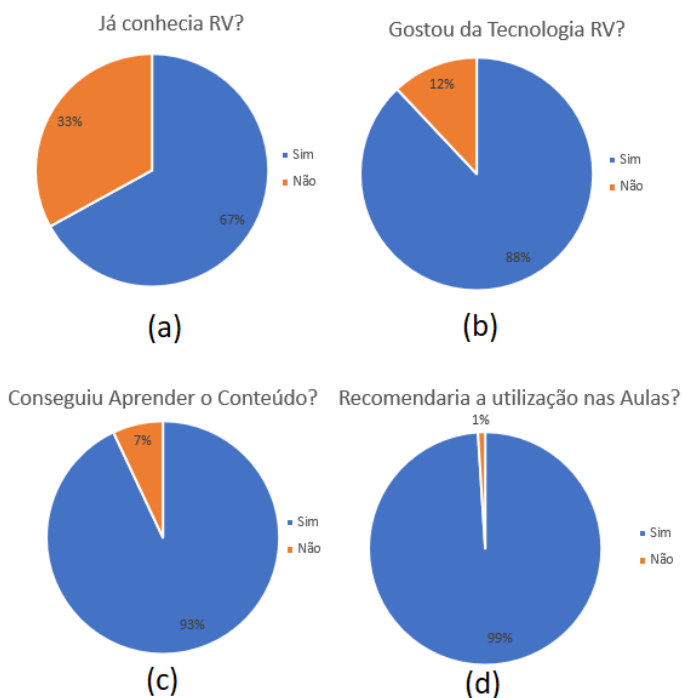
Por fim, destaca-se que esta metodologia de desenvolvimento pode ser aplicada para auxiliar no ensino de diferentes áreas do conhecimento, trazendo inovação e motivação para os alunos e professores. Assim a aplicação da realidade virtual no ensino é bastante pertinente e podem trazer resultados significativos. Ainda mais em um momento que a educação vive hoje, na modalidade remota. Onde o custo de se ter um óculos VR-Box é relativamente baixo.

#### 4.6 Análise Quantitativa

A partir dos testes realizados foi realizada uma pesquisa quantitativa. O protótipo foi testar por 33 pessoas, e foram feitas as 4 perguntas a seguir:

- Já conhecia RV?
- Gostou da tecnologia RV?
- Conseguiu aprender o conteúdo?
- Recomendaria a utilização nas aulas?

Os resultados foram organizados em formato de gráfico de pizza e são apresentados na figura 7.



**Figura 7.** Resultados da análise quantitativa.

Fonte: Os próprios autores.

Conforme observa-se na figura 7 (a), 67% das pessoas que testaram o protótipo já conheciam a tecnologia de realidade virtual. Na figura 7 (b), observa-se que 88% gostaram da experiência. Já a figura 7 (c) indica que 93% dos alunos que testaram conseguiram apreender o conteúdo. E por fim, na figura 7 (d), 99% das pessoas recomendaria a utilização nas aulas.

Vale destacar que este tipo de ferramenta tem muito potencial para despertar o interesse e valorizar o aprendizado dos alunos. Só o fato de estar tendo uma aula em um ambiente diferente do tradicional, motivou os alunos em participar. Assim é evidente que produtos deste tipo de pesquisa, são essenciais para a evolução e inovação da educação.

## 5 | CONCLUSÕES

Neste capítulo, foi apresentada a utilização de realidade virtual como tecnologia de informação e comunicação (TIC) no ensino médio. O uso da Realidade Virtual tem o princípio da interação e imersão do usuário a fim de fazê-lo ter um acesso fictício a um espaço inacessível. Por isso, é necessária sua idealização, e o estilo de aprender, levando em conta o processo de ensino-aprendizagem para que haja um melhor desenvolvimento do aluno, pois a RV pode se tornar um excelente recurso pedagógico.

Foi desenvolvido um modelo 3D animado em 360° RV do processo de fecundação. Tema clássico da biologia, e apresentado a alunos do ensino médio como uma aula de laboratório. Os resultados foram satisfatórios, pois 93% dos alunos atestaram conseguir aprender o conteúdo e 99% recomendariam a utilização desta ferramenta para aula de biologia, ao invés do método tradicionalmente utilizado.

Adicionalmente o baixo custo dos óculos RV e a grande compatibilidade com os smartphones atuais, mostram que a utilização da Realidade Virtual para fins educacionais não é uma barreira difícil de ser transposta. Por meio de aplicativos gratuitos, ou desenvolvidos, como neste projeto, e aliados a práticas de ensino planejadas e bem executadas, é possível explorar o potencial dessa tecnologia nas escolas, promovendo aulas mais dinâmicas, interessantes, participativas e conectadas com as tecnologias que envolvem a sociedade atualmente.

Por fim, conclui-se que a utilização da realidade virtual como ferramenta de auxílio ao ensino-aprendizado é extremamente eficiente, e pode contribuir com a inovação da educação, despertando o potencial dos alunos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso (IFMT) pelo apoio financeiro para esta pesquisa. O segundo, terceiro e quarto autor agradecem à Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de iniciação científica júnior. O primeiro autor agradece à

Pró-Reitoria de Pesquisa (PROPE) do IFMT pela concessão de uma bolsa de pesquisa (51/2020).

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, K. E-Book: Guia definitivo da Educação 4.0. Planeta Educação. 2019.

BRAGA, M. Realidade virtual e educação. Revista de Biologia e Ciências da Terra, v. 1, n. 1. P. 1-8, 2001.

BUCCIOLI, A. A. B.; ZORZAL, E. R.; KIRNER, C. Usando Realidade Virtual e Aumentada na Visualização da Simulação de Sistemas de Automação Industrial, 2015.

BURDEA, G.; COIFFET, P. Virtual Reality Technology. 2. ed. S.I: John Wiley & Sons, 2003.

BYRNE, C. Water on Tap: The Use of Virtual Reality as an Educational Tool. Washington University, 1995.

CETIC - Centro de Estudos Sobre as Tecnologias da Informação e da Comunicação. O uso de celular por alunos para a realização de atividades escolares, 2016. Disponível em: < <https://cetic.br/pesquisa/educacao/indicadores> > Acesso em: 05 de maio. de 2020.

DELINGETTE H., AYACHE N. Hepatic surgery simulation. ACM Communications. 48 (2), p. 31-36, 2005.

EDWARDS, T. Virtual Reality and Education. 1996. Acesso em: 5 ago. 2019.

GAETA, C.; MASETTO, M. Metodologias ativas e o processo de aprendizagem na perspectiva da inovação. Congresso internacional PBL 2010, São Paulo, fev. 2010.

HASSAN, E. B. Laboratório Virtual 3D para ensino de Redes de Computadores. XIV Simpósio Brasileiro de Informática na Educação, 2003.

JOHNSON K. et al. The validity of a virtual human experience for interpersonal skills education. Proc. SIGCHI Conf. on Human Factors in Computing Systems; 2007. p. 1049-1058.

KALAWSKY, R.S. Exploiting Virtual Reality Techniques in Education and Training: Technological Issues. SIMA, Support Initiative for Multimedia Applications. Loughborough, 1996.

KANEHIRA R., SHODA A. Development of an Acupuncture Training System Using Virtual Reality Technology. Proc. Fuzzy Systems and Knowledge Discovery Conference; pg. 665-668, 2008.

KIRNER, C. Sistemas de Realidade Virtual. Grupo de Pesquisa em Realidade Virtual (UFSCar), 1996. Acesso em: 5 ago. 2019.

KIRNER, C.; SISCOOTTO, R. Realidade Virtual e Aumentada: Conceitos, Projeto e Aplicações. Editora SBC - Sociedade Brasileira de Computação, Porto Alegre, 2007.

LUZ, M.; MENDONÇA, D.; SANTOS FILHO, C. Metodologias Ativas no Processo Ensino-Aprendizagem. In: Jornada Acadêmica Universo. 2018 1/2 v.1. Belo Horizonte, 2018.

MARÇAL, E.; ANDRADE, R.; RIOS, R. Aprendizagem utilizando Dispositivos Móveis com Sistemas de Realidade Virtual: Novas Tecnologias na Educação. CINTED-UFRGS, 2005.

MEIGUINS, B. S. et al. Tecnologia de Realidade Virtual para o Auxílio no Aprendizado em Sala de Aula para Circuitos Elétricos, 2015.

MALBOS A. N. A. et al. Aplicação da Realidade Aumentada para simulação de experimentos físicos em dispositivos móveis. 11th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV), 2014.

PANTELIDES, V. S. Reasons to Use Virtual Reality in Education. East Carolina University, Greenville, North Carolina, 1995.

PINHO, M. S. Realidade Virtual como Ferramenta de Informática na Educação. VII Simpósio Brasileiro de Informática na Educação, Belo Horizonte/MG. 1996.

SANT'ANA, A. S. C.; LIMA, A. W. B.; ALMEIDA, P. V. S. A educação imersiva em um tour virtual 360°: sobre percursos pedagógicos e computacionais iniciais na elaboração de uma proposta de objeto de aprendizagem. Brazilian Journal of Developemend. v. 6, n. 6, p. 5480-5493, 2019.

SILVA, A. M. P. Processos de ensino-aprendizagem na era digital. 2009. Disponível em: <<http://www.bocc.ubi.pt/pag/silva-adelina-processos-ensino-aprendizagem.pdf>>. Acesso em: 15 de abril de 2020.

SCHMITZ, Q. T.; KEMCZINSKI, A.; HOUNSELL, M. S. Realidade Virtual no Treinamento da Inspeção de Focos de Dengue. In: IV Workshop de Informática Aplicada à Saúde - CBCOMP, v. 1, p. 541-546, 2004.

SORENSEN T. S.; MOSEGAARD J. Virtual Open-Heart Surgery: Training Complex Surgical Procedures in Congenital Heart Disease. Proc. Siggraph Emerging Technologies. 2006.

VASCONCELOS, C.; PRAIA, J. F.; ALMEIDA, L. S. Teorias de aprendizagem e o ensino/aprendizagem das ciências: da instrução à aprendizagem. Psicologia escolar e educacional, Campinas, v. 7, n. 1, p. 11-19, jun. 2003.

VENDRUSCOLO, F. et al. Escola TRI-Legal: Um Ambiente Virtual como Ferramenta de Apoio ao Ensino Fundamental através de Jogos Educacionais Colabor@. Revista Digital da CVA, Ricesu, 2005.

XAVIER, M. F.; MURAKAMI, E. T.; NETO, I. V.; OLIVEIRA, P. R. A.; SANTIAGO, R. C.; CELESTINO, C. C. A realidade aumentada e virtual como métodos de ensino. Brazilian Journal of Developemend. v. 6, n. 12, p. 97362-97370, 2020.

# CAPÍTULO 18

## RESULTADOS DE CAMPANHAS DE MEDIÇÃO DE QUALIDADE DA ENERGIA EM SISTEMAS COM COMPENSADORES ESTÁTICOS DE REATIVOS - ANÁLISE DO IMPACTO DE OUTROS AGENTES NA AMPLIFICAÇÃO DE HARMÔNICOS EM SISTEMA DE 500 KV

Data de aceite: 02/08/2021

Data de submissão: 25/06/2021

### Nelson Clodoaldo de Jesus

GSI - ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA  
Taubaté (SP)

### João Roberto Cogo

GSI - ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA  
Taubaté (SP)

### Luis Fernando Ribeiro Ferreira

GSI - ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA  
Taubaté (SP)

### Luiz Marlus Duarte

GSI - ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA  
Taubaté (SP)

### Éverson Júnior de Mendonça

GSI - ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA  
Taubaté (SP)

### Leandro Martins Fernandes

GSI - ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA  
Taubaté (SP)

### Jesus Daniel de Oliveira

GSI - ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA  
Taubaté (SP)

**RESUMO:** Este trabalho apresenta uma avaliação dos resultados obtidos em campanhas de medição de qualidade da energia elétrica (QEE) na rede básica em 500 kV. Para esta análise, serão apresentados os resultados das campanhas

de medição relacionadas as condições de pré e pós-operação de um Compensador Estático de Reativos (CER) com potências nominais de -100 a +200 Mvar. A análise comparativa entre as medições evidencia uma significativa mudança nos comportamentos das distorções das tensões na segunda campanha, com variações intermitentes durante toda a operação, sendo caracterizada a presença de inter-harmônicos com frequências elevadas. Adicionalmente, apresentam-se os resultados da operação do equipamento, com comportamento adequado e características normais. Destaca-se que, apenas na última campanha de medição foram registrados indicadores atípicos e não esperados para o sistema em 500 kV, cujo comportamento não está diretamente relacionado à operação do equipamento de compensação, destacando-se a possível influência da entrada de geração eólica.

**PALAVRAS - CHAVE:** Compensador Estático de Reativos, Qualidade da Energia Elétrica, Campanhas de Medição, Harmônicos, Geração de Energia Eólica.

### RESULTS OF ENERGY QUALITY MEASUREMENT CAMPAIGNS IN SYSTEMS WITH STATIC REACTIVE COMPENSATORS - ANALYSIS OF THE IMPACT OF OTHER AGENTS ON THE AMPLIFICATION OF HARMONICS IN A 500 KV SYSTEM

**ABSTRACT:** This work presents an evaluation of the results obtained in electricity quality measurement campaigns (QEE) in the 500 kV basic grid. For this analysis, the results of measurement campaigns related to pre- and

post-operation conditions of a Static Reactive Compensator (CER) with nominal powers from -100 to +200 Mvar will be presented. The comparative analysis between measurements shows a significant change in the behavior of voltage distortions in the second campaign, with intermittent variations throughout the operation, characterized by the presence of high frequency interharmonics. Additionally, the results of the equipment operation are presented, with adequate behavior and normal characteristics. It is noteworthy that only in the last measurement campaign were atypical and unexpected indicators recorded for the 500 kV system, whose behavior is not directly related to the operation of the compensation equipment, highlighting the possible influence of the input of wind generation.

**KEYWORDS:** Reactive Static Compensator, Electric Power Quality, Measurement Campaigns, Harmonics, Wind Power Generation.

## 1 | INTRODUÇÃO

A conexão de cargas elétricas não lineares ao Sistema Interligado Nacional (SIN), tais como, sistemas de geração de energia eólica e fotovoltaica, compensadores estáticos de reativos (CER), etc, tem demandado a realização de estudos e medições para verificação dos possíveis impactos no sistema, com atenção especial para a análise da propagação de harmônicos.

Este trabalho apresenta uma avaliação das medições em um sistema de 500 kV. O primeiro monitoramento foi realizado na Rede Básica do SIN, utilizando os Transformadores de Potencial Capacitivos (TPCs) instalados no “bay” de conexão em 500 kV, antes da entrada em operação do CER. As medições tiveram como objetivo verificar o comportamento dos indicadores de QEE em comparação aos valores recomendados em (3). Após a instalação, comissionamento e operação do sistema de compensação do CER, realizou-se uma segunda medição que não foi considerada, entretanto, para a análise dos indicadores de QEE. Desta forma, uma terceira medição foi realizada para a campanha pós-operação e considerada como a segunda campanha de medição. Esta última campanha foi realizada no mesmo ponto de conexão e com o mesmo medidor de QEE (Dranetz PowerXplorer PX5).

Para a análise dos indicadores de QEE são avaliados os resultados das medições nas condições sem e com a operação do CER e, para esta última condição, considerando ainda as faixas de controle de potência reativa de -100 a 200 Mvar. Somente na última medição, onde o sistema já estava operando em anel, foram verificados resultados com forte degradação e distorções das tensões medidas, induzindo a uma reflexão quanto aos resultados e o comportamento resultante, considerado anormal e inesperado.

## 2 | CAMPANHAS DE MEDIÇÃO DE QEE

Conforme estabelecem os Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), as campanhas de medição são realizadas por um período mínimo

de 7 dias consecutivos. No caso em análise, foram realizadas três medições, sendo então utilizadas a primeira e a terceira como amostrais para obtenção dos indicadores de referência e consideração dos dados para composição dos resultados sob a condição de pré-operação e pós-operação do CER. Devido aos resultados anormais obtidos na terceira medição, apresentam-se também o comportamento do sistema durante a operação do CER na segunda medição, conforme (4), (2) e (5). Todas as medições foram obtidas a partir dos mesmos sinais dos transdutores de tensão (TPCs), instalados no lado de 500 kV de uma subestação no Estado da Bahia, localizada próxima a diversos complexos eólicos que atualmente se encontram em operação.

O equipamento de compensação de reativos é formado por Reatores Controlados por Tiristores (RCT), Capacitores Chaveados a Tiristores (CCT) e Filtros de Harmônicos de 5ª ordem (FH5-1 e FH5-2) e 7ª ordem (FH-7), instalados no secundário do banco de transformadores com unidades de 45/55/67 MVA, em 500/30 kV, conforme Figura 1 a seguir. Os resultados obtidos nas campanhas de medição (pré e pós-operação) foram corrigidos em função das respostas em frequência para cada fase.

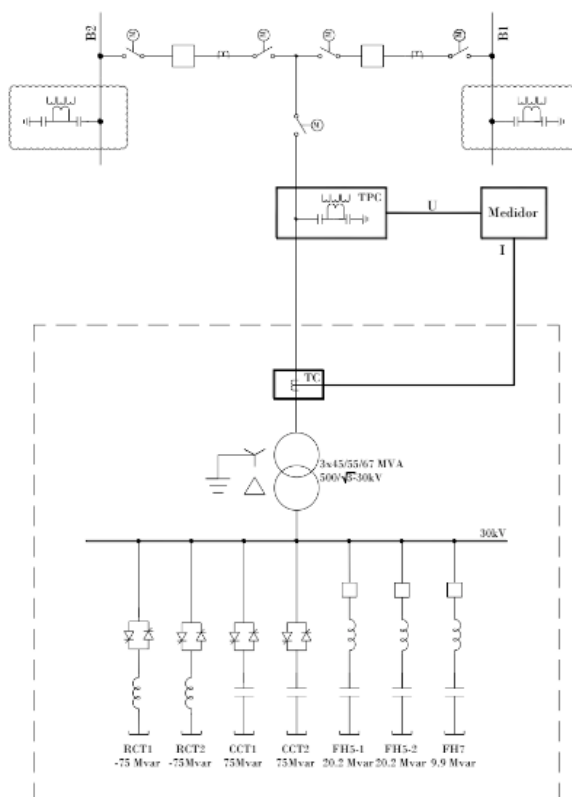


Figura 1 - Diagrama unifilar do Compensador Estático de Reativos (CER)



### 3 I RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE HARMÔNICOS

Os resultados obtidos nas três medições realizadas e as correspondentes análises são apresentadas nos itens a seguir.

#### 3.1 Primeira Campanha de Medição

A Figura 2 (a) mostra o comportamento das distorções médias das tensões no período de 02 a 12/08/17, com valores adequados e inferiores ao limite recomendado de 3%, conforme (3). A Figura 2 (b) apresenta os resultados já corrigidos a partir dos ganhos do TPC, sem a operação do CER no sistema, onde os principais componentes observados se referem aos de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens e com distorções totais próximas a 2,3%, portanto, aproximadamente 77% do limite de 3%. Os limites individuais também não foram violados nesta primeira campanha de medição.

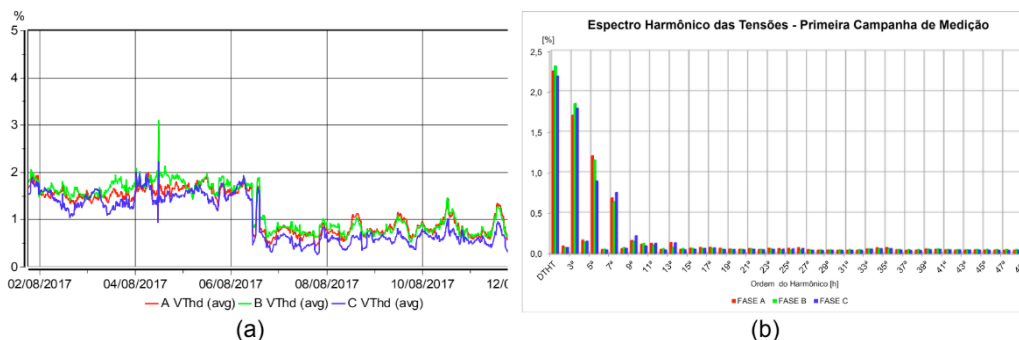


Figura 2 - Primeira campanha: comportamento das distorções das tensões (a) e indicadores das distorções e componentes harmônicos (b)

#### 3.2 Campanha de Medição Intermediária

A Figura 3 mostra o comportamento das distorções médias das tensões, no período de 18 a 27/10/17, resultando também em valores inferiores aos limites recomendados. Com a entrada em CER dos respectivos filtros, verificou-se até mesmo uma redução das distorções neste intervalo de medição, comparando com o monitoramento realizado antes de sua entrada em operação, conforme a Figura 2 (a).

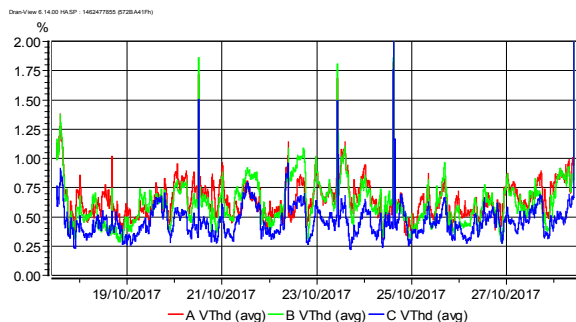


Figura 3 - Campanha intermediária: comportamento das distorções das tensões

### 3.3 Segunda Campanha de Medição

A Figura 4 (a) mostra o resultado das distorções médias das tensões, no período de 25/02 a 03/03/18, com resultados fora dos padrões para sistemas de 500 kV e, portanto, atípicos e inesperados, além de variações repetitivas e valores superiores aos limites de referência.

São apresentados ainda, na Figura 4 (b), os resultados dos indicadores, também corrigidos com as respostas em frequência dos TPCs, apresentando valores superiores aos limites e, sobretudo, características atípicas, pois os componentes preponderantes estão nas faixas próximas a 33<sup>a</sup>, 34<sup>a</sup>, 39<sup>a</sup> e 40<sup>a</sup> ordens, mostrando claramente duas bandas predominantes. Ressalta-se que tais componentes não tem relação direta com a operação e características de compensadores estáticos convencionais, pois seu princípio de funcionamento é a base de tiristores.

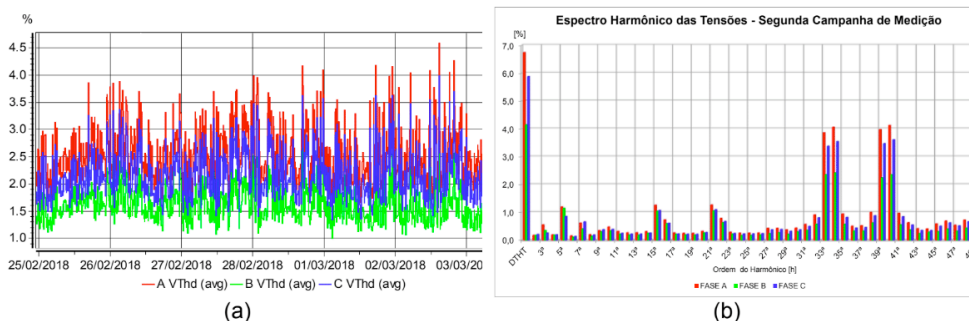


Figura 4 - Segunda campanha: comportamento das distorções das tensões (a) e indicadores das distorções e componentes harmônicos (b)

## 4 | ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS MEDIÇÕES

Este item apresenta uma análise comparativa entre os resultados obtidos nas medições de QEE em termos dos indicadores quanto às distorções devido aos componentes harmônicos, considerando a primeira campanha de medição, sem a operação do CER, e mais duas condições do sistema interligado, já com a conexão do CER, atuando no controle de potência reativa e nas faixas limites do equipamento.

### 4.1 Resultados dos Indicadores das Campanhas de Medição

A comparação entre os indicadores das distorções e componentes individuais da tensão da fase A, para as duas campanhas de medição, está apresentada na Figura 5 com notável e significativa mudança de comportamento. Este fato deve servir como exemplo, pois, não necessariamente, campanhas de medição refletem os comportamentos e efeitos de um único equipamento, especialmente quando ocorre ampliações dos valores de distorções e aumento de outras fontes intermitentes próximas ao sistema elétrico em análise.

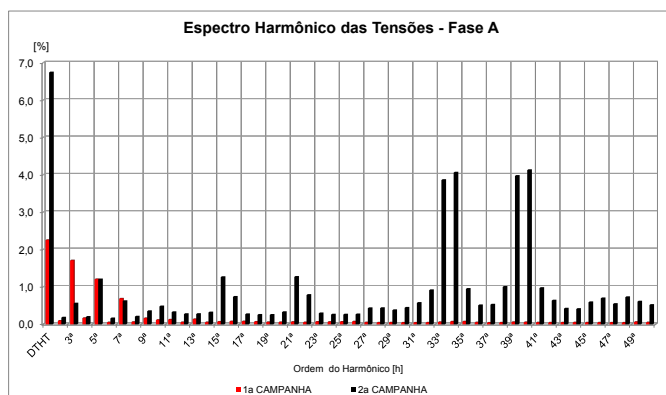


Figura 5 - Comparação entre os indicadores de harmônicos da Fase A

### 4.2 Formas de Onda e Componentes Harmônicos sem O Cer Na Primeira Campanha de Medição

As formas de onda típicas verificadas durante a primeira campanha de medição estão mostradas na Figura 6, sendo o perfil harmônico composto por componentes de baixa ordem, como os harmônicos de 3a, 7a e 5a ordens, respectivamente.

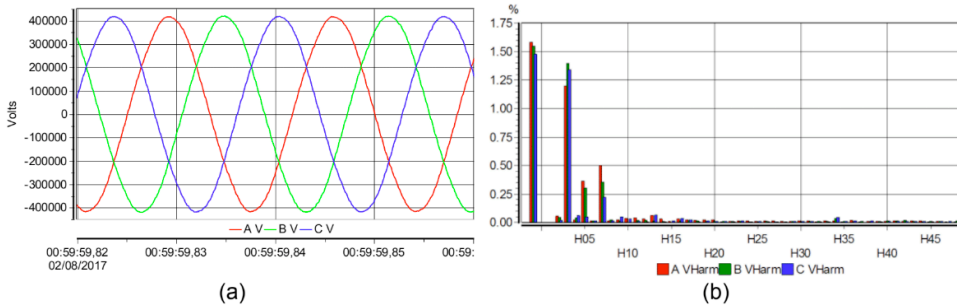


Figura 6 - Formas de onda das tensões (a) e correspondentes espectros harmônicos (b) na medição pré-operacional do CER

### 4.3 Formas de Onda e Componentes Harmônicos com O Cer em Operação na Medição Intermediária

Este item apresenta os resultados das medições quando não foram caracterizadas variações significativas nos indicadores, sendo que as características típicas para operação nos valores limites de potência reativa podem ser comparadas a seguir.

#### 4.3.1 Operação do Cer Com -100 Mvar

A Figura 7 (a) apresenta as formas de onda das tensões e correntes obtidas durante o teste com controle no modo de potência reativa, para um ajuste de referência em -100 Mvar. Na Figura 7 (b) é apresentado o espectro harmônico das tensões do sistema nesta condição operacional, resultando em uma distorção total em torno de 0,6% e componentes individuais de 5<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens como os mais preponderantes.

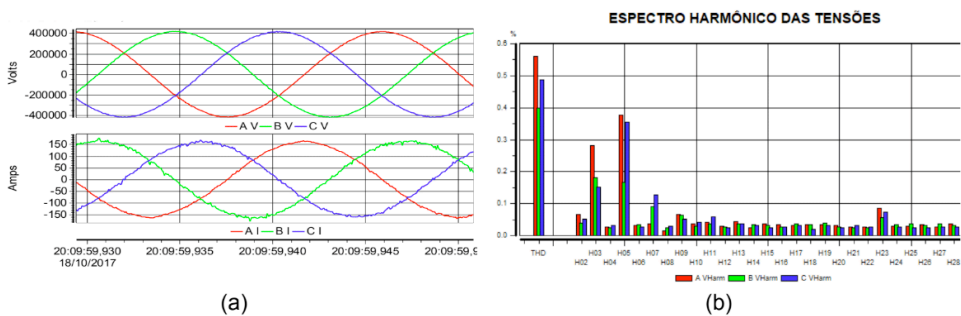


Figura 7 - Operação do CER com -100 Mvar: formas de onda das tensões e correntes (a) e espectro harmônico das tensões (b)

#### 4.3.2 Operação do Cer Com +200 Mvar

A Figura 8 (a) apresenta o resultado obtido durante o teste com controle no modo de potência reativa, para um ajuste de referência em + 200 Mvar e, com base na Figura 8 (b), pode-se inferir que também nesta operação do CER, os indicadores de QEE foram

plenamente adequados com uma distorção total em torno de 0,8%.

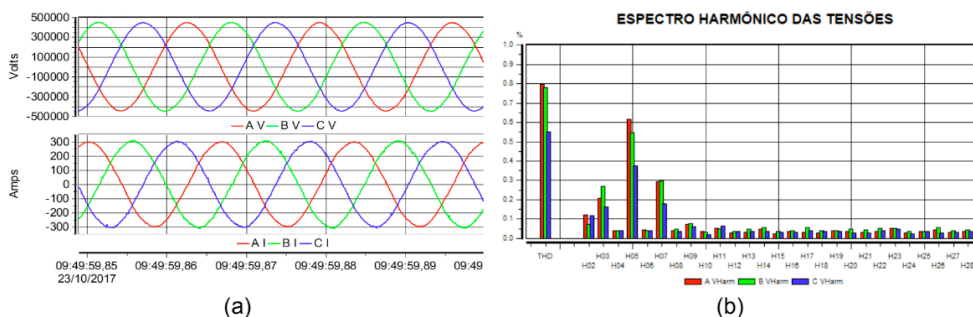


Figura 8 - Operação do CER com +200 Mvar: formas de onda das tensões e correntes (a) e espectro harmônico das tensões (b)

#### 4.4 Formas de onda e componentes harmônicos com o cer em operação na segunda campanha de medição

Nesta medição, as formas de onda das tensões e correntes apresentam características bem distintas das obtidas anteriormente com a operação do CER, induzindo ao entendimento de um possível efeito externo devido à entrada em operação de agentes de geração eólica no sistema eletricamente próximo.

##### 4.4.1 Operação do Cer Com -100 Mvar

A Figura 9 (a) apresenta o resultado obtido durante o teste com operação no modo de controle de potência reativa, para um ajuste de referência em -100 Mvar. Os espectros harmônicos das tensões para esta condição de operação estão mostrados a seguir, destacando-se componentes harmônicos preponderantes de altas frequências, conforme registro da Figura 9 (b).

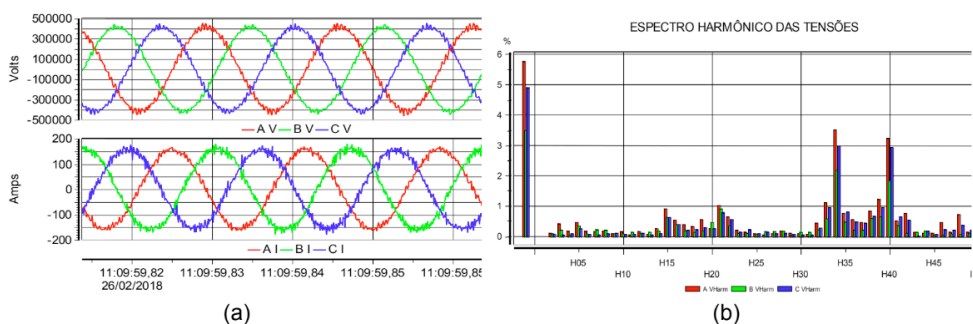


Figura 9 - Operação do CER com -100 Mvar: formas de onda das tensões e correntes (a) e espectro harmônico das tensões (b)

#### 4.4.2 Operação do Cer Com +200 Mvar

A Figura 10 apresenta o resultado obtido durante o teste com controle no modo de potência reativa, para um ajuste de referência em +200 Mvar. Os perfis harmônicos registrados para as tensões estão apresentados em seguida, indicando os mesmos componentes atípicos, ou seja, 32ª e 38ª ordens.

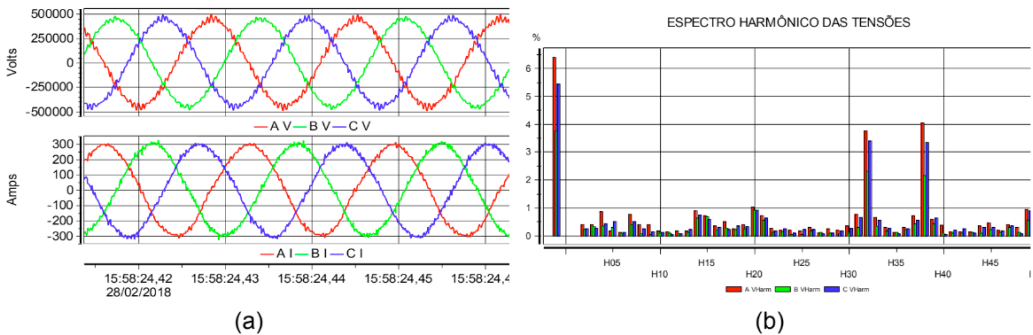


Figura 10 - Operação do CER com +200 Mvar: formas de onda das tensões e correntes (a) e espectro harmônico das tensões (b)

## 5 | REGISTROS DE OSCILAÇÕES, AMPLIFICAÇÕES E PRESENÇA DE INTER-HARMÔNICOS NAS MEDIÇÕES DE QEE

Este item apresenta uma descrição do comportamento intermitente, com identificação de variações nas distorções das tensões devido à presença de inter-harmônicos durante as medições realizadas especificamente na segunda campanha de medição. Além das variações e elevadas distorções nas formas de onda das tensões, foram também registradas oscilações de harmônicos e a presença de componentes do tipo inter-harmônicos, próximos aos harmônicos preponderantes registrados e representativos para esse período de monitoramento. Quando o medidor de QEE utilizado foi programado e instalado para o teste mínimo de verificação das tensões (uma fase em todos os canais), já foram observadas variações significativas das distorções. Os valores mínimos, médios e instantâneos das distorções da fase A estão apresentados na Figura 11, onde se percebe claramente variações periódicas nas distorções das tensões medidas durante o início e realização da última campanha de medição de QEE no sistema em 500 kV.

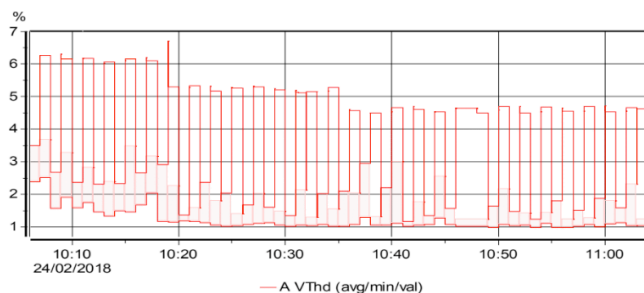


Figura 11 - Comportamento das distorções mínimas, médias e instantâneas

A Figura 12 (a) ilustra as formas de onda obtidas durante um determinado instante no período inicial desta campanha de medição da QEE, enquanto na Figura 12 (b) é apresentado o espectro harmônico da tensão, resultando em uma distorção total de 6%, ou seja, o dobro do valor considerado como limite para esse sistema.

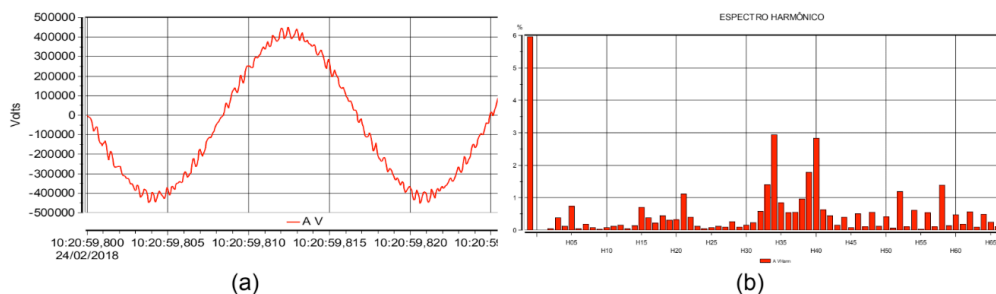


Figura 12 - Formas de onda da tensão da Fase A (a) e o correspondente espectro harmônico (b) durante a segunda campanha

A Figura 13 ilustra outro exemplo da análise para um determinado instante no período inicial desta campanha de medição da QEE, destacando-se o espectro harmônico total registrado nas tensões (“fullspectra”).

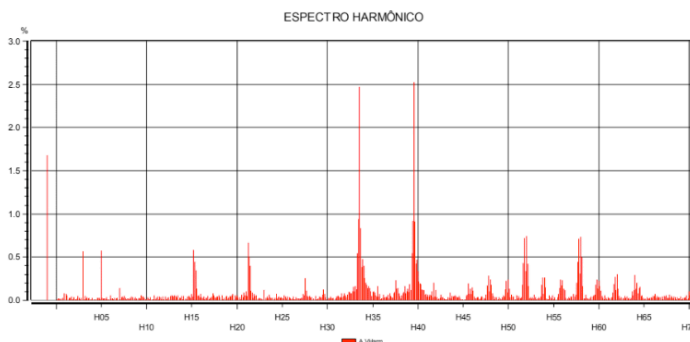


Figura 13 - Espectro harmônico da tensão da Fase A durante a segunda campanha

Na análise das formas de onda foram observadas frequências próximas as mostradas anteriormente, evidenciando a presença de componentes não múltiplos da fundamental (inter-harmônicos), com valores significativos na decomposição dos componentes individuais. Destaca-se que a presença de harmônicos não característicos e também de inter-harmônicos, normalmente não estão relacionadas a operação e a injeção de correntes pelo sistema do CER. De forma repetitiva, foram observadas variações nas distorções e tais características permaneceram durante todo o período dessa campanha de medição, ou seja, comprovou-se que o sistema atualmente em operação apresenta comportamento intermitente, bem como componentes de altas frequências registradas nas tensões medidas no ponto de conexão com a rede básica, como destacado na Figura 14 (a) e no respectivo espectro harmônico total ilustrado na Figura 14 (b).

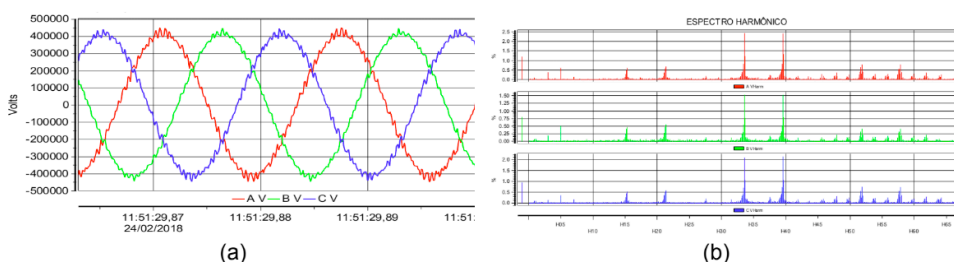


Figura 14 - Formas de onda (a) e espectro harmônico das tensões (b) durante a segunda campanha

## 6 | RESULTADOS DE MEDIÇÕES COM OUTROS INSTRUMENTOS

Diante da constatação de comportamento inesperado e completamente atípico para esta classe de tensão, incluindo também a observação pelo “display” do equipamento do tipo classe A, utilizado nas respectivas campanhas de medição de QEE, foram obtidas algumas amostras no painel do registrador de perturbações (RDP), indicando também a presença de componentes não característicos. Além do procedimento anterior de registro e verificação das formas de onda das tensões pelo RDP, conforme a Figura 15, foi realizada ainda uma avaliação através do osciloscópio localizado na subestação, sendo também comprovada a sobreposição de componentes de altas frequências. Portanto, três distintos tipos de equipamentos de medição mostraram que os sinais derivados dos TPCs apresentavam elevadas distorções nas formas de onda utilizadas para verificação dos indicadores de QEE no sistema elétrico em análise com a operação do CER.



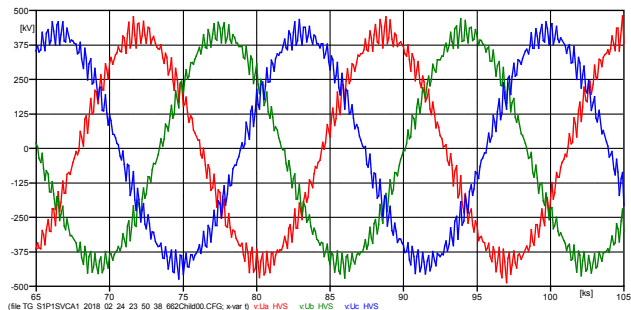


Figura 15 - Formas de onda das tensões obtidas pelo registro do RDP

## 71 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou os comportamentos e os indicadores de qualidade das tensões no referido sistema durante a realização de campanhas de medição. Com base nesta análise pode-se inferir que as distorções observadas nas tensões para a condição atual de operação não apresentam correlação direta com a entrada do CER. Do ponto de vista da operação do CER, destaca-se que os principais componentes harmônicos das correntes injetadas normalmente seriam os de 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens, sendo este o motivo pelo qual existem os filtros de harmônicos, sintonizados próximos a estas frequências. As distorções registradas não têm como origem os chaveamentos dos tiristores utilizados no controle e operação do CER, pois conforme resultados obtidos na medição intermediária, os principais componentes harmônicos das tensões não são os injetados pelo equipamento de compensação estática instalado em 500 kV.

Para comprovação categórica do comportamento do sistema, foi sugerido realizar medições adicionais, sem a operação do CER, bem como identificar as possíveis interferências no sistema. Considerando as divergências entre os resultados obtidos na primeira e segunda campanha oficial de medição da QEE, configurações do sistema estabelecidas entre ambos os períodos e as condições de geração dos parques eólicos da região, a comparação para verificar possíveis impactos da operação do CER ficou prejudicada, com os resultados que indicaram forte degradação das tensões no referido ponto de conexão ao SIN em 500 kV.

Um ponto a ser explorado nesta análise sob o aspecto de injeção e amplificação de harmônicos e variações intermitentes devido à presença de inter-harmônicos nos sinais das tensões medidas se refere às possíveis influências de outros agentes conectados ao mesmo sistema. A combinação entre a rede e a injeção de harmônicos pelos sistemas de geração intermitentes, pode resultar em um aumento das distorções das tensões devido às possíveis amplificações, sendo este um exemplo da complexidade envolvida com sistemas elétricos, pois não se pode afirmar categoricamente sobre distorções que dependem de vários agentes conectados ao mesmo tempo e do comportamento dinâmico do sistema de

potência. Como verificado também nas referências internacionais, oscilações dinâmicas estão ocorrendo em outras instalações com ampliações das distorções das tensões (1).

Diante do exposto e dos resultados apresentados, entende-se como necessário refinar os estudos de harmônicos, de forma que se considerem os reais efeitos de chaveamentos de fontes renováveis e seu impacto nos sistemas elétricos, como no caso apresentado nesta análise, baseada em todos os procedimentos e diretrizes para a realização de campanhas de medição de QEE, relacionadas à conexão de cargas não lineares à rede básica do SIN.

Conclui-se que campanhas de medição podem não retratar o efeito exato e o comportamento de um único equipamento no sistema, especialmente quando da presença de ampliações, bem como do aumento expressivo de parques eólicos conectados ao sistema onde foram realizadas as medições. Destaca-se que o tipo de comportamento registrado provavelmente esteja relacionado ao aumento do número de máquinas e das potências injetadas pelos parques eólicos circunvizinhos ao sistema em análise, devido a sua característica de funcionamento intermitente e operação através de controle do sistema com inversores de frequência do tipo Modulação por Largura de Pulsos (PWM). Aliás, as distorções e características verificadas nas tensões do sistema apresentam comportamento similar, coincidindo com a injeção de componentes de altas frequências em outras instalações de parques eólicos, sobretudo em função das frequências de chaveamentos dos inversores utilizados nos sistemas de controles dos aerogeradores e possíveis ampliações ou ressonâncias em altas frequências (HFR) (1) e (6).

## REFERÊNCIAS

(1) Bollen, M.; Yang, K.L.; “**Another Aspect of the Interaction Between Wind Power Installations and the Grid**”, CIREN 22nd - International Conference on Electricity Distribution, Stockholm, 10-13 June 2013.

(2) Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) - **Definição das Metodologias e Procedimentos Necessários às Campanhas de Medição dos Indicadores de Desempenho** - ONS RE 2.1 028/2005 - Revisão 4, 14/12/07.

(3) Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) - **Gerenciamento dos Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica da Rede Básica** - Submódulo 2.8 - Revisão 2016.12 - Data de Vigência 01/01/17.

(4) Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) - **Instruções para Realização de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Novos Acessos à Rede Básica para Parques Eólicos, Solares e Consumidores Livres** - ONS NT 009/2016 - Revisão 01, de abril de 2016.

(5) Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), **Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão às Instalações de Transmissão**. Submódulo 3.6, Revisão 2016.12, Data de Vigência 01/01/2017.

(6) Song, Y., Wang, X., Blaabjerg, F.; “**High Frequency Resonance Damping of DFIG based Wind Power System under Weak Network**”. IEEE Transactions on Power Electronics, 32 (3), 1927-1940, 2017.

## SIMPLIFIED NUMERICAL MODEL FOR ANALYSIS OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE BEAMS WITH PARTIAL INTERACTION

*Data de aceite: 02/08/2021*

### **Samuel Louzada Simões**

Universidade Federal de Lavras  
Departamento de Engenharia  
Lavras – Minas Gerais  
<http://lattes.cnpq.br/5482470630187719>

### **Tawany Aparecida de Carvalho**

Universidade Federal de Lavras  
Departamento de Engenharia  
Lavras – Minas Gerais  
<http://lattes.cnpq.br/7634540054180568>

### **Ígor José Mendes Lemes**

Universidade Federal de Lavras  
Departamento de Engenharia  
Lavras – Minas Gerais  
<https://orcid.org/0000-0002-0458-0335>

### **Rafael Cesário Barros**

Universidade Federal de Ouro Preto  
Departamento de Engenharia Civil  
Ouro Preto – Minas Gerais  
<https://orcid.org/0000-0002-9252-1772>

### **Ricardo Azoubel da Mota Silveira**

Universidade Federal de Ouro Preto  
Departamento de Engenharia Civil  
Ouro Preto – Minas Gerais  
<https://orcid.org/0000-0001-8955-0356>

computational methodologies for the accurate measurement of structural behavior. With good numerical efficiency, the Refined Plastic Hinge Method also stands out for its simplicity. This methodology will be used considering rotational pseudo-springs at the finite elements ends for the simulation of plasticity. However, this approach was initially developed for isotropic materials with elastic-perfectly-plastic behavior, implying loss of precision in the analysis of structures containing concrete in their composition. Furthermore, the effects of partial interaction can not be simulated by the inherently rotational behavior of the pseudo-springs. Thus, to corrected reported problems, the introduction of the cracking and partial interaction effects will be approached through effective moment of inertia defined by normative criteria for partial shear connection and using the Patel model for cracking simulation in concrete slab. In addition, geometric non-linearity will be introduced to the model considering a co-rotational formulation, dismembering from the rigid body displacements those that actually cause deformation to the element. The validation of the implementations will be done based on the comparison with numerical and experimental data present in the literature. The results converged to the expected behavior, capturing cracking, elastic and plastic limit satisfactorily.

**KEYWORDS:** Partial interaction, steel-concrete composite beams, cracking, concentrated plasticity.

**ABSTRACT:** The present study refers to the composite steel-concrete beams analysis considering the various nonlinear effects. These effects generate complexity to the design requiring

## MODELO NUMÉRICO SIMPLIFICADO PARA A ANÁLISE DE VIGAS MISTAS AÇO-CONCRETO COM INTERAÇÃO PARCIAL

**RESUMO:** O presente estudo se refere à análise de vigas mistas aço-concreto considerando os diversos efeitos não lineares. Tais efeitos geram grande complexidade ao projeto exigindo metodologias computacionais para a aferição precisa do comportamento estrutural. Com boa eficiência numérica, o Método da Rótula Plástica Refinado, se destaca também pela sua simplicidade. Utilizou-se essa metodologia considerando molas rotacionais fictícias nas extremidades dos elementos finitos para a simulação da plasticidade. Entretanto, essa abordagem foi inicialmente desenvolvida para materiais isotrópicos com comportamento elasto-plástico perfeito, implicando em perdas de precisão na análise de estruturas que contém concreto em sua composição. Além disso, os efeitos da interação parcial não podem ser simulados pelo comportamento inerentemente rotacional das molas. Desse modo, para correção dos problemas observados, a introdução dos efeitos da fissuração e da interação parcial foi abordada via momento de inércia efetivo definido por critérios normativos no caso da interação parcial, e utilizando o modelo de Patel para a simulação da fissuração na laje componente da viga mista. Ademais, a não linearidade geométrica foi introduzida ao modelo considerando uma formulação corrotacional, desmembrando dos deslocamentos de corpo rígido aqueles que realmente causam deformação ao elemento. A validação das implementações foi feita com base na comparação com dados numéricos e experimentais presentes na literatura. Os resultados obtidos convergiram para o comportamento esperado, captando a fissuração, o limite elástico e o limite plástico satisfatoriamente.

**PALAVRAS - CHAVE:** Interação parcial, vigas mistas aço-concreto, fissuração, plasticidade concentrada.

### 1 | INTRODUCTION

Steel and concrete are materials that have plenty of applications in the construction area, whereas both satisfy several structural problems because of their properties (mechanical and physical) and can be produced relatively easily. Structures that are formed by the combination of both show an improvement in diverse areas, as such resistant capacity, rigidity, protection of metallic elements, among others (LEMES, 2018). Steel-Concrete composites structures have a high degree of complexity to be calculated and analyzed. Thus, computational methodologies are the best option to overcome this problem (LEMES, 2018; LIEW et al., 2001), because it has a design code simplification (ABNT, 2008), making it easier check the safety of the structure.

The Refined Plastic Hinge Method (LEMES et al., 2018) is one of the methods available to have an efficient analysis, it consists in dealing with the plasticity in a concentrated form, several papers evaluate the inelastic effect through this method (LI et al., 2015; LEMES et al., 2016; LEMES et al., 2017). RPHM consist in the insertion of a fictional spring in the nodal point of study, which will simulate the nonlinear effects of the material degradation.

Patel et al. (2015) introduced a new approach to estimate the moment of inertia of reinforced concrete structures, through an explicit equation was possible to observe

an improved behavior adjustment of reinforced concrete beams when compared with experimental values.

This study aims to use the equation provided by Patel et al. (2015) to study the behavior of steel-concrete composite beams with partial shear connections together with computational analysis, comparing with experimental values existing in the literature and getting quick answers without losing accuracy.

## 2 | FINITE ELEMENT FORMULATION

In the present work, the displacement-based formulation with concentrated plasticity in the nodal points is applied. In this case, the axial and flexural stiffness degradation occurs exclusively at the FE nodes. Then, the method is presented, introducing the material nonlinearity only. Some considerations and simplifications of this formulation can be seen in (LEMES, 2018; LEMES et al., 2018).

In the structural system modelling, the hybrid beam-column finite element of length  $L$ , delimited by nodal points  $i$  and  $j$  (Figure 1), is used. This element has zero-length pseudo rotational springs at its ends, which are responsible for the plasticity simulation by means of the parameter  $S_p$ , discussed in Section 3. The finite element is referenced to the co-rotational system where the degrees of freedom are the rotations at nodes  $i$  and  $j$ , given by  $\theta_i$  and  $\theta_j$ , and the axial displacement in  $j$ ,  $\delta$ . The terms  $M_p$ ,  $M_j$  and  $P$  represent the bending moments and the axial force in the respective degrees of freedom.

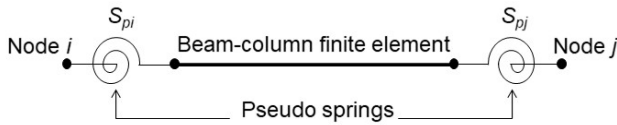


Figure 1. Finite element with pseudo-springs

The force-displacement relationship can be writing as:

$$\begin{Bmatrix} \Delta N \\ \Delta M_{pi} \\ \Delta M_{pj} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 \\ 0 & S_{pi} - \frac{S_{pi}^2 (S_{pj} + k_{33})}{\beta} & \frac{S_{pi} k_{23} S_{pj}}{\beta} \\ 0 & \frac{S_{pj} k_{32} S_{pi}}{\beta} & S_{pj} - \frac{S_{pj}^2 (S_{pi} + k_{22})}{\beta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \theta_{pi} \\ \Delta \theta_{pj} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

in which  $\beta = (S_{pi} + k_{22})(S_{pj} + k_{33}) - k_{32} k_{23}$ .

The terms  $k_{11}$ ,  $k_{22}$ ,  $k_{23}$ ,  $k_{32}$ , and  $k_{33}$  are components of the beam-column stiffness matrix element, without the pseudo-springs, described as (LEMES, 2018):

$$\begin{aligned}
 k_{11} &= \frac{E_s A}{L} & k_{22} &= \frac{E_s (3I_{eff,i} + I_{eff,j})}{L} \\
 k_{23} = k_{32} &= \frac{E_s (I_{eff,i} + I_{eff,j})}{L} & k_{33} &= \frac{E_s (I_{eff,i} + 3I_{eff,j})}{L}
 \end{aligned} \tag{2}$$

where  $E_s$  is the steel modulus of elasticity,  $A$  is the homogenized area of the section,  $I_{eff}$  is the modulus of inertia as discussed on Section 4, measured in nodes  $i$  and  $j$ , and  $L$  is the finite element length.

### 3 I PSEUDO SPRINGS FLEXURAL STIFFNESS

The limits of uncracked, elastic or plastic states are defined by the by the moment-curvature relationship (LEMES, 2018). In this nonlinear procedure, the initial cracking moment  $M_{cr}$ , the initial yield moment  $M_{er}$  and the full yield moment  $M_{pr}$  can be easily obtained.

According to the classical RPHM, three equations define the pseudo-spring stiffness for the regions showed in Figure 2. In regions 1 and 2, it is observed that the section is in an elastic regime. In regions 3 and 4, there can be noticed that the section is in a stiffness degradation process due to plastic strains. And finally, for when the fully plastified section occurs (region 5). For a given axial force-bending moment combination,  $S_p$  is defined as follow:

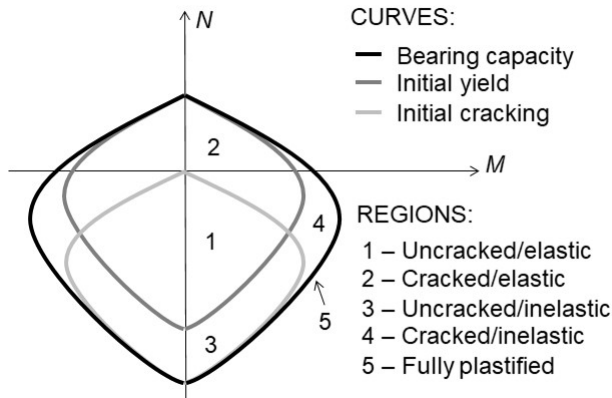


Figure 2. Interaction curves and behavior limits of the cross sections.

$$\begin{aligned}
 \text{if } M \leq M_{er} : & \quad S_p = 1 \times 10^{10} \\
 \text{if } M_{er} < M \leq M_{pr} : & \quad S_p = \frac{E_s I_{eff}}{L} \left( \frac{M_{pr} - M}{M - M_{er}} \right) \\
 \text{if } M_{pr} \leq M : & \quad S_p = 1 \times 10^{-10}
 \end{aligned} \tag{3}$$

in which  $L$  is the finite element length and  $E_s I_{eff}$  is the section's flexural stiffness, considering the cracking, as discussed below.

Note that, by the value described in Eq. 3, there is no possibility of simulating cracking

and partial shear connection in the elastic regime. This adjustment is made in the following section.

#### 4 | MOMENT OF INERTIA

Patel et al. (2015) proposed an explicit equation for the effective moment of inertia evaluation of RC sections in a cracking state. The effective moment of inertia,  $I_{eff,c}$  is given by:

$$I_{eff,c} = \frac{3I_c}{1 + e \left[ 7.4688 + \sum_{k=1}^6 \left( \frac{a_k}{1 + e^{H_k}} \right) \right]} \quad (4)$$

where:

$$H_k = b_k \chi_t + c_k \frac{I_{cr}}{I_c} + d_k \frac{M_{cr}}{M} + e_k \quad (5)$$

being  $M_{cr}$  and  $M$ , respectively, the initial cracking bending moment and the bending moment acting on the section,  $I_c$  is the intact section moment of inertia,  $I_{cr}$  is the cracked moment of inertia of the section evaluated in the critical point of moment-curvature relationship (LEMES, 2018),  $a_k$ ,  $b_k$ ,  $c_k$ ,  $d_k$  and  $e_k$  described in the Table 1 and  $\chi_t$  the rate of tensile reinforcement bars.

Parameter	$k$					
	1	2	3	4	5	6
$a$	8.7116	-0.3754	11.6985	-10.7167	0.6177	22.9397
$b$	-0.1978	4.3806	2.8322	3.0191	10.1889	-3.7310
$c$	1.2333	-22.0048	-4.1654	-4.3927	-15.7592	5.4520
$d$	0.0011	-0.1823	9.4775	9.7598	5.0682	-0.0189
$e$	-0.0386	6.2396	-6.7756	-7.1914	-3.2443	-2.9660

Table 1. Parameters of Equations (4) and (5)

Considering the partial action between concrete slab and steel section, the effective moment of inertia,  $I_{eff}$  can be determined as a directly function of degree of interaction,  $n_r$ . Thus (ABNT, 2008):

$$I_{eff} = I_{steel} + \sqrt{n_i} (I_{tr} - I_{steel}) \quad (6)$$

in which  $I_{steel}$  and  $I_{tr}$  are moment of inertia of steel and homogenized cross sections, respectively. The homogenized moment of inertia is calculated by the direct relation of  $I_{eff,c}$  and  $I_{steel}$

## 5.1 NUMERICAL APPLICATION

In this section the numerical procedure described in this paper will be tested. Chapman and Balakrishnan (1964) tested simply supported composite beams with partial interaction. In this analysis, the E1 beam (CHAPMAN AND BALAKRISHNAN, 1964), illustrated in Fig. 3, is simulated using the proposed formulation. In this same figure, loads, geometry, FE meshes and the cross-section are showed. The partial shear connection is made by equally spaced 50 rows with a couple of stud-bolt connectors per row. The material data of this beam are presented in Table 2.

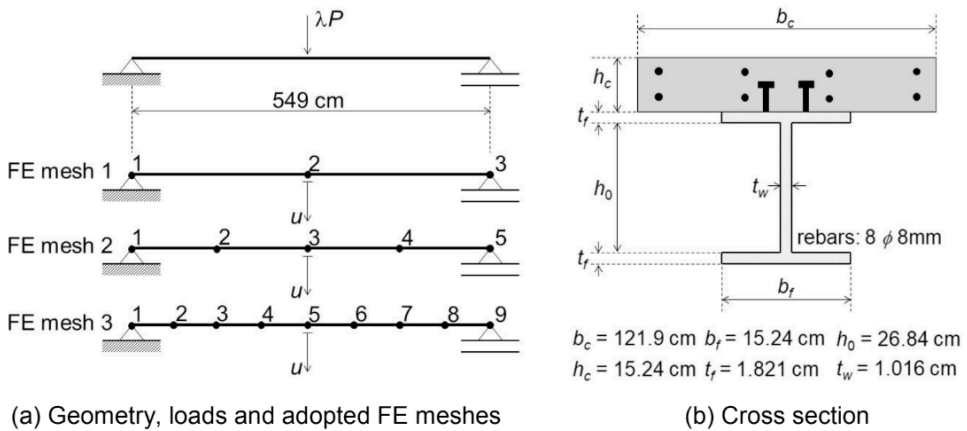


Figure 3. Simply supported beam with partial shear connection

Concrete			Connectors	Steel		Rebars	
$f_c$	$\varepsilon_{ci}$	$\varepsilon_{cu}$	$\eta_i$	$f_y$	$E_s$	$f_{yr}$	$E_{sr}$
3.268	-0.0022	-0.00395	0.929	25.82	20200	32	20500

Table 2. Material data of simply supported beam with partial interaction (in kN, cm).

In Figure 4 the equilibrium paths for finite element meshes 1,2 and 3 are plotted and compared with the experimental results (CHAPMAN AND BALAKRISHNAN, 1964). As can be seen in this figure, the data of numerical analysis tends to distance itself from the experimental values, thus showing that is overestimated, however in all cases it is seen a good precision in both initial stiffness and final bearing capacity. In this same figure it can be observed that after the beginning of the stiffness degradation the most refined meshes present a more rigid behavior.



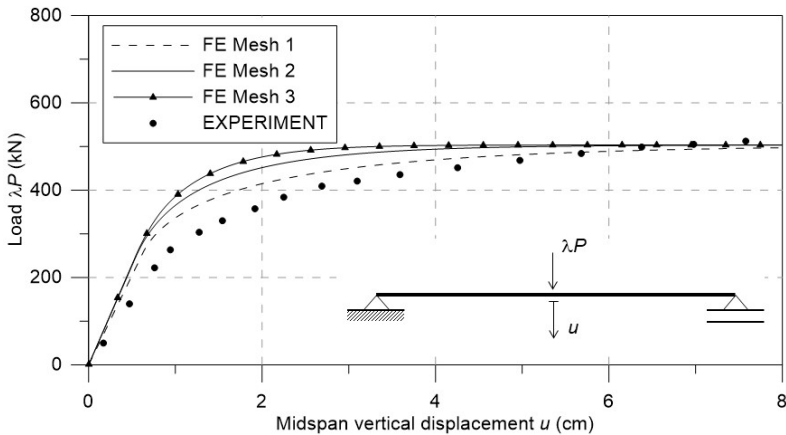


Figure 4. Equilibrium path of simply supported composite beam

## 6 | CONCLUSIONS

This study presents a concentrated plasticity-based formulation using the finite element method for material nonlinear analysis of steel-concrete composite beams with partial interaction. The classical Refined Plastic Hinge Method was applied considering the explicit modification of the effective moment of inertia. For this, the cracking effect of the slab was introduced using the formulation of Patel et al. (2015). Associate to this, the moment of inertia was reduced by the degree of interaction of concrete slab and steel section.

The simply supported beam simulated in this paper presented consistent initial stiffness and final bearing capacity with the experimental data. It is important to highlighted that low refinement meshes were sufficient for a satisfactory global response in the tested example.

Thus the proposal of union of the classical RPHM with the effective moment of inertia equation (originally designed for reinforced concrete), considering cracking and partial interaction, provided satisfactory results in the context of material nonlinear analysis of steel-concrete composite beams. But this results can be improving with a better study of pseudo-springs stiffness degradation.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank CAPES and CNPq (Federal Research Agencies), Fapemig (Minas Gerais State Research Agency), UFLA and UFOP for their support during the development of this work.

## REFERENCES

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro. 2008.

CHAPMAN, J. C. and BALAKRISHNAN, S. Experiments on composite beams. **Structural engineers**, vol. 42, pp. 369–383, 1964.

LEMES, Í. J. M. **Advanced numerical study of steel, concrete and steel-concrete composite structures**. 2018. 177f. PhD thesis, Federal University of Ouro Preto, Ouro Preto, Brazil.

LEMES, Í. J. M., BARROS, R. C., SILVEIRA, R. A. M., SILVA, A. R. D. and ROCHA, P. A. S. Numerical analysis of RC plane structures: a concentrated nonlinear effect approach. **Latin American Journal of Solids and Structures**, vol. 15, n. 2, 2018.

LEMES, Í. J. M., BATELO, E. A. P., SILVA, A. R. D., SILVEIRA, R. A. M. e ROCHA, P. A. S.. Estudo numérico comparativo via análise não linear do comportamento de estruturas de concreto armado com base nas normas de projeto NBR 6118 e EC2. **Anais do 58 Congresso Brasileiro do Concreto**. 2016.

LEMES, Í. J. M., SILVEIRA, R. A. M., SILVA, A. R. D. and ROCHA, P. A. S. Nonlinear analysis of two-dimensional steel, reinforced concrete and composite steel-concrete structures via coupling SCM/RPHM. **Engineering Structures**, vol. 147, pp. 12–26, 2017.

LI, T., LIU, S. and CHAN, S. Direct analysis for high-strength steel frames with explicit model of residual stresses. **Engineering Structures**, vol. 100, pp. 342–355, 2015

LIEW, J., CHEN, H. and SHANMUGAM, N. Inelastic analysis of steel frames with composite beams. **Journal of Structural Engineering**, vol. 127, n. 2, pp. 194–202, 2001.

PATEL, K., BHARDWAJ, A., CHAUDHARY, S., and NAGPAL, A. Explicit expression for effective moment of inertia of RC beams. **Latin American Journal of Solids and Structures**, vol. 12, n. 3, pp. 542–560, 2015

## SIMULAÇÃO DE UMA LONGARINA COMPÓSITA DE UMA AERONAVE ESPORTIVA LEVE

*Data de aceite: 02/08/2021*

*Data de submissão: 06/05/2021*

### Felipe Silva Lima

Universidade Federal da Paraíba,  
Departamento de Engenharia Mecânica  
João Pessoa – Paraíba  
<http://lattes.cnpq.br/7070823136947722>

### Álvaro Barbosa da Rocha

Universidade Federal de Campina Grande,  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Campina Grande – Paraíba  
<http://lattes.cnpq.br/6840402574951092>

### Daniel Sarmento dos Santos

Universidade Federal de Campina Grande,  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Campina Grande – Paraíba  
<http://lattes.cnpq.br/2832145306660574>

### Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

Universidade Federal de Campina Grande,  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Campina Grande – Paraíba  
<http://lattes.cnpq.br/8131607733881361>

**RESUMO:** Este artigo tem como objetivo examinar o comportamento mecânico-estático de uma longarina compósita projetada para uma aeronave esportiva leve através de investigações numéricas, empreendidas em software (ANSYS Release 19.2) comercial de elementos finitos. Diferentes seções transversais foram testadas numericamente para se

determinar suas respectivas tensões equivalente e deslocamentos finais alcançados. Para avaliar os efeitos tridimensionais, modelos com a capacidade de simular uma viga em balanço, onde uma extremidade foi engastada enquanto a outra sofre flexão devido a sustentação, foram desenvolvidos cumprindo etapas de definição geométrica, geração de malha e aplicação de carregamento. As simulações revelaram que os fatores analisados, assinalaram os efeitos dos picos resultantes de tensão na sobrecarga sob a região engastada, simultaneamente, destaca que uma opção de perfil se sobrepõe com deslocamentos inferiores a 10 % em relação aos outros, assim como tensões equivalentes variando 17 até 75 % inferiores ao que foi desenvolvido em outros espécimes. Por fim, a partir dos resultados verificou-se a presença de pontos críticos e locais de baixa solicitação, mantidos dentro de especificações de projeto, o que evidencia a versatilidade da análise por elementos finitos, podendo evitar equívocos desconsiderados em análises empíricas, imprimindo celeridade ao processo de investigação.

**PALAVRAS - CHAVE:** Análise Estrutural, Longarina de Asa, Materiais Compósitos, ANSYS

### STRUCTURAL ANALYSIS OF A COMPOSITE WING SPAR OF A LIGHT SPORTING AIRCRAFT

**ABSTRACT:** According rising of industrial demands for new materials, supported by academic research, it's clear there are huge recommended the development and tests of new materials as an alternative to those traditionally used in the structures. Namely, in the aircraft

industry, the demand for materials with improved mechanical properties, lighter and capable of performing more than one function at the same time, motivated the large use of composite materials. The knowledge of mechanical behavior in the design phase of structures is a critical factor. Therefore, is important the computational analyzes that allows predicting limitations or failures. This paper aims to evaluate the static behavior of a composite wing spar designed for a light sports aircraft by a numerical model developed in commercial finite element software (ANSYS Release 19.2). Different cross sections were tested numerically to determine their respective equivalent stress and displacements. A three-dimensional model cap able of simulating a cantilever beam, where clamped end of the beam while the other suffers bending due to lift, it was developed following the steps of defining geometry, mesh generation and load application to verify the structural behavior. The results shows the effects of the peaks resulting from stress on overload under the clamped end of the beam, simultaneously, it highlights that a profile option overlaps with displacements of less than 10% in relation to the others, as well as equivalent stress below 17 to 75% of what was developed in other specimens. Numerical test are also to performed the versatility of the finite element analysis, being able to avoid equivocal, as well as losses due to oversizing.

**KEYWORDS:** Structural analysis, Wing spar; Composite Material, Ansys.

## 1 | INTRODUÇÃO

As disputas entre as indústrias aeronáuticas pela soberania no mercado global, vem projetando novas linhas de pesquisa e se convertendo em uma interessante ferramenta de avanço tecnológico. Nova tecnologia dispõe, dado a necessidade, de materiais com exigências de propriedades que não são alcançados por materiais convencionais (RANA; FANGUEIRO, 2016). No intuito de atingir as propriedades requeridas, tais como, baixo peso, alta rigidez, resistência à corrosão e bom desempenho em elevadas temperaturas, a ciência dos compósitos tem evoluído paulatinamente (KASSAPOGLOU, 2013).

O emprego de materiais compósitos ficou circunscrito a alguns setores da indústria durante décadas, principiando com o projeto de peças sujeitas a baixos níveis de solicitação estrutural. Posteriormente, progrediu para a substituição de conjunto de peças com uma importância notável para o correto funcionamento do avião, a exemplo das superfícies móveis de controle. E finalmente, a substituição de conjuntos críticos para o desempenho da aeronave, como os conjuntos da asa, caixa de torção, fuselagem, estabilizador horizontal e vertical (KASSAPOGLOU, 2013).

Nesse sentido, no projeto aeronáutico o baixo peso estrutural correlacionado a um bom comportamento mecânico tem efeito apreciável no desempenho em voo, na capacidade de transporte e no consumo de combustível.

O montante em novos investimentos, ligado aos curtos prazos de entrega, vem acarretando o emprego cada vez maior do método dos elementos finitos, requerendo o uso de poderosos *softwares* devido a segurança, precisão e velocidade de resposta (KAUFMANN; ZENKERT, WENNHAGE, 2010; KIM; KENNEDY; GÜRDAL, 2008).

A realização dos cálculos analíticos seria, para essa situação, muito trabalhosa ou até mesmo impossível em certas circunstâncias, além disso a construção de protótipos demandaria muito tempo, pois uma ou mais iterações acerca de configurações geométricas são necessárias para que se chegue a um resultado que atenda às especificações exigidas (KIM; KENNEDY; GÜRDAL, 2008).

Em trabalho recente, Araújo *et al.* (2018) relataram o projeto e o processo de obtenção de uma longarina composta para uma asa destinada a um UAV leve, visando alcançar uma alta eficiência estrutural. No trabalho, o primeiro passo centra-se na seleção do aerofólio, em seguida, definição do tipo de asa e suas principais dimensões, além das cargas aerodinâmicas. Um procedimento analítico é apresentado para o dimensionamento estrutural além disso, fazendo emprego do critério de falha de Tsai-Wu para obter as margens estruturais de segurança para as peças compostas.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a longarina principal integrante da asa de uma aeronave esportiva leve, fazendo uso de materiais compósitos comuns a indústria aeronáutica. A partir do modelo genérico de longarina, analisa-se como ela se comporta alterando, através do método dos elementos finitos, os parâmetros geométricos. É realizada uma análise estática comparando as longarinas com as mesmas dimensões, variando apenas a seção transversal que as compõem. O comportamento mecânico em termos globais do modelo, isto é, deflexões e tensões, devem ser representativos das repostas reais.

## 2 | METODOLOGIA

O problema abordado neste trabalho é baseado no projeto de uma longarina compósita para uma aeronave esportiva leve, denominada de *ST20* sob domínio construtivo da *Stratus Indústria Aeronáutica*. O estudo, em questão, enfatizou a análise estrutural deste elemento demarcado em duas etapas. A metodologia proposta é ilustrada no organograma da Fig. 1.

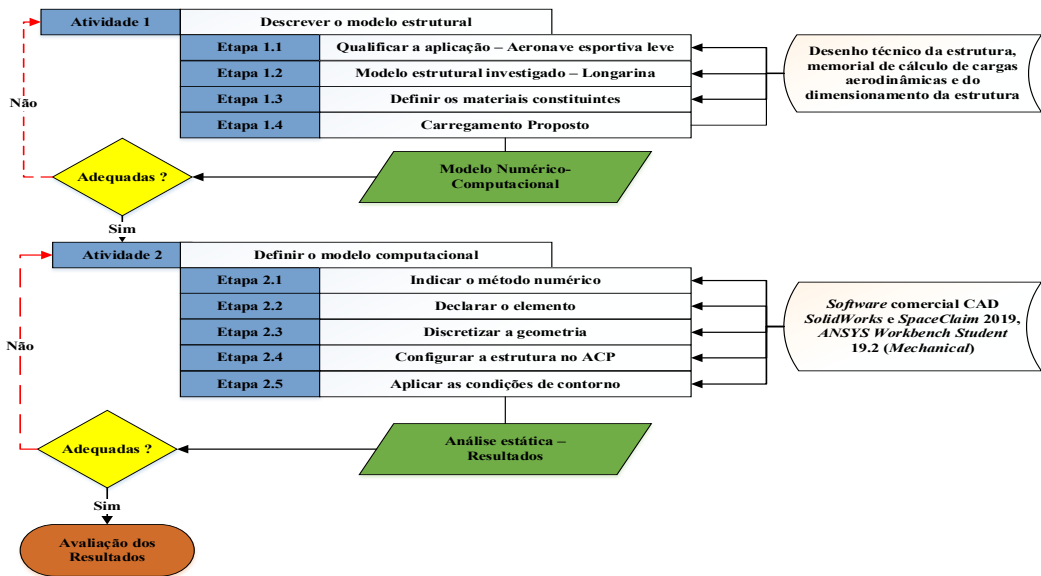


Figura 1. Metodologia empregada para o desenvolvimento desta pesquisa. Fonte: Acervo do autor (2019)

## 2.1 Modelo Estrutural

A aeronave *ST20* enquadra-se na categoria leve esportiva ou LSA (*Light Sport Aircraft*), apresentando por característica: uso para diferentes propósitos, como desporto, meio de transporte particular, ferramenta de treinamento, etc. A Tab. 1 resume as principais características técnicas da aeronave *ST20*.

Parâmetros	ST20
Área Alar (m <sup>2</sup> )	14
Envergadura (m)	11
Velocidade de Estol (nós)	45
Velocidade de Cruzeiro (nós)	120
Peso da Aeronave (Kg)	325

Tabela 1. Características técnicas principais.

Fonte: Acervo do Autor (2019)

O elemento estrutural investigado no presente trabalho se refere a uma longarina de asa, cuja estrutura é formada por elementos em material compósito. As suas medidas explicitam uma envergadura equivalente a 10,502 m. Assim sendo, o corpo em estudo detém de comprimento muito superior em relação às dimensões de sua seção transversal

( $b/L \ll 1$  e  $h/L \ll 1$  onde  $b$  é largura,  $h$  é altura e  $L$  é comprimento), segundo Vinson e Sierakowski (2006) sendo considerado, portanto, como um elemento estrutural viga. Adicionalmente, percebe-se que há um ângulo diedro positivo formado entre o plano de asas e o eixo transversal do avião.

A longarina é um arranjo de três partes perfeitamente aderidas uma à outra, tal como acontece com as vigas convencionais. Com alusão às características físicas dos materiais utilizados, pode-se dizer:

- As duas faces que funcionam como mesas são compostas por um empilhamento de lâminas. Cada lâmina de material possui cerca de 0,32 mm de espessura. A matriz consiste em resina do tipo epóxi reforçado por fibras de carbono unidirecionais. Para compor a espessura de 6 mm correspondente a cada mesa, foram empilhadas 20 camadas de material pré-impregnado. Na Tab. 2 são indicados os materiais componentes das mesas da longarina com suas propriedades mecânicas;

<b>Propriedades – Epóxi/Fibra de Carbono</b>	
Massa Específica ( $\text{g/cm}^3$ )	1,54
Tensão de Compressão (MPa)	893
Tensão de Tração (MPa)	1979
Tensão de Cisalhamento (GPa)	100
Módulo de Elasticidade (GPa)	209

Tabela 2. Propriedades mecânicas do material da mesa. Fonte: Rana e Fangueiro (2016)

- No que concerne à “alma”, que desempenha um papel similar a um núcleo resistindo às tensões de cisalhamento provocadas por carregamentos transversais e torcionais, foi ratificado pela equipe de projeto, o arranjo que estabelece um material intermediário (núcleo) em Divinycell®. Este polímero é uma espuma de PVC rígida com estrutura de célula fechada, com espessura de 6 mm, intercalada a tecidos em fibra de carbono, impregnado de resina epóxi orientados de acordo com a sequência de laminação  $[-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ]$ . Vale mensurar, a circunstâncias para adoção de reforços bidirecionais na forma de tecido despontou-se pela atenuação do efeito das tensões cisalhantes sobre a região. A Tab. 3 se refere aos materiais comumente empregados, especificando o valor das propriedades necessárias para a sua determinação.

Parâmetros	Epóxi/Fibra de Carbono	Divinycell®
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,76	0,06
Tensão de Compressão (MPa)	350	0,9
Tensão de Tração (MPa)	385	1,8
Tensão de Cisalhamento (GPa)	60	0,76
Módulo de Elasticidade (GPa)	48,9	0,075

Tabela 3. Propriedades mecânicas dos materiais da “alma”. Fonte: Rana e Fangueiro (2016)

A longarina, devido a necessidade de garantida da forma aerodinâmica durante o voo, requer uma rigidez. Para isso, a seção utilizada deve ter o maior momento de inércia possível. O mais expressivo esforço sofrido por este componente é a flexão devido a sustentação. Especificamente, neste trabalho a distribuição das forças de sustentação em uma asa é simplificada através do Método de Schrenk, que supõe a distribuição das forças de sustentação ao longo da envergadura de um avião, proporcional às áreas de uma asa imaginária, na qual suas cordas são a média geométrica das cordas reais e das cordas de uma asa elíptica de mesma área e envergadura. O comportamento da corda equivalente é representado na Fig. 2.

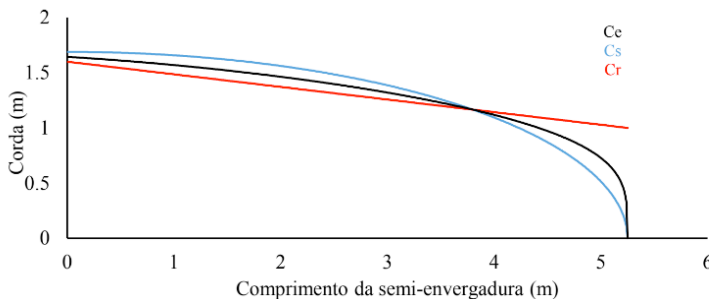


Figura 2. Corda equivalente.

Fonte: Acervo do autor (2019)

## 2.2 Modelo Numérico

A concepção do modelo numérico baseou-se no Método dos Elementos Finitos – MEF, sendo selecionada em função da familiaridade do autor e devido a excelente precisão fornecida. A modelagem desenvolvida lidou com a dificuldade de preparar estruturas em material compósito, dado que eles obrigam cuidados específicos ao apontar as suas propriedades bem como a definição da orientação das fibras em cada camada (BARBERO, 2013). Para averiguar o comportamento mecânico foi realizada uma modelagem teórica



através do CAE (comercial *ANSYS 19.2*), sendo observado o comportamento da meia longarina, porquanto seu comportamento é espelhado.

O elemento finito empregado nas simulações numéricas para anunciar o comportamento mecânico da longarina foi o *Shell 181*, que é um elemento bidimensional apropriado para analisar estruturas de cascas e moderadamente espessas. O *Shell 181* tem por característica apresentar quatro nós, cada qual com seis graus de liberdade: translações nas direções x, y, e z, e rotações sobre os eixos x, y e z. O *Shell 181* é propício para grandes rotações e/ou grandes aplicações não-lineares de tensão. Mudança na espessura da casca são contabilizadas nas análises não-lineares.

As simulações preliminares para definição da malha testaram modelos com elementos de casca *Shell 181*. Foram executadas análises estruturais visando a obtenção dos valores de deflexão do sistema estrutural em estudo, mediante aplicação dos esforços intrínsecos a uma longarina. Através da Fig. 3 é possível contatar o comportamento das deflexões em função da variação do tamanho da malha de elementos finitos, indicando uma tendência invariante da curva para tal, foi considerado o modelo de longarina em C (original).

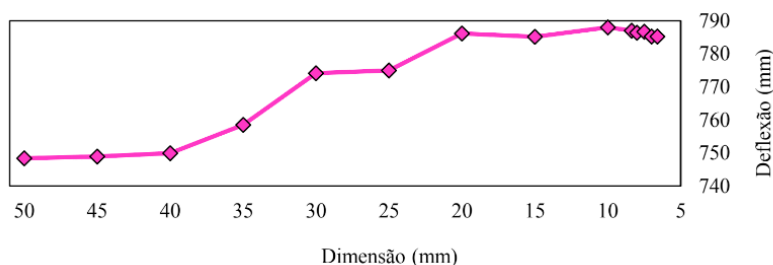


Figura 3. Gráfico comparativo entre a deflexão e dimensão de elemento para o estudo de convergência de malha.

Fonte: Acervo do autor (2019)

O material foi modelado e configurado no *ANSYS Workbench 2019.2*. Esse programa possui um módulo de pré-processamento de materiais compósitos denominado *ACP Pre*, o qual atribui ao elemento as propriedades mecânicas de cada laminado. E o *ANSYS Mechanical* incumbe-se do módulo de pós-processamento, na qual é feita a análise de tensões no laminado.

Em relação às condições de contorno no caso da longarina, uma extremidade foi engastada, ou seja, há restrição de translação e rotação em todos os eixos. Na prática, para simular esta condição no *ANSYS Mechanical* foi empregado a opção denominada de *Fixed Support* (Suporte Fixo). A distribuição de carga ao longo da semi-envergadura foi alcançada utilizando o método de Schrenk, de modo que as cargas foram introduzidas sob

a mesa superior, simulando os esforços na região. Para maior simetria do carregamento, convencionou-se uma divisão em 21 componentes de força, vertical para baixo, a fim de se obter uma configuração compatível com o tamanho da malha adotado no modelo. A Fig. 4 mostra o cenário explicitado acima.

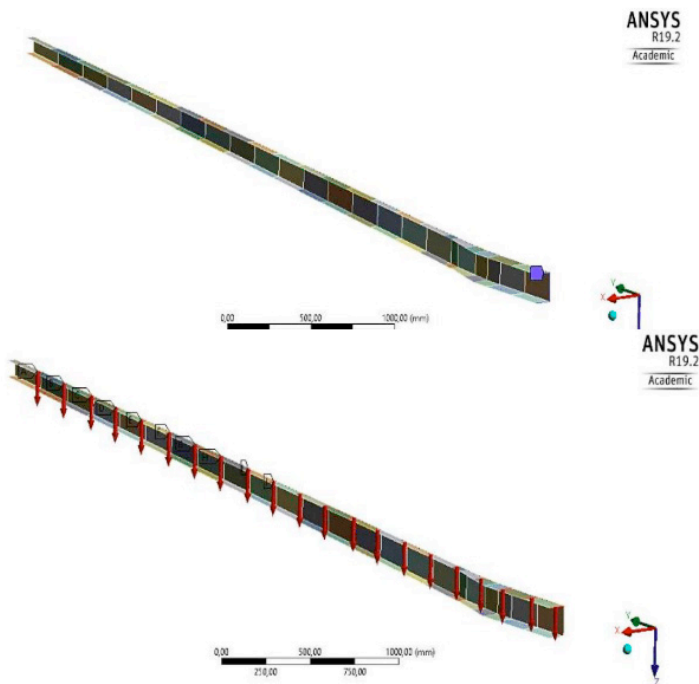


Figura 4. Restrição da extremidade e configuração de cargas na longarina no *ANSYS Mechanical*.

Fonte: Acervo do autor (2019)

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base na geometria adotada e nas condições de contorno enfatizadas na metodologia, realizaram-se as análises estruturais estáticas no aplicativo computacional ANSYS. Para a elaboração dos gráficos, o ângulo diedro foi observado para as vigas com seção transversal em “I” e “C”, assim como também foram examinadas as configurações sem diedro. A seção transversal em caixão foi considerada apenas no seu formato usual. Vale destacar que para todas as investigações efetuadas foi processada uma análise de convergência de malha.

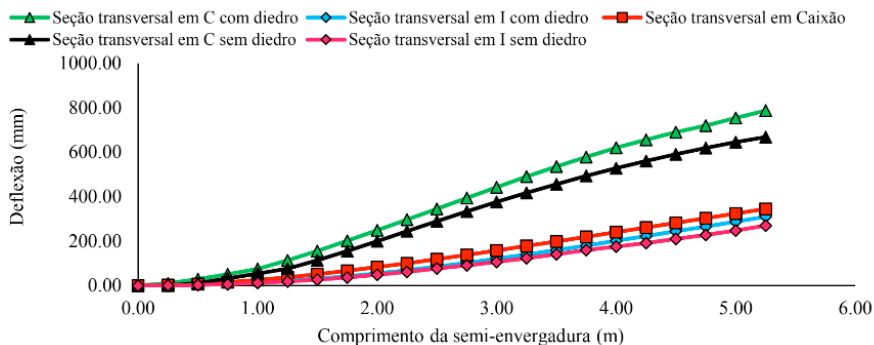
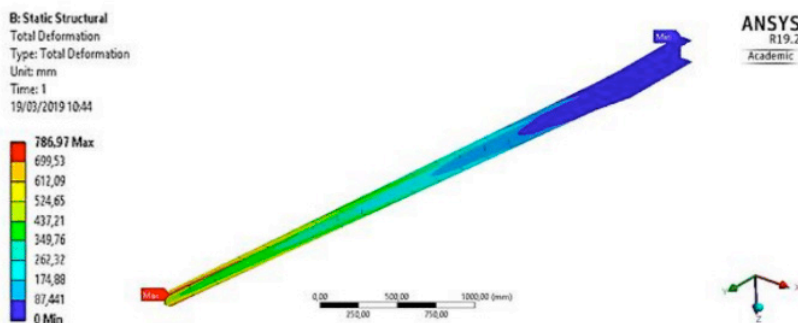


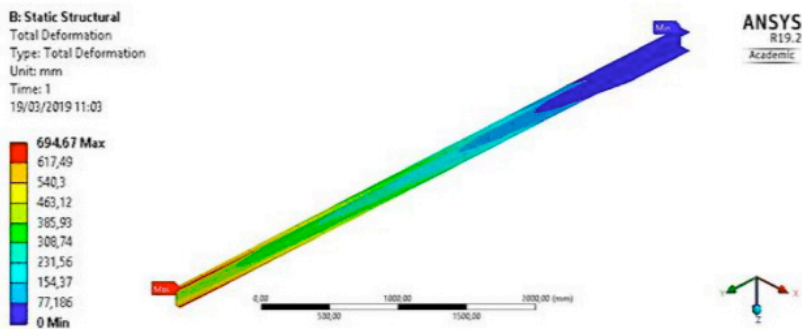
Figura 5. Curvas de deflexão versus semi-envergadura obtidas para diferentes seções transversais.

Fonte: Acervo do autor (2019)

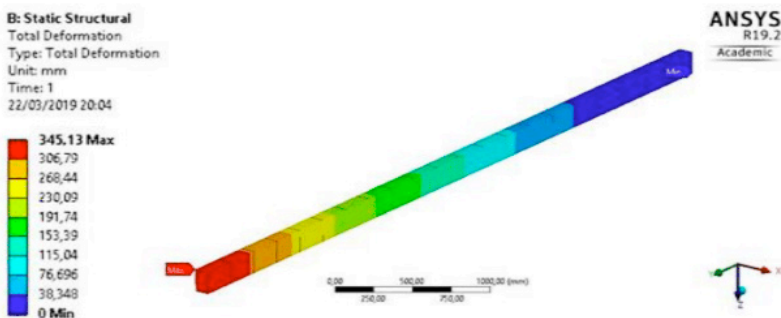
A Fig. 5 ilustra a variação da deflexão ao longo da semi-envergadura da longarina. Por sua vez, a Fig. 6 traz a representação computacional dos valores da distribuição de deflexão para cada modelo, evidenciando a localização dos valores máximo e mínimo. Desta forma, de acordo com os valores, têm-se os resultados da longarina em “I” indicando que a deflexão é menor em cerca de 153,94 % em confronto com o exemplar em “C”, caindo para 10,21 % ao observar o modelo em caixão. De forma semelhante, tem-se a viga em “C” apresentando deflexão 128,02 % superior a seção em Caixão. Ressalta-se que, embora as principais medidas da longarina permanecem idênticas, houve alteração no momento de inércia, responsável mais pronunciado por essa diferença entre valores.



(a)



(b)



(c)

Figura 6. Deflexão total da estrutura (a) “C” com diedro, (b) “I” com diedro.

Fonte: Acervo do autor (2019)

Ainda a partir das análises executadas, pode-se ver nas Fig. 6 que, para as longarinas em “C” e “I”, foram examinados os modelos sem a incorporação do ângulo diedro. Dentro desse contexto nota-se que os modelos proporcionam reduções em se tratando de deflexões, particularmente maiores que as disposições com diedro, por exemplo, no arranjo em “C” a redução é de 11,73 % e no arranjo em “I” equivale a 12,96 %. Todavia, os ganhos muito provavelmente são negligenciados, em função do aumento da estabilidade lateral conseguida na aeronave através do ângulo diedro.

As observações constatadas estão disponíveis na Fig. 7, onde as curvas de tensão em função da semi-envergadura da asa estão ilustradas. Na Fig. 8 observa-se os resultados referentes ao gradiente de tensão para os modelos, em consideração.

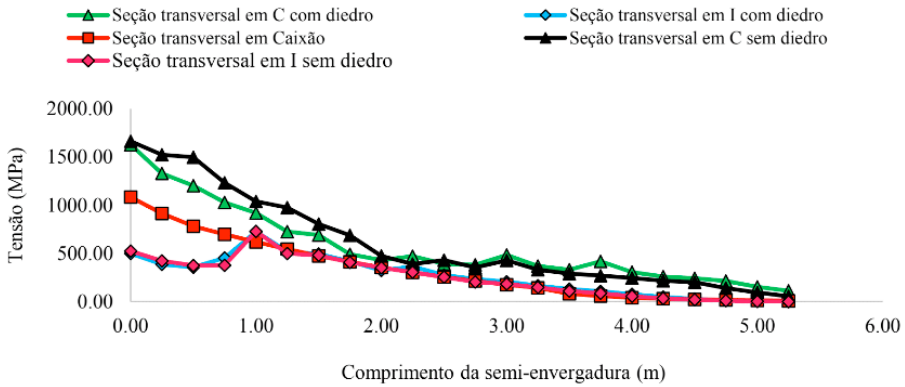
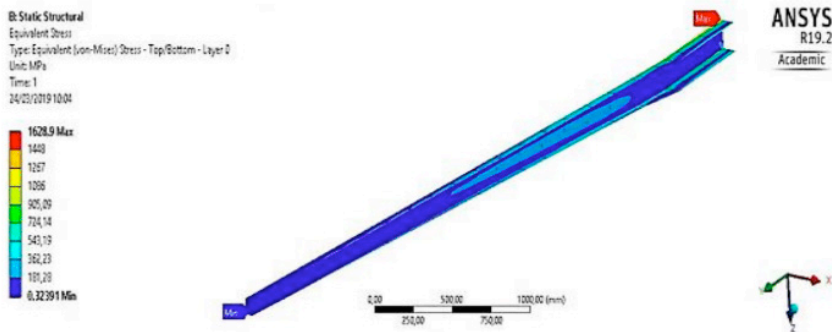


Figura 7. Curvas de tensão versus semi-envergadura obtidas para diferentes seções transversais.

Fonte: Acervo do autor (2019)

Os dados apresentados na Fig. 7 mostram que as longarinas com seções transversais em “C” e Caixão registraram valores de 74,88 % e 17,49 %, respectivamente, superiores que o exemplar em “I”. Considerando apenas a análise, que confronta os resultados de tensão, observa-se que houve um acréscimo de 48,84% de C em relação à seção caixão. É notável notar que, sob o ponto de vista estrutural, o não emprego do ângulo diedro conduz a diminuição dos valores do gradiente de tensão. O desencadeamento do processo de sobrepor um ângulo diedro pode ocasionar mudanças súbitas de seções no decurso da longarina que, nesse caso, provoca, imediatamente, uma diminuição da área projetada, transferindo uma grande parcela de carga para a região.



(a)

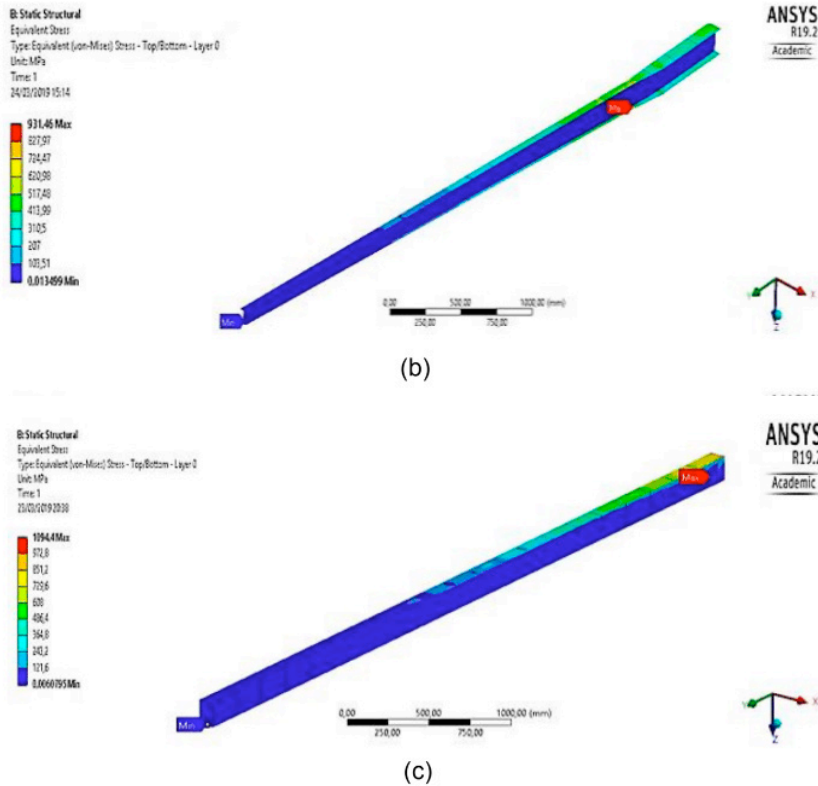


Figura 8. Gradiente de tensões nas estruturas da longarina (a) “C” com diedro, (b) “I” com diedro.

Fonte: Acervo do autor (2019)

## 4 | CONCLUSÕES

Neste trabalho foi possível avaliar numericamente uma longarina, além de analisar de forma rápida diferentes configurações de perfis estruturais, que porventura poderiam ser implementados no projeto de uma asa para a aplicação em questão. A estratégia de analisar as possíveis configurações para os perfis de uma longarina se mostrou satisfatória para o projeto da aeronave, uma vez que respeita às hipóteses de falha para a estrutura, concomitantemente impede a produção de protótipos que onerariam os custos de projeto, fornecendo meios para o aumento da performance. Com a metodologia aplicada, os resultados apresentaram tensões e deformações distintas em cada configuração analisada. Além disto, deve-se ressaltar que os pontos críticos e os valores das variáveis arregimentadas se mantêm em regiões específicas, apesar das modificações executadas. Através deste estudo, foi possível uma boa familiarização com os conceitos de materiais compósitos, tal qual com os métodos de projeto aeronáuticos envolvendo meios computacionais empregados para sua análise.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, pelo apoio financeiro concedido à esta pesquisa e à Stratus Aeronaves pelo suporte técnico prestado.

## REFERÊNCIAS

ARAUJO, P. M. N.; COSTA, T. R.; SILVA, E. C. Design and manufacturing process of uav composite wing. In: **4th Brazilian Conference on Composite Materials**. 2018. p. 1-8.

BARBERO, E. J. **Finite element analysis of composite materials**. CRC press, 2007.

KASSAPOGLOU, C. **Design and analysis of composite structures: with applications to aerospace structures**. John Wiley & Sons, 2013;

KAUFMANN, M.; ZENKERT, D.; WENNHAGE, P. Integrated cost/weight optimization of aircraft structures. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 41, n. 2, p. 325-334, 2010;

KIM, H. A.; KENNEDY, David; GÜRDAL, Z. Special issue on optimization of aerospace structures. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 36, n. 1, p. 1-2, 2008;

RANA, S.; FANGUEIRO, R. (Ed.). **Advanced composite materials for aerospace engineering: Processing, properties and applications**. Woodhead Publishing, 2016;

VINSON, J. R.; SIERAKOWSKI, R. L. **The behavior of structures composed of composite materials**. Springer, 2006.

## SISTEMA RFID PARA CONTROLE DE ATIVOS PÚBLICOS

Data de aceite: 02/08/2021

Data de submissão: 09/07/2021

### João Felipe Fonseca Nascimento

Instituto Federal de Sergipe (IFS) – Campus  
Lagarto  
Lagarto – Sergipe  
<http://lattes.cnpq.br/9845456693347294>

### Jislane Silva Santos de Menezes

Instituto Federal de Sergipe (IFS) – Campus  
Lagarto  
Aracaju – Sergipe  
<http://lattes.cnpq.br/4484686084492373>

### Jean Louis Silva Santos

Instituto Federal de Sergipe (IFS) – Campus  
Lagarto  
Aracaju – Sergipe  
<http://lattes.cnpq.br/2939386820411644>

### Jennysson D. dos Santos Júnior

Instituto Federal de Sergipe (IFS) – Campus  
Lagarto  
Lagarto – Sergipe  
<http://lattes.cnpq.br/2590678947265725>

### Luccas Ribeiro Cruz

Instituto Federal de Sergipe (IFS) – Campus  
Lagarto  
Lagarto – Sergipe  
<http://lattes.cnpq.br/0997921476865139>

### Jean Carlos Menezes Oliveira

Instituto Federal de Sergipe (IFS) – Campus  
Lagarto  
Lagarto – Sergipe  
<http://lattes.cnpq.br/9117831392415170>

### João Marcos Andrade Santos

Instituto Federal de Sergipe (IFS) – Campus  
Lagarto  
Lagarto – Sergipe  
<http://lattes.cnpq.br/3961004720654430>

**RESUMO:** RFID é uma tecnologia utilizada para detecção e identificação automática de objetos, que pode ser aplicada em serviços de rastreabilidade, rapidez na conferência e controles de entrada e saída em diversas áreas como educação, saúde, manufatura, logística e distribuição. A tecnologia RFID é caracterizada pela presença de quatro componentes que interagem entre si para enviar e receber sinais de radiofrequência, são eles: antena, leitor, tag e o *middleware*. Diante da necessidade de controlar a entrada e saída de ativos de TI como *data-shows* retirados das coordenações para as aulas, este trabalho tem como objetivo descrever a construção de um sistema para monitoramento de ativos públicos, utilizando o Instituto Federal de Sergipe, campus Lagarto como estudo de caso. O sistema foi implementado em duas etapas: prototipação e desenvolvimento web. Na fase de prototipação, foi criado um sistema desktop na linguagem de programação Java, biblioteca *Swing* e banco de dados *Sql Server*. Na arquitetura web, ele foi desenvolvido usando a abordagem *front-end* e *back-end*, com auxílio do *framework Spring* e da linguagem *React*, armazenando os dados no banco *MongoDB*. O sistema tem como funcionalidades principais: cadastro de tags e ativos e consultas a movimentos e inventário. Com a implantação



do sistema, espera-se reduzir custo, tempo de serviço, além de maior gerenciamento e segurança dos ativos.

**PALAVRAS-CHAVE:** RFID, monitoramento de ativos, rádio-frequência.

## RFID SYSTEM FOR CONTROL OF PUBLIC ASSETS

**ABSTRACT:** RFID is a technology used for automatic detection and identification of objects, which can be applied in traceability services, conference speed and entry and exit controls in various areas such as education, health, manufacturing, logistics and distribution. RFID technology is characterized by the presence of four components that interact with each other to send and receive radio frequency signals, they are: antenna, reader, tag and middleware. Faced with the need to control the entry and exit of IT assets as data-shows taken from the coordinations for classes, this work aims to describe the construction of a system for monitoring public assets, using the Federal Institute of Sergipe, Lagarto campus as a case study. The system was implemented in two stages: prototyping and web development. In the prototyping phase, a desktop system was created in the Java programming language, Swing library, and Sql Server database. In the web architecture, it was developed using the front-end and back-end approach, with the help of the Spring framework and react language, storing the data in the MongoDB database. The system has as main functionalities: registration of tags and assets and queries to movements and inventory. With the deployment of the system, it is expected to reduce cost, service time, and greater management and security of assets.

**KEYWORDS:** RFID, asset monitoring, radio frequency.

## 1 | INTRODUÇÃO

Tecnologia de identificação por radiofrequência RFID (*Radio Frequency Identification*) é uma técnica em que ondas de rádio eletromagnéticas são emitidas pelos leitores RFID e atingem as chamadas etiquetas inteligentes (tags ou *transponders*), retornando os seus respectivos códigos eletrônicos de produto (EPC) (BRASIL, 2004). O uso dessa tecnologia vem garantindo, para os mais diversos setores mundiais, um maior nível de rastreabilidade e controle na cadeia de produção, rapidez na conferência de ativos, redução de custos e um maior nível de integração entre os produtos. Como exemplo, em Fernandes et al. (2019) é apresentada uma solução que controla empréstimo, devolução e renovação de livros na biblioteca do campus da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), utilizando RFID.

Considerando a necessidade de um maior controle da movimentação de ativos dentro das organizações, onde bens são transferidos temporariamente perdendo sua localização original, faz-se necessário utilizar um sensor RFID que dispense a intervenção humana para controlar a entrada e saída de ativos.

Assim, este trabalho teve como objetivo construir um sistema com base na tecnologia RFID, para controlar a entrada e saída de ativos de Tecnologia da Informação

e Comunicação (TIC) em uma instituição pública, de forma a reduzir custos e aumentar o controle sobre os bens públicos.

## 2 | JUSTIFICATIVA

Instituições de ensino como o Instituto Federal de Sergipe (IFS) possuem um grande número de ativos de Tecnologia da Informação (TI), destacando-se os elementos utilizados em laboratórios de ensino aprendizado e pesquisa, e aqueles que servem de suporte para o funcionamento da rede de ensino, localizados em setores administrativos, como computadores de mesa, notebooks, roteadores, switches, nobreaks, estabilizadores, impressoras entre outros.

Esses elementos, também chamados de bens públicos, pertencem a um ente público – a União, um Estado, um Município, uma autarquia ou uma empresa pública. Assim, as responsabilidades do ente público vão desde o uso, manutenção, conservação e principalmente o zelo a ser atribuído. Estes bens necessitam constantemente de alguma movimentação, seja ela para remanejamento, substituições, manutenções etc. Tais procedimentos carecem de atividades administrativas para controle da localização a fim de que seja mantida e atualizada a carga patrimonial da instituição.

Periodicamente, a Coordenadoria de Almoxarifado e Patrimônio (COALP) realiza inventários patrimoniais com a finalidade de verificar a localização setorial do ativo, bem como identificar irregularidades tais como o “desaparecimento” de algum bem público. Ela também controla a quantidade de estoque disponível, auxiliando na tomada de decisões.

Atualmente, a execução das atividades de patrimônio é feita por meio de leitor de código de barras ou de forma manual, tendo que alimentar um ou mais sistemas por meio de planilhas eletrônicas. Em alguns casos, estes procedimentos levam muito tempo para serem concluídos e como o processo em si é feito de forma manual, poderá acontecer o esquecimento de registrar algum item no inventário ou até mesmo dificuldades na leitura de objetos, onde o número do patrimônio foi arrancado ou o código de barras está ilegível. Em trabalhos de grande escala, como no caso do levantamento de todo o acervo de TIC pertencente ao IFS, podem acontecer problemas de inconsistências nos dados levantados, pois itens conferidos no início do processo podem ser substituídos por conta de defeito ou desgaste natural ou são realocados de setor, fazendo com que a realização desse controle de forma manual se torne praticamente impossível, devido ao grande número de ativos e informações que são atualizadas diariamente.

## 3 | IDENTIFICAÇÃO POR RADIO FREQUÊNCIA

Segundo Hessel (2012), essa tecnologia, como o próprio nome diz, é um microchip acoplado a uma pequena antena, que identifica de forma automática, os objetos nele fixados. Apesar de possuir características similares ao tradicional código de barras, a tecnologia

RFID possui diferenciais que a destacam das demais tecnologias de auto identificação, por exemplo, a sua adaptabilidade, podendo ser utilizada em diferentes tipos de superfícies e em locais de difícil acesso.

Sistemas de códigos de barras muitas vezes necessitam da presença humana para realização da captura de dados, com um leitor específico, precisando estar visível, a uma certa distância específica para que seja lida pelo leitor. Diferentemente do RFID, que dispensa o contato visual, necessitando apenas que as tags estejam dentro da área de cobertura suportada pelo leitor, já que toda a captura é feita pela emissão de ondas eletromagnéticas.

A Tecnologia RFID é caracterizada pela presença de quatro componentes que interagem entre si para enviar e receber sinais de radiofrequência, são eles: antena, leitor, tag ou *transponder* e o *Middleware* (CHINELATTO, 2010). Na Figura 1 é apresentada a arquitetura básica de funcionamento dessa tecnologia, apresentando a organização dos componentes citados.

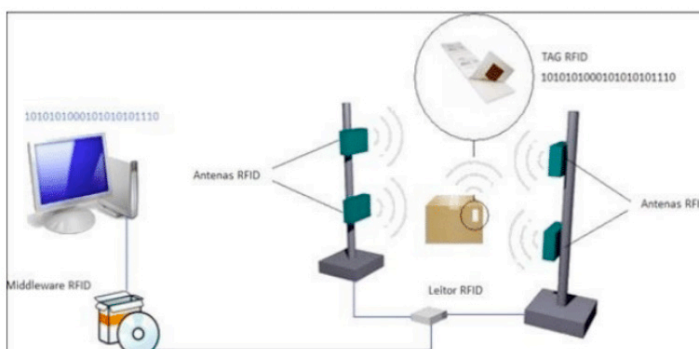


Figura 1. Arquitetura básica RFID.

A arquitetura funciona basicamente da seguinte maneira: primeiro o leitor envia sinais de radiofrequência, por meio de uma ou mais antenas, à procura de etiquetas RFID. Quando esses sinais atingem as etiquetas que estão dentro da área de cobertura, elas enviam um sinal de resposta com as informações contidas no microchip. Logo em seguida, o leitor recebe essa informação e realiza o tratamento desses sinais internamente, decodificando em informação útil para o computador. Os dados são recebidos pela aplicação que realiza o devido tratamento por meio do middleware disponibilizando para aplicação os dados “aproveitáveis”, que neste caso são aqueles que realmente interessam com base na regra de negócio do software (ROISOFT, 2019).

## 4 | METODOLOGIA

O Instituto Federal de Sergipe, Campus Lagarto, conta com diversos ativos que são movimentados diariamente, de local em local, seja para fazer algum tipo de manutenção ou para ser usado durante as aulas, por exemplo, os data shows e as caixas de som. Todos os ativos necessitam de controle em tempo real para que possamos, além de outras coisas, conhecer a sua localização atual, a data e hora em que eles foram movimentados e o responsável pela movimentação.

A construção do sistema foi dividida em 5 etapas a fim de facilitar a gestão de cada atividade envolvida no processo. A primeira etapa foi elicitar os requisitos necessários. As tags deveriam ser fixadas nos ativos durante o cadastro do bem no patrimônio da instituição. Foram entrevistados os servidores da Coordenação de Almoxarifado e Patrimônio (COALP) e a Coordenadoria de Tecnologia da Informação (CTI), setor onde é realizada a manutenção de ativos de TIC.

Na segunda etapa, elaborou-se o documento de requisitos de acordo com a norma IEEE 830/1998 (IEEE, 1998), contendo as funcionalidades previstas para o sistema.

Na terceira etapa do trabalho, foram construídos diagramas UML com base nos requisitos elicitados, por exemplo, os diagramas de caso de uso, de classes e de sequência.

Na quarta etapa foi construído um protótipo implementado na linguagem Java. Para isso foi utilizado o ambiente de desenvolvimento Netbeans, versão 8.2 e a *API Swing* para o desenvolvimento de interface gráfica com o usuário. Para realizar a comunicação entre os sensores e antena RFID com o sistema, um *middleware* foi desenvolvido para controlar de forma automática a leitura dos ativos com as tags. O hardware usado foi um leitor fixo da marca Honeywell, modelo IF1, com antena integrada do tipo linear polarizada (7,5 dBi) e tags do tipo smart label, tanto pelo seu custo quanto pela sua adaptabilidade sobre as superfícies existentes. O banco de dados utilizado para armazenar as informações lidas pelas antenas RFID foi o *Sql Server Express 2014* e o sistema operacional utilizado foi o *Microsoft Windows 10 Home Edition*.

Na última etapa do trabalho, o protótipo foi melhorado para uma versão web utilizando o desenvolvimento *front-end* e *back-end*. Novas tecnologias foram utilizadas para integrar o *middleware* construído em Java e a linguagem *ReactJS* para desenvolver as interfaces e operacionalizar com o leitor RFID. Para desenvolvimento do projeto web foi usado um *framework* de desenvolvimento chamado *Spring Boot*. Para armazenamento das informações foi usado o banco de dados *Mongodb*. Também foi utilizada a ferramenta *Insomnia* para fazer a integração entre o *front-end* e *back-end*. Na seção 7 são apresentadas as principais funcionalidades do sistema de monitoramento RFID desenvolvido.

## 5 I MODELAGEM DO PROJETO

Para auxílio da construção do modelo, foram utilizados os softwares Bizagi Modeler na sua versão 3.1.0.011 e Astah UML, versão 8.0. Na descrição do funcionamento do sistema serão apresentados os modelos de negócio, os requisitos do software e os diagramas UML.

### 5.1 MODELAGEM DE NEGÓCIO

Inicialmente, foi feito o levantamento dos ativos do IFS junto ao setor de almoxarifado que possibilitou entender parte do processo de gestão de ativos, como o recebimento do ativo no IFS, guarda, e até sua disponibilização para uso pelos servidores e alunos.

Com base nestas informações, realizou-se a modelagem dos processos envolvidos, usando o programa Bizagi Modeler, que permitiu entender o funcionamento do processo de forma organizada e intuitiva, seguindo a notação BPMN (*Business Process Model and Notation*) reconhecida mundialmente..

Nos Quadros 1 e 2 são apresentados respectivamente os requisitos funcionais e não funcionais. Os requisitos funcionais identificados descrevem as funcionalidades previstas no programa. As listas a seguir foram formuladas após levantamento de informações junto à COALP e CTI.

Requisito	Descrição
RF001	Fazer a manutenção do cadastro das <i>tags</i> .
RF002	Fazer a manutenção do cadastro dos usuários.
RF003	Fazer a manutenção do cadastro de ativos.
RF004	Fazer a manutenção do cadastro das marcas e modelos disponíveis.
RF005	Fazer a manutenção do cadastro dos locais pertencentes a um departamento.
RF006	Fazer a manutenção do cadastro dos departamentos.
RF007	Realizar o inventário patrimonial dos ativos.
RF008	Consultar o histórico de movimentação de um ou mais ativos.
RF009	Monitorar em tempo real a entrada e a saída dos ativos.

Quadro 1. Requisitos Funcionais

Requisito	Descrição
RNF001	O sistema precisa estar em funcionamento durante 24 h/dia para que ele possa monitorar em tempo real os ativos.
RNF002	A interface do sistema deve ser de fácil utilização.
RNF003	O sistema fará o controle de acesso e <i>log</i> das operações realizadas

Quadro 2. Requisitos Não-Funcionais

## 6 | PROTÓTIPO

Para construir o sistema RFID para monitoramento de ativos foi desenvolvido um protótipo do tipo desktop, usando a biblioteca *swing* da linguagem *Java* para validar a integração leitor, antena e sistema. O menu do sistema apresenta as seguintes funções: Controle do leitor, Cadastro de tag, Cadastro de Ativo, Departamento, Empregado, Histórico e Inventário.

O controle do leitor permite escolher quando parar ou iniciar o middleware RFID. A funcionalidade Tag realiza a manutenção das tags. No cadastro de ativo é feita a manutenção dos ativos. Neste ponto, as tags são associadas aos ativos.

A função departamento permite a manutenção dos departamentos da instituição. Na funcionalidade empregado é realizada a manutenção dos empregados/servidores que utilizarão o sistema. No histórico é feita a consulta de movimentação dos ativos por determinado período. Já a função inventário permite realizar a consulta dos ativos pertencentes a um determinado setor.

As Figuras 2 e 3 apresentam as principais telas de cadastramento da tag, cadastramento dos ativos, consulta do histórico de movimentação e resultado de consulta.

A imagem mostra duas telas de uma aplicação desktop. A tela à esquerda, intitulada 'Tela Cadastro Tag', contém um campo de texto para 'EPC:', um menu suspenso para 'tipo de Tag' com as opções 'Ativa', 'Passiva' e 'Semi-Ativa', e dois botões 'Inserir' e 'Voltar'. A tela à direita, intitulada 'Cadastro de Ativo', possui campos para 'Número do Patrimônio' (1325), 'Marca' (EPSON), 'Nome do Host' (DTSHOWCOINF01), 'Modelo' (Power Lite S41+), 'Data de Aquisição' (01-01-2019 16:30:30) e 'Data Final Garantia' (01-01-2024 23:59:59). Também possui menus para 'Localização' (Sala dos Professores-COINF) e 'Categoria do Ativo' (Datashow), e um campo 'Tag Relacionada' com o valor FFF0000000000000000000001325. Botões 'Inserir' e 'Voltar' estão na base.

Figura 2. Telas de Cadastro de TAG e Ativo.

A imagem mostra duas telas de uma aplicação desktop. A tela à esquerda, intitulada 'Tela Consulta Histórico', contém campos para 'Período Inicial' e 'Período Final', um menu para 'Localização' (Sala dos Professores) e um campo para 'Número do Patrimônio'. A tela à direita, intitulada 'Consultar Histórico Movimentação', mostra o mesmo formulário preenchido com 'Período Inicial' 03/12/2019 e 'Período Final' 03/12/2019, e 'Localização' Sala dos Professores-COINF. Abaixo, há uma tabela com os seguintes dados:

Numero Patrimônio	Categoria	Marca	Modelo	Datshoos	Tipo Movimentação	Localização	Departamento
1329	Datashow	EPSON	Power Lite S41+	2019-12-03 21:48:44.8	SABU	SUPROF	COINF
1328	Datashow	EPSON	Power Lite S41+	2019-12-03 21:43:21.9	ENTRDU	SUPROF	COINF
1330	Datashow	MEC	Projektor Interativo Proconf	2019-12-03 21:46:17.9	ENTRDU	SUPROF	COINF
1326	Datashow	MEC	Projektor Interativo Proconf	2019-12-03 21:08:35.8	SABU	SUPROF	COINF
1329	Datashow	EPSON	Power Lite S41+	2019-12-03 21:08:39.8	SABU	OPROF	COINF
1327	Datashow	EPSON	Power Lite S41+	2019-12-03 21:03:24.8	ENTRDU	SUPROF	COINF
1328	Datashow	EPSON	Power Lite S41+	2019-12-03 21:02:13.8	ENTRDU	SUPROF	COINF
1331	Datashow	MEC	Projektor Interativo Proconf	2019-12-03 21:01:03.8	ENTRDU	SUPROF	COINF
1326	Datashow	EPSON	Power Lite S41+	2019-12-03 20:58:39.8	ENTRDU	SUPROF	COINF
1328	Datashow	EPSON	Power Lite S41+	2019-12-03 20:57:49.8	ENTRDU	SUPROF	COINF
1329	Datashow	MEC	Projektor Interativo Proconf	2019-12-03 20:57:39.8	ENTRDU	SUPROF	COINF
1328	Datashow	EPSON	Power Lite S41+	2019-12-03 20:57:25.8	ENTRDU	SUPROF	COINF

Figura 3. Tela de Histórico de Movimentações.

## 7 | SISTEMA DE MONITORAMENTO RFID WEB

Dando continuidade a validação do protótipo do sistema, foi necessário construir uma aplicação web para prover os serviços necessários para comunicação em rede, facilitando o acesso ao sistema por diferentes usuários, em ambientes distintos e com compatibilidade a diferentes sistemas operacionais. Para construção do sistema, foi desenvolvida uma *Application Programming Interface (API)* web utilizando o *framework Spring Boot*, um *framework* não intrusivo, baseado nos padrões de projeto inversão de controle e injeção de dependência (WALLS, 2015). Por meio desta API foi realizada a integração do middleware de comunicação RFID homologado no protótipo anterior, para ser consumida através de um novo painel, construído a fim de possibilitar uma melhor interação entre os usuários e o sistema. O painel web foi desenvolvido utilizando a ferramenta *ReactJS*, que possibilitou o desenvolvimento de interfaces intuitivas, de fácil acesso e proporcionando um desenvolvimento relativamente rápido. As novas funcionalidades implementadas no sistema, foram: cadastro de funcionários, cadastro de locais(setores), cadastro de tags, cadastro de ativos, entre outros.

No protótipo anterior, os dados eram armazenados no banco de dados proprietário da Microsoft, o *SQL Server Express*. Um dos critérios que proporcionaram a criação do sistema web, foi a decisão de utilizar um banco de dados flexível, gratuito, que possibilitasse alterações dinâmicas e rápidas para facilitar o desenvolvimento das novas funcionalidades. Para atender estas características foi escolhido o banco de dados como serviço (*DBaaS*) *Mongodb*<sup>1</sup> na versão 4.2, que permitiu o armazenamento na forma de coleções de dados. O banco de dados executava dentro do serviço *Atlas*, um serviço próprio sustentado pela *MongoDB*, disponibilizando uma capacidade de 500 Mb, suficiente para o início desta aplicação.

A Figura 4 apresenta os logs da API, onde é possível visualizar tags EPC sendo capturadas quando expostas ao receptor RFID, indicando assim que houve uma movimentação no ativo cujo a tag está associada.

---

<sup>1</sup> <https://account.mongodb.com/account/login>;

```

2021-02-11 18:24:13.995 INFO 976 --- [ousIoService-16] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : captured EPC code: 308833c2dd99140808080808
2021-02-11 18:24:13.997 INFO 976 --- [ousIoService-16] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : EPC code is in the list: 308833c2dd99140808080808
2021-02-11 18:24:13.999 INFO 976 --- [ousIoService-16] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : captured EPC code: e2811b57080820fa987d1e
2021-02-11 18:24:14.008 INFO 976 --- [ousIoService-16] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : EPC code is in the list: e2811b57080820fa987d1e
2021-02-11 18:24:14.006 INFO 976 --- [ousIoService-16] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : EPC: e28011057080820fa987d1e REGISTERED - SEEKING ASSET /
2021-02-11 18:24:14.090 INFO 976 --- [ousIoService-16] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : LAST MOVEMENT: 1
2021-02-11 18:24:14.094 INFO 976 --- [mouIoService-2] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : captured EPC code: fff00000000000000000001334
2021-02-11 18:24:14.094 INFO 976 --- [mouIoService-2] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : EPC code is in the list: fff00000000000000000001334
2021-02-11 18:24:14.095 INFO 976 --- [mouIoService-2] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : captured EPC code: 308833c2dd99140808080808
2021-02-11 18:24:14.095 INFO 976 --- [mouIoService-2] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : EPC code is in the list: 308833c2dd99140808080808
2021-02-11 18:24:15.357 INFO 976 --- [mouIoService-5] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : captured EPC code: e28011057080820fa987d1e
2021-02-11 18:24:15.357 INFO 976 --- [mouIoService-5] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : EPC code is in the list: e28011057080820fa987d1e
2021-02-11 18:24:15.358 INFO 976 --- [mouIoService-5] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : captured EPC code: fff00000000000000000001334
2021-02-11 18:24:15.358 INFO 976 --- [mouIoService-5] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : EPC code is in the list: fff00000000000000000001334
2021-02-11 18:24:15.359 INFO 976 --- [mouIoService-5] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : captured EPC code: 308833c2dd99140808080808
2021-02-11 18:24:15.359 INFO 976 --- [mouIoService-5] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : EPC code is in the list: 308833c2dd99140808080808
2021-02-11 18:24:15.361 INFO 976 --- [mouIoService-5] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : captured EPC code: fff00000000000000000001337
2021-02-11 18:24:15.361 INFO 976 --- [mouIoService-5] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : EPC code is in the list: fff00000000000000000001337
2021-02-11 18:24:15.361 INFO 976 --- [mouIoService-5] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : captured EPC code: e28011057080820fa987d1e
2021-02-11 18:24:15.362 INFO 976 --- [mouIoService-5] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : EPC code is in the list: e28011057080820fa987d1e
2021-02-11 18:24:15.363 INFO 976 --- [mouIoService-5] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : captured EPC code: e28011057080820fa987d1e
2021-02-11 18:24:15.363 INFO 976 --- [mouIoService-5] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : EPC code is in the list: e28011057080820fa987d1e
2021-02-11 18:24:15.364 INFO 976 --- [mouIoService-5] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : captured EPC code: e28011057080820fa987d1e REGISTERED - SEEKING ASSET /
2021-02-11 18:24:15.366 INFO 976 --- [mouIoService-5] b.e.i.r.a.middleware.rfidMiddleware : LAST MOVEMENT: 1

```

Figura 4. Logs da aplicação exibindo o EPC durante a captura do receptor RFID.

Como trabalho futuro, pretende-se criar a documentação de requisitos do software e pesquisar a existência de sistemas próprios de código aberto que apresentem características semelhantes que permitam uma adaptação.

## 8 | SISTEMA DE MONITORAMENTO RFID WEB

Para realizar os testes caixa preta no *back-end*, utilizou-se a ferramenta *Insomnia*, que executa requisições http/https na aplicação, validando toda a construção do request e response enviados pela aplicação. *Insomnia* permite trabalhar com requisições de todos os tipos. A Figura 9 apresenta um exemplo da requisição POST para o path /tag que é, segundo os princípios de uma API Rest, a forma mais adequada para se criar uma tag (REDHAT, 2021). Neste caso, vê-se que foi enviada uma troca de informações (*body*), usando a notação JSON incluindo 2 propriedades, código EPC e tipo da tag.



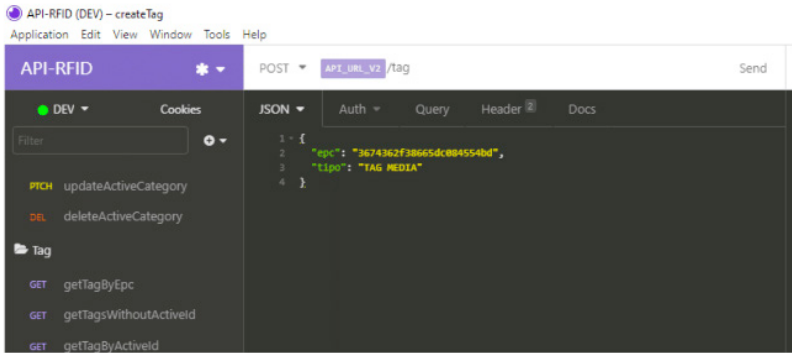


Figura 5. Requisição de Cadastro de Tag no Insomnia.

Para simular a aplicação rodando em um ambiente real, foi utilizado o serviço do Heroku<sup>2</sup>, que possibilita disponibilizar uma aplicação com todos os requisitos necessários para execução, usando sua plataforma livre (*free tier*).

Entre as funcionalidades implementadas estão as Figuras 6, 7 e 8 que apresentam o cadastro de tags (etiquetas *RFID*), a consulta dos ativos e o cadastro de ativos.

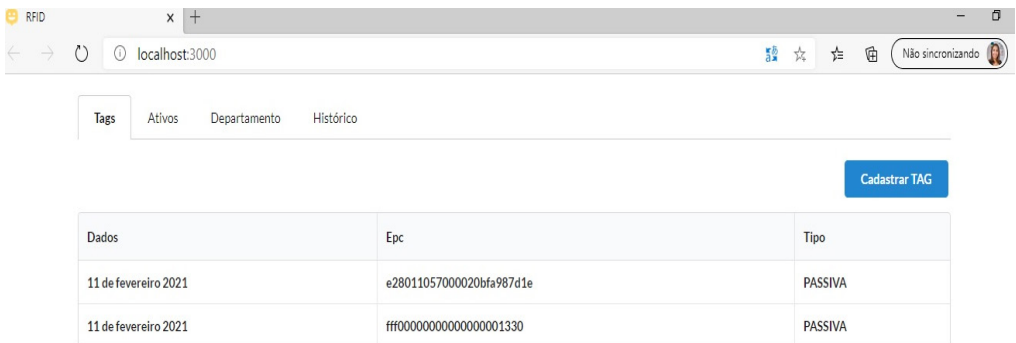


Figura 6. Cadastro de Tags.

<sup>2</sup> <https://www.heroku.com/free>

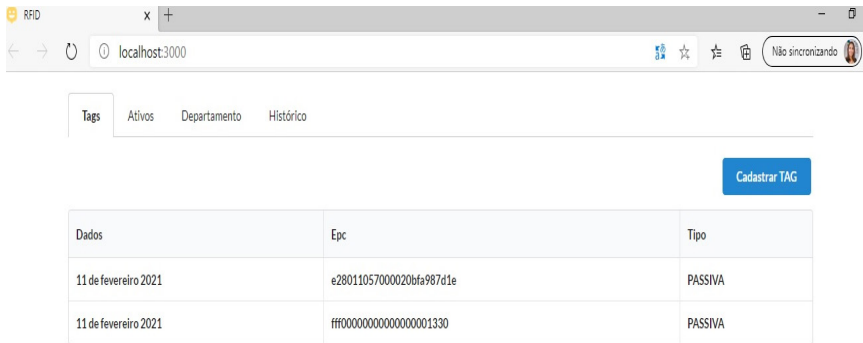


Figura 7. Lista de Ativos.

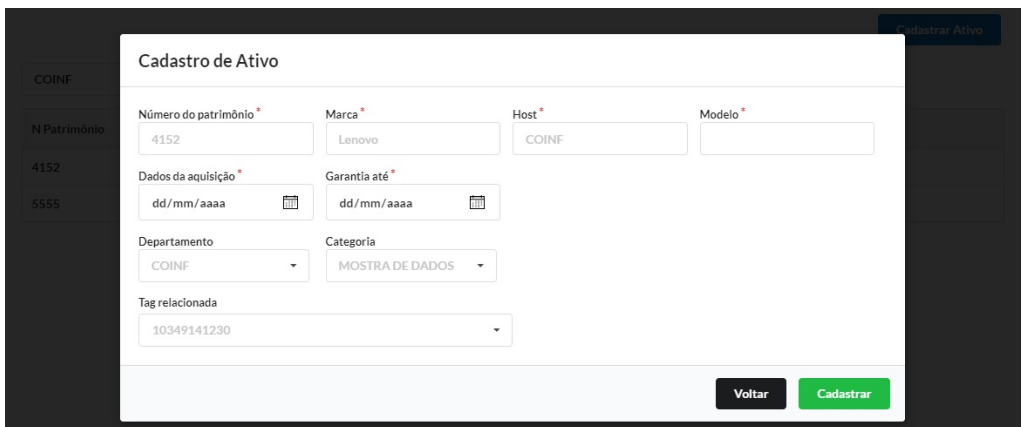


Figura 8. Cadastro de Ativos.

Com a integração do *front-end e back-end*, o sistema foi testado em um ambiente controlado como apresenta a Figura 9, onde foi executado um teste em toda a aplicação, desde o leitor fixo da marca Honeywell, antena externa do tipo linear polarizada (7,5 dBi), tags do tipo *smart label* e notebook i5, modelo Aspire 5 da marca Acer. Todos conectados à aplicação por meio do middleware conectado no protótipo, como também a integração desenvolvida entre o *back-end* e o painel *front-end* da mesma.

Por fim, foram realizados testes de cadastro de tags e associação a um determinado ativo, até mesmo a simulação de um ativo sendo movido de um local para outro. Como resultado esperado, o sistema monitorava toda a movimentação deste ativo e as registrava, garantindo assim o pleno funcionamento do sistema desenvolvido conforme o proposto inicialmente.



Figura 9. Ambiente de Teste do Sistema.

## 9 | CONCLUSÃO

A tecnologia RFID é utilizada para detecção e identificação automática de objetos que pode ser aplicada em uma série de situações, inclusive na manufatura, logística e distribuição, proporcionando mais visibilidade, rastreamento e sincronização da cadeia de suprimentos, com total confiabilidade.

Neste trabalho, o objetivo de utilizá-la esteve em construir um sistema de controle de ativos com base na tecnologia RFID, utilizando um ambiente web capaz de controlar, em tempo real, a entrada e a saída dos ativos pertencentes a uma organização. Espera-se com este projeto, melhorar o controle e monitoramento dos ativos da instituição, além de promover o aprendizado da equipe no manuseio de uma tecnologia atual.

Como trabalho futuro, pretende-se realizar a implantação do sistema e projetar o mesmo para outros campi da instituição.

## REFERÊNCIAS

BRASIL, G. **Epc/rfid. 2004**. Disponível em: <<https://www.gs1br.org/codigos-e-padroes/epc-RFID>>. Acesso em: 05 set. 2019.

CHINELATTO, C. **Tecnologia de Identificação por Radiofrequencia - RFID aplicada em sistemas de gerenciamento de armazéns**. 2010. Disponível em: <<https://tinyurl.com/y7thrtz>>. Acesso em: 07 out. 2019.

FERNANDES, V. R. C. et al. **Implantação de sistema de auto-atendimento RFID (Radio Frequency Identification) em bibliotecas**. 2019. Disponível em: <<http://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/4331>>. Acesso em: 07 jul. 2021.

HESSEL, F. **Implementando RFID na Cadeia de Negócios**. 2. Ed. Porto Alegre, RS: Editora EDIPUCRS, 2012.

IEEE, C.S. **IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications**. 1998.

REDHAT. **O que é API REST?**. 2021. Disponível em: <https://www.redhat.com/pt-br/topics/api/what-is-a-rest-api>. Acesso em: 09 jul. 2021.

ROISOFT. Sistema Integração Equipamentos RFID e Banco de Dados.2019. Disponível em: <<https://www.roisoft.com/solucoes/roi-middleware>>. Acesso em: 09 nov. 2019.

WALLS, C. **Spring Boot in action**. Simon and Schuster, 2015.

## SISTEMAS ESTRUTURAIS CONVENCIONAIS E SISTEMAS DE LAJES LISAS EM EDIFÍCIOS DE CONCRETO ARMADO

*Data de aceite: 02/08/2021*

*Data de submissão: 30/04/2021*

### **Pablo Juan Lopes e Silva Santos**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia do Piauí  
Teresina – Piauí  
<http://lattes.cnpq.br/6734564205405210>

### **Carlos Henrique Leal Viana**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia do Piauí  
Teresina – Piauí  
<http://lattes.cnpq.br/5126094758903357>

### **Sávio Torres Melo**

Centro Universitário do Piauí (UNIFAPI)  
Teresina – Piauí  
<http://lattes.cnpq.br/1207620183365048>

### **Rebeka Manuela Lobo Sousa**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia do Piauí  
Teresina – Piauí  
<http://lattes.cnpq.br/6214319560629327>

### **Tiago Monteiro de Carvalho**

CEEP José Pacífico de Moura Neto  
Teresina – Piauí  
<http://lattes.cnpq.br/2162762581194082>

### **Thiago Rodrigues Piauilino Ribeiro**

Faculdade de Ensino Superior de Floriano  
(FAESF)  
Floriano – Piauí  
<http://lattes.cnpq.br/3111845764872632>

**RESUMO:** A concepção estrutural de edifícios cada vez mais esbeltos influencia diretamente na estabilidade global, e a redução da rigidez através da supressão das vigas em alguns tipos de sistemas estruturais faz com que sejam ainda mais suscetíveis às ações horizontais de vento. Neste trabalho, verificou-se o efeito da substituição de um sistema convencional de lajes e vigas por um sistema com lajes lisas em um edifício de concreto armado através de software de análise estrutural, bem como a influência da utilização de pilares-parede na estabilidade global e na resistência à punção das lajes. Para isso, fez-se uma análise dos deslocamentos e do parâmetro de estabilidade global de cinco modelos estruturais, variando o sistema estrutural e as dimensões dos pilares. Assim, observou-se um aumento nos deslocamentos máximos de 187,70% do modelo convencional para o de lajes lisas. No sistema com vigas, o valor de  $\gamma_z$  foi de 1,038; já no de lajes lisas, o valor aumentou para 1,102. Os resultados demonstraram que o uso de pilares-parede é uma excelente alternativa para o contraventamento e redução de deslocamentos em sistemas de lajes lisas. Porém, verificou-se a formação de cones de ruptura à punção diferentes do modelo de verificação recomendado pela NBR 6118 (2014).

**PALAVRAS - CHAVE:** sistema estrutural, lajes lisas, pilares-parede, estabilidade global, punção.

## CONVENTIONAL STRUCTURAL SYSTEMS AND SYSTEMS WITH FLAT SLABS IN REINFORCED CONCRETE BUILDINGS

**ABSTRACT:** The structural design of increasingly slender buildings directly influences global stability, and the reduction of stiffness through the suppression of beams in some types of structural systems makes them even more susceptible to horizontal wind actions. This work aims to verify the effects of replacing a conventional system of slabs and beams with a system with flat slabs in a reinforced concrete building using structural analysis software, as well as the influence of the use of walls on the overall stability. For this, an analysis was made of the displacements and the global stability parameter of five structural models, varying the structural system and the dimensions of the columns. Thus, an increase in the maximum displacement of 187.70% was observed from the conventional model to the model with flat slabs. In the system with beams, the value of  $\gamma_z$  was 1.038; in the case of flat slabs, the value increased to 1.102. The results showed that the use of walls is an excellent alternative for bracing and reducing displacements in flat slab systems. However, there was a formation of punching rupture cones different from the verification model recommended by NBR 6118 (2014).

**KEYWORDS:** structural system, flat slabs, walls, global stability, punching.

### 1 | INTRODUÇÃO

A utilização de sistema estrutural composto por lajes lisas em detrimento de sistemas convencionais com lajes apoiadas em vigas tem sido cada vez mais comum, pois possibilita ambientes com pé-direito reduzido, maior ventilação e iluminação, devido à ausência daqueles elementos. Do ponto de vista econômico, Araújo (2014) comenta que esta solução estrutural possibilita uma redução no peso próprio das edificações devido ao menor volume de concreto utilizado, facilidade de armação e simplificação dos tipos de formas, resultando em menor tempo de execução.

A necessidade de otimização dos espaços urbanos busca solução na construção de edifícios cada vez mais esbeltos, e isso representa a primeira ponderação que se deve fazer quanto à utilização de lajes lisas. Damasceno (2007) explana que a escolha deste sistema estrutural tem influência direta na estabilidade global, pois a redução da rigidez resultante da supressão das vigas o torna mais deformável a ação das cargas horizontais. Para a mitigação deste problema, Araújo (2014) propõe a utilização de contraventamentos, a exemplo dos pilares-parede.

Melges (2001) explica que a segunda ponderação a ser feita quanto à utilização de lajes lisas é relativa à ruptura por punção, que ocorre devido a elevadas tensões cisalhantes atuantes em pequenas áreas, a exemplo da região da ligação laje-pilar. Neto (2012) alerta sobre os riscos desse tipo de ruína, que ocorre de forma frágil, sem aviso prévio, podendo afetar a totalidade da estrutura.

O aumento da rigidez da estrutura através do uso de pilares-parede contribui favoravelmente para a estabilidade global, mas afeta o comportamento à punção das

lajes lisas. Neste tema, destaca-se o trabalho de Oliveira (2003) que estudou o caso de pilar-parede com índice de retangularidade  $C1/C2$  igual a 5, e comprovou de maneira experimental a formação de mais de um único cone de ruptura, ao contrário do perímetro crítico sugerido pela NBR 6118 (2014). Já Feitoza e Silva (2010) analisaram lajes lisas apoiadas sobre pilares com  $C1/C2$  igual a 8 e comprovaram de maneira computacional este efeito.

A motivação deste trabalho surge devido a carência de estudos mais específicos da interação entre lajes lisas e pilares-parede para valores de  $C1/C2$  maior do que 5, no que diz respeito à estabilidade global e a punção. Faz-se necessária a verificação computacional da diminuição percentual dos deslocamentos numa estrutura com lajes lisas e pilares-parede de larguras variadas, bem como a comprovação da eficiência da consideração da superfície de controle proposta pela NBR 6118 (2014) de modo que o cálculo não resulte em subdimensionamento.

## 2 | PUNÇÃO EM LAJES

Santos et al. (2014) menciona que as lajes lisas sofrem ruptura por punção com a propagação de fissuras tangenciais, com inclinação entre  $26^\circ$  a  $45^\circ$ , e as fissuras radiais, levando a formação de um cone de ruptura à medida que os carregamentos vão sendo aumentados. A Figura 1 de Santos (2014) ilustra este comportamento.

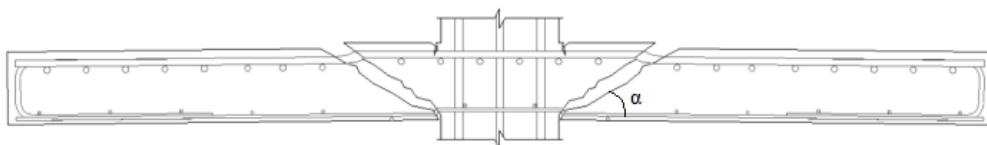


Figura 1. Ruptura por punção

Oliveira (1998) cita como medidas para o aumento da resistência à punção o uso da protensão, armadura de cisalhamento e a utilização de concretos de alta resistência. Damasceno (2007) também comprovou a correlação entre a redução dos efeitos de punção e o aumento da retangularidade dos pilares. Holanda (2002) alerta ainda que a alta taxa de armação pode contribuir para a ruína por punção. A resistência à flexão das lajes é determinada através da Teoria das Linhas de Ruptura de Ingerslev de 1923, em que a plastificação ocorre em regiões definidas por linhas.

A NBR 6118 (2014) apresenta o modelo de cálculo que corresponde à verificação do cisalhamento em duas ou mais superfícies críticas definidas no entorno de forças concentradas. Assim, para um pilar interno com carregamento simétrico, a força de punção pode ser reduzida da força distribuída aplicada na face oposta da laje, dentro do contorno

considerado na verificação, conforme ilustra a Figura 2 da NBR 6118 (2014).

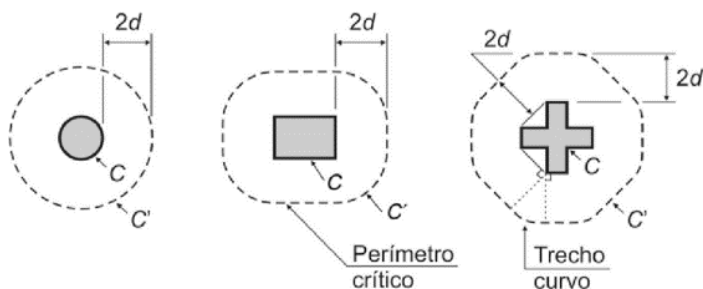


Figura 2. Perímetro crítico

### 3 | PILARES-PAREDE

A NBR 6118 (2014) define pilar-parede como o elemento estrutural cuja maior dimensão da seção transversal supera em cinco vezes a menor dimensão. Araújo (2014) classifica-os como pilares cujas seções são compostas por retângulos de pequena espessura, podendo ser abertas ou fechadas. A Figura 3 de Araújo (2014) ilustra os tipos de pilares-parede.

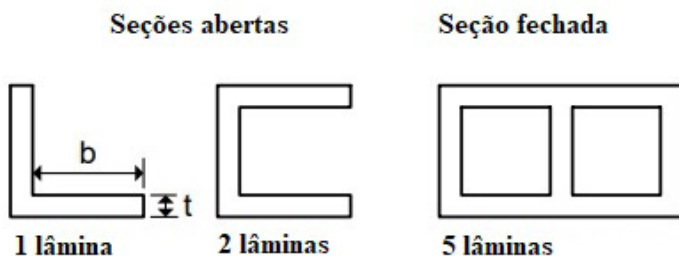


Figura 3. Seções de pilares-parede

Segundo a NBR 6118 (2014), em pilares-parede pode-se ter uma região que apresenta não retilineidade maior que do que a do eixo do pilar como um todo. Assim, nessas regiões surgem efeitos de segunda ordem maiores, chamados de efeitos de segunda ordem localizados que aumentam a flexão longitudinal e transversal. Assim, esta norma prevê para que os pilares-parede possam ser incluídos como elementos lineares no conjunto resistente da estrutura, deve-se garantir que sua seção transversal tenha forma mantida por travamentos adequados nos diversos pavimentos e que os efeitos de segunda ordem locais e localizados sejam convenientemente avaliados.

Santos e Viana (2020) mostraram que o uso de ligações centradas entre



vigas e pilares-parede com índice de retangularidade C1/C2 maior do que 5 favorece significativamente na estabilidade de edifícios em comparação a utilização de ligações excêntricas, pois à medida que maiores larguras dos pilares-parede conferem uma maior rigidez destes elementos de contraventamento, também ampliam a área de atuação dos carregamentos horizontais de vento, diminuindo a rigidez das ligações e aumentando da influência da excentricidade.

## 4 | ESTABILIDADE DE EDIFÍCIOS

Com edifícios cada vez mais altos e esbeltos, surgem deslocamentos que passam a ser regidos, além do carregamento vertical inicial, pelas ações horizontais. Com isso, a estrutura passa a apresentar uma configuração deformada, diferente da concepção original. A partir disso, Lima (2001) explica que são realizadas considerações ditas de segunda ordem, em que os esforços seguem um comportamento não-linear, ao contrário da situação indeformada.

A solicitação de estruturas de edifícios por ações horizontais e verticais de modo simultâneo determina a necessidade de atentar ao problema da estabilidade global. Conforme Cicolin (2007), a variação dos esforços que surgem nas estruturas como consequência da deformação devida às ações horizontais (efeitos de segunda ordem) dependerá principalmente da deformabilidade horizontal da estrutura e da magnitude dessas ações. Diante do estudo do comportamento da estrutura em face da não linearidade do concreto armado, tem-se a não linearidade física (NLF) e a não linearidade geométrica (NLG).

Conforme a NBR 6118 (2014), na verificação dos efeitos de segunda ordem em estruturas reticuladas com no mínimo quatro pavimentos, é levada em consideração a não linearidade física de forma aproximada, minorando a rigidez dos elementos estruturais de acordo com o seu tipo. Moncayo (2011) explica que as estruturas são consideradas de nós fixos quando os efeitos globais de segunda ordem são irrelevantes, ou seja, inferiores a 10% dos de primeira ordem, e são consideradas de nós móveis quando os efeitos de segunda ordem são responsáveis por, no mínimo, 10% dos respectivos esforços de primeira ordem.

Franco e Vasconcelos (1991) determinam o coeficiente  $\gamma_z$ , parâmetro utilizado na análise de estabilidade global de edifícios, como majorador dos esforços de primeira ordem para obtenção dos esforços finais, os quais já incluem os esforços de segunda ordem. De acordo com a NBR 6118 (2014), o valor de  $\gamma_z$  para cada combinação de carregamento é dado pela eq. (1), que relaciona o momento de tombamento atuante na estrutura ( $M_{1,tot,d}$ ), que é a soma dos momentos resultantes da atuação das forças horizontais com seus valores de cálculo em relação a base das estruturas, com a soma dos momentos causados pelas forças verticais atuantes na estrutura na configuração deformada ( $\Delta M_{tot,d}$ ).

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1,tot,d}}} \quad (1)$$

Quanto à deslocabilidade, se o coeficiente  $\gamma_z$  for menor ou igual a 1,1, a estrutura é de nós fixos, e se  $\gamma_z$  for maior que 1,1 e menor ou igual a 1,3, a estrutura é considerada de nós móveis. Cicolin (2007) diz que o valor de  $\gamma_z$  aproxima de uma maneira conveniente aos coeficientes de ampliação dos momentos fletores, possibilitando prever de forma antecipada os valores resultantes de uma análise de segunda ordem. Outro fator relevante na análise dos efeitos causados pelo movimento lateral de edifícios é o deslocamento provocado pela ação do vento para combinação frequente previsto na NBR 6118 (2014). Segundo esta norma, os deslocamentos horizontais limites em edifícios são dados pelas relações  $H/1700$  e  $H_i/850$ , para deslocamentos entre pavimentos, sendo  $H$  a altura total da edificação e  $H_i$  a altura entre pavimentos.

## 5 I METODOLOGIA

Neste trabalho foram estudados os comportamentos de dois tipos de edifícios de concreto armado de 4 pavimentos, sendo um com sistema estrutural convencional, com lajes apoiadas sobre vigas, e outro com sistema de lajes lisas. Os modelos possuem pé-direito de 2,85 m e 2,80 m, altura total de 12,00 m, dimensões de 6,00 m x 12,00 m, resistência característica à compressão do concreto aos 28 dias igual a 30 MPa e módulo de elasticidade secante igual a 26.838,41 MPa. As considerações utilizadas para o cálculo das cargas horizontais de vento foram de  $v_0$  igual a 30m/s, categoria II, classe A, fator topográfico  $S_1$  igual a 1,0, fator de rugosidade  $S_2$  com valor de 0,90 e fator estatístico  $S_3$  igual a 1,0. Foi adotada uma sobrecarga de 2,5 kN/m<sup>2</sup> e carregamento permanente de 0,15 kN/m<sup>2</sup>. No total, foram utilizados 5 modelos de pórticos, identificados de acordo com o sistema estrutural utilizado e o índice de retangularidade  $C_1/C_2$  dos pilares, em que foram analisados os deslocamentos máximos no topo dos pilares, a estabilidade global e a formação dos cones de ruptura a punção nos pilares centrais, P4, dos modelos de lajes lisas. A Tabela 1 reúne todos estes modelos.

Modelo	Descrição
SC	Sistema convencional
SLPQ	Sistema de lajes lisas apoiadas em pilares quadrados (30x30) $C_1/C_2=1$
SLPPC1C2/5	Sistema de lajes lisas apoiadas em pilares-parede (20x100) $C_1/C_2=5$
SLPPC1C2/6	Sistema de lajes lisas apoiadas em pilares-parede (20x120) $C_1/C_2=6$
SLPPC1C2/7	Sistema de lajes lisas apoiadas em pilares-parede (20x140) $C_1/C_2=7$

Tabela 1. Identificação dos modelos utilizados

O modelo SC é composto por duas lajes de 0,15 m de espessura, apoiadas sobre vigas externas de 0,20 m x 0,60 m e uma viga central de maior rigidez, e dimensões de 0,30 m x 0,70 m, que pode ser visto na Figura 4a. Os modelos SLPQ e SLPP são caracterizados pela ausência de vigas e lajes únicas, com espessura de 0,20 m, diferindo apenas nos tipos de pilares em que as lajes estão apoiadas. A Figura 5 ilustra um modelo do tipo SLPP, indicando as disposições dos pilares-parede de dimensões 0,20 m x 1,00 m, em que a laje lisa deste modelo de pórtico está apoiada. Os demais modelos deste tipo seguem a mesma concepção estrutural, porém com dimensões diferentes para os pilares-parede.

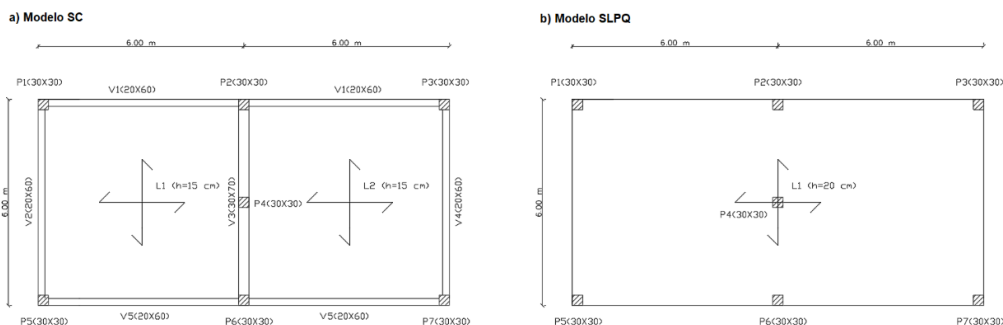


Figura 4. Planta de forma dos modelos SC e SLPQ

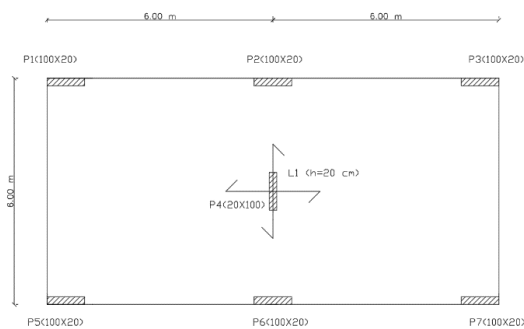


Figura 5. Planta de forma do modelo SLPPC1C2/5

## 6 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após análise dos deslocamentos máximos no software CypeCAD, considerando a combinação de peso próprio, carregamento permanente, sobrecarga, combinadas com as cargas horizontais de vento nas direções 0° e 90°, encontraram-se as estruturas deformadas dos modelos SC e SLPQ, representadas nas Figura 6a e Figura 6b, respectivamente, em que se pode observar uma maior deslocabilidade na estrutura com lajes lisas e ausência de vigas.



Figura 6. Estrutura deformada do sistema convencional e de lajes lisas

Os pórticos dos modelos SLPP foram analisados de maneira análoga, distinguindo apenas na análise dos pilares-parede, que foram considerados como elementos de chapa, e não de barra, como nos pilares quadrados do modelo SLPQ. Utilizando o método dos elementos finitos, os elementos verticais foram discretizados em elementos triangulares de forma a constituir uma malha, resultando numa verificação mais fidedigna.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados das análises dos modelos propostos, de acordo com as combinações citadas anteriormente e representadas aqui pela letra C, combinada com as cargas horizontais de vento. Constatou-se um aumento percentual máximo dos deslocamentos de 187,70% entre os modelos SC e SLPQ, mostrando a grande influência do tipo de sistema estrutural no comportamento da estrutura. A supressão das vigas, e conseqüente diminuição de rigidez da estrutura frente as ações horizontais, levou a estrutura a ultrapassar o limite de deslocabilidade horizontal de  $H/1700$  igual a 7,06 mm, preconizado pela norma NBR 6118 (2014), além de ter o ultrapassado o valor limite de 1,1 do parâmetro  $\gamma_z$ , passando a se comportar como estrutura de nós móveis, em que os efeitos de segunda ordem passam a ser considerados nos cálculos e verificações.

Com a utilização de pilares-parede como elementos de contraventamento nos pórticos com lajes lisas, verificou-se uma grande redução dos deslocamentos máximos na estrutura, obtendo-se uma diminuição percentual de 59,11% entre os modelos SLPQ e SLPPC1C2/5, e de 15,78% e 15,46%, entre os modelos SLPPC1C2/5 e SLPPC1C2/6, e entre SLPPC1C2/6 e SLPPC1C2/7, respectivamente. A diminuição percentual total foi de 70,89% entre os modelos SLPQ e SLPPC1C2/7. Assim, comprovou-se a grande eficácia deste tipo de solução na estabilidade global de edificações com lajes lisas, pois todos os modelos do tipo SLPP se comportaram como estruturas de nós fixos.

Modelo	$\delta_{\text{máx}}$ (mm)		Parâmetro $\gamma_z$	
	C+Vento 0°	C+Vento 90°	C+Vento 0°	C+Vento 90°
SC	4,31	3,06	1,038	1,031
SLPQ	12,40	6,98	1,102	1,091
SLPPC1C2/5	5,07	1,79	1,019	1,032
SLPPC1C2/6	4,27	1,48	1,014	1,026
SLPPC1C2/7	3,61	1,26	1,011	1,021

Tabela 2. Valores de deslocamentos máximos e parâmetro  $\gamma_z$

Após análise do comportamento do esforço cortante total nos pilares centrais P4 dos modelos, verificou-se a formação de um cone de ruptura com superfície crítica bem definida no modelo SLPQ, condizente com o estabelecido pela NBR 6118 (2014), e mostrado na Figura 7. Porém, nos demais modelos com lajes lisas, à medida que se aumentou a retangularidade dos pilares, constatou-se o início da formação de dois meio-cones de ruptura no modelo SLPPC1C2/5, como mostra a Figura 7b, evoluindo para a completa concentração dos esforços nos cantos do pilar-parede da Figura 7d.

As maiores tensões foram verificadas no pilar central do modelo SLPPC1C2/7 devido a tendência de concentração destas nos cantos de pilares retangulares. A NBR 6118 (2014) recomenda a verificação da punção ao longo de um perímetro de controle de raio  $2d$ , em que  $d$  é a altura útil da laje, porém fica evidente que esta metodologia não é compatível nas verificações para pilares-parede, e devem ser feitas análises experimentais para determinação perímetros críticos condizentes para cada índice C1/C2 acima de 5, sob risco de se obterem tensões solicitantes menores do que as necessárias, devido a consideração de uma área de distribuição maior e irreal.

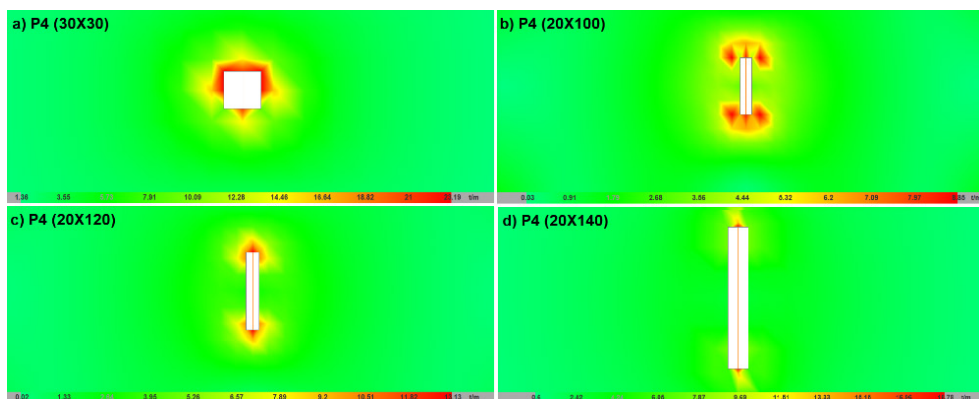


Figura 7. Cones de ruptura dos pilares centrais P4 dos modelos para o esforço cortante total

## 7 | CONCLUSÕES

Após análise dos resultados dos modelos estudados neste trabalho, pode-se concluir a grande influência que a escolha de um sistema estrutural possui no comportamento das edificações. A opção pelo sistema de lajes lisas proporciona uma série de vantagens construtivas e arquitetônicas, porém, afeta diretamente a estabilidade da estrutura, com aumento percentual de 187,70% nos deslocamentos máximos. Isso resultou em uma estrutura de nós móveis, em que o limite de deslocabilidade lateral  $H/1700$  da NBR 6118 (2014) foi ultrapassado. A utilização de pilares-parede como solução de contraventamento se mostrou bastante eficiente, obtendo-se uma redução percentual total dos deslocamentos

de 70,89% entre o modelo de lajes lisas com pilares quadrados, e o modelo com pilares-parede de índice de retangularidade C1/C2 igual a 7.

Foram analisados, também, o comportamento à punção dos pilares centrais dos modelos de lajes lisas. Verificou-se que no modelo SLPQ, a superfície crítica formada no entorno do pilar correspondeu ao modelo de verificação recomendado pela NBR 6118 (2014), porém, nos modelos SLPQ, constatou-se a formação de dois meio-cones de ruptura, com os esforços se concentrando nas extremidades, à medida que a relação C1/C2 ia aumentando. Portanto, recomenda-se a utilização de pilares-parede como uma excelente solução para contraventar sistemas de lajes lisas, desde que sejam consideradas as particularidades do comportamento à punção destes elementos estruturais, com a utilização de perímetros de controle específicos para a verificação precisa das tensões solicitantes e correto dimensionamento.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, J. M. **Curso de concreto armado**. v.3, 4.ed. Porto Alegre: Dunas, 2014.

ARAÚJO, J. M. **Curso de concreto armado**. v.4, 4.ed. Porto Alegre: Dunas, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto armado – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

CICOLIN, L. A. B. **Estabilidade em edifícios de concreto armado com pavimentos em lajes planas**. 2007. 142 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

DAMASCENO, L. S. R. **Análise experimental de lajes lisas unidirecionais de concreto armado com pilares retangulares ao punçionamento**. Dissertação de Mestrado. Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

FEITOZA, V. A. S.; SILVA, R. J. C. **Punção em lajes lisas de concreto armado apoiadas em pilares-parede**. In: Anais do 52º Congresso Brasileiro do Concreto. 2010.

FRANCO, M.; VASCONCELOS, A.C. **Practical assessment of second order effects in tall buildings**. In: COLOQUIUM ON THE CEB-FIP MC90, 1991, Rio de Janeiro. Anais.

HOLANDA, K. M. A. **Análise dos mecanismos resistentes e das similaridades de efeitos da adição de fibras de aço na resistência e na ductilidade à punção de lajes-cogumelo e ao cisalhamento de vigas de concreto**. São Carlos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.

LIMA, J. S. **Verificações da punção e da estabilidade global em edifícios de concreto: desenvolvimento e aplicação de recomendações normativas**. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2001.

MELGES, J. L. P. **Análise experimental da punção em lajes de concreto armado e protendido**. São Carlos. 2v. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001.

MONCAYO, W. J. Z. **Análise de segunda ordem global em edifícios com estrutura de concreto armado**. 2011. 221 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 2011

NETO, A. F. L. **Punção em lajes cogumelo de concreto armado com capitéis**. Tese de doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

OLIVEIRA, D. R. C. **Análise experimental de lajes cogumelo de concreto armado com pilares retangulares**. Tese de doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

OLIVEIRA, D. R. C. **Análise experimental de lajes cogumelo de concreto de alta resistência com armadura inclinada de punção**. Tese de doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 1998.

SANTOS, G. S.; NICÁCIO, W. G.; LIMA, A. W.; MELO, G. S. S. A. **Punching strengthening in flat plates of reinforced concrete with carbon fiber reinforced polymer (CFRP)**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 7, n. 4, p. 592-625, 2014.

SANTOS, P. J. L. S.; VIANA, C. H. L. **Análise comparativa da influência da excentricidade da ligação viga e pilar-parede em edifícios de concreto armado considerando diferentes coeficientes de restrição à rotação**. Revista Tecnologia, v. 41, n.1, p. 1-19, 2020.

## SOCIEDADE 5.0 CORRELACIONADA COM A INDÚSTRIA 4.0 E A TRANSFORMAÇÃO DIGITAL

Data de aceite: 02/08/2021

Data de submissão: 06/07/2021

### Pablo Fernando Lopes

Instituto de Educação Tecnológica – IETEC  
Araxá – MG

<http://lattes.cnpq.br/8537069283101168>

<https://orcid.org/0000-0002-3477-0252>

### Thiago Silva Souza

Instituto de Educação Tecnológica – IETEC  
Nova Serrana - MG

### Fernando Hadad Zaidan

Instituto de Educação Tecnológica – IETEC  
Belo Horizonte - MG

<http://lattes.cnpq.br/4835234239471713>

**RESUMO:** A Sociedade 5.0 ou Sociedade Criativa, originada no Japão em 2016, evidenciado através das transformações e imaginações. As vantagens dessa nova sociedade exposta são a facilidade de um atendimento médico online em casa, a mobilidade de transportes públicos automatizados e entregas de mercadorias via *drones*, além de infraestrutura com informações e comunicações tecnológicas e a agilidade de fazer compras. Este estudo teve por objetivo identificar a relação da Sociedade 5.0 envolvida no contexto da Indústria 4.0 e a Transformação Digital. Assim, o roteiro metodológico utilizado foi uma pesquisa qualitativa com o tipo descritiva, além de delineamento de pesquisa bibliográfico e coleta de dados documental secundário. Através

da pesquisa realizada, foi diagnosticado um comparativo entre a sociedade e a indústria ao longo da história e a transformação digital inserida no contexto da Indústria 4.0 que está aliada com a Sociedade 5.0. Assim, foi possível concluir que a Sociedade Criativa, por meio das revoluções indústrias e a da transformação digital, permite que o ser humano resolva problemas e crie novos valores.

**PALAVRAS - CHAVE:** Sociedade 5.0. Indústria 4.0. Transformação Digital. Ser Humano. Sociedade Criativa.

### SOCIETY 5.0 CORRELATED WITH INDUSTRY 4.0 AND DIGITAL TRANSFORMATION

**ABSTRACT:** Society 5.0 or Creative Society, originated in Japan in 2016, evidenced through transformations and imaginations. The advantages of this new society displayed are the facility of an online home healthcare access, automated public transport mobility and drone delivering of goods, above infrastructure with information and technology communications, and the agility to trade. This issue study claimed as its purpose to identify the relationship of the Society 5.0 involved in the context of Industry 4.0 and Digital Transformation. Thus, the methodological script used was a qualitative research with a descriptive type, as well as a bibliographic research design and then after all a secondary documentary data collection. Through this research, a comparison between society and industry was diagnosed throughout history and the digital transformation inserted in the context of Industry 4.0, which is allied with Society 5.0.



Therefore, due to all mentioned it was possible to conclude that the Creative Society through the industrial revolutions and the digital transformation allow the human being to solve problems and create new values.

**KEYWORDS:** Society 5.0. Industry 4.0. Digital Transformation. Human being. Creative society.

## 1 | INTRODUÇÃO

A Sociedade 5.0, originada no Japão no ano de 2016, iniciou-se pelo Gabinete Japonês na *5th Science and Technology Basic Plan*<sup>1</sup>, trazendo uma nova perspectiva de vida humana, aprimorando produtividade e qualidade de vida. Sua evolução começou com o ser humano, que buscou o seu próprio sustento, através da caça (Sociedade 1.0). Em seguida, a fase da agricultura para sustento próprio e cuidado do rebanho (Sociedade 2.0). Logo após, a era da sociedade industrial (Sociedade 3.0), que simultaneamente surgiu a primeira revolução industrial (Meados do século XVIII). Adiante, houve o surgimento da sociedade da informação com a introdução da *web* (Sociedade 4.0), além da Indústria 3.0. Por fim a sociedade criativa, denominada Sociedade 5.0, com o surgimento na mesma década da Indústria 4.0 (KEIDANREN, 2016).

A Sociedade 5.0 chegou para indicar uma nova sociedade desenvolvida por transformações acopladas pela inovação científica e tecnológica (HARAYAMA, 2017). Na contextualização atual, denota-se a expansão tecnológica como um conjunto de métodos e ferramentas para se adequar cada vez mais ao contexto em que o homem está inserido.

Dessa forma, o avanço da tecnologia é perceptível, comparado há um século. A maneira de como gerir negócios, meios de locomoção, bem como os meios de comunicação, tem se tornado ferramentas indispensáveis para a sociedade do século XXI. Portanto, o presente estudo apresenta o problema de pesquisa: Qual a associação da Sociedade 5.0 com a indústria e a transformação digital? Posteriormente, como objetivo da pesquisa, o foco é identificar a relação da Sociedade 5.0, envolvida no contexto da Indústria 4.0 e a Transformação Digital.

Assim, toda essa evolução da tecnologia, através de criações de novas ferramentas, como exemplo Internet das coisas (*IOT*), Dados Aumentados (*Big Data*), Cidade Inteligente (*Smart Cities*), Robotica (*Drone*), Inteligência Artificial (*AI*), dentre outros, a sociedade precisa estar preparada para entrar nesta superfície da Cybernetic que representa o mundo da web.

Sobre o tema elucidado em primeiro instante, o objetivo do presente estudo é conceituar o assunto por se tratar “estado da arte”, ou seja, atual no meio científico e além de trazer uma nova perspectiva para a sociedade. Contudo, a exploração do tema vem ao encontro dos pesquisadores que almejam desvendar os passos trilhados pela Sociedade

<sup>1</sup> The 5th Science and Technology Basic Plan refere-se a um plano de governo Japonês aprovado em decisão de gabinete em 22 de janeiro de 2016 (KEIDANREN, 2016).

5.0 rumo ao um bem comum: o ser humano.

Quanto à estrutura do artigo, inicia-se com o resumo e o abstract; após, o capítulo 1 contendo a introdução que há o problema da pesquisa e demais abordagens. Em seguida, o capítulo 2 representado pela metodologia, seguida da revisão de literatura no capítulo 3. Logo após, a apresentação da pesquisa e análise dos resultados no capítulo 4; no capítulo 5 as considerações finais. Por fim é descrita todas as referências utilizadas no trabalho.

## 2 | METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido através de uma pesquisa qualitativa com o tipo descritiva, que é considerada a existência de uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito pesquisado. Esse tipo de pesquisa possibilita uma investigação detalhada do conteúdo analisado, descrevendo apenas fatos, tendo o objetivo de demonstrar características de determinada população ou fenômeno ou estabelecer uma relação entre as variáveis (GIL, 2017 e BEUREN, 2013).

O delineamento de pesquisa utilizado é o bibliográfico. A escolha é devido à elaboração a partir de materiais já publicados. Segundo Lakatos e Marconi (2011) esse tipo de delineamento estabelece uma conexão entre o pesquisador e tudo que já foi publicado sobre o assunto pesquisado.

Para Cervo, Bervian e Silva (2007), os estudos monográficos buscam a formação de excelência, por meio da pesquisa bibliográfica, através do domínio do estado da arte de um determinado tema.

A coleta de dados utilizada é documental secundário, pois os documentos estudados para solucionar o problema já foram publicados em artigos, livros, revistas, internet e outros. Para Malhotra – 2004, os dados secundários são aqueles gerados pelo pesquisador para resolver o problema pesquisado.

Assim, o método usado para selecionar as bibliografias deste trabalho foi o de realizar pesquisas pelo tema “*Society 5.0*” em portais como *Ebsco*, *EEExplore*, *Scielo* e *Portal Capes*. Os autores observaram que as referências citadas pela maioria dos artigos foram baseadas em informações do site do governo japonês, contendo apresentações a qual explana sobre a nova Sociedade 5.0.

Assim, percorrido todos os métodos da pesquisa, bem como a sua tipologia, o próximo tópico aborda a revisão de literatura.

## 3 | REVISÃO DE LITERATURA

Esse tópico apresenta os conceitos da Sociedade 5.0, Indústria 4.0 e a Transformação Digital.

### 3.1 Sociedade 5.0

Hoje, o avanço da ciência e da tecnologia é percebido, principalmente, através das inovações que despontam a cada momento. A força com a qual o mundo da computação foi através do desenvolvimento dos negócios e da sociedade para o avanço da produtividade e bem estar das pessoas (SHIROISHI; UCHIYAMA; SUZUKI, 2018).

A nova fase da Sociedade 5.0, conhecida como Sociedade Criativa (Imaginação), iniciou no Japão, na *5th Science and Technology Basic Plan*, no ano de 2016, com o intuito de representar uma nova visão para essa nova sociedade e com objetivo de desenvolver a economia e resolver as questões sociais usando as evoluções tecnológicas (FUJII; GUO; KAMOSHIDA, 2018; KEIDANREN, 2018;).

Dessa forma, dentro do contexto da Sociedade Criativa, surge o tema Sociedade Super Inteligente (*Super Smart Society*) que representa uma sociedade baseada na conectividade.

Posteriormente, o termo se divide em cinco pontos. O primeiro é a preocupação com a saúde, com atendimentos médicos *online* por exemplo. O segundo é a mobilidade, propiciando para a população uma disponibilidade de deslocamento acessível, no intuito de redução de acidentes e congestionamentos (HITACHI, 2019). Ainda na mesma linha de pensamento, o terceiro elemento citado pelo autor é a produção a qual se organiza e se adapta de acordo com as necessidades e preferências da sociedade. O quarto ponto é a infraestrutura que está ligada ao desenvolvimento urbano. Por último, a área financeira, que pretende extinguir os cartões de créditos e o papel moeda, como também os documentos e ter as identificações biométricas contendo todos os dados pessoais e financeiros (HITACHI, 2019).

Por fim, depois da explanação do conceito e do objetivo da Sociedade 5.0, é válido e relevante pesquisar a respeito da Indústria 4.0.

### 3.2 Indústria 4.0

Indústria 4.0, denominada quarta revolução industrial, tornou-se o grande paradigma do sistema de produção com a introdução da tecnologia para integrar as máquinas e os seres humanos dentro de uma cadeia de valor (SILVA; SANTOS FILHO; MIYADI, 2015). Foi criada na Alemanha em 2012, através de um programa de investimentos nas indústrias do país, objetivando usar redes inteligentes para interconectar todos os processos produtivos sem a intervenção humana (RODRIGUES; DE JESUS; SCHUTZER, 2016).

Para o mesmo autor, esse programa possibilita que o processo produtivo seja autogovernado, possibilitando solucionar problemas de produção, deixando os processos mais eficazes e assim aumentar a competitividade das empresas.

Anderl (2014) relata que a Indústria 4.0 permite a comunicação entre as pessoas, dinâmica de sistemas complexos e produtos diversificados através de uma abordagem estratégica e sistemas de controles avançados com tecnologias de internet.

Anderl (2014) e Lee (2008) cita ainda a respeito do programa que os equipamentos de processos físicos, sistemas produtivos e produtos com sensores, atuadores inteligentes e diversos sistemas de computação cria um Sistema Físico-Cibernético (CPS). Outros exemplos são os avanços da tecnologia e de sistema, bem como a Internet das coisas (IOT), Dados Aumentados (*Big Data*), Cidade Inteligente (*Smart Cities*), Robotica (*Drone*), Inteligência Artificial (AI) (KEIDAREN, 2016).

Assim, compreender a transformação digital é necessária para descobrir as origens e as definições. Em seguida, o próximo tópico explana sobre o tema.

### 3.3 Transformação Digital

A contextualização da transformação digital, mesmo sendo um assunto atual, já é mencionada desde o período de 1990 e 2000. A partir dessa época, os serviços e mídias cresceram e expandiram.

Após o ano 2000, com a ascensão da tecnologia, ocorreu uma mudança a qual não era esperada e por outro lado de impacto, a formalização da internet como comunicação e ferramenta de trabalho. (SCHALLMO; WILLIAMS, 2018).

Dessa forma, surgiu-se um cenário competitivo pelo qual as empresas têm passado; e as mudanças são inevitáveis. Exemplo disso é a remodelagem das estruturas dos custos dos produtos, o vínculo com os consumidores e o gerenciamento das informações (FRANCISCO; KUGLER; LARIEIRA, 2017).

Para Rogers – 2017 o significado de transformação digital não está referenciado à tecnologia, mas sim à capacidade do indivíduo pensar em novas maneiras e estratégias. Assim, com toda essa nova vertente de perspectiva, a ideia da transformação digital é analisar os desafios eminentes das empresas com toda a reestruturação baseada na criação de valor (SCHALLMO; WILLIAMS, 2018).

Francisco, Kugler e Larieira (2017) cita que a criação de valor é o pensamento voltado para o cliente, em que toda a prioridade é baseada naquilo que eles querem. O mesmo autor ainda acrescenta que os perfis dos clientes de hoje são de grandes exigências, são impacientes e, além disso, têm conhecimento sobre determinado produto ou serviço, querem pagar menos e por outro lado esperam serviços e produtos de qualidade.

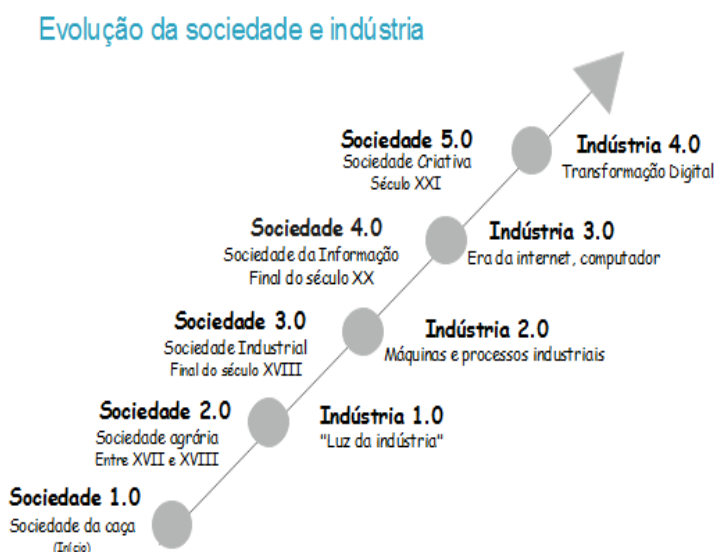
## 4 | APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na história da evolução da sociedade e segundo o que foi estabelecido no plano de governo citado anteriormente, essa evolução se divide da seguinte forma: Sociedade 1.0, definida como a era da caça, princípio da humanidade em que o homem tinha a necessidade de buscar o seu alimento através da caça; Sociedade 2.0, conceituada como a sociedade agrária, em que o homem se organizava para o plantio e a colheita, meados de XVII e XVIII.

Sobremodo, ao findar dessa Sociedade 2.0 iniciou-se a primeira Revolução Industrial, chamada “a luz da indústria” (KEIDANREN, 2018). A Sociedade 3.0, devido ao

surgimento das máquinas, é conceituada como a sociedade industrial. Simultaneamente, nessa época, fim do século XVIII, ocorreu a segunda Revolução Industrial.

Em andamento, a Sociedade 4.0 surgiu no fim do século XX com a nova era da informação, com sistemas de informação integrados à sociedade. De modo simultâneo, inicia a terceira Revolução Industrial, chamada de era da computação e da internet. Por fim, no século XXI, conceitua-se a Sociedade 5.0 como Sociedade Criativa e ao mesmo tempo a quarta Revolução Industrial (KEIDANREN, 2016). A figura 1 elucida toda a fase da evolução da sociedade com a indústria.



**Figura 1** – Evolução da sociedade e da indústria

**Fonte:** Adaptação KEIDAREN, 2016.

Gladden (2019) cita que a Sociedade 5.0 origina de uma consolidação da Indústria 4.0. Devido ao avanço da tecnologia, a sociedade obteve como vantagens maior eficiência, eficácia e otimização financeira no que se tange a produtividade. Os recursos tecnológicos citados no item 3.2, como a Internet das coisas (*IOT*), Dados Aumentados (*Big Data*), Cidade Inteligente (*Smart Cities*), Robotica (*Drone*), Inteligência Artificial (*AI*), confirmam o envolvimento da evolução da Indústria 4.0 e da Sociedade 5.0. Essa Sociedade veio para somar na qualidade de vida com mais conforto e menos desgaste físico (KEIDAREN, 2016; HARAYAMA, 2017; GLADDEN, 2019).

Para Keidaren (2018), a transformação digital é considerada um novo estágio para a sociedade, sendo que esse avanço permite aos seus consumidores terem o seu

próprio estilo de vida. O autor ainda acrescenta que a transformação digital contribui, na sociedade, com o aprimoramento das habilidades, da ambição e das ideias e que permite as pessoas conduzirem suas atividades e negócios. Dessa forma, conforme Keidaren (2018) e Francisco, Kugler e Larieira (2017), citados no tópico 3.3, é confirmada a ligação da transformação digital com a sociedade.

A figura 2 representa essa ligação para melhor compreensão desse envolvimento entre a Transformação Digital e a Sociedade 5.0 (Sociedade Criativa),



**Figura 2** – Sociedade 5.0 – Sociedade Criativa

**Fonte:** Adaptação KEIDAREN, 2018.

Observa-se que a primeira parte da figura mostra toda a evolução da sociedade. Para Keidaren (2018), esse processo se resume em transformação digital e imaginação/criação. Assim também é ilustrado na figura 1: a transformação digital está acoplada à Indústria 4.0, mostrando então mais uma evidência da ligação entre os três tópicos.

Para o Gabinete do Governo do Japão, a Sociedade 5.0 está centrada no ser humano e não na tecnologia para controlá-lo. Mesmo com toda a capacidade tecnológica em monitorar todo o espaço virtual, o intuito não é controlar a sociedade, mas sim resolver vários problemas e atender aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU<sup>2</sup>.

Assim, a abordagem da transformação digital, apresentada na figura 2 versus a imaginação/criação, mostra o envolvimento do cliente em relação aos produtos e ao atendimento de suas respectivas exigências, uma vez, citada por Keidaren (2018) e também por Schallmo e Williams (2018). Ainda na mesma figura, o resultado desse processo culmina na solução de problemas e na criação de valor conforme os autores citados no referencial

<sup>2</sup> Organização das Nações Unidas – ONU. Organização intergovernamental criada para promover a cooperação internacional.

teórico, Schallmo e Williams (2018).

Portanto, através de toda a discussão dos resultados obtidos, a ponto de responder à questão problema da pesquisa, que foi associar a Sociedade 5.0 no contexto da indústria 4.0 e da transformação digital, a próxima fase é as considerações finais.

## 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A sociedade é um meio que engloba todo o cenário habitado pelo ser humano. Dessa forma, pode-se concluir que ela é influenciada pela indústria e pela transformação digital. Foi avaliado que durante todo o processo da evolução da sociedade e da indústria em todas as épocas houve um envolvimento entre ambas e culminou em um fator de aprimoramento, crescimento e amadurecimento ao longo do tempo.

O aparecimento das tecnologias evidencia que a expansão de novas ideias e de técnicas foram os motivos para a ascensão dessa sociedade. Através desses avanços tecnológicos houve maior desempenho e conseqüentemente maior produtividade.

Com os argumentos dos autores explanados, e especificamente as diretrizes do governo japonês, conclui-se que a sociedade 5.0 surgiu para trazer ao ser humano uma nova perspectiva e que os esforços aplicados em várias situações podem ser diminuídos ou até mesmo extintos se essas tecnologias forem usadas corretamente.

Dessa forma, identificou que é necessária a adaptação da indústria e da sociedade quanto aos recursos já existentes, pois eles vieram para somar dentro desse contexto. E assim, a falta de utilização dessas ferramentas causa uma paralisia do processo e posteriormente rompe a sequência de aprimoramento e evolução das tecnologias e métodos para que novamente sejam aplicados.

Quanto às limitações de estudo, por se tratar de um tema estado da arte, as principais bibliografias se encontram na língua nativa, japonês; e na segunda língua, inglês. Outra situação encontrada foi um número considerável de trabalhos publicados avaliados pela Plataforma Sucupira.

Como sugestão de pesquisa futuro seria: Como utilizar a tecnologia desenvolvida pela indústria a favor da sociedade. Identificar em qual ponto em que a transformação digital é benéfica e/ou negativa para a sociedade. Como a indústria se comportará com a automatização dos equipamentos no cenário da sociedade 5.0.

## REFERÊNCIAS

ANDERL, Reiner. Industrie 4.0-advanced engineering of smart products and smart production. In: **Proceedings of International Seminar on High Technology**. 2014.

BEUREN, I. M. I. **Como elaborar trabalhos monográficos em contabilidade**. Editora Atlas SA, 2013.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A. SILVA, R. **Metodologia científica**, v. 6, 2007.

FRANCISCO, E. R.; KUGLER, José Luiz; LARIEIRA, Cláudio Luis Carvalho. Líderes da transformação digital. **GV EXECUTIVO**, v. 16, n. 2, p. 22-27, 2017.

FUJII, T.; GUO, T.; KAMOSHIDA, A.; A consideration of service strategy of Japanese electric manufactures to realize super smart society (SOCIETY 5.0). KMO. **Communications in Computer and Information Science**, v. 877. Springer, Cham. 2018.

GOVERNMENT OF JAPAN. Cabinet Office. **Society 5.0**. Tokyo: Cabinet Office, 2019. Disponível em: [https://www8.cao.go.jp/cstp/society5\\_0/index.html](https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html). Acesso em: 18 ago. 2019.

GLADDEN, Matthew E. Who will be the members of society 5.0? Towards an anthropology of technologically posthumanized future societies. **Soc. Sci.**, v. 8, n. 148, p. 1-39, May 2019.

GIL, A. A. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

HARAYAMA, Yuko. Society 5.0: aiming for a new human-centered society. [Interview given the] Mayumi Fukuyama. **Hitachi Review**, v. 66, n. 6, p. 554–555, 2017. Disponível em: [http://www.hitachi.com/rev/archive/2017/r2017\\_06/trends/index.html](http://www.hitachi.com/rev/archive/2017/r2017_06/trends/index.html). Acesso em: 11 jul. 2019.

HITACHI. **Hitachi's approach to Society 5.0**. Japan: Hitachi, 2019. Disponível em: <http://www.hitachi.co.jp/products/social/society5/>. Acesso em: 27 jul. 2019.

KEIDAREN. **Toward realization of the new economy and society**: reform of the economy and society by the deepening of “society 5.0”. Japan Business Federation: Keidaren, 2016. Disponível em: [https://www.keidanren.or.jp/en/policy/2016/029\\_outline.pdf](https://www.keidanren.or.jp/en/policy/2016/029_outline.pdf). Acesso em 12 jul. 2019.

KEIDAREN. **Society 5.0**: co-creating the future: (Excerpt). Japan: Keidaren, 2018. Disponível em: [https://www.keidanren.or.jp/en/policy/2018/095\\_proposal.pdf](https://www.keidanren.or.jp/en/policy/2018/095_proposal.pdf). Acesso em: 27 jul. 2019.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. Metodologia científica. rev. e ampl. **São Paulo: Atlas**, 2011.

LEE, E. A. Cyber physical systems: Design challenges. In: **2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)**. IEEE, 2008. p. 363-369.

MALHOTRA, N. **Pesquisa de marketing: uma orientação aplicada**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2004.

RODRIGUES, L. F.; JESUS, Rodrigo Aguiar; SCHÜTZER, Klaus. Industrie 4.0: Uma revisão de literatura. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v.19, n.38, p.33-45, 2016.

ROGERS, David L. **Transformação digital**: repensando o seu negócio para a era digital. Autêntica Business, 2017.

SCHALLMO, D. RA; WILLIAMS, C. A. **Digital Transformation Now!: Guiding the Successful Digitalization of Your Business Model**. Springer, 2018.



SILVA, RM da; SANTOS FILHO, Diolino J.; MIYAGI, P. E. Modelagem de Sistema de Controle da Indústria 4.0 Baseada em Holon, Agente, Rede de Petri e Arquitetura Orientada a Serviços. **XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**. Natal, 2015.

SHIROISHI, Yoshihiro; UCHIYAMA, Kunio; SUZUKI, Norihiro. Society 5.0: for human security and well-being. **Computer**, v. 51 , Issue 7 , p. 91-95, July 2018.

## TÉCNICA DE DIAGNÓSTICO DE BARRAS QUEBRADAS EM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO SEM CARGA POR MEIO DA TRANSFORMADA WAVELET

*Data de aceite: 02/08/2021*

*Data de submissão: 13/04/2021*

### **Carlos Eduardo Nascimento**

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP)  
São Paulo – SP – Brasil

### **Cesar da Costa**

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP)  
São Paulo – SP – Brasil

**RESUMO:** Este estudo de caso apresenta dois métodos de diagnóstico para monitoramento e predição de barras quebradas, em motor de indução trifásico com rotor de gaiola de esquilo: método da transformada rápida de Fourier (FFT) e método da transformada Wavelet. O método FFT permite o diagnóstico da barra do rotor quebrada, quando o motor opera sob carga, mas se a máquina for desacoplada da carga mecânica, os componentes da faixa lateral do espectro, associados às barras quebradas não aparecem. O método WT é uma ferramenta poderosa de processamento de sinais usada em sistemas de energia e outras áreas. Os métodos de predição baseados em transformada Wavelet com foco na análise da corrente de partida do motor têm sido propostos para a detecção de barras quebradas. Uma vez que o sinal transiente da corrente do estator não é periódico, não é possível analisar o sinal pelo método FFT. Além disso, é impossível estimar o tempo de ocorrência da falha usando

a transformada FFT. Neste artigo, o principal objetivo é descobrir as vantagens do método da transformada Wavelet em comparação com o método da transformada de Fourier, na detecção de falhas de barra quebradas em rotor de máquinas de indução.

**PALAVRAS - CHAVE:** Transformada Wavelet, Transformada FFT, Diagnóstico, Motor de Indução, Máquina Elétrica.

### DIAGNOSIS TECHNIQUE OF BROKEN BAR IN THREE-PHASE INDUCTION MOTOR NO LOAD THROUGH WAVELET TRANSFORM

**ABSTRACT:** This case study presents two diagnostic methods for monitoring and predication of broken bars in three phase induction motor with squirrel-cage rotor: fast Fourier transform (FFT) method and Wavelet transform method. The FFT method allows diagnosis broken rotor bar when the motor operates under a load, but if the machine is decoupled from the mechanical load, the side band components associated with broken bars do not appear. The WT method is a powerful signal-processing tool used in power systems and other areas. Wavelet-based prediction methods that are focused on the analysis of the startup current have been proposed for the detection of broken bars. Since the transient stator current signal is not periodic, it is not amenable to analyze the signal by FFT method. In addition, it is impossible to estimate the time of the fault occurrence using the FFT transform. In this paper, our main goal is to find out the advantages of Wavelet transform method compared to Fourier transform method in rotor failure detection of induction machines.

**KEYWORDS:** Wavelet Transform, FFT Transform, Diagnostic, Induction Motor, Electrical Machine.

## 1 | INTRODUÇÃO

Os motores de indução com rotor de gaiola de esquilo são amplamente utilizados em muitos processos industriais e desempenham papéis importantes em várias indústrias de transformação (SAPENA-BAÑÓ et al, 2015; DA COSTA et al, 2015). Apesar do baixo custo, do ponto de vista da confiabilidade e robustez, os motores de indução são propensos a falhas devido à sua exposição a uma variedade de ambientes adversos e condições operacionais incorretas ou defeitos de fabricação. Se não forem identificadas a tempo, essas falhas e a deterioração gradual podem levar à interrupção do motor e aumentar o consumo de energia elétrica. Sabe-se que a detecção precoce de falhas em máquinas rotativas de indução pode não apenas minimizar os danos e reduzir o consumo de energia, mas também impedir a propagação de falhas ou limitar sua escalada em termos de gravidade. Portanto, os sistemas de diagnóstico ou monitoramento das condições do motor receberam considerável atenção nos últimos 10 anos (DEHINA et al, 2018; GEORGOULAS et al, 2014; PU et al, 2013). A falha de barras quebradas em rotores de gaiola de esquilo raramente causa danos imediato, especialmente em grandes motores multipolares (velocidade lenta).

A quebra de barras do rotor ocorre, frequentemente, em grandes motores de indução (Fig. 1), que possuem um tempo de partida bastante longo, e a falha deve ser detectada durante este tempo de inicialização. Isso é muito importante quando existem problemas como tração magnética desequilibrada intensa e até a formação de arco voltaico durante a partida do motor sob a falha. Um dos objetivos deste estudo de caso é apresentar um método de monitoração e predição de falhas de barras quebradas, durante o tempo de partida de um motor de indução trifásico, utilizando aquisição de dados e processamento de sinais baseado em ferramentas matemáticas e computacionais.



Fig. 1. Rotor tipo gaiola de esquilo com seis barras quebradas de um motor trifásico de indução.

Este artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 1 apresenta uma introdução geral do tema estudado. A Seção 2 fornece uma breve comparação entre a transformada de Fourier e a transformada Wavelet. A Seção 3 apresenta o método de detecção de falhas por análise espectral (FFT). A Seção 4 apresenta o método de detecção de falhas por análise de Wavelet. A seção 5 apresenta a metodologia da pesquisa, os testes experimentais e os resultados com os métodos FFT e Wavelet. Finalmente, a seção VI apresenta a conclusão do trabalho.

## 2 | TRANSFORMADA DE FOURIER VERSUS TRANSFORMADA DE WAVELET

Os métodos de análise de processamento de sinal baseados em transformada FFT, não podem fornecer uma ferramenta para diagnosticar uma falha durante a partida do motor. A razão é que o processamento baseado em transformada FFT é aplicável em regime permanente do motor e não pode ser aplicado em regime transiente durante a partida do motor, no qual a amplitude e a frequência variam ao longo do tempo (DA COSTA et al, 2015).

Uma abordagem para detecção de falhas no estado transiente do motor, é mover uma janela de tempo curto ao longo do sinal para obter o espectro de Fourier em função da mudança de tempo. Esse método é conhecido como transformada STFT (*Short Time Fourier Transform*) (KAIKAA et al, 2014; KEHTARNAVAZ, 2008).

A transformada STFT, como ilustrado na Fig. 2, divide um sinal  $x(t)$ , não estacionário, em pequenas janelas de tempo iguais, sinal  $g(t)$ . A Transformada de Fourier é então aplicada ao segmento de tempo (janela) que está sendo examinada. À medida que a largura ou a função da janela diminui, uma porção menor do sinal é considerada, garantindo uma maior localização no tempo das componentes de frequência do sinal. À medida que a função da janela aumenta, informações mais precisas sobre as frequências dentro da janela aumentam, mas a capacidade de determinar o tempo em que esses transitórios ocorrem no sinal é perdida. A visualização da transformada STFT geralmente é realizada por meio de seu espectrograma, que é um gráfico de intensidade da STFT (KEHTARNAVAZ, 2008).

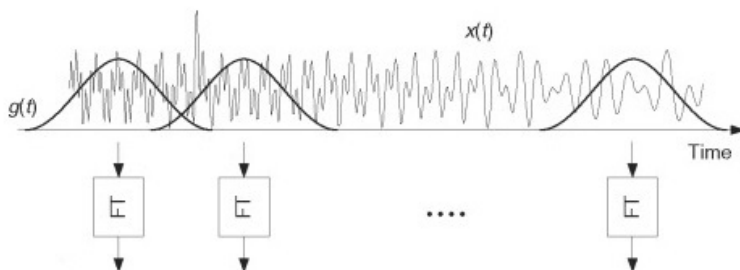


Fig. 2. Transformada de Fourier de curta duração.

O uso do processamento baseado em transformada Wavelet (WT) pode resolver os problemas de detecção de falhas em sinais transiente durante a partida do motor de indução trifásico, onde as amplitudes e frequências variam e, um comportamento mais preciso da análise do sinal pode ser obtido (GARVANOV et al, 2019; SHAO et al 2014). A transformada WT é uma poderosa ferramenta matemática de processamento de sinal usada em sistemas de energia e outras áreas. A transformada WT, como a transformada STFT, permitem a localização no tempo de diferentes componentes de frequência de um determinado sinal, no entanto, com uma diferença importante: a transformada STFT usa uma função de janelas de largura fixa. Como resultado, a resolução de frequência e tempo da transformação resultante será fixa, mas no caso da transformada WT, as funções de análise, chamadas *wavelets*, ajustarão suas larguras de tempo à frequência de maneira que, *wavelets* de frequências mais altas serão muito estreitas e as de menor frequência serão mais amplas. Portanto, em contraste com a transformada STFT, a transformada WT pode isolar no tempo as componentes do sinal transitório em altas e baixas frequências (KRUGLOVA, 2016; ATHULYA, 2018).

### 3 I ANÁLISE POR TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

A transformada de Fourier (FT) define que uma forma de onda periódica no domínio do tempo pode ser representada por uma soma ponderada de senos e cossenos. A mesma forma de onda pode então ser representada no domínio da frequência como um par amplitude-fase para cada componente de frequência. O espectro de frequência de um sinal é basicamente os componentes de frequência (componentes espectrais) desse sinal. A análise espectral refere-se à representação dos sinais de corrente no domínio da frequência. A análise espectral da corrente do estator usando a transformada rápida de Fourier (FFT) é aplicada no diagnóstico de barras quebradas do rotor. De acordo com Sakhalkar et al (2017) e Thakur et al (2019), em um motor de indução trifásico com rotor de gaiola de esquilo, as barras do rotor quebram ou racham na terminação do anel do rotor, perturbando o fluxo magnético, a frequência do rotor e alterando o espectro de corrente do estator. Vários trabalhos como Da Costa (2015) e Dehina et al (2018) usaram a transformada rápida de Fourier (FFT) para análise espectral da corrente do estator para diagnosticar barras quebradas do rotor. A partir desses trabalhos, falhas de barras quebradas do rotor podem ser detectadas no espectro de corrente do estator.

#### 3.1 Processamento do Sinal de Corrente do Motor

Na operação normal de um motor de indução, a frequência da corrente induzida no rotor é igual a  $sf_0$ . Onde  $f_0$  é a frequência da rede de alimentação do motor e  $s$  é o seu escorregamento descrito pela Eq. 1.

$$s = (n_s - n) / n_s \quad (1)$$

Onde:

$n_s$  é a velocidade síncrona do motor;

$n$  é a velocidade do rotor.

A corrente de indução gera um campo magnético girante a favor da velocidade em relação ao rotor. Se o rotor tem uma barra quebrada, a corrente induzida passa a ter duas componentes de frequência  $\pm sf_0$ , que geram um campo magnético a favor e outro contrário a velocidade em relação ao rotor.

Esta condição anormal de falha no rotor induz uma corrente no enrolamento do estator definida pela Eq. 2.

$$f_{bb} = (1 \pm 2s)f_0 \quad (2)$$

Onde:

$f_{lsb} = (1 - 2s)f_0$  é a frequência da banda lateral inferior causada pela falha de barra quebrada;

$f_{usb} = (1 + 2s)f_0$  é a frequência da banda lateral superior causada pela oscilação da velocidade.

Os métodos mais comuns de diagnóstico e previsão de falhas de rotor são baseados no processamento do sinal de corrente do estator em estado estacionário. Esse método é chamado de análise da assinatura da corrente do motor (MCSA) (SAKHALKAR et al, 2017; GEORGOULAS et al 2014). Tradicionalmente, o método MCSA tem sido utilizado para detecção de falhas elétricas e mecânicas em motores de indução. Por muitos anos esta análise tem sido implementada utilizando ferramentas matemáticas e capacidade computacional limitada (KEHTARNAVAZ et al, 2008). Uma transformada rápida de Fourier (FFT) calcula o espectro do sinal para determinar as bandas laterais superior e inferior específica do tipo de falha. A Fig. 3 exemplifica o espectro da corrente do estator para um motor saudável com carga. Observa-se que a frequência correspondente a banda lateral inferior  $f_{lsb} = (1 - 2s)f_0$ , causada pela falha de barra quebrada, possui uma amplitude muito baixa de  $-80$  dB, indicando um motor saudável.

A Fig. 4 apresenta o espectro da corrente do estator para o motor com carga, com uma falha de barra quebrada. Pode-se verificar que a frequência correspondente a banda lateral inferior, possui uma amplitude de  $-40$  dB, muito mais elevada que o exemplo anterior de  $-80$  dB, que caracteriza o início de uma falha de barras quebradas (DA COSTA et al, 2015).

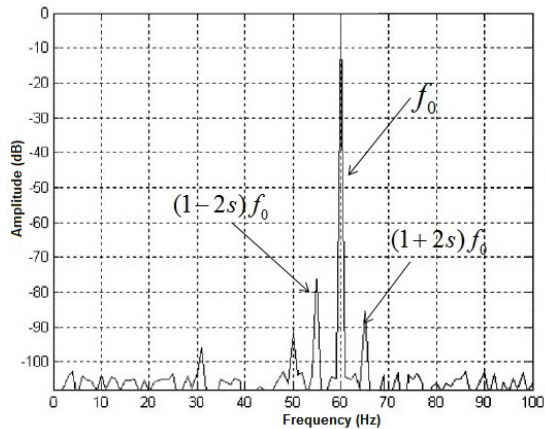


Fig. 3. Espectro de corrente de um motor saudável com carga.

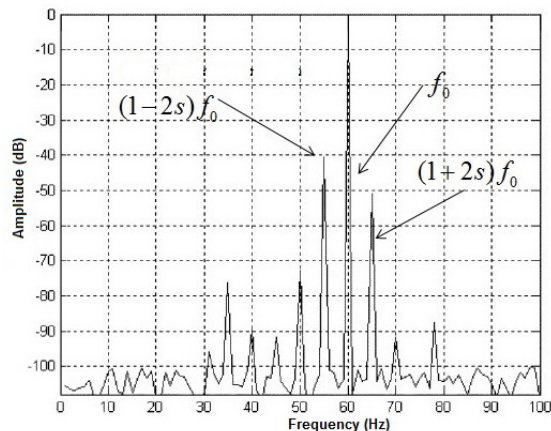


Fig. 4. Espectro de corrente de um motor com falha de barra quebrada, com carga.

Quando o motor de indução opera sem carga, o escorregamento  $s$  varia entre zero e valores muito baixos. Analisando-se a Equação 2 e observando-se as Figuras 1 e 2 pode-se concluir, que uma abordagem baseada em transformada rápida de Fourier (FFT), análise da assinatura da corrente do motor (MCSA), não deve ser aplicada em um motor sem carga, uma vez que as frequências de bandas laterais superior  $f_{usb} = (1+2s)f_0$  e inferior  $f_{lsb} = (1-2s)f_0$  tendem a ficar sobrepostas a frequência  $f_0$ , fundamental da rede de alimentação do motor, que torna difícil o diagnóstico da falha.

#### 4 | ANÁLISE POR TRANSFORMADA DE WAVELET

A Transformada Wavelet foi aplicada em vários ramos da ciência devido à sua característica peculiar de detalhar pontos específicos de um sinal (FUPING et al, 2014;

DAYA et al, 2015). Em aplicações em que é necessária uma análise de frequência de alta precisão como em corrente transitória, partida do motor de indução, o método tradicional de transformada rápida de Fourier não produz resultados satisfatórios e não possui a capacidade de detalhar regiões de interesse do sinal. Em termos de métodos para detectar barras quebradas em um rotor de gaiola de esquilo, as *wavelets* são muito eficazes. Exemplos mais recentes sobre a aplicação de *wavelets* na detecção da condição de um motor de indução podem ser encontrados em (DEHINA et al, 2018; GARVANOV et al, 2019; BELKHOU et al, 2019).

#### 4.1 Processamento do Sinal por Wavelet

A transformada Wavelet contínua (CWT) foi desenvolvida como uma abordagem alternativa a transformada STFT, para superar seu problema de resolução. A análise da transformada Wavelet é feita de maneira semelhante à análise STFT, no sentido de que o sinal é multiplicado por uma função *wavelet*, semelhante à função janela no STFT, e a transformada é calculada separadamente para diferentes segmentos do sinal no domínio do tempo. A transformada Wavelet contínua é definida pela Eq. 3.

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (3)$$

Onde:

$\psi(t)$  é a função de transformação, também chamada de wavelet mãe;

$b$  é o parâmetro de translação;

$a$  é o parâmetro de escala.

O parâmetro translação é usado no mesmo sentido em que foi utilizado na transformada STFT; está relacionado à localização da janela, pois a janela é deslocada através do sinal. O parâmetro escala na análise da *wavelet* é semelhante à escala usada nos mapas. Escalas altas correspondem a uma visão global não detalhada do sinal e escalas baixas correspondem a uma visão detalhada do sinal. Da mesma forma, em termos de frequência, as baixas frequências (altas escalas) correspondem a uma informação global de um sinal, enquanto as altas frequências (baixas escalas) correspondem a uma informação detalhada de um padrão oculto no sinal, que geralmente dura um tempo relativamente curto (BHONGADE et al, 2016).

Para a transformada Wavelet discreta (DWT), a ideia principal é a mesma do caso da transformada contínua (CWT). Entretanto, a DWT é mais simples de processar e mais rápida de implementar em processadores DSP. Uma representação em escala de tempo de um sinal digital pode ser obtida usando técnicas de filtragem digital. Filtros de diferentes frequências de corte são usados para analisar o sinal em diferentes escalas. O sinal é processado através de uma série de filtros passa-alta para analisar as altas frequências e, é processado através de uma série de filtros passa-baixa para analisar as baixas frequências (BOLSHUNOVA et al, 2016; BOSONIC et al, 2017; ABDELEMAM et



al, 2017; KECHIDA et al, 2015). A transformada DWT analisa um sinal  $S$  em diferentes bandas de frequência com diferentes resoluções, decompondo o sinal em informações aproximadas  $a_j$  e informações detalhadas  $d_j$ . A transformada DWT emprega dois conjuntos de funções, chamadas funções de escala e funções wavelet, que estão associadas aos filtros passa-baixa e passa-alta, respectivamente. Isso significa que a aproximação contém as informações de baixa frequência do sinal original e os detalhes contêm as informações de alta frequência. A decomposição do sinal em diferentes bandas de frequência (Fig. 5), também conhecida como análise multiresolução (MRA), é obtida por sucessivas filtrações passa alta e passa baixa do sinal no domínio do tempo.

## 4.2 Algoritmo Para Detecção De Banda Lateral Pelo Método Transformada Wavelet

De acordo com Da Costa et al (2015), a decomposição DWT em  $n$  níveis de um sinal  $i_s = (i_1, i_2, i_3, \dots, i_q)$ , consiste em um processo de filtragem digital com  $n+1$  estágios. O sinal é processado através de  $n$  filtros passa-alta e passa-baixa. Como resultado desse processo de múltipla filtragem são obtidos  $n$  vetores de coeficientes de detalhe  $\beta^j = \beta_i^j$  (onde  $j$  é o nível da decomposição), e vetores de coeficiente de aproximação  $a^n = a^n$ .

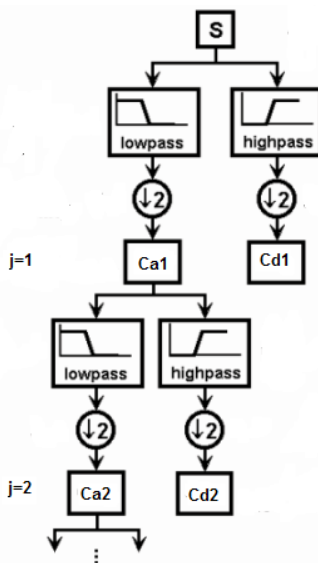


Fig. 5. Decomposição de um sinal pela transformada DWT.

O processo para obter a transformada DWT é realizado usando um algoritmo recursivo de alta eficiência computacional denominado como “algoritmo de *Mallat*” ou algoritmo piramidal. A partir desses coeficientes, o sinal pode ser reconstruído usando a transformada inversa. O sinal reconstruído consiste na soma de  $n$  sinais de detalhe ( $d$ ) e

um sinal de aproximação ( $a$ ), cada um contendo o mesmo número de amostras ( $q$ ) como o sinal original ( $i_s$ ), conforme a Eq. 4.

$$i_s(t) = d_1 + d_2 + \dots + d_n + a_n \quad (4)$$

Se houver uma barra quebrada a componente harmônica da banda lateral esquerda terá uma amplitude significativa, durante todo o processo de partida do motor de indução; porque sua frequência está sempre abaixo de  $f_0$ , frequência da rede de alimentação do motor. Isso causa um aumento significativo na energia do sinal de aproximação ( $a_n$ ), durante o processo de partida do motor (DA COSTA et al, 2015). Portanto, o nível de decomposição do sinal de aproximação, que inclui a componente harmônica da banda lateral esquerda é dado pela Eq. 5.

$$n_f = \text{integer}\left[\frac{\log(f_s / f_0)}{\log(2)}\right] \quad (5)$$

Onde:

$f_s$  é a frequência de amostragem do sinal;

$f_0$  é a frequência da rede de alimentação do motor.

## 5 | METODOLOGIA DE PESQUISA

A pesquisa experimental foi conduzida por dois diferentes casos. Os materiais utilizados para validar os métodos discutidos na teoria foram: (i) motor de indução trifásico de 4 polos, 60 Hz, 0.5 CV, 220/380 V (tensão nominal) e 1750 rpm (velocidade nominal); (ii) sensor de corrente; (iii) dispositivo de aquisição de dados DAQ; (iv) tacogerador digital; (v) microcomputador PC e, (vi) software MATLAB. A Fig. 6 apresenta a bancada experimental. A carga (*load*) utilizada nos ensaios foi uma máquina DC de 1,8 kW com uma velocidade nominal de 1800 rpm.

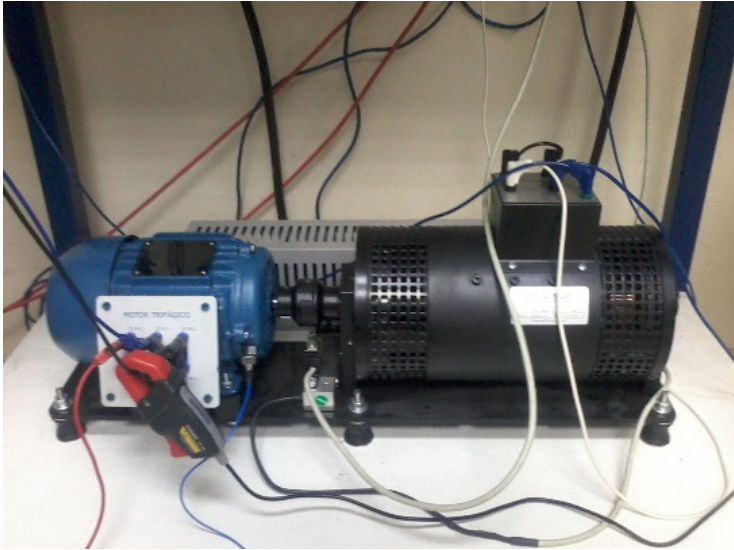


Fig. 6. Bancada experimental para teste de motor.

A falha de barras quebradas foi produzida artificialmente em laboratório, abrindo o motor e perfurando orifícios em diferentes partes das barras de seu rotor (Fig. 7).



Fig. 7. Rotor com falha de barra quebrada simulada.

## 5.1 Caso N.0 1 – Análise por Transformada de Fourier

Vários testes sob diferentes cargas para rotores saudáveis e rotores defeituosos com barras quebradas foram realizados em estado estacionário do motor. Em cada caso a corrente do estator foi adquirida por um sensor de corrente e um dispositivo DAQ (*Data Acquisition*). Um algoritmo foi desenvolvido no software MATLAB para processar o sinal de corrente do motor em teste, baseado na transformada rápida de Fourier (FFT). A taxa de amostragem definida foi de 2 kHz, 4000 amostras e resolução de frequência igual a 0,5 Hz.

### 5.1.1 Análise por Transformada de Fourier – Motor Saudavel com Carga

A Fig. 8 apresenta o espectro da corrente do estator obtida no teste com um motor saudável a 90% da carga nominal e a velocidade igual a 1745 rpm. As componentes de frequência de falha  $f'_{lsb}$  (banda lateral inferior) é igual a 56 Hz e a frequência  $f'_{usb}$  (banda lateral superior) é igual a 64 Hz. A amplitude de frequência  $f'_{lsb}$  é 55 dB mais baixa que a amplitude da frequência da rede (60 Hz) e a amplitude da frequência  $f'_{usb}$  é 70 dB mais baixa. Amplitudes que de acordo com a teoria indicam um motor saudável.

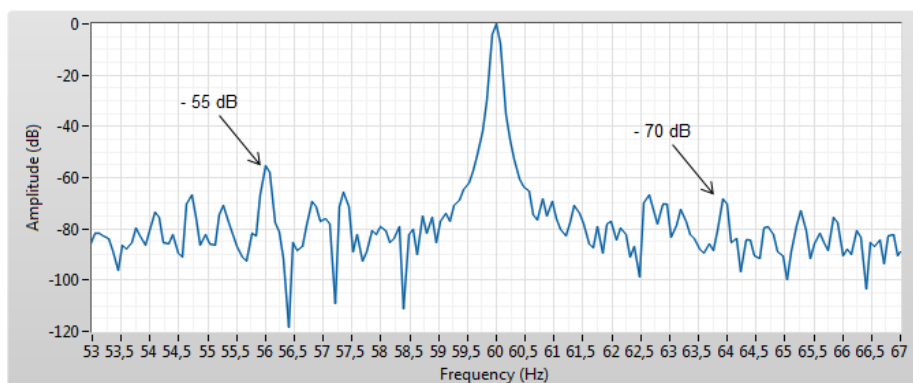


Fig. 8. Espectro da corrente do estator para o motor saudável com carga.

### 5.1.2 Análise por Transformada de Fourier – Motor com Barras Quebradas com Carga

A Fig. 9 apresenta o espectro da corrente do estator obtido no teste com um motor com falha de barras quebradas a 90% da carga nominal e a velocidade igual a 1745 rpm. A componente de frequência de falha  $f'_{lsb}$  é igual a 56,40 Hz e a frequência  $f'_{usb}$  é igual a 63,60 Hz. A amplitude de  $f'_{lsb}$  é 35 dB mais baixa que a amplitude da frequência da rede (60 Hz) e a amplitude de  $f'_{usb}$  é 40 dB mais baixa. Amplitudes que indicam a presença de barras quebradas no rotor.

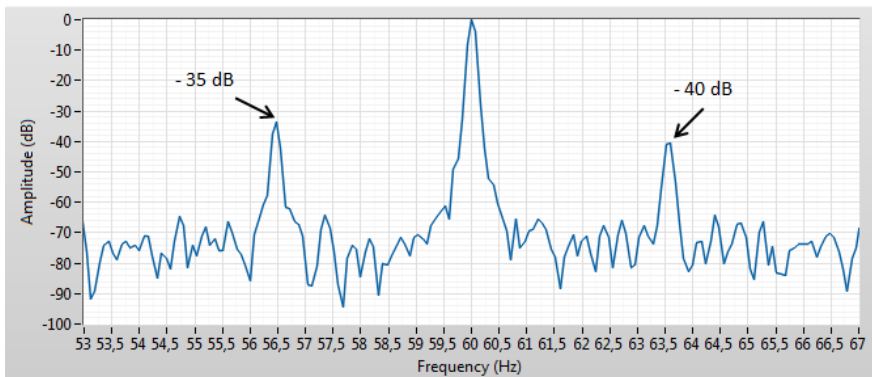


Fig. 9. Espectro da corrente do estator para o motor com falha de barras quebradas com carga

### 5.1.3 Análise por Transformada de Fourier – Motor com Barras Quebradas sem Carga

A Fig. 10 apresenta o espectro da corrente do estator, com diversas barras quebradas do rotor, motor sem carga, a 0% da carga nominal e a velocidade igual a 1745 rpm. Como o escorregamento  $s$  é muito baixo, as componentes harmônicas das bandas laterais superior  $(1 + 2s) \cdot f_0$  e inferior  $(1 - 2s) \cdot f_0$  no espectro de frequência, não são visíveis, pois se sobrepõem à frequência fundamental  $f_0$ . Portanto, a análise do espectro resultante não permite a detecção da condição de falha de barras quebradas do rotor, no estado estacionário, sem carga.

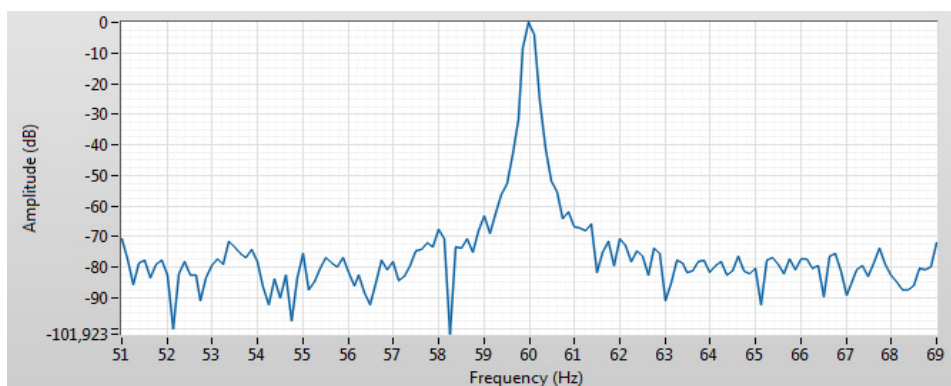


Fig. 10. Espectro da corrente do estator para o motor com falha de várias barras quebradas sem carga.

## 5.2 Caso N.0 2 – Análise por Transformada Wavelet

Um algoritmo foi desenvolvido no software MATLAB para implementar a decomposição do sinal de corrente do estator em diferentes bandas de frequência, algoritmo

também conhecido como análise multi-resolução (MRA) baseado na transformada Wavelet. A corrente do estator foi adquirida durante o tempo de partida do motor, estado transiente, operando inicialmente a 90% da carga nominal. A frequência de amostragem usada para capturar o sinal foi de 5000 amostras / segundo. O sinal de aproximação com 8 níveis de decomposição foi obtido para localizar a frequência de falha  $f'_{lb}$  (banda lateral inferior). A Tabela 1 mostra as bandas de frequência correspondentes aos sinais de *wavelets* de alta ordem resultantes da análise, de acordo com a taxa de amostragem (5000 amostras/seg) usada para os testes.

**TABELA I**

J0	Fs = 5000 Hz (0-2500 Hz)			
J1	0-1250 Hz			
J2	0-625 Hz	625-1250 Hz		
J3	0-312,50 Hz	312,5-625 Hz		
J4	0-156,25 Hz	156,25-312,5 Hz		
J5	0-78,12 Hz	78,12-156,25 Hz		
J6	0-39,06 Hz	39,06-78,12 Hz		
J7	0-19,53 Hz	19,53-39,06 Hz	39,06-58,59 Hz	58,59-78,12 Hz
J8	0-9,76 Hz	9,76-19,53 Hz	19,53-29,30 Hz	29,30-39,06 Hz
	A8	D8	D7	D6

### 5.2.1 Transformada Dwt – Motor Saudavel com Carga

A Transformada discreta DWT do sinal da corrente do estator foi obtida usando-se a Toolbox Wavelet do software MATLAB, associada a Wavelet mãe Daubechies-44. A Fig. 11 apresenta os gráficos da corrente de partida do estator com a transformada DWT em 8 níveis, motor saudável com carga. Pode-se observar que os sinais de nível A8 (aproximação), D8 e D7 (detalhes) não apresentam variação significativas, além das oscilações iniciais que duram apenas alguns ciclos. A partir dos gráficos pode-se concluir que a frequência  $f'_{lb}$  (banda lateral inferior) de 56,4 Hz, associada a falha de barras quebradas, não apresenta alterações significativas.

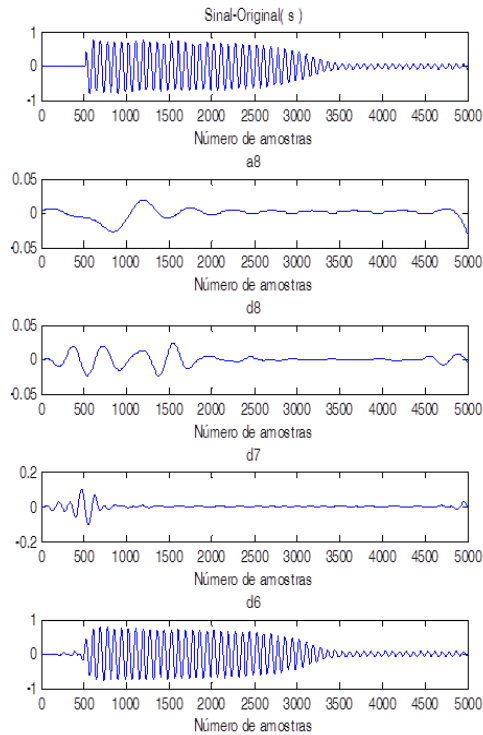


Fig. 11. Transformada DWT do sinal da corrente de partida, motor saudável com carga.

### 5.2.2 Transformada Dwt – Motor com Barras Quebradas com Carga

A Fig. 12 apresenta os gráficos da corrente de partida do motor com a transformada DWT em 8 níveis, motor com duas barras quebradas, com carga. Como mostrado na figura, um aumento significativo em relação ao caso do motor saudável, aparece na energia dos sinais de nível D8 e D7 (detalhes). As oscilações nesses sinais são devidas à evolução da componente de frequência de falha  $f_{lsb}$  (banda lateral inferior), durante a partida do motor. Essas oscilações seguem uma sequência que está de acordo com a evolução da componente da frequência  $f_{lsb}$  de 56,4 Hz, pelo método baseado na transformada FFT. A partir dessa análise pode-se concluir que os dois métodos estudados informam sobre a presença de barras quebradas do rotor na máquina com carga.

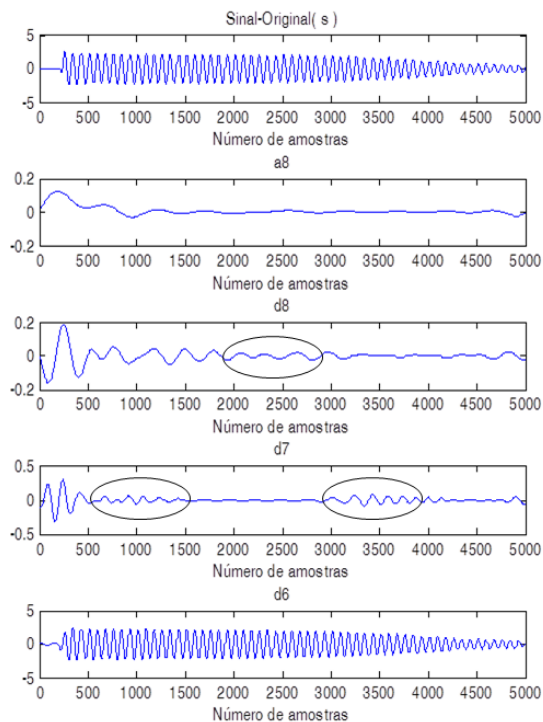


Fig. 12. Transformada DWT do sinal da corrente de partida, motor com barras quebradas com carga.

### 5.2.3 Transformada Dwt – Motor com Barras Quebradas sem Carga

A Fig. 13 apresenta os gráficos da corrente de partida do motor com a transformada DWT em 8 níveis, motor com duas barras quebradas, sem carga. Nesse caso, a aplicação do método clássico MCSA, com base na transformada FFT, não é válido como apresentado na Fig. 10, pois o escorregamento é muito baixo. No entanto, como pode-se observar na Fig. 13, a transformada DWT sinaliza nos níveis de detalhes D8 e D7 da corrente de partida, um claro aumento de energia, se comparado ao gráfico do motor saudável. Além disso, suas oscilações indicam a evolução da frequência de falha  $f'_{lb}$  (banda lateral inferior) de barras quebradas do rotor (56,4 Hz). Assim, neste caso, motor sem carga, as informações fornecidas pelo método da transformada DWT podem complementar as informações fornecidas pela abordagem clássica MCSA, para alcançar uma detecção mais precisa. Este caso é um exemplo da validade da abordagem em um caso em que o método da transformada FFT clássico não é adequado para ser aplicado.



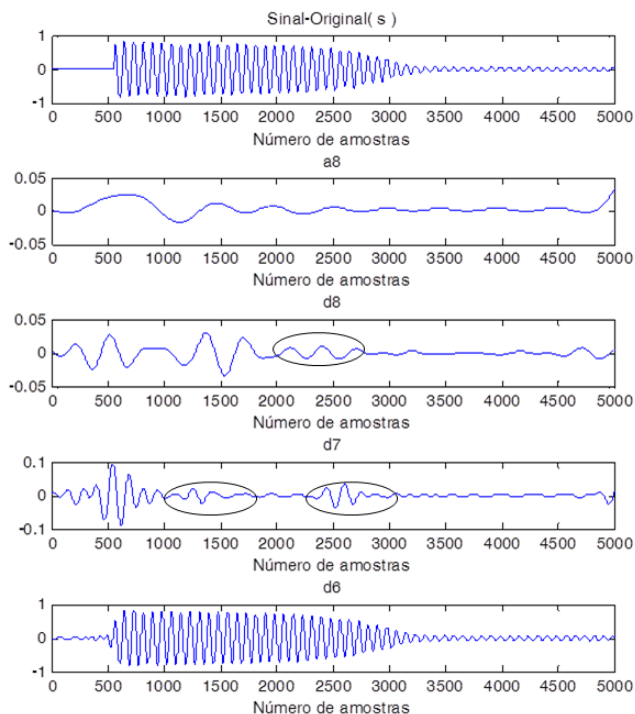


Fig. 13. Transformada DWT do sinal da corrente de partida, motor com barras quebradas sem carga.

## 6 | CONCLUSOES

Este estudo de caso apresenta uma abordagem teórica e experimental de duas ferramentas matemáticas: transformada FFT e transformada Wavelet, aplicadas no diagnóstico e previsão de falhas de barras quebradas, em rotor tipo gaiola de esquilo de motores trifásicos de indução.

O primeiro caso utiliza o método baseado na transformada FFT, que permite a detecção clássica de barras quebradas, por meio da análise do espectro de frequência do sinal da corrente de estator, no estado estacionário do motor. O monitoramento e a previsão de falhas são obtidos, por meio do estudo das duas componentes da banda lateral (inferior e superior), que aparecem no espectro da corrente ao redor da componente de frequência fundamental da rede elétrica, que alimenta o motor. Essa abordagem clássica apresenta vantagens importantes, como a simplicidade dos sistemas de aquisição de dados e o software necessário, além da robustez, que em alguns casos tem fornecido resultados satisfatórios. No entanto, em máquinas de indução sem carga, por exemplo, o escorregamento é muito baixo e as componentes da banda lateral do espectro de frequência, praticamente se sobrepõem à frequência fundamental de alimentação da máquina. Isso torna difícil detectar a falha.

O segundo caso é baseado no uso da transformada de Wavelet (DWT). Essa técnica permite a decomposição de um sinal de corrente do estator, em diferentes componentes de frequência, permitindo o estudo de cada componente separadamente em sua escala correspondente. Uma vantagem da transformada de Wavelet durante a decomposição do sinal é que ela permite ao usuário, analisar as informações contidas em um sinal transitório, ou seja durante a partida do motor, em diferentes resoluções de tempo-frequência.

O método baseado na transformada DWT pode ser considerado como uma complementação do método baseado na transformada FFT tradicional, em estados não estacionários da máquina de indução. Esse método de detecção pode ser considerado representativo de uma nova tendência, para chegar a um diagnóstico em alguns casos em que o método FFT convencional não funciona adequadamente, como em um motor sem carga, por exemplo.

## REFERÊNCIAS

- ABDELEMAM, M. M.; EI-RIFAIE, A. M. and MOUSSA, S. M. **“Discrete wavelet transform based protection for a wind farm double fed induction generator,”** *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, pp. 1-6, Milan, 2017.
- ATHULYA, K. **“Inter Turn Fault Diagnosis in Wound Rotor Induction Machine Using Wavelet Transform,”** *2018 International CET Conference on Control, Communication, and Computing (IC4)*, pp. 22-27, Índia, 2018.
- BELKHOUB, A.; ACHMAMAD, A. and JBARI, A. **“Classification and Diagnosis of Myopathy EMG Signals Using the Continuous Wavelet Transform,”** *2019 Scientific Meeting on Electrical-Electronics & Biomedical Engineering and Computer Science (EBBT)*, pp. 1-4, Istanbul, Turkey, 2019.
- BHONGADE, S. and S. GOLHANI, S. **“HIF detection using wavelet transform, travelling wave and support vector machine,”** *2016 International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)*, pp. 151-156, Bhopal, 2016.
- BOLSHUNOVA, O.; KAMYSHIAN, A.; and BOLSHUNOV, A. **“Diagnostics of electric motors technical condition using wavelet analysis,”** *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, pp. 1-4, Chelyabinsk, 2016.
- BOSONIC, J. A.; PETROVIC, G.; PUTNIK, A. and MOSTARAC, P. **“Power quality disturbance classification based on wavelet transform and support vector machine,”** *2017 11th International Conference on Measurement*, pp. 9-13, Smolenice, 2017.
- DA COSTA, C.; KASHIWAGI, M.; MATHIAS, M. H. **“Rotor failure detection of induction motors by wavelet transform and Fourier transform in non-stationary condition,”** *Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 1, pp. 15-26, July 2015.
- DAYA, J. L. F.; SANJEEVIKUMAR, P.; BLAABJERG, F.; WHEELER, P. W. and OJO, J. O., **“Implementation of Wavelet-Based Robust Differential Control for Electric Vehicle Application,”** *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 12, pp. 6510-6513, Dec. 2015.

DEHINA, W.; BOUMEHRAZ, M.; and KRATZ, F. **“Diagnosis of Rotor and Stator Faults by Fast Fourier Transform and Discrete Wavelet in Induction Machine,”** *2018 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, pp. 1-6, Algiers, Algeria, 2018.

FUPING, Z.; RONGMEI, L.; BEI, H. and YAN, H. **“An electrical energy meter for electric vehicle charging machines based on FFT and wavelet analysis,”** *2014 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*, pp. 1-5, Bucharest, 2014.

GARVANOV, I.; IYINBOR, R.; GARVANOVA, M.; and GESHEV, N. **“Denoising of Pulsar Signal Using Wavelet Transform,”** *2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, pp. 1-4, Varna, Bulgaria, 2019.

GEORGOULAS, G.; TSOUMAS, I. P.; DAVIU, J. A. A.; ALARCON, V. C. **“Automatic pattern identification based on the complex empirical mode decomposition of the startup current for detection of rotor asymmetries in asynchronous machines”**, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 61, No 9, pp. 4937-4946, 2014.

KAIKAA, M. Y.; HADIAMI, M. **“Effects of the simultaneous of static eccentricity and broken rotor bars on the stator current of induction machine”**, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 61, No 5, pp. 2452-2463, 2014.

KECHIDA, R.; MENACER, A. TALHAOUI, H. and CHERIF, H. **“Discrete wavelet transform for stator fault detection in induction motors,”** *2015 IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, pp. 104-109, Guarda, Portugal, 2015.

KEHTARNAVAZ, N. **“Digital Signal Processing System Design - LabVIEW-Based Hybrid Programming”**, 2nd Edition, Elsevier, 2008. ISBN: 978-0-12-374490-6.

KRUGLOVA, T. N. **“Wavelet analysis for fault diagnosis of electrical machines using current signals,”** *2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, pp. 1-5, Chelyabinsk, 2016.

PU, S.; ZHENG, C.; YURIY, V.; ZOUBIR, Z. **“A new detection of broken rotor bar fault extent in three phase squirrel cage induction motor,”** *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 42, pp. 388–403, 2013.

SAKHALKAR, N. P., and KORDE, P. **“Fault detection in induction motors based on motor current signature analysis and accelerometer,”** *2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, pp. 363-367, Chennai, 2017.

SAPENA-BANO, A.; PINEDO-SANCHEZ, M.; PUCHE-PANADERO, R.; MARTINEZ-ROMAN, J.; and MATIC, D. **“Fault Diagnosis of Rotating Electrical Machines in Transient Regime Using a Single Stator Current’s FFT,”** *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64, no. 11, pp. 3137-3146, Nov. 2015.

SHAO, R.; HU, W.; WANG, Y.; and QI, X. **“The fault feature extraction and classification of gear using principal component analysis and kernel principal component analysis based on the wavelet packet transform”**, *Measurement*, Vol. 54, pp. 118-132, 2014.

THAKUR, A.; WADHWANI, S.; WADHWANI, A. K. "**Motor current signature analysis as a tool for induction machine fault diagnosis**". International Journal of Computer Science and Information Technology. Research: 2015. Disponível em: <[www.researchpublish.com](http://www.researchpublish.com)>. Acesso em: 11 abr. 2019.

## UNCERTAINTY QUANTIFICATION OF FRACTURE POTENTIAL AT CONCRETE-ROCK INTERFACE

*Data de aceite: 02/08/2021*

*Data de submissão: 02/05/2021*

### **Mariana de Alvarenga Silva**

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil  
Brasília – Distrito Federal  
<http://lattes.cnpq.br/8015681088985847>

### **Francisco Evangelista Junior**

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil  
Brasília – Distrito Federal  
<http://lattes.cnpq.br/1213553571707025>

**ABSTRACT:** The uncertainties are present in engineering projects, in which can be due to materials, models or constructive inaccuracies. This is very important in dams, because the failure of this structure can lead to enormous social, economic and environmental impacts. In addition, dams must resist overtopping occurrence, in which it has intensity, period and duration variabilities. Thus, this paper aims to analyze the behavior of a concrete gravity dam in the presence of a crack along interface dam/foundation, where it is, normally, the weakest zone of the structure. The study of this discontinuity was based in linear elastic fracture mechanics, considering mixed-mode propagation, due to the particulars of the problem. Furthermore, a reliability analysis was made to take account the uncertainty of main design properties and loadings. The results showed the tendency of energy release rate to

follow a lognormal distribution. The importance of flood control was evidenced, because the analyzed dam presented high failure probability with overtopping. Moreover, consider triangular uplift or constant uplift acting on the crack generated great differences in reliability analysis.

**KEYWORDS:** Uncertainty Quantification, Fracture Mechanics, Concrete Gravity Dam

**RESUMO:** As incertezas estão presentes em projetos de engenharia, nos quais podem ser decorrentes de materiais, modelos ou imprecisões construtivas. Isso é muito importante em barragens, pois o rompimento dessa estrutura pode gerar enormes impactos sociais, econômicos e ambientais. Ademais, as barragens devem resistir à ocorrência de galgamento, no qual há variabilidades de intensidade, período e duração. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de uma barragem gravidade de concreto na presença de uma fissura ao longo da interface barragem/fundação, onde é, normalmente, a zona mais fraca da estrutura. O estudo dessa descontinuidade foi baseado na mecânica da fratura elástica linear, considerando a propagação em modo misto, devido às particularidades do problema. Além disso, uma análise de confiabilidade foi feita para levar em conta a incerteza das principais propriedades de projeto e carregamentos. Os resultados mostraram a tendência da taxa de liberação de energia seguir uma distribuição lognormal. Ficou evidenciada a importância do controle das cheias, pois a barragem analisada apresentou alta probabilidade de rompimento com o galgamento. Além disso, considerar

a subpressão triangular ou a subpressão constante atuando na fissura gerou grandes diferenças na análise de confiabilidade.

**PALAVRAS - CHAVE:** Quantificação da Incerteza, Mecânica da Fratura, Barragem de Gravidade.

## 1 | INTRODUCTION

Dams are big engineering structures which can be designed for storage of water or tailings, energy generation, river regularization, among others and its failure can cause enormous social, economic and environmental impacts. In concrete gravity dams, specially, the failure is associated, especially, to foundation problems, which is the weakest zone of the structure. Thus, if there is a crack along the interface dam/foundation, which can be created due to thermal variations, stress concentrations, among others, its propagation can lead to the structure failure. Furthermore, due to low flood control, these structures are commonly affected by overtopping, as verified by Su [1] in 39,6% of the studied dams in China.

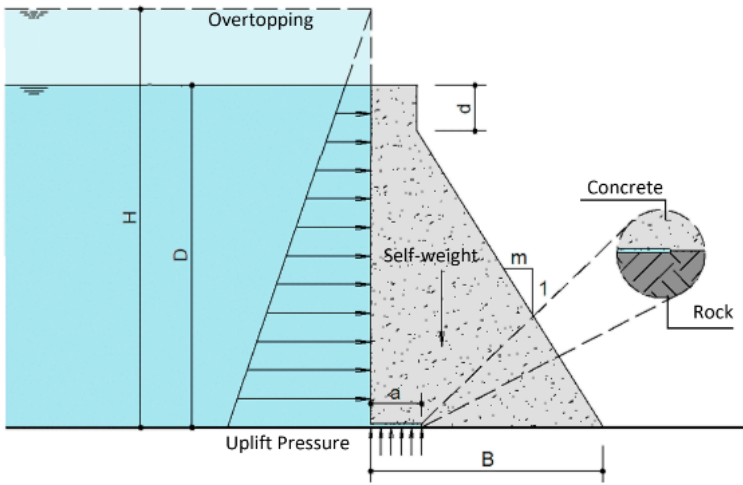
There are in literature some studies about crack propagation along dam/foundation (concrete-rock) interface, as seen in Manfredini *et al.* [2], Bolzon [3] and Barpi and Valente [4]. Furthermore, Plizzari [5] developed geometric equations for mode I and mode II stress intensity factors at the interface. However, the literature lacks the consideration of the uncertainty of the parameters and how this affects the uncertainty in the cracking potential of existing cracks in concrete gravity dams.

The purpose of this paper is to analyze the potential of crack growth along the concrete-rock interface under mixed mode and to quantify the uncertainties of the energy release rate at the interface due to uncertainty of main design properties and loadings.

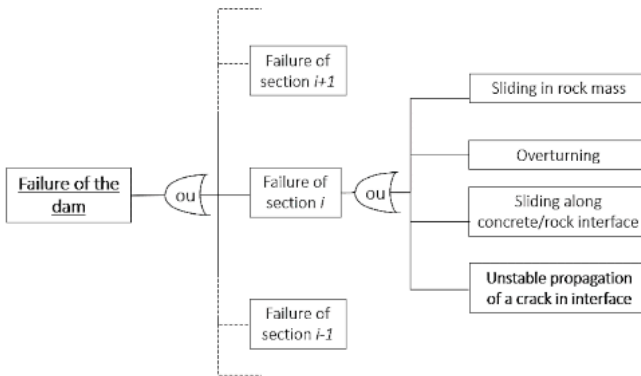
## 2 | CRACK PROPAGATION ALONG DAM/FOUNDATION INTERFACE

The case study consists on a concrete gravity dam on a rock foundation (Fig. 1a). It was considered the existence of a crack along the interface dam/foundation, which can be formed due to differences in material properties, constructive techniques, thermal variations and stress concentrations. During operation, the crack can propagate unsteadily due to water pressure and lead to the structure failure. The schematization of the problem is exhibited in Fig. 1a, in which the crack is subjected to dam's self-weight, uplift pressure and water pressure due to reservoir. Figure 1b shows the proposed system of failure modes for gravity dams with the highlighted failure mode studied in this paper.

In large structures, as dams, the fracture zone is limited, therefore the LEFM can be well applied [6].



(a)



(b)

Figure 1. Typical concrete dam configuration with overtopping: (a) typical cross section (b) system of failure modes

### 3 I LINEAR ELASTIC FRACTURE MECHANICS (LEFM) FOR INTERFACE BETWEEN MATERIALS

The LEFM analyses the materials with global linear elastic behavior and the stress intensity factor ( $K$ ) characterizes the stress at the crack tip according to three modes of deformation: normal ( $K_I$ ), in-plane shear ( $K_{II}$ ) and out-of-plane shear ( $K_{III}$ ).

Other parameter defined in LEFM is the energy release rate ( $G$ ), which is a measure of the energy available for an increment of crack extension. If the crack is along an interface between two linear elastic materials, the relation between  $G$  and  $K$  is given below [7]:

$$G = \frac{K^2}{2 \cosh^2(\pi\varepsilon)} \left( \frac{1}{\bar{E}_1} + \frac{1}{\bar{E}_2} \right), \quad (1)$$

where  $\bar{E}_i$  ( $i=1,2$ ) is the stiffness of each material, which for plane strain state is  $E/(1-\nu^2)$ , where  $E$  is the Young's modulus and  $\nu$  is Poisson's ratio, and  $\varepsilon$  is given by:

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{k_1 G_2 + G_1}{k_2 G_1 + G_2} \right), \quad (2)$$

where  $G_i$  ( $i=1,2$ ) is the shear modulus of each material and  $k_i$  for plane strain is  $3 - 4\nu_i$ .

## 4 | METHODOLOGY

In addition to the actions previously mentioned, it was considered two types of uplift pressure, showed in Fig. 2.

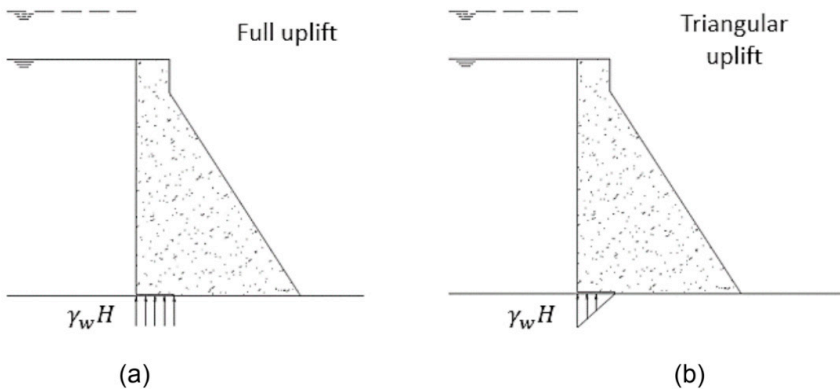


Figure 2. Types of uplift pressure: (a) Full uplift and (b) Triangular uplift

Due to actions and the principle of superposition:

$$K_i = K_i^{sw} + K_i^{fr} + K_i^{ot} + K_i^{ul},$$

$$K_i = \gamma_c D^{3/2} d_i^{sw}(\alpha) + \gamma_w D^{3/2} d_i^{fr}(\alpha) + \gamma_w (H - D) D^{1/2} d_i^{ot}(\alpha) + \gamma_w H D^{1/2} d_i^{ul}(\alpha), \quad (3a,b)$$

where the subscript is related to Mode I and Mode II,  $K_i^{sw}$  is due to self-weight,  $K_i^{fr}$  is related to hydrostatic pressure of full reservoir,  $K_i^{ot}$  is due to overtopping pressure and  $K_i^{ul}$  is due to uplift pressure along the crack.  $\gamma_c$  and  $\gamma_w$  are the weight densities of concrete and water, the factors  $H$  and  $D$  are showed in Fig. 1 and  $d_i^j(a)$  were obtained in Plizzari [5].

Table 1 presents the deterministic and random variables used in the simulation.



Variable	Mean ( $\mu$ )	V ( $\sigma / \mu$ )	Distribution
Dam height ( $D$ )	35, 50 and 80 m	-	-
Downstream slope (m)	0.75 <sup>a</sup>	-	-
Dam width ( $B$ )	$mD$	-	-
Water weight density ( $\gamma_w$ )	10 kN/m <sup>3</sup>	-	-
Concrete Poisson's ratio ( $\nu_c$ )	0.255 <sup>b</sup>	-	-
Rock Poisson's ratio ( $\nu_r$ )	0.165 <sup>b</sup>	-	-
Crack length ( $a$ )	0.01-0.23 $\mu_B$	0.2	Lognormal
Water level ( $H$ )	1.05 $D$	0.1	Extreme Value Type II
Concrete weight density ( $\gamma_c$ )	24 kN/m <sup>3</sup>	0.04 <sup>c</sup>	Normal <sup>c</sup>
Elastic modulus of rock ( $E_{rock}$ )	27.25 GPa <sup>b</sup>	0.25 <sup>d</sup>	Lognormal
Elastic modulus of concrete ( $E_{concrete}$ )	33.56 GPa <sup>b</sup>	0.15 <sup>c</sup>	Lognormal <sup>c</sup>

Table 1. Case study variables

<sup>a</sup>: suggested in [5]; <sup>b</sup>: suggested in [8]; <sup>c</sup>: suggested in [9]; <sup>d</sup>: suggested in [1];

In addition to uncertainty quantification, for the reliability analysis, a limit state equation is defined to determine the degree of confidence of the system. In this problem, this equation is given as:

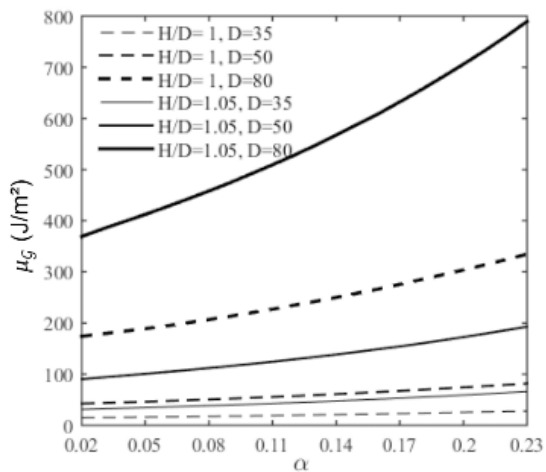
$$\gamma = G_c - G, \quad (4)$$

where  $\gamma$  is the performance function and  $G_c$  is the critical energy release rate. The  $G_c$  is calculated with Eq. (1) and the critical stress intensity factor was determined by the regression of experimental data published in Zhong et al. [10]. The Monte Carlo Method is used to solve this case by random sample generation and simulation in this proposed model. The failure probability can be determined as the number of times the performance function is less than zero.

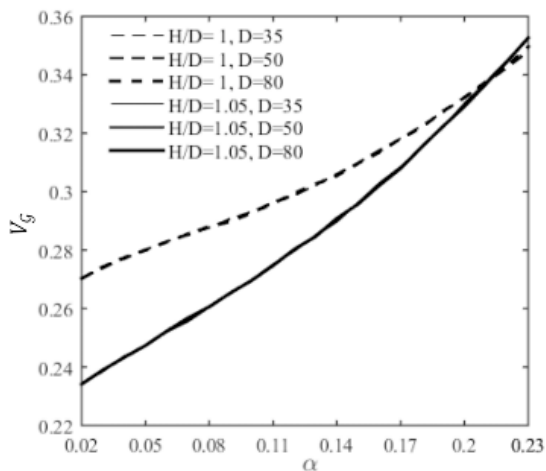
## 5 | RESULTS AND DISCUSSION

Figure 3a shows the increase of the mean of  $G$  according to the growth of normalized crack length. Despite the increase of  $G$  average with the height increment, the major increase of  $G$  observed is due to occurrence of overtopping. It shows that flood control is fundamental in dam's project. Figure 3b demonstrates the same variation coefficient for different heights only, which is expected due to the change of mean and deviation in same proportion varying the height.

Figure 3c shows the mixity angle behavior considering full uplift. Without occurrence of overtopping, the absolute increase of  $K_{II}$  appears to be more accentuated with relation to  $K_I$ , what explains the growth of  $\phi$ . With overtopping, from a value of  $a$ ,  $K_I$  becomes more significant than  $K_{II}$  and what shows the reduction of  $\phi$ .



(a)



(b)

Figure 3. Mixed mode parameters: (a)  $\mu_g$ , (b)  $V_g$  and (c) Mixed mode angle

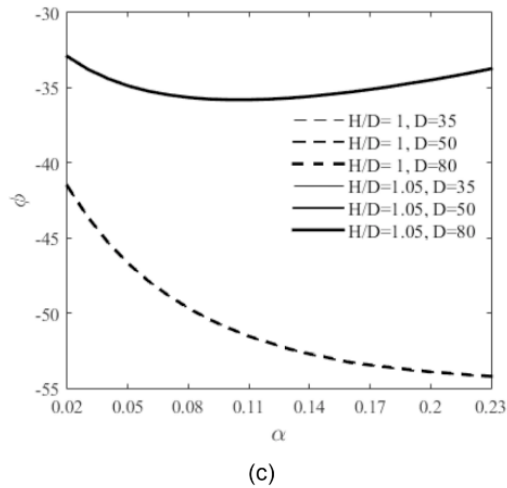
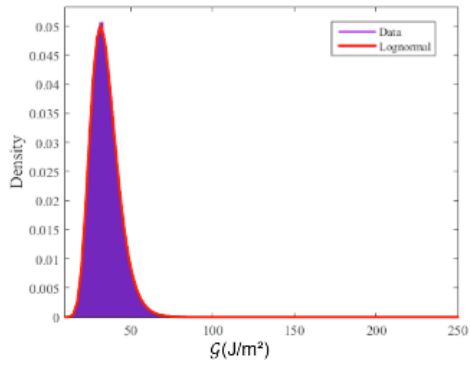
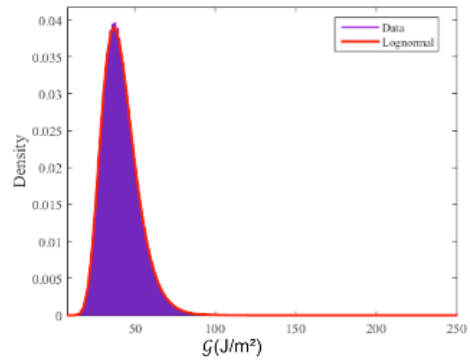


Figure 3 (continuation). Mixed mode parameters: (a)  $\mu_{\mathcal{G}}$ , (b)  $V_{\mathcal{G}}$  and (c) Mixed mode angle

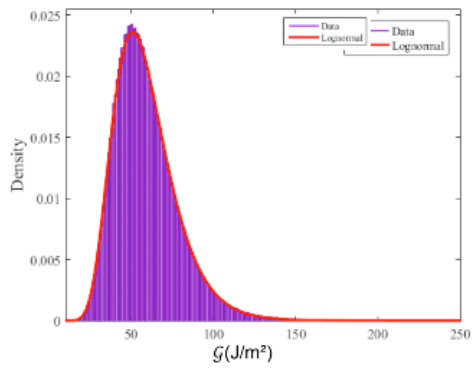
Figure 4 presents the histograms for  $\mathcal{G}$  mixed mode considering the dam's height of 35 m and full uplift. This figure illustrates the increase of the mean and the deviation with normalized crack length seen in Fig. 3. The more open the histogram, greater the deviation. All data fit in a Lognormal distribution. Figure 5a to Fig. 5d exhibit the statistic parameters for  $\mathcal{G}$  and  $\mathcal{G}_c$ , considering  $D = 35$  m and two types of uplift pressure. The values of energy release rate for constant uplift is higher than the values for triangular uplift and this form is closer to reality. The variation coefficient for triangular uplift exhibits peaks for values of  $\alpha$  near to critical points in the curve of  $\mathcal{G}$  and  $\mathcal{G}_c$ . Figure 5d,e show the failure probability and the security factor. It can be seen for constant uplift and overtopping that the failure will always occur to any  $\alpha$ . The probability is acceptable only for triangular uplift and without overtopping, but until  $\alpha = 0.05$ .



(a)



(b)



(c)

Figure 4. Histograms for  $G$  mixed mode, for  $D = 35$  m and  $H/D = 1.05$ : (a)  $\alpha = 0.05$ , (b)  $\alpha = 0.10$  and (c)  $\alpha = 0.20$

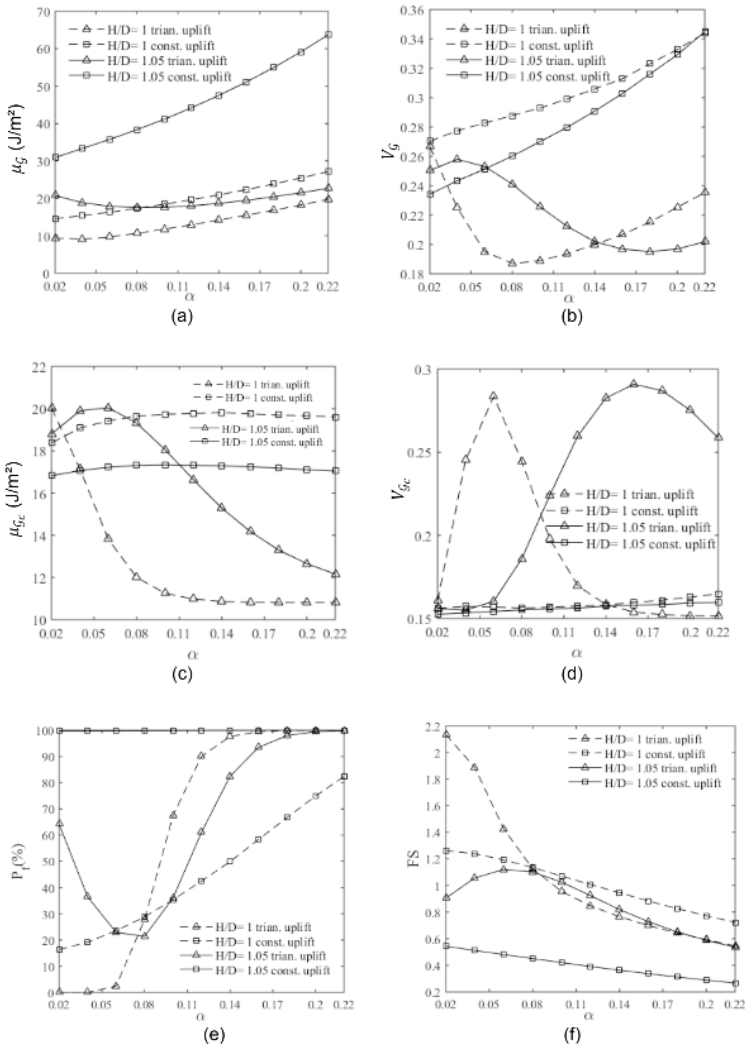


Figure 5. Reliability analysis considering  $D = 35$  m and two types of uplift: (a)  $\mu_G$ , (b)  $V_G$ , (c)  $\mu_{Gc}$ , (d)  $V_{Gc}$ , (e) Failure probability and (f) security factor for crack propagation

## 6 I CONCLUSIONS

It was showed the non-influence of dam's height in the variation coefficient of energy release rate, which was similarly verified for the mixity angle. Moreover, the data for  $G$  fits in a lognormal distribution, what can be explained due to the majority random variables described as lognormal.

The results evidenced the importance of the flood control to dam's behavior, because the structure presented high failure probability with overtopping. In addition, consider constant uplift can be a more conservative analysis due to the highest values for the parameters and for the failure probability.

The purpose of this paper was reached with the uncertainty quantification of the random variables that describe the case and the confidence determination of the proposed dam.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the University of Brasília for the support and research incentive.

## REFERENCES

- [1] H. Su, J. Hu e Z. Wen, "Service life predicting of dam systems with correlated failure modes," *Journal of Performance of Constructed Facilities*, pp. 252-269, 2013.
- [2] P. Manfredini, C. F. e M. Maghella, "Fracture mechanics analysis of a gravity dam," em *Fifth International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams*, Denver, CO, 1999.
- [3] G. Bolzon, "Size effects in concrete gravity dams: a comparative study," *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 1891-1906, 2003.
- [4] F. V. S. Barpi, "The cohesive frictional crack model applied to the analysis of the dam-foundation joint," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. Vol. 77, pp. pp. 2182-2191, 2010.
- [5] G. A. Plizzari, "On the influence of uplift pressure in concrete gravity dams," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. Vol. 59, pp. 253-267, 1998.
- [6] G. A. Plizzari e V. E. Saouma, "Linear or Nonlinear Fracture Mechanics of Concrete?," *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, pp. 1377-1386, 1995.
- [7] L. Banks-Sills, "Interface fracture mechanics - Theory and experiment," *International Journal of Fracture*, pp. 131-146, 2015.
- [8] J. M. C. Kishen e S. K. D., "Stress Intensity Factors Based Fracture Criteria for Kinking and Branching of Interface Crack: Application to Dams," *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 201-219, 2001.
- [9] Joint Committee on Structural Safety (JCSS), "Probabilistic Model Code," [Online]. Available: <https://www.jcss.byg.dtu.dk>. [Acesso em July 2019].
- [10] H. Zhong, E. T. Ooi, C. Song, T. Ding, G. Lin e H. Li, "Experimental and numerical study of the dependency of interface fracture in concrete-rock specimens on mode mixity," *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 287-309, 2014.

## USANDO MINERAÇÃO DE DADOS PARA IDENTIFICAR FATORES MAIS IMPORTANTES DO ENEM DOS ÚLTIMOS 22 ANOS

Data de aceite: 02/08/2021

### Jacinto José Franco

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso (IFMT)  
Barra do Garças, MT – Brazil

### Fernanda Luzia de Almeida Miranda

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso (IFMT)  
Barra do Garças, MT – Brazil

### Davi Stiegler

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso (IFMT)  
Barra do Garças, MT – Brazil

### Felipe Rodrigues Dantas

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso (IFMT)  
Barra do Garças, MT – Brazil

### Jacques Duílio Brancher

Departamento de Ciências da Computação  
Universidade Estadual de Londrina (UEL) - Londrina, PR – Brasil

### Tiago do Carmo Nogueira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano (IFBaiano)  
Guanambi, BA – Brasil

**RESUMO:** O Exame Nacional do Ensino Médio (Enem) é uma prova requerida pela maioria das universidades brasileiras para seleção de estudantes. Neste exame, são coletadas

várias características sobre os candidatos. Algumas dessas características não contribuem de forma significativa para a predição de desempenho, representando assim, um conjunto demasiadamente grande de dados, o que requer recursos computacionais exponenciais para identificá-las. Para solucionar tal problema, este trabalho aplica algoritmos de seleção e de classificação de atributos, identificando as vinte principais características que contribuem para o desempenho alto ou baixo dos estudantes neste exame, nos últimos vinte e dois anos (1998-2019).

**PALAVRAS - CHAVE:** Enem, Mineração de Dados Educacionais, Experimentos, Algoritmos de seleção

**ABSTRACT:** The national high school exam (Enem) is a test required by most Brazilian universities to select students. In this exam, several characteristics about the candidates are collected. Some of these characteristics do not contribute significantly to the performance prediction, thus representing an excessively large dataset, requiring exponential computational resources to identify them. To solve this problem, this work applies algorithms for the selection and classification of attributes, identifying twenty main characteristics that contribute to the high or low performance of students in this exam, in the last twenty-two years (1998-2019).

**KEYWORDS:** Enem, Educational Data Mining, Experiments, Feature selection Algorithms.

## 1 | INTRODUÇÃO

No Brasil, os estudantes de nível médio que almejam ingressar em algum curso de nível superior precisam realizar testes para avaliar seus conhecimentos. Essa avaliação pode ocorrer de duas formas, via vestibular ou pelo Exame Nacional do Ensino Médio, o Enem. Este é aplicado anualmente pelo Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (Inep) (Lima et al., 2019).

Nos anos iniciais de aplicação do Enem, o teste contou com um número pequeno de inscritos; contudo, esse número foi crescendo ao longo dos anos ao longo dos anos à medida que as instituições brasileiras de ensino superior foram adotando-o como requisito para o ingresso em seus cursos. Atualmente, essa prova é largamente utilizada por grande parte das instituições públicas e privadas do país, pois provê uma métrica confiável para avaliar os conhecimentos do público estudantil.

O resultado de cada edição do Enem realizada nos últimos anos está disponível via microdados anonimizados pelo Inep<sup>1</sup>, o que viabiliza análises quanto a relevância de cada fator. Uma dificuldade que muitos pesquisadores podem ter ao analisar o Enem diz respeito ao número de fatores coletados pelo Inep em cada prova, que pode chegar a 327 variáveis coletadas em um único ano. Para resolver esse tipo de problema, em mineração de dados, vários métodos foram desenvolvidos com o intuito de reduzir a dimensionalidade, permitindo dizer quais fatores são mais importantes e eliminar os que são redundantes ou irrelevantes (Stańczyk & Jain, 2015).

Considerando a mencionada constatação, este trabalho fez uso de métodos de seleção de atributos e de classificação para identificar os fatores que mais contribuem para o desempenho do estudante como sendo baixo ou alto. Nos datasets avaliados foram considerados todos os fatores como entrada dos algoritmos de seleção de atributos, com exceção dos que se referiam às notas, às informações do gabarito e à presença dos candidatos. Ao final, escolheram-se somente os 10 melhores atributos retornados por cada algoritmo de acordo com o *ranking*. As 10 características de cada ano foram aglutinadas em um *ranking* global após a conclusão dos experimentos de cada ano.

Para mensurar a qualidade dos fatores retornados pelos métodos de seleção, este trabalho fez uso de algoritmos de classificação e da média das dez execuções, estabelecendo-se a melhor combinação de fatores cuja taxa de acertos foi maximizada.

Com a finalidade de avaliar os dados entre 1998 e 1999, este trabalho aplicou uma abordagem exploratória para identificar algoritmos que possuem melhores desempenhos em relação às informações contidas nos *datasets* do Enem. A partir dos resultados obtidos, os quatro melhores métodos de seleção e os dois melhores algoritmos de classificação foram selecionados para evidenciar os fatores mais relevantes no contexto educacional para a performance dos estudantes.

---

<sup>1</sup> <http://inep.gov.br/microdados>



Quanto à sua estrutura, além desta introdução (seção 1), este artigo apresenta: a seção 2, que traz a revisão da literatura, com intuito de identificar os principais trabalhos sobre mineração de dados educacionais no Enem; a seção 3, na qual se realiza o delineamento experimental demonstrando as fases de pré-processamento, seleção e classificação das melhores características aplicadas no Enem; a seção 4, que apresenta os resultados e discussões; e a seção 5, que traz as conclusões deste estudo.

## 2 | REVISÃO DA LITERATURA

Para a identificação de possíveis lacunas na literatura, buscou-se por trabalhos que aplicassem a mineração de dados educacionais no conjunto de dados do Enem. Essa procura ocorreu de maneira exploratória, utilizando-se as engines de buscas *Google Scholar*, *ISI Web of Science*, *ACM Digital Library*, *IEEE Digital Library*, *Scielo*, *Science Direct*, *Scopus* e *Springer*.

Dessa forma, definiu-se uma *string* de busca genérica a fim de detectar o maior número de estudos possíveis sobre a temática, elencando-se, como a principal *string*, a palavra-chave 'Enem'. Todos os resultados advindos das *engines* acima elencadas foram considerados, desde que a quantidade de entradas fosse inferior a 1.000 registros. Não obstante, por ser considerado uma *string* de busca genérica, que gera muitos registros no Google Scholar passíveis de descarte por estarem fora do escopo deste trabalho, acrescentou-se ao protocolo mais uma palavra-chave. Assim, utilizando-se dos conectores lógicos, a *string* de busca final foi ('Enem' and 'mineração de dados'), limitando as buscas em 500 registros. Ao final da aplicação deste protocolo, obteve-se o quantitativo de 11 estudos sobre mineração de dados e Enem, em todas as engines utilizadas nesta pesquisa.

Para realizar a tarefa de filtrar os registros, foi considerado apenas artigos publicados em periódicos e eventos, sendo sua seleção feita pelo título, resumo, palavras chaves e conclusões, conforme recomenda (Rf & Mc, 2007) para revisões e o software usado nessa atividade foi o Parsifal. Com essa filtragem, constatou-se que somente 11 artigos de fato usavam algum método de mineração de dados aplicado aos datasets do Enem.

A grande parte dos trabalhos encontrados na literatura não levam em consideração o uso dos algoritmos para a redução da dimensionalidade, com exceção de (Santos et al., 2020) que aplica o *Principal Component Analysis* (PCA) no *dataset* de 2016 do Enem em conjunto com Redes Bayesianas, o que permite gerar redes reduzidas, facilitando assim a interpretação dos resultados. No estudo considerou-se 43 variáveis e após a aplicação do PCA o número foi reduzido para apenas 23. Segundo os autores, a renda, a escolaridade dos pais e o tipo de escola são fatores de grande influência no resultado.

A maioria dos trabalhos quando faz a seleção dos atributos, o faz sem o auxílio de algoritmos, apenas avaliando o conjunto de variáveis alvo do estudo. Isso é realizado por (Gomes et al., 2017) e (COSTA et al., 2017), para estabelecer a composição das variáveis

da pesquisa. Essa abordagem também é encontrada em trabalhos que realizam análises estatísticas da seção seguinte.

Os artigos identificados nas análises focam-se majoritariamente em classificadores, sendo esse o caso de (Alves et al., 2018), (Braga & Drummond, 2016), (COSTA et al., 2017), (Adeodato et al., 2014), (Silva & Bernardino, 2019), (Stearns et al., 2017), (Simon & Cazella, 2017), e (Gomes et al., 2017). Os algoritmos mais referenciados são: KNN, Naive Bayes, J48, SVM, Redes Neurais, Redes Bayesianas, XGBoost e AdaBoost.

Embora este trabalho se foque somente em algoritmos de classificação, no processo, identifica-se que os trabalhos de (Gomes et al., 2017), (Braga & Drummond, 2016), (Adeodato et al., 2014) e (Alves et al., 2018) fazem uso de regras de associação. Identifica-se também que (Ideas, 2019) e (Albertini & Backes, 2017) utilizam agrupamento e (Alves et al., 2018) de regressão alucidar conhecimentos dos *datasets*.

Nota-se que a maior parte dos artigos lidam com apenas um único *dataset*, com exceção de (Ideas, 2019) que explorou os *datasets* de 2009 à 2015 e (Albertini & Backes, 2017) com dados de 2010 e 2011, os demais artigos focaram-se em apenas um ano do Enem. Destes trabalhos, é possível notar que nenhum dos autores fez uso de métodos da mineração de dados para prover uma visão geral acerca dos fatores de todos os *datasets* do Enem.

Em decorrência dessa constatação, este trabalho utilizou métodos de seleção de atributos para identificar os 10 fatores mais importantes de todos os anos do Enem, tendo sua validação provida por meio de algoritmos de classificação.

A partir do que se verificou na literatura, observou-se que muito do que se coletou em todos os anos do Enem ainda não foi analisado utilizando métodos de mineração de dados. Sendo assim, o presente trabalho preenche essa lacuna com um desenho experimental replicado para todos os anos, provendo uma visão de alto nível acerca dos 20 fatores considerados mais importantes na classificação.

## 3 | DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Nesta seção são apresentados os três passos usados para obter as 10 melhores características do Enem, que consistem no pré-processamento, na seleção de 10 atributos mais relevantes para cada *dataset* desde 1998 e na validação pela classificação.

### 3.1 Pré-processamento

O primeiro passo efetuado consistiu em calcular as médias aritméticas de todas as notas para cada prova. O limite de 600 pontos determina se o aluno tem desempenho baixo ou alto, sendo considerado alto quando o aluno alcança a média cujo valor é igual ou superior a 600 pontos e baixo se o valor for inferior ao mencionado limite.

Essa abordagem foi aplicada somente para o ano de 2018; para os demais,

considerou-se uma constante, que é 1,13, multiplicada pela média para estabelecer o limite de notas altas. É válido esclarecer que se chegou ao valor da constante por meio da divisão de 600 pela média obtida em 2018. Isso se fez necessário para normalizar entre os anos o conceito de aluno com desempenho alto ou baixo, pois a média de cada ano foi distinta, em virtude, dentre outros motivos, de possíveis variações quanto ao grau de dificuldade das provas entre as diferentes edições do exame.

Saliente-se, ainda, que as informações de todos os estudantes foram consideradas no experimento, com exceção às que se referiam aos alunos que não preencheram os questionários, que eram treineiros, que zeraram na(s) prova(s) e aos que faltaram às etapas do exame ou a alguma delas.

Após a definição do filtro inicial e do perfil de aluno com alto desempenho, o próximo passo consistiu em converter o *dataset* de cada ano em números inteiros com o comando *apply* da biblioteca Pandas em todas as colunas dos *datasets*. Cada nível das características coletadas tem um valor inteiro único, mesmo os valores nulos. Para estes, o mesmo resultado pode ser obtido usando a *SimpleImputer*<sup>2</sup> disponível no *Scikit-learn*.

Um problema observado quando se utilizou de classificação foi o desbalanceamento das classes. Nessa situação, ao se aplicar os algoritmos de classificação, percebeu-se que enquanto houve grande índice de acerto na apresentação da classe de alunos com baixo desempenho, o mesmo não ocorreu em relação à categoria de alunos com alto desempenho, o que invalidou o resultado. Uma abordagem muito comum em ciência de dados é usar algum método sintético para balancear as classes. Essa tarefa foi executada usando o SMOTE (*Synthetic Minority Oversampling Technique*) implementado na biblioteca *imblearn*<sup>3</sup>.

Com o pré-processamento concluído, o *dataset* ficou pronto para a próxima etapa, a seleção de atributos, podendo, na sequência, ser realizada a execução dos classificadores. Um aspecto relevante a ser observado sobre os *datasets* em questão referiu-se ao número de fatores coletados. Nota-se que esse número variou entre 100 e 327, conforme a Figura 1, e com apenas 10 características foi possível obter taxas de acerto de 69.2% a 89%, o que pode ser verificado na Figura 2 da seção 4.

---

<sup>2</sup> <https://scikit-learn.org/stable/modules/impute.html>

<sup>3</sup> <https://imbalanced-learn.readthedocs.io/en/stable/index.html>

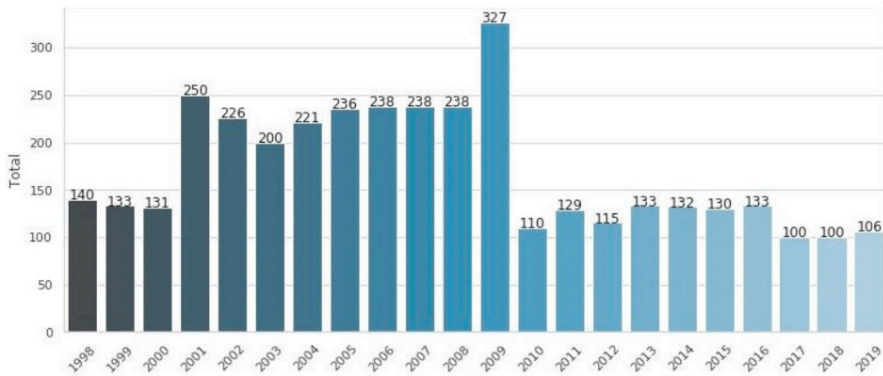


Figura 1: Total de características consideradas de todos os anos do Enem.

#### 4 | SELEÇÃO DOS ATRIBUTOS MAIS RELEVANTES

Inicialmente o experimento partiu de uma abordagem exploratória no sentido de testar vários algoritmos de seleção de atributos e de classificação, não sendo viável executar em *datasets* muito grandes, devido ao tempo requerido para isso. Portanto, escolheram-se os dados de 1999 para apontar os algoritmos mais eficientes em identificar os fatores que propiciam melhor resultado na classificação.

Considerando haver na literatura muitos algoritmos de seleção de atributos e que a execução de todos iria requerer muito tempo, neste trabalho foram escolhidos alguns algoritmos disponíveis no software Weka na versão 3.9.4, Scikit-learn na versão 0.23.1 e na biblioteca MLxtend<sup>4</sup> na versão 0.17.2. Outra abordagem usada para evidenciar os atributos mais significativos consistiu em executar algoritmos de classificação e extrair o *feature\_importances\_* após o treinamento do modelo. Somado aos algoritmos, também foi testado os atributos cujo fator de correlação e Predictive Power Score (PPS) é maior. O fator de correlação foi obtido pela biblioteca pandas na versão 1.0.1 e o PPS pela biblioteca ppscore 0.0.2.

Foram considerados inicialmente os seguintes algoritmos de seleção de atributos:

- **Weka** - InfoGainAttributeEval, SymmetricalUncertAttributeSetEval e GainRatioAttributeEval.
- **Scikit-learn** - SelectKBest, RFE, GenericUnivariateFeatures e PCA.
- **MLxtend** - SequentialFeatureSelector (SFS) combinado com o classificador LinearRegression do Scikit-learn.

Os classificadores abaixo foram usados para extrair as características mais importantes providas pelo atributo *feature\_importances\_*:

- XGBoost provido pela biblioteca xgboost na versão 1.0.2.

<sup>4</sup> <http://rasbt.github.io/mlxtend/>

- LinearSVC e ExtraTreesClassifier disponíveis no Scikit-learn.

## 5 | CLASSIFICAÇÃO

No experimento, os algoritmos de classificação serviram para dizer o quanto é possível chegar em termos de classificação e definir a melhor combinação de fatores. Quanto ao número de classificadores, o experimento não explorou tantas opções devido à quantidade de dados que precisaram ser processados.

Os seguintes classificadores foram considerados: *XGBoost*, *LightGBM*, redes neurais e árvores de decisão implementados nas classes *MLPClassifier* e *DecisionTreeClassifier* do *Scikit-learn*. Nos algoritmos *XGBoost* e *LightGBM* não foi aplicada nenhuma personalização, no *DecisionTreeClassifier* alterou-se somente o parâmetro `n_jobs` com valor -1 para permitir o uso pleno de todos os núcleos. Como entrada, os algoritmos tiveram 30% do *dataset* para teste e 70% para treinamento e cada classificador foi repetido 10 vezes com conjuntos de teste e de treinamento distintos gerados pelo `train_test_split` do *Scikit-learn*, alterando-se apenas o `random_state` de cada execução.

## 6 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados todos os resultados obtidos experimentalmente combinando fatores, algoritmos de seleção e de classificação que proporcionam a melhor taxa de acerto. Inicialmente, parte-se de uma abordagem exploratória quanto ao número de algoritmos testados e, depois, passa-se a discorrer sobre a escolha dos quatro melhores algoritmos para a seleção de atributos e dos dois melhores para a classificação.

### 6.1 Dataset de 1998 e 1999

Os dois primeiros anos do Enem foram testados com o intuito de identificar os algoritmos de seleção e classificações que seriam mais confiáveis quanto à qualidade dos resultados possíveis de serem obtidos nos demais anos.

Ranking	Método	Algoritmo de classificação	Quantidade de características	Taxa de acerto
1	XGBClassifier	LightGBM	10	76.31567
2	ExtraTreesClassifier	XGBClassifier	10	76.31279
3	SFS	XGBClassifier	10	76.24993
4	ExtraTreesClassifier	NeuralNet	10	76.24670

Tabela 1: 4 melhores resultados combinando todos os algoritmos no dataset de 1999.

Ranking	Método de seleção	Algoritmo de classificação	Quantidade de características	Taxa de acerto
1	SFS	LightGBM	10	80.46193
2	PCA	XGBoost	10	80.36647

Tabela 2: Duas melhores combinações com o dataset de 1998.

A partir da execução, repetida por 10 vezes, de todos os algoritmos com 10 características, foram escolhidos para a tarefa de classificação os algoritmos *XGBoost* e *LightGBM*; já para a tarefa de seleção, os *XGBoost*, *ExtraTreesClassifier*, *PCA* e *SFS*. A partir do ano 2000 somente esses algoritmos foram usados, pois executar todos os algoritmos disponíveis geraria um alto custo computacional.

## 7 | RESULTADO COMBINADO DE TODOS OS ANOS

Conforme a Figura 2, os resultados obtidos experimentalmente indicaram que, no período de 1998 a 2019 a taxa de acerto possível variou entre 69.2% e 89.0% com 10 características.

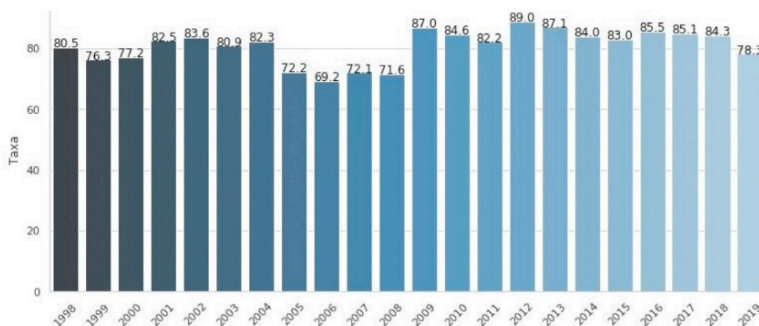


Figura 2: Taxa de acerto do experimento dos últimos 22 anos.

Em razão do grande número de características gerado pela busca efetuada nos 22 anos de exame, para elencar as mais relevantes em cada ano, optou-se por usar o atributo `feature_importances_` obtido a partir de uma execução em cada *dataset* com o *XGBoost* para indicar os 20 atributos considerados mais importantes. A partir da média do valor `feature_importances_`, permitiu-se indicar os atributos que em média foram mais relevantes para a atividade de classificação.

Ranking	Descrição	Anos	Score Médio
1	Língua Estrangeira	2016, 2018, 2019, 2011, 2012, 2013, 2014, 2010	0,302309875
2	Grau de importância quanto aos motivos que levaram a participar do ENEM Para Conseguir uma bolsa de estudos (ProUni, outras)	2010	0,280232
3	O quanto você se interessa e acompanha: a política internacional	1999, 2000,	0,248994
4	Se indicou indígena, qual(is) língua(s) você domina	2005, 2006, 2007, 2008	0,2179125
5	Indique os motivos que levaram você a participar do ENEM: Conseguir uma bolsa de estudos (ProUni, outras).	2015,2016, 2012, 2013, 2014	0,1878978
6	Indique o que levou você a participar do ENEM: Conseguir uma bolsa de estudos (ProUni, outras)	2011	0,16978
7	Você tem em sua casa? Microcomputador	1999, 2000, 2002, 2003, 2004, 2006, 2007, 2009, 2011, 2012, 2013, 2014	0,160423333333333
8	Fez curso de língua estrangeira	2009, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2013, 2010	0,155758625
9	Indique os cursos que você frequenta ou frequentou: Curso superior	2013, 2014, 2011, 2010	0,153418
10	Em que tipo escola cursou ou está cursando o ensino médio (2º grau)	2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2008, 2015, 2016, 2017, 2018, 1998	0,144833846153846
11	Você considera que conhece suficientemente a atividade de trabalho Que você escolheu.	1999	0,129628
12	O quanto você se interessa pela política dos outros países	2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006	0,1238565
13	Qual é a renda mensal de sua família? (Some a sua renda com a dos Seus familiares.)	2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2005, 2006, 2007, 2008, 2012, 2010	0,1196753
14	Sexo	2011, 2013, 2014, 2017, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008	0,11832
15	Tem Acesso à Internet e quantos	2003, 2004, 2009, 2011	0,11703875
16	Em que tipo de escola cursou o ensino fundamental (1º grau)	2004, 2006, 2007, 2008, 2010, 2012	0,10934
17	Durante o Ensino Fundamental, você abandonou os estudos e/ou Foi reprovado?	2015,2016	0,103279
18	Em que turno cursou ou esta cursando o ensino médio (2º grau)	2000, 2001, 2002, 2003, 2005, 1998, 2005	0,093806428571429
19	Ao concluir o ensino médio (2º grau) o candidato do ENEM pretende fazer curso(s) profissionalizante(s) e me preparar para o trabalho.	1999	0,087494
20	Você tem em sua casa? Banheiro	2012	0,08709

Tabela 3: Ranking dos melhores atributos dos últimos 22 anos do Enem.

A Tabela 3 elencou os fatores mais importantes para os classificadores. O resultado seria diferente se fosse utilizado o fator de correlação como referência. Embora a correlação dos fatores com o resultado não seja o foco principal deste trabalho, é importante dizer que a renda familiar se tornou o fator de maior correlação com a definição do desempenho como baixo ou alto somente a partir de 2011. Na Tabela 4, considerou-se o maior fator de correlação que mais se aproxima de 1 positivo ou negativo.

Quanto ao algoritmo que permitiu a melhor classificação, o *XGBoost* destacou-se em quase todos os anos. Em média, foi possível obter a taxa de 80,85% de acerto, conforme a Tabela 5, o que proporcionou maior segurança para dizer que os fatores elencados na

Tabela 3 poderiam ser considerados relevantes. O melhor resultado foi o obtido com o *XGBoost* para o ano de 2012, tendo assertividade de 89%.

Descrição	Fator	Ano
Tipo de escola que cursou o ensino médio (2º grau)	0,422846794455483	1998
O quanto você se interessa e acompanha: a política internacional	-0,32451507473847	1999
	-0,346604306461826	2000
Em que tipo escola cursou ou está cursando o ensino médio (2º grau)	0,380182101996118	2001
Tem Microcomputador e quantos	-0,290258678805769	2002
Está frequentando um curso profissionalizante	0,256403650140639	2003
Até quando a mãe estudou	0,28581360289315	2004
Se indicou indígena, qual(is) língua(s) você domina	0,249277195498918	2005
	0,216173206398373	2006
	0,219766219644129	2007
	0,257849686576848	2008
Até quando sua mãe estudou	0,218394601633761	2009
Grau de importância quanto aos motivos que levaram a participar do ENEM para Conseguir uma bolsa de estudos (ProUni, outras)	-0,329040009597119	2010
Qual é a renda mensal de sua família? (Some a sua renda com a dos seus familiares.)	0,397946320171181	2011
	0,410388728724133	2012
	0,39844400990799	2013
	0,401047691589809	2014
	0,248671127151669	2015
	0,404529502005125	2016
	0,407309507632146	2017
	0,410839404783366	2018
	0,439258036363207	2019

Tabela 4: Maior fator de correlação de todos os anos do Enem.

Observa-se que a melhor combinação de algoritmos obtida no experimento foi o do *ExtraTreesClassifier* com o *XGBoost* para a classificação, em 8 anos, seguido do *XGBoost* para a classificação e seleção, em 7 anos, e do *SFS* com o *XGBoost*, em 4 anos. Entre os quatro métodos escolhidos para a seleção de atributos, o *PCA* é o seletor de atributos menos eficiente.

Utilizando o método de classificação supracitado, foi possível constatar que o que é perguntado aos candidatos no questionário de cada Enem influencia diretamente o resultado da classificação. Partindo dessa premissa, o questionário do exame de 2012 foi considerado o melhor estruturado de todas as edições, pois, no referido ano, foi possível obter a taxa de acerto de 88,97% executando o *XGBoost*.

Segundo a Tabela 5, corroborada pela Figura 3, o fator de classificação considerado mais importante para 2012 foi o tipo de escola que o estudante cursou o ensino fundamental. Uma possível justificativa para isso seria o fato de, na educação escolar brasileira, esse nível de ensino representar 3/4 dos estudos anteriores ao ingresso da maioria dos candidatos em algum curso de nível superior. Infelizmente tal informação não pôde ser coletada nas últimas edições do Enem, em virtude de seus respectivos questionários não contemplarem mais essa pergunta



Importância	Fator	Descrição
0.231240	Q32	Em que tipo de escola você cursou o Ensino Fundamental?
0.191640	TP_LINGUA	Tipo de Língua Estrangeira
0.104269	Q3	Qual é a renda mensal de sua família? (Some a sua renda com a Dos seus familiares.)
0.087090	Q21	Você tem em sua casa? Banheiro
0.082882	Q38	Caso você ingresse no Ensino Superior privado pretende recorrer aos auxílios abaixo para custeio das mensalidades? Bolsa de estudos da empresa onde trabalho.
0.076745	Q10	Você tem em sua casa? Microcomputador
0.064528	Q30	Quantos anos você levou para concluir o Ensino Fundamental?
0.061394	Q16	Você tem em sua casa? Telefone celular
0.050122	Q28	Indique os motivos que levaram você a participar do ENEM: Conseguir uma bolsa de estudos (ProUni, outras)
0.050088	Q4	Quantas pessoas moram em sua casa (incluindo você)?

Tabela 5: Melhores características para a classificação de 2012.

Em 2012, o desempenho do aluno foi considerado alto, se obteve média maior ou igual a 570,30 pontos. A partir das porcentagens da Tabela6, notou-se que somente 7,71% dos alunos que cursaram o ensino fundamental na rede pública conseguiram atingir notas acima de 570,30 pontos, ao passo que as alcançaram 45,92% dos que cursaram esse nível escolar na rede particular de ensino. Essa constatação provavelmente se aplica aos demais anos, pois o Brasil não avançou muito em termos de qualidade do ensino fundamental, que, conforme se averiguou neste estudo, foi o nível que fez toda a diferença para classificar o desempenho dos estudantes em alto ou baixo.

Descrição	Conceito	Quantidade	Porcentagem
Somente em escola pública	Alto	336.782	7,71%
	Baixo	4.029.581	<b>92,29%</b>
Maior parte em escola pública	Alto	78.548	17,75%
	Baixo	364.073	<b>82,25%</b>
Somente em escola particular	Alto	338.140	45,92%
	Baixo	398.168	<b>54,08%</b>
Maior parte em escola particular	Alto	68.270	28,17%
	Baixo	174.068	<b>71,83%</b>
Somente em escola indígena	Alto	99	6,86%
	Baixo	1.345	<b>93,14%</b>
Maior parte em escola indígena	Alto	55	7,97%
	Baixo	635	<b>92,03%</b>
Somente em escola situada em comunidade quilombola.	Alto	53	8,33%
	Baixo	583	<b>91,67%</b>
Maior parte em escola situada em comunidade Quilombola	Alto	74	11,13%
	Baixo	591	<b>88,87%</b>

Tabela 6: Porcentagem de alunos cuja nota é considerada é baixo ou alto para 2012.

## 8 | CONCLUSÕES

A partir dos dados evidenciados nesta pesquisa, foi possível inferir que a redução da dimensionalidade do conjunto de características simplificou o estudo, pois diminuiu seu escopo, permitindo que se focasse no que é de fato relevante para avaliar o desempenho da maior parte dos estudantes brasileiros no ENEM.

Cumprido ressaltar que a consideração de um maior número de atributos não pressupõe necessariamente uma melhor classificação, pois alguns deles são redundantes e/ou irrelevantes para os resultados, conforme verificou-se em alguns classificadores pela variável *feature\_importance* e pelo ranking fornecido pelos algoritmos de seleção de atributos.

Foi possível perceber que alguns atributos considerados importantes nos experimentos foram removidos do questionário do Enem dos últimos anos, a exemplo dos dados relacionados ao ensino fundamental do estudante. Do ponto de vista educacional, observou-se que algumas informações retiradas eram mais relevantes que as que permaneceram no questionário.

Notou-se, ainda, que embora sejam computacionalmente menos onerosos, os métodos *filters* selecionam características menos eficientes para classificar os alunos quanto aos seus desempenhos no referido Exame.

Pelos resultados obtidos, mesmo que este estudo não tenha explorado muitos fatores para todos os anos e tenha executado os ensembles sem qualquer otimização, mostrou-se mais eficiente que os trabalhos analisados na literatura.

Verificou-se que a importância e a correlação dos atributos entre os anos analisados foram distintas. Após análise das Tabelas 3, 4 e 5, percebeu-se também que os fatores nelas descritos foram os que permitiram classificar melhor os alunos brasileiros de nível médio. Além disso, constatou-se a necessidade de uma reformulação no questionário a ser preenchido pelos estudantes, a fim de melhorar a acurácia do modelo de aprendizagem de máquina, pois, em 2019, foi possível obter apenas 78.3% de acerto contra 88.97% de 2012.

Diante de todo o exposto, o presente estudo pode servir de base para um trabalho futuro, pois provê subsídios para a realização de análises estatísticas acerca dos fatores evidenciados experimentalmente, bem como fornece meios para averiguar quais interações os fatores podem ter entre si, permitindo, assim, uma melhor compreensão dos atributos e arranjos que mais influenciam o desempenho dos estudantes no ENEM.

## REFERÊNCIAS

Adeodato, P. J. L., Santos Filho, M. M., & Rodrigues, R. L. (2014). Predição de desempenho de escolas privadas usando o ENEM como indicador de qualidade escolar. **Anais Do XXV Simpósio Brasileiro de Informática Na Educação (SBIE 2014)**, 1(1), 891. <https://doi.org/10.5753/cbie.sbie.2014.891>

Albertini, M. K., & Backes, A. R. (2017). Visualization of Clusters in an Educational Data Set Based on Convex-Hull Shape Preservation Algorithm. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 31(02), 1750004.

Alves, R. D., Cechinel, C., & Queiroga, E. (2018). Predição do desempenho de Matemática e Suas Tecnologias do ENEM utilizando técnicas de Mineração De Dados. *Anais Dos Workshops Do Congresso Brasileiro de Informática Na Educação*, 7(1), 469.

Braga, L. C. C., & Drummond, I. N. (2016). Uma abordagem de mineração descritiva aplicada a dados abertos governamentais empregando a ferramenta R. *Anais Do Computer on the Beach (2016)*, 51–60. <https://siaiap32.univali.br/seer/index.php/acotb/article/view/10709>

COSTA, J. A. R., REIS, ; André L., SOUZA, ; Daniel C. L., CRISTINO, ; Kaessa G. S., M., ; Marcelo, AURELIANO, SOARES, ; Salles R., SANTOS, ; Thiago E., & SILVA, ; Yasmin V. S. (2017). *Técnicas de mineração de dados aplicadas em dados do enem 2015*. 2–5. <https://jornada.ifsuldeminas.edu.br/index.php/jcmch4/jcmch4/paper/viewFile/3406/2282>

Gomes, T., Gouveia, R., & Batista, M. (2017). Dados Educacionais Abertos: associações em dados dos inscritos do Exame Nacional do Ensino Médio. *Anais Do Workshop de Informática Na Escola*, 23(1), 895.

Ideas, N. (2019). *Desempenho das Instituições Brasileiras no ENEM: uma Abordagem Usando Mineração de Dados*. 106–113.

Lima, P. da S. N., Ambrósio, A. P. L., Ferreira, D. J., & Brancher, J. D. (2019). Análise de dados do Enade e Enem: uma revisão sistemática da literatura. *Avaliação: Revista Da Avaliação Da Educação Superior (Campinas)*, 24(1), 89–107.

Rf, S. A., & Mc, E. M. A. (2007). Estudos De Revisão Sistemática : Um Guia Para Síntese. *Revista Brasileira de Fisioterapia*, 11(1), 83–89. <https://doi.org/10.1590/S1413-35552007000100013>

Santos, A. T. B., Paulino, J., Silva, M. S., & Rego, L. (2020). Educational Data Mining: A Study on Socioeconomic Indicators in Education in INEP Database. In S. Borah, V. Emilia Balas, & Z. Polkowski (Eds.), *Advances in Data Science and Management* (pp. 51–65). Springer Singapore.

Silva, J. E. H., & Bernardino, H. S. (2019). *A Data Mining Approach Applied to the High School National Examination: Analysis of Aspects of Candidates to Brazilian Universities* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-30241-2>

Simon, A., & Cazella, S. (2017). Mineração de Dados Educacionais nos Resultados do ENEM de 2015. *Anais Dos Workshops Do VI Congresso Brasileiro de Informática Na Educação (CBIE 2017)*, 1(Cbie), 754. <https://doi.org/10.5753/cbie.wcbie.2017.754>

Staćzyk, U., & Jain, L. C. (2015). *Feature selection for data and pattern recognition*. Springer.

Stearns, B., Rangel, F., Firmino, F., Rangel, F., & Oliveira, J. (2017). Prevendo Desempenho dos Candidatos do ENEM Através de Dados Socioeconômicos. *Anais Do XXXVI Concurso de Trabalhos de Iniciação Científica Da SBC*.

## ARTIFICIAL INTELLIGENCE USAGE FOR IDENTIFYING AUTOMOTIVE PRODUCTS

*Data de aceite: 02/08/2021*

*Data de submissão: 07/05/2021*

### **Leandro Moreira Gonzaga**

Dept. of Control and Automation Engineering,  
Federal Institute of Espírito Santo  
Serra - Espírito Santo  
<http://lattes.cnpq.br/9750127473696255>

### **Gustavo Maia de Almeida**

Dept. of Control and Automation Engineering,  
Federal Institute of Espírito Santo  
Serra - Espírito Santo  
<http://lattes.cnpq.br/2650921349694794>

**ABSTRACT:** The Computational Vision process has been presenting a huge development in the recent years. This is occurring thanks to the development in the field of Artificial Neural Networks, specially the Convolutional Neural Networks. These networks are capable of training to identify patterns in a large set of images, for latter identifying these same patterns in other images. A very common architecture used nowadays, due to its high accuracy, is the Mask R-CNN. This architecture not only classifies and identifies objects, but also realizes its segmentation pixel by pixel. In this present work, Mask R-CNN was used for segmentation of automotive products (windshields, headlights, tail lights, bumpers and rearview mirrors) in an aftermarket organization. In its evaluation, the algorithm presented a significantly high mAP and accuracy – checked through a confusion matrix,

even reaching a val\_loss of 2.413, demonstrating a satisfactory result for its proposed applications: a system filter for preventing human error and a premise for future works of identifying defects in the mentioned products.

**KEYWORDS:** automotive products, computational vision, Mask R-CNN, artificial intelligence.

### USO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA IDENTIFICAÇÃO DE PRODUTOS AUTOMOTIVOS

**RESUMO:** O processo da Visão Computacional tem apresentado um enorme desenvolvimento nos últimos anos. Isso ocorreu graças ao desenvolvimento no campo das Redes Neurais Artificiais, especialmente as Redes Neurais Convolucionais. Estas redes são capazes de realizarem treinamentos para identificar padrões em um grande conjunto de imagens, para posteriormente identificar estes mesmos padrões em outras imagens. Uma arquitetura muito comumente utilizada atualmente, devido à sua grande acurácia, é a Mask R-CNN. Esta arquitetura não apenas classifica e identifica objetos, mas também realiza sua segmentação pixel a pixel. Neste trabalho, a Mask R-CNN foi utilizada para a segmentação de produtos automotivos (parabrisas, faróis, lanternas, para-choques e retrovisores) em uma empresa do ramo de reposição automotiva. Em sua avaliação, o algoritmo apresentou precisão e acurácia significativamente altas – verificadas por meio de uma Matriz de Confusão, atingindo um val\_loss de 2.413, demonstrando um resultado satisfatório para suas aplicações propostas: um

filtro em sistema para prevenção de erros humanos e a premissa de trabalhos futuros para a identificação de objetos dos produtos aqui mencionados.

**PALAVRAS - CHAVE:** produtos automotivos, visão computacional, Mask R-CNN, inteligência artificial.

## 1 | INTRODUCTION

Computational Vision is a research area that has been presenting a huge development. According to Gonzales and Woods (2002), this occurs due to two main reasons: the possibility of information improvement for human interpretation, and image data processing for storage, transmission and representation for implementation in autonomous machines. Studies involving this area, specifically object recognition, are basically focused on trying to resemble the capacity that the human brain has in recognizing three-dimensional objects based only in a bi-dimensional image (HOGENDOOM, 2006).

Images contains huge amounts of information that are perceptible by human eyes and, due to this, Carvalho (2003) quoted that images have become data sources for researches in areas involving Computational Vision.

In a short period, Computational Vision reached a rapid development in the field of detection and recognition. Image detection and classification for objects or groups of objects compose some useful, interesting and hard challenges for machine vision. In his work, Bisneto (2011) states that a lot of progress has been reached during the last decade: the modeling projects that capture the image and its natural objects geometrical characteristics, the development of algorithms that rapidly correlate these models to the images, and the improvement in learning techniques that can estimate these models from a training and limited supervision.

Referring to learning techniques, He *et al.* (2018) recently presented one of the most used nowadays: Mask R-CNN. This is a Convolutional Neural Network, region-based, capable of object detection, identification and segmentation, being the State of the Art in relation to the Computational Vision applied to machine learning, and is the architecture used in this article.

According to Bisneto (2011), the classical problem of Computational Vision and Image Processing is determining if an image contains an object, characteristic or a pre-determined activity. It is an easily solved task for humans, but not yet satisfactory done by autonomous equipment, in which objects, situations, illumination and positioning are completely arbitrary. Machado (2008) completes it stating that Computational Vision process main problem is related to quantifying visual information presented in images, in other words, for a given object recognition it is necessary to find some image characteristics that distinguish it from other objects in its same universe.

The actual evolution of the economy and the global society made the cars selling

grow rapidly. At the same time, the vehicle insurance market developed substantially, growing its customer chart. Aftermarket companies that supplies the insurance market, due to higher demands for quality, must provide even better services and products, meeting customer wishes. One of these services is the mobile inspection, in which the owner of the vehicle can photograph the parts of the car, including the damaged ones, for register and recording into the company files. However, many clients are not used to the name of the car parts and end up sending the wrong part pictures (the not-damaged ones, for fraud evaluation, for example). This generates a lot of rework in the process, because the policy holder has to resend the correct pictures or even go to the workshop for having an inspection done by a technician.

With the fast development of deep learning, the object detection method based in deep convolutional neural networks has been widely used. In the presented works until now, the problem of vehicle recognition stayed focused on the vehicle detection, vehicle type (passenger car, SUV's, trucks) and the plate identification, while the vehicle components recognition is still left aside. Qianqian *et al.* (2019) presented the most recent work related to vehicle components recognition. In their work, three networks have their accuracy and precision checked for external vehicle components segmentation, using three different types of dataset (panoramic view, close view and an integration of both types) for turning them the most accurate possible, making it possible to be used in future applications.

Therefore, this present work aims to present a model proposal for vehicle external components segmentation, specifically windshields, rearview mirrors, bumpers, headlights and tail lights, for using as a systemic filter in wrong pictures sending made by clients from insurance companies. It can also be used as a filter for stock correction made by the employee in charge of the distribution center, that sometimes relate the picture to a wrong product or defect (in the cases of the Quality Control inspections). Also, the vehicle external components recognition is particularly important as a premise for the defect detection in those component to locate the damage in the Quality Control process in the entry of the product.

This article is divided into five chapters. The first one contains a brief summary with the contextualization and the proposed problem. In the second chapter the theoretical reference on which the research is developed is presented. Chapter three describes the methodology used in the research, describing its activities and parameters so it can be reproduced. In the fourth chapter the detailed work results are presented. The last chapter presents the conclusions about the work, with a result evaluation and proposal for future works.

## 2 | THEORETICAL REFERENCES

### 2.1 Convolutional Neural Networks

In a Convolutional Neural Network, each image pixel is converted in a characterized representation, by a series of mathematical operations. Images can be represented by an order 3 tensor, with height, width and color channels. According to Ferguson (2018), the input sequentially passes by some processing steps, commonly referred as layers, realizing a random transformation, providing a feature map as output, as can be seen in Fig. 1. In most modern Convolutional Neural Networks the first convolutional layers extract features like edges and textures. The deeper convolutional layers can extract features that span a greater spatial area of the image, such as object shapes.

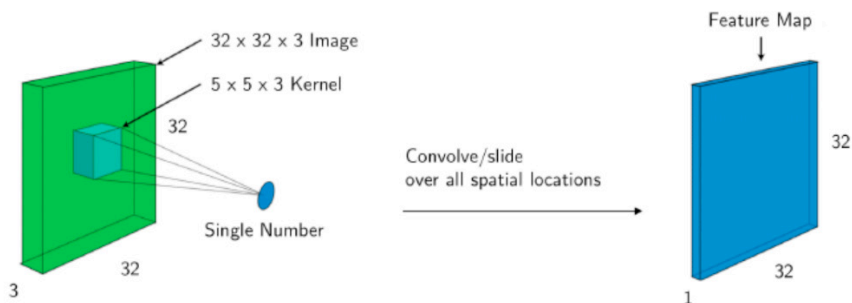


Figure 1. Image convolution with a kernel to produce a feature map

Wu (2017) mentions that by combining multiple layers it is possible to develop a complex nonlinear function, mapping data such as images, providing outputs as classification, identification and segmentation of objects.

Deeper neural networks are, by design, parametrized nonlinear functions (WU, 2017). An activation function is applied in the output of a layer to introduce this nonlinearity. He *et al.* (2016) also presents the pooling layers. The primary function of these layers is to reduce progressively the spatial size of the representation to reduce the number of parameters in the network, avoiding overfitting.

The training of a neural network is made by reducing a loss function, which Wu (2017) defines as a measure between the neural network output and the ground truth. As long as each layer of the neural network is differentiable, it is possible to calculate the loss function gradient, in respect to some parameters. Werbos (1990) also defines that the backpropagation algorithm allows the numeric gradients to be calculated efficiently.

## 2.2 MASK R-CNN

Mask R-CNN architecture, as defined by He *et al.* (2018), like other architectures, has two outputs for each potential object: a classification and the bounding box. Beyond that, it was added a third branch, bringing the object segmentation as an output. The additional output distinguish from the others due to the need of extracting a much finer spatial layout of an object.

The Mask R-CNN architecture adopts a two stage execution. The first one, called Region Proposal Network (RPN), proposes bounding boxes for the object. In the second stage, parallel to the class and the box prediction, Mask R-CNN also provides as an output a binary mask for each Region of Interest (RoI). This differs Mask R-CNN from other modern systems, which depends of mask predictions, like the ones designed by Pinheiro *et al.* (2015), Dai *et al.* (2016) and Li *et al.* (2017).

Qianqian (2019) explains that the Mask R-CNN architecture uses a RoI alignment layer to correct pixels from the images, then uses a network to classify the targets and execute regressions in the boxes of possible candidates. Parallel to the implementation problem solving of classification and regression, a prediction branch is added in Mask R-CNN, and each pixel in the RoI can be identified as belonging do the class of a given object.

Formally stated by He *et al.* (2018), during training, a multitask loss function is defined in each Region of Interest, defined by:

$$L = L_{cls} + L_{box} + L_{mask} \quad (1)$$

The classification loss,  $L_{cls}$ , and the box loss,  $L_{box}$ , are identical to those defined by Li *et al.* (2017). The mask branch has an output for each RoI, for each class. To this is applied a sigmoid function pixel by pixel, defining  $L_{mask}$  as the average binary cross-entropy loss.

According to He *et al.* (2018), as can be seen in Fig. 2, the image detection system is composed by four modules. The first module is a feature extraction module that generates a representation of the input image with its high-level features. The second module is a Convolutional Neural Network that proposes Regions of Interest in the image, based on the features map. The third module is a Convolutional Neural Network that tries to classify the objects in each RoI. The fourth module realizes image segmentation, with the goal to generate a binary mask for each region.



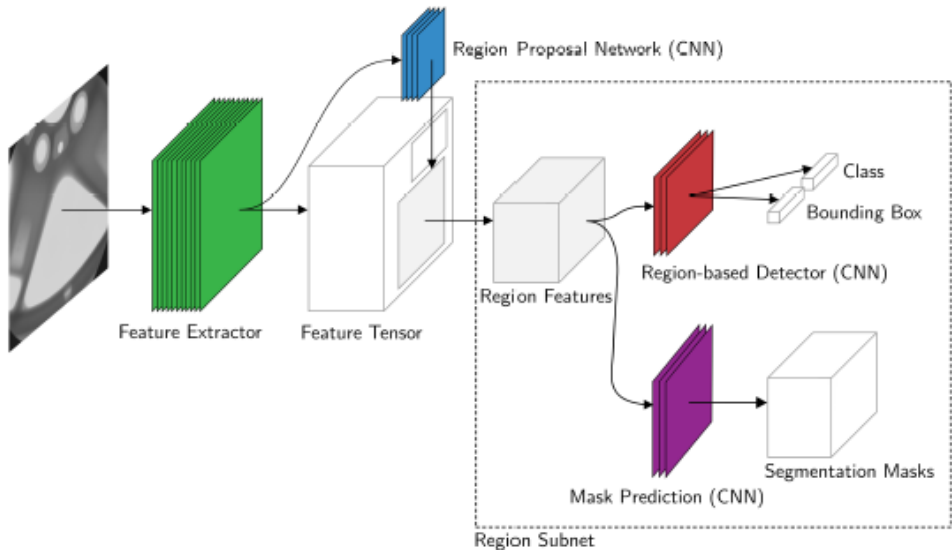


Figure 2. Neural Network architecture for object segmentation

## 2.3 Metrics

For measuring the results of the Mask R-CNN applied to the classification and segmentation of vehicle external components it is usual to apply the Mean Average Precision (mAP) (TAN, 2019). Beyond that, to solve the problem of mistaken pictures and use the model to act as a filter, Accuracy, Precision, Recall and F-Measure is used to evaluate the classifications made by the network.

## 3 | METHODOLOGY

In this section, a classification, detection and segmentation system for automotive parts (headlights, tail lights, bumpers, rearview mirrors and windshields) is proposed, based in the Mask R-CNN architecture, using the Transfer Learning technique available in Github (ABDULLA, 2017). The implementation was realized using the 1.14 version of Tensorflow and the 2.2.4 version of Keras library.

There isn't, nowadays, any public repository with an image dataset for automotive products recognition. Therefore, it was necessary to build my own dataset. Thus, we gathered 945 files, consisting in 1320 images of car parts for training (244 headlights, 214 tail lights, 170 bumpers, 526 windshields and 166 rearview mirrors) and 325 images for validation (58 headlights, 51 tail lights, 55 bumpers, 111 windshields and 51 rearview mirrors). The dataset consists of images of the products fitted in the vehicles and out of the packing in the moment of the entry (Fig. 3). Images resolutions go from 640 x 480 to 5184 x 3456 pixels. The annotations for object recognition and segmentation were made with VGG Image Annotator 1.0.6 (DUTTA, 2017).



Figure 3. Examples of the dataset, mounted in the vehicle (left) and outside the packing (right)

There were too many attempts to find the optimum hyper parameters for this implementation until finding the one with the best results (the last presented in Tab.1).

Backbone	Epochs	Augmentation	Layers Trained	Image Max Dim	Image Min Dim	Loss Weights	Train ROIs Per Image	Learning Rate
ResNet101	50	Flip, Crop, Contrast, Normalization, Multiply, Scale, Rotate	Heads	512	256	(1, 1, 1, 1, 1)	100	0,0001
ResNet101	100	N/A	Heads	512	512	(1, 1, 1, 1, 1)	200	0,0001
ResNet50	50	N/A	3x	1024	800	(1, 1, 2, 3, 2)	200	0,0001
ResNet50	51	N/A	Heads	1024	800	(1, 1, 2, 3, 2)	200	0,001
ResNet50	60	N/A	Heads	1024	800	(1, 1, 2, 3, 2)	200	0,001

Table 1. Hyper parameters configuration attempts

All other hyper parameters were used in the default mode of Mask R-CNN.

To compute the accuracy, precision, recall and F1 score, a Confusion Matrix was made using another dataset of images and these metrics were extracted.

## 4 | RESULTS

After the algorithm execution it was possible to evaluate the performance of Mask R-CNN for this dataset. Comparing the evolution of loss and val\_loss during 60 epochs, as shown in Fig. 4, we can conclude that the network presented an overfitting close to epoch 25 ( $L_{\text{box}}$  contributed the most for this result).

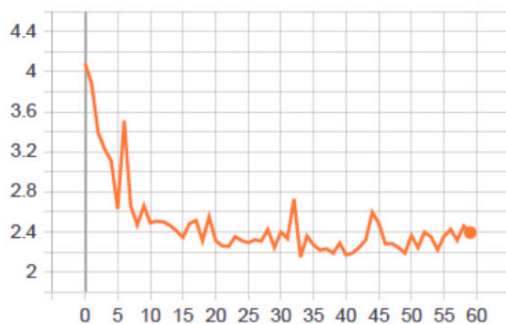


Figure 4. Val\_loss over 60 epochs of training

Besides that, we present the Confusion Matrix of the classification in Fig. 5, from where the metrics were calculated and presented in Tab. 2.

		Predicted				
		headlight	tail light	rearview mirror	windshield	bumper
True	headlight	128	0	6	2	0
	tai light	3	41	2	0	3
	rearview mirror	0	0	126	0	0
	windshield	0	0	0	47	0
	bumper	5	0	1	1	44

Figure 5. Confusion Matrix from classification using Mask R-CNN

Product	Accuracy	Precision	Recall	F-Measure
headlight	0,9609	0,9412	0,9412	0,9412
tail light	0,9804	1,0000	0,8367	0,9111
rearview mirror	0,9780	0,9333	1,0000	0,9655
windshield	0,9927	0,9400	1,0000	0,9691
bumper	0,9756	0,9362	0,8627	0,8979

Table 2. Results of the metrics calculated for the dataset

The result for mAP, considering an Intersection over Union of 0.5, is 0.4919. The visualization of the segmentation can be seen in Fig. 6 as follows.



Figure 6. Image segmentation for the automotive parts proposed in this work

## 5 | CONCLUSIONS

The developed model, even having a small number of images in the dataset, showed appropriate results for recognizing the automotive products shown in this work (headlight, tail light, rearview mirror, windshield and bumper), while still there is a need for evolving with the bounding boxes and segmentation generation, that still does not fit perfectly to the objects (Fig. 6).

The val\_loss of approximately 2.4, as can be seen in Fig. 4, showed that the model presented an overfitting behavior. This can be solved by increasing the number of images of each product in the dataset. Even reaching a relatively high loss, the results has proven

the model to be satisfactory, principally in the classification of the objects, reaching high values of the metrics exposed in Tab. 2. For the applications of acting like a filter for the pictures sent by the insurance companies' clients or uploaded by the stock corrections, the main metric to observe is recall, because it is really important to have a high number of true positives amongst the real quantity of that specific product. Analyzing the recall for each automotive product, the values go from 0,8367 to 1,0000, which are good results for the products classification. For raising the recall for tail lights (0,8367) and bumpers (0,8627) we must increase images of these products in the dataset.

Evaluating the segmentation, the object recognition worked in an appropriate way, attending the goal to work as a premise for learning about Mask R-CNN. The next step would be to apply this knowledge to develop a model to recognize defects in these products, like scratch, spot, breaking, among others.

For future works, we would suggest to enlarge the products portfolio, including other products sold by the company, like radiator, suspension, rear and lateral window, hood and bumper grill.

## REFERENCES

ABDULLA, W. **Mask R-CNN for object detection and instance segmentation on Keras and Tensorflow**. Github, 2017.

BISNETO, C. R. B. **Reconhecimento de objetos utilizando Redes Neurais Artificiais e Geometria Fractal**. PhD thesis, SENAI CIMATEC, 2011.

CARVALHO, A. A. C. **Fundamentação teórica para Processamento Digital de Imagens**. Graduation conclusion work, Federal University of Lavras, 2003.

DAI, J.; HE, K.; SUN, J. **Instance-aware semantic segmentation via multi-task network cascades**. In: *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, vol. 2, pp. 980-988, 2016.

DUTTA, A.; GUPTA, A.; ZISSERMAN, A. **VGG Image Annotator (VIA)**. University of Oxford, 2018.

FERGUSON, M.; AK, R.; LEE, Y.; LAW, K. **Detection and segmentation of manufacturing defects with convolutional neural networks and transfer learning**. *Smart and Sustainable Manufacturing Systems*, vol. 2, n. 1, pp. 137-164, 2018.

GKIOXARI; HE, K.; DOLLÁR, P.; GIRSHICK, R. **Mask R-CNN**. In: *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 2961-2969, 2018.

GONZALES, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. Tom Robins, 2002.

HE, K.; ZHANG, X.; REN, S.; SUN, J. **Deep residual learning for image recognition**. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (VCPR)*, pp. 770-778, 2016.

HOGENDOOM, H. **The State of the Art in Visual Object Recognition**. PhD thesis, GLA University, 2006.

LI, Y.; QI, H.; DAI, J.; WEI, Y. **Fully convolutional instance-aware semantic segmentation**. In: *Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 1, pp. 711-720, 2017.

MACHADO, D. S. **Reconhecimento de objetos de formas variadas**. PhD thesis, Federal University of Minas Gerais, 2008.

PINHEIRO, P. O.; COLLOBERT, R.; DOLLÁR, P. **Learning to segment objects in candidates**. In: *28<sup>th</sup> International Conference on Neural Information Processing Systems*, vol. 2, pp. 1990-1998, 2015.

QIANQIAN, Z.; SEN, L.; WEIMING, G. **Research on vehicle appearance component recognition based on Mask R-CNN**. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1, n. 1335, 2019.

TAN, R. J. **Breaking down Mean Average Precision (mAP)**. Graduation conclusion work, NUS MTEch, 2019.

WERBOS, P. K. **Backpropagation through time: what it does and how to do it**. In: *Proceedings of IEEE*, vol. 78, pp. 1550-1560, 1990.

WU, J. **Convolutional neural networks**. Class notes, Nanjing University, 2017.

## UTILIZAÇÃO DE APLICATIVO PARA DISPOSITIVO MÓVEL PARA ADMINISTRAÇÃO DE MEDICAMENTOS

Data de aceite: 02/08/2021

### Luísa de Castro Guterres

Bacharel em Sistemas de Informação, Centro Universitário Estácio da Amazônia (ESTÁCIO AMAZÔNIA), Boa Vista, Roraima, Brasil

### Allan Rafael da Silva Lima

Bacharel em Sistemas de Informação, Centro Universitário Estácio da Amazônia (ESTÁCIO AMAZÔNIA), Boa Vista, Roraima, Brasil

### Wender Antônio da Silva

Professor de Sistemas de Informação, Centro Universitário Estácio da Amazônia (ESTÁCIO AMAZÔNIA), Boa Vista, Roraima, Brasil

**RESUMO:** Este artigo apresenta um estudo que busca determinar o nível de usabilidade de um aplicativo protótipo para android no suporte do monitoramento da administração de medicamentos. A não administração correta da posologia medicamentosa é um dos grandes problemas enfrentados pelo sistema de saúde atualmente, não seguir a prescrição médica e tratamento pode resultar no alongamento do tratamento e até danos a saúde do paciente. Há muito tempo a tecnologia vem sendo usada no suporte aos cuidados com a saúde mas, o uso de aplicativos para celular estão criando uma nova relação entre eles, o mHealth. Estas novas interações estão tornando possível o monitoramento de pacientes durante suas rotinas diárias, em qualquer lugar, a qualquer momento.

**PALAVRAS - CHAVE:** mHealth, Android, usabilidade.

### USABILITY OF A MOBILE APPLICATION TO MONITOR MEDICATION ADMINISTRATION

**ABSTRACT:** This paper presents a study to determinate the level of usability of a android application prototype for the support in the mobile monitoring of medication use. The failure to follow medical prescriptions and treatments is one of the huge problems in the health care system, not follow the prescriptions and treatments can results in elongation of treatment and even damage health. For a long time the technology has been used in the support of health care, but the use of the mobile applications are bringing a new relation between then, the mHealth, making the possibility to monitor the patient during his routine, anywhere, anytime.

**KEYWORDS:** mHealth, Android, Usability.

## 1 | INTRODUÇÃO

O sistema móvel de celular foi introduzido no Brasil no final da década de 1980. Em 1998 o Sistema Telebras foi privatizado resultando na expansão da rede e grande adesão por parte da população. No início do século XXI houve um enorme crescimento no volume de dados que circulam na Internet, foi observado que cada vez mais as pessoas passavam mais tempo conectadas, resultando na valorização das empresas voltadas para a internet e aumentando o interesse de outras organizações

em participar deste mercado. Assim, várias organizações que produziam aparelhos de telefonia móvel criaram o conceito dos smartphones, aparelhos celulares que possuem uma maior capacidade de processamento e, muitas vezes, a possibilidade de se conectar à internet [20,21].

Em levantamento feito pela SECOM [1], no Brasil, 76% das pessoas que tem acesso a internet a utilizam diariamente, principalmente por meio do computador (71%) e do celular (66%). Sendo o celular a única plataforma de acesso que obteve crescimento.

Um dos principais setores atingidos pelo uso crescente das tecnologias da informação e comunicação é o da saúde. Essa intervenção tem modificado as estratégias de prestação de serviços gerais em saúde por todo o mundo, de modo que seu potencial é reconhecido e incentivado pela Organização das Nações Unidas (ONU) e Organização Mundial da Saúde (OMS) [3].

Tal reconhecimento deu origem ao conceito mHealth (*mobile health*), “práticas médicas e de saúde pública auxiliadas por aparatos portáteis, como celulares, aparelhos de monitoramento dos pacientes, assistentes pessoais digitais (PDAs), e outros aparelhos sem fio”[12].

As Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) vem inserindo-se nesse contexto, como ferramentas capazes de oferecer novas opções de atuação para profissionais e acadêmicos, proporcionando maior qualidade no exercício do cuidado em saúde [5].

No Brasil, a oferta e uso de aplicativos mHealth tende a crescer juntamente com a popularização dos smartphones, principalmente os que operam sobre a plataforma Android [6].

Dentre as funcionalidades disponibilizadas pelos smartphones a que mais vem crescendo são os aplicativos, “(...) programas desenvolvidos com o objetivo de facilitar o desempenho de atividades práticas do usuário, seja no tablet ou nos telefones móveis. Servem tanto para facilitar a vida – em se tratando de aplicativos utilitários –, quanto como para puro divertimento”[2]. Na área da saúde, os sistemas de informação têm sido utilizados com o objetivo de transformar os dados coletados e armazenados em informações pertinentes e fidedignas para o direcionamento do processo decisório, seja na gestão das informações de todo o setor ou na assistência ao paciente [8].

A utilização de dispositivos móveis nessa área vem crescendo e ganhando espaço com o passar dos anos. A OMS (2011) afirma que “mHealth é uma integração das vantagens da tecnologia móvel no sistema de saúde” [5]. Vem ocorrendo devido a grande quantidade de dispositivos móveis disponibilizam uma base para a acessibilidade dos serviços mHealth, assim os pacientes não precisam adquirir dispositivos adicionais [9].

Os aplicativos mHealth tornaram-se importantes ferramentas na área da saúde pois permitem o suporte remoto a pacientes ou a autopromoção a saúde, permitindo o contínuo estímulo à adoção de práticas saudáveis. Os governos de vários países vêm utilizando esses aplicativos para auxiliar políticas públicas de combate a doenças, como obesidade,



tabagismo e, particularmente no Brasil, a dengue, além de estimular o usuário a manter ou iniciar práticas benéficas à sua saúde e bem-estar [4,7].

A OMS (2011) afirma que “mHealth é uma integração das vantagens da tecnologia móvel no sistema de saúde” [5]. O principal desafio dos aplicativos mHealth é aproveitar o potencial computacional dos Smartphones para automatizar de maneira integrada, simples e intuitiva, tarefas que apoiem o tratamento do paciente [6].

Diante do contexto apresentado nos indagamos: como auxiliar no controle da promoção da saúde dos seres humanos, auxiliando na segurança e eficiência terapêutica no processo de administração de medicamentos, principalmente para usuários domiciliares, desta forma busca-se responder a seguinte pergunta: quais níveis de usabilidade podem ser providos por um aplicativo voltado ao auxílio da administração de medicamentos em seres humanos?

Diante do exposto o presente trabalho teve por objetivo desenvolver e determinar o nível de usabilidade do aplicativo protótipo para dispositivo móvel na área da saúde voltado ao auxílio do monitoramento móvel no uso de medicamentos em seres humanos.

Para isso utilizamos de pesquisa do tipo bibliográfica e descritiva, pois para desenvolvermos o aplicativo protótipo realizamos estudos sobre as principais tecnologias e técnicas envolvidas no desenvolvimento de um aplicativo, tais como: plataforma Android, API de fragmentos para responsividade de tela e API's Google chart API, Achartengine, ChartDroid. Verificamos a usabilidade do aplicativo protótipo por meio da aplicação de questionário para os alunos de Sistemas de Informação do Centro Universitário Estácio da Amazônia que testaram o aplicativo.

## 2 | TRABALHOS RELACIONADOS

### 2.1 Projeto MonitorPrevIntel

O MonitorPrevIntel ou de forma extensa Monitor Intelligent Prevention (Monitor Preventivo Inteligente em tradução livre), projeto desenvolvido por Silva (2012), é um aplicativo inteligente que atua como agente assistente personalizado para auxiliar o monitoramento remoto dos sinais vitais de pacientes com doenças cardiovasculares para prevenir doenças mantendo o paciente supervisionado durante suas atividades diárias.

O sistema analisa os dados coletados do paciente os armazena e analisa, comparando os dados com uma base de regras que foi produzida especificamente para o paciente cadastrado por um profissional da saúde para detectar situações anormais. Quando essas situações são detectadas o sistema envia um alerta para o paciente e o centro de supervisão médica.

As mensagens enviadas pelo sistema para o centro de supervisão médica e para o usuário são ativadas em dois momentos, quando é detectada uma situação de alerta

e quando é detectada uma situação de risco. O SMS enviado pelo sistema contém as informações do paciente que ativaram a regra. Na situação de alerta o sistema envia uma mensagem para o paciente utilizando a interface gráfica do aparelho, informando qual sinal vital foi detectado como alterado e o tempo de agendamento da próxima execução será reduzido.

Já na situação de emergência o sistema age praticamente da mesma forma, mas ocorre uma alteração na mensagem apresentada ao paciente que sugere que o mesmo realize uma chamada para uma central de pronto atendimento, apresentando um botão que fará a chamada imediatamente.

## 2.2 Projeto Pé em risco

Um aplicativo capaz de avaliar o risco de o paciente desenvolver o pé diabético e auxiliar na assistência e educação dos profissionais de saúde, projeto desenvolvido por Santos (2013).

O aplicativo foi dividido em três partes, o primeiro módulo cadastra o profissional de saúde, o segundo consulta e orienta e o terceiro sincroniza com o servidor central.

O segundo módulo inicia-se com o cadastro do paciente no aplicativo por meio de um formulário onde serão requisitadas informações pessoais e do histórico de saúde.

O sistema destaca o histórico de saúde pregressa por meio das comorbidades<sup>1</sup> (hipertensão arterial sistêmica, dislipidemia, doenças cardiovasculares e outros), complicações agudas (hipoglicemia e a cetoacidose diabética) e complicações crônicas (nefropatia diabética, neuropatia diabética e retinopatia diabética). O sistema ainda leva em consideração a anamnese, presença de ulcerações ou amputações, atividades físicas onde deverão ser indicados o tipo e a frequência, as informações do exame físico dos pés e um teste de sensibilidades. Após o preenchimento de todo o formulário o sistema fará a análise e disponibilizará ao profissional as orientações e cuidados que devem ser tomados quanto ao paciente examinado.

No módulo três os usuários serão cadastrados pelo administrador e, após a criação do login e senha, poderão visualizar as consultas. No servidor central serão armazenadas todas as consultas sincronizadas pelos profissionais de saúde. A sincronização ocorre através de sockets. Ao acessar o servidor o usuário poderá visualizar todas as consultas realizadas organizados pelo número da consulta.

## 2.3 Projeto Le Fit

Projeto desenvolvido por Gonçalves (2014) com o objetivo de desenvolver um aplicativo mHealth para o controle da DM2 (Diabetes Mellitus tipo 2). Destinando-se a pacientes cujo tratamento possa se basear na alteração de comportamentos e que não utilizem medicamentos.

---

<sup>1</sup> Comorbidade é um termo usado para descrever a ocorrência simultânea de dois ou mais problemas de saúde em um mesmo indivíduo. Esse é um fenômeno frequente na prática clínica, e sua identificação é um fator importante que afeta tanto o prognóstico dos pacientes como a conduta terapêutica do médico[36].

O aplicativo foi desenvolvido buscando a facilidade no uso, uma vez que é um aplicativo de uso diário, utilizando de componentes lúdicos dos registros realizados e design simplista visando ser minimamente intrusivo para o usuário.

O aplicativo faz uma interação diária com o usuário que tem início com uma notificação que abre um pop-up apresentando uma pergunta que será respondida por meio de um slide, de um ícone e uma frase que são alterados de acordo com o slide.

Abaixo do slide três botões, um para enviar a resposta, outro para adiar o pop-up e o terceiro para cancelar o envio da resposta.

As mensagens são de vários tipos com caráter informativo, com dicas e conselhos que motivem e o usuário a buscar uma vida mais ativa. O usuário poderá optar por não ver as mensagens.

Ao abrir a aplicação o usuário terá o resumo de seu desempenho na última semana, que será apresentado em formato de agenda em que cada dia apresenta o ícone correspondente a resposta dada. Os dias que não foram preenchidos podem ser clicados para serem respondidos. As mensagens vão se adequando através de um algoritmo com as preferências do usuário.

Com relação as soluções homólogas existentes no mercado este aplicativo trouxeram algumas melhorias como, a adequação das mensagens, dar mais realce a componentes informativos, diminuir a frequência de utilização, dar o feedback meramente como reconhecimento da interação.

## 2.4 Borboleta

Projeto desenvolvido por Correia (2011) com o objetivo de desenvolver um sistema de código aberto para auxiliar a equipe de Atendimento Primário Domiciliar do Centro de Saúde visando a melhoria na qualidade e na eficácia do atendimento primário domiciliar.

Antes das visitas o profissional deve fazer a escolha dos pacientes a partir do SAGUISaúde, que é o sistema central do centro de saúde, e sincronizar os dados do servidor com o dispositivo móvel. Assim que os dados forem importados eles estarão disponíveis na tela Lista de Pacientes. Para visualizar as informações detalhadas do paciente o profissional deve clicar sobre o nome do paciente na lista, a lista poderá ser filtrada através do nome. Através do botão Lista de Encontros será possível visualizar os três últimos encontros feitos ao paciente. Para registrar um novo encontro o profissional clicará sobre o botão Novo.

O cadastro de um novo encontro é dividido em quatro entradas de dados. A primeira é a caracterização geral onde são informados os dados básicos da visita como o motivo da visita e se é a primeira visita. Depois serão coletados os Dados Específicos onde serão informados dados como anamnese<sup>2</sup>, atividades da vida diária e exame físico.

A próxima etapa é o preenchimento dos Problemas e Necessidades onde serão

<sup>2</sup> Lembrança com escassez de certeza. Recordação vaga. Medicina. Conjunto das informações recolhidas pelo médico a respeito de um doente e de sua doença [37].

coletados uma grande gama de dados subdivididos em situação clínica, cuidados e atividades do paciente, aspectos do cotidiano e relacionamentos entre o paciente e a equipe de saúde. Nessa etapa serão coletados dados como o diagnóstico do paciente, sua evolução e as condutas prescritas pela equipe de saúde, tipos de cuidados e outros.

A última etapa é programação final onde são informados os dados da próxima visita e qual a composição da equipe recomendada para a mesma.

Os dados são salvos de forma automática a cada dois minutos na memória do dispositivo móvel visando minimizar as perdas de informação. Ao retornar ao centro de saúde os dados devem ser sincronizados com o servidor.

O Borboleta ainda não entrou em produção, está em fase de teste com os profissionais de saúde e vem recebendo alterações pontuais de acordo com as necessidades demonstradas pelos profissionais.

## 3 | PERCURSO METODOLÓGICO

### 3.1 Desenvolvimento do sistema

Considerando os objetivos, nossa pesquisa foi dividida em duas fazes, respectivamente, como bibliográfica e descritiva. A pesquisa possui caráter bibliográfico quando elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente de: livros, revistas, publicações em periódicos e artigos científicos, (...) com o objetivo de colocar o pesquisador em contato direto com todo material já escrito sobre o assunto da pesquisa. E caráter descritivo quando o pesquisador apenas registra e descreve os fatos observados sem interferir neles. Visa a descrever as características de determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis. Envolve o uso de técnicas padronizadas de coleta de dados: questionário e observação sistemática. A pesquisa qualitativa revela áreas de consenso, tanto positivo quanto negativo, nos padrões de respostas. Ela também determina quais ideias geram uma forte reação emocional. Além disso, é especialmente útil em situações que envolvem o desenvolvimento e aperfeiçoamento de novas ideias [13].

Na primeira fase foi feito um estudo das principais técnicas e tecnologias envolvidas no desenvolvimento de um aplicativo, tais como: plataforma Android, API de Fragmentos para responsividade de tela e API's Google chart API, Achartengine, ChartDroid, e dos trabalhos correlatos. Para o desenvolvimento do aplicativo protótipo foram modelados os diagramas de caso de uso e sua documentação, diagrama de classe, diagrama de atividades e o diagrama de sequência.

A modelagem dos diagramas foi realizada utilizando o software Astah Community que é o sucessor do Jude Community e tornou-se uma IDE (Integrated Development Environment) para modelagem de dados UML (Unified Modeling Language) gratuita, mas não *open source*, mais utilizada devido a sua praticidade em elaborar diagramas completos [38]. Apresenta os dados para o usuário de uma forma clara e ainda possui a vantagem

de seu layout ser bem intuitivo. É possível trabalhar com vários diagramas, classes, caso de uso, desenvolvimento etc.[38]. Além do Astah Community, existem outras três versões: Astah UML, Astah Professional e Astah Share, que disponibilizam outras funcionalidades além da modelagem UML, porém, não são gratuitos [39].

O desenvolvimento do aplicativo foi realizado utilizando como interface de desenvolvimento o software Android Studio, ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) oficial para o desenvolvimento de aplicativos para Android [10].

Para verificarmos o nível de usabilidade do aplicativo protótipo foi elaborado um questionário de usabilidade baseado na ISONorm 9241 com o objetivo de avaliar a conformidade do aplicativo com as recomendações constantes na norma [15]. O questionário foi elaborado utilizando perguntas fechadas, [22] as define como “como aquelas que podem ser respondidas com respostas curtas, selecionadas de um número limitado de respostas possíveis” [22]. O questionário foi construído utilizando a escala de Likert, uma escala de verificação utilizada para mensurar atitudes no contexto das ciências comportamentais, tomando um construtor e desenvolver um conjunto de afirmações relacionadas à sua definição, para as quais os respondentes emitirão seu grau de concordância [14].

Para sabermos qual a amostra necessária utilizamos o cálculo amostral, Fig. 1, por meio da calculadora desenvolvida por [11], este cálculo permite determinar a quantidade de elementos necessários para compor a amostra, a fim de se obterem resultados válidos, mas não mais do que o suficiente [16].

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}{Z^2 \cdot p \cdot (1 - p) + e^2 \cdot (N - 1)}$$

Figura 1. Fórmula de Cálculo Amostral conforme Santos (2015).

- Tamanho do universo: 209 alunos.
- Nível de confiança: 90%.
- Erro amostral: 10%.

Desta forma, chegamos a uma amostra de 52 alunos.

O questionário foi construído com base na ISONorm 9241 e aplicado por meio do Google Forms, plataforma do Google para questionários e formulários, pois esta ferramenta permite a criação de formulários personalizados e que os mesmos sejam enviados e respondidos de forma prática. O link do questionário foi enviado aos duzentos e nove alunos juntamente com o aplicativo protótipo. Para testar os alunos fizeram o download do aplicativo protótipo, o instalaram e após responderam ao questionário.

Ao recebermos os questionários respondidos as respostas receberam um peso de acordo com sua intensidade. Foram submetidas ao SPSS para validação. O SPSS (Statistical Software for Social Sciences), é um software estatístico desenvolvido pela IBM que utiliza o coeficiente alfa de Cronbach, fórmula apresentado por Lee J. Cronbach, em

1951, como uma forma de estimar a confiabilidade de um questionário aplicado em uma pesquisa, medindo a correlação entre respostas em um questionário por meio da análise do perfil das respostas dadas pelos respondentes, dado que todos os itens de um questionário utilizam a mesma escala de medição, o coeficiente  $\alpha$  é calculado a partir da variância dos itens individuais e da variância da soma dos itens de cada avaliador por meio da equação Fig. 2 [17].

$$\alpha = \left( \frac{k}{k-1} \right) \times \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^k s_i^2}{s_t^2} \right)$$

Figura 2. Fórmula de Alfa de Cronbach.

O questionário é composto de onze afirmações:

Q1 - Este aplicativo tem uma apresentação agradável e legível.

Esta afirmação tem por objetivo verificar se o usuário achou agradável a apresentação gráfica do aplicativo, suas cores, disposição dos itens e se durante os testes não ocorreu nenhum problema de leitura das informações.

Q2 - De modo geral considero rápido o acesso as informações do aplicativo.

Esta afirmação busca saber sobre o desempenho do aplicativo durante o teste, se o usuário não percebeu nenhuma demora excessiva no acesso das informações.

Q3 - É fácil a navegação neste aplicativo.

Esta afirmação procura verificar se o usuário encontrou alguma dificuldade para acessar as informações que ele desejava ou se em algum momento ele não sabia mais onde estava na aplicação.

Q4 - É simples cadastrar, alterar ou remover um lembrete.

Esta afirmação busca saber se o usuário encontrou algum problema para cadastrar, editar ou remover os lembretes na aplicação durante os testes. Assim, é possível verificar o quanto as funções da aplicação são intuitivas para o usuário.

Q5 - Foi fácil aprender a usar este aplicativo.

Esta afirmação tem por objetivo verificar o quanto o aplicativo é intuitivo, uma vez que, quanto mais intuitivo for o aplicativo mais facilmente o usuário aprenderá a usar o aplicativo.

Q6 - O aplicativo atende às minhas necessidades.

Esta afirmação procura verificar se o aplicativo é capaz de suprir as necessidades do usuário com relação a sua proposta.

Q7 - Eu usaria este aplicativo com frequência.

Esta afirmação busca saber quantos usuário que testaram a aplicação acharam a proposta do aplicativo interessante a ponto de passar a utilizar o aplicativo.

Q8 - A organização dos menus e botões é lógica, permitindo encontrá-los facilmente na tela.

Esta afirmação procura verificar se o usuário encontrou algum problema com relação a encontrar os menus e botões da aplicação durante o teste.

Q9 - Eu achei o aplicativo consistente. Por exemplo, todas as funções podem ser realizadas de uma maneira semelhante.

Esta afirmação tem por objetivo verificar se alguma função ou tela do aplicativo está destoando do geral e, assim, causando dificuldades de interação do usuário com a aplicação.

Q10 - Eu recomendaria este aplicativo para outra pessoa.

Esta afirmação sonda se o usuário acredita que a aplicação atenderia as necessidades de outras pessoas.

Q11 - Eu me senti seguro o aplicativo.

Esta afirmação tem por objetivo verificar se o usuário acha o aplicativo seguro.

## 4 | ARQUITETURA DO SISTEMA

O aplicativo protótipo foi desenvolvido em três fases:

1. Análise de requisitos;
2. Modelagem do sistema;
3. Implementação do sistema

Na primeira fase foi realizado o estudo de conceitos e das tecnologias na literatura permitindo iniciar o levantamento dos requisitos do aplicativo. Assim, foram identificados os seguintes requisitos funcionais e não funcionais como mostra a tabela a seguir.

Requisitos Funcionais	Requisitos não funcionais
O aplicativo deve permitir a inclusão, modificação e exclusão de um lembrete.	Desempenho ("A resposta do botão "salvar" deve ser, no máximo, 2 segundos").
O sistema exibirá os dias que possuem lembrete agendado.	Disponibilidade ("O aplicativo estará disponível 24h").
O aplicativo deverá sempre notificar o usuário quando o chegar a hora de tomar o medicamento agendado.	Integridade/segurança ("Qualquer usuário poderá ter acesso ao aplicativo").
	Compatibilidade ("O aplicativo deverá ser compatível com versões do Android 4.1.x ou superior").
	Confiabilidade ("o sistema de se comportar de forma consistente e aceitável, operando dentro do ambiente em que ele foi projetado").
	Usabilidade ("O usuário deverá ser capaz de aprender o aplicativo sem muito esforço").

	Hardware e software alvo (“O produto será desenvolvido para ambientes Android e para com pelo menos 256 MB de memória”).
	Manutenibilidade (“Modificações deverão acontecer sempre que novos erros ou probabilidade de melhorias forem encontradas”).
	Reusabilidade.

Após a definição dos requisitos foi iniciada a modelagem do sistema. Para auxiliar no processo de desenvolvimento do aplicativo foi utilizada a linguagem UML (Unified Modeling Language) pois ela disponibiliza modelos para representar diversos estágios de desenvolvimento de um software [23,24].

Para uma melhor visualização da disposição dos componentes e das funcionalidades do aplicativo na tela foram feitos protótipos Fig. 7a e 7b.

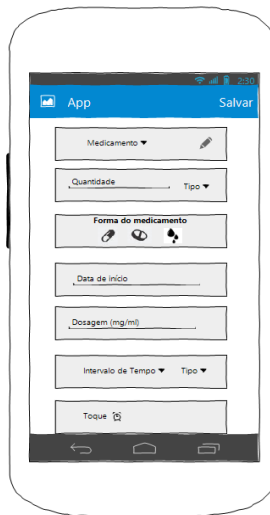


Figura 7a. Esboço da tela inicial do aplicativo Medimax.





Figura 7b. Esboço da tela de cadastro de lembrete do aplicativo Medimax.

O desenvolvimento do aplicativo foi realizado utilizando como interface de desenvolvimento o software Android Studio da Google, ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) oficial para o desenvolvimento de aplicativos para o sistema operacional Android [25].

#### 4.2 Funcionamento do sistema

O usuário instalará o aplicativo de auxílio a saúde em seu smartphone que tenha como sistema operacional o Android a partir da versão 4.1 (Jelly Bean).

Na tela inicial o usuário visualizará alguns ícones na barra de menu superior e um calendário. Para cadastrar um lembrete ele deverá clicar no ícone com símbolo de soma “+” que se encontra no canto inferior direito da tela. O aplicativo abrirá uma tela para agendar lembretes Fig. 8.

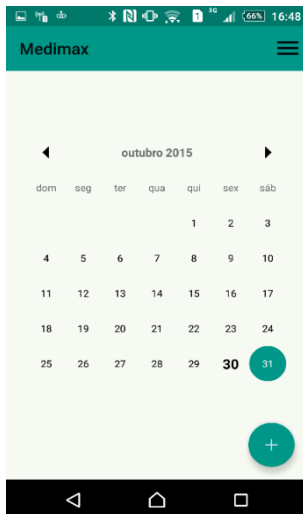


Figura 8. Tela inicial do aplicativo Medimax (Android 5.1).

Método do botão “+”, faz com que seja chamada a tela de novo lembrete, referente a Fig. 8.

```
public void btfloat (View v) {
    Intent intent = new Intent(getApplicationContext(), EditAgendamentoActivity.class);
    startActivityForResult(intent, REQ_EDIT);
}
```

Métodos que inicia o widget calendário da tela principal do aplicativo trazendo em destaque a data atual, referente a Fig. 8.

```
protected void onCreate(Bundle savedInstanceState) {
    super.onCreate(savedInstanceState);
    setContentView(R.layout.activity_mainagendamento);
    mToolbar = (Toolbar) findViewById(R.id.toolbar_agenda);
    setSupportActionBar(mToolbar);
    initializeCalendar();
    widget.setOnDateChangeListener(this);
    widget.setOnMonthChangeListener(this);
}

public void initializeCalendar() {

    widget = (MaterialCalendarView) findViewById(R.id.calendarView);
    Calendar calendar = Calendar.getInstance();
```

```

widget.setSelectedDate(calendar.getTime());
agendamentoDAO = AgendamentoDAO.getInstance(this);
this.decoraDatas();

```

Para efetuar o cadastro de um lembrete o usuário selecionará um medicamento caso o usuário não encontre o medicamento desejado ele poderá cadastrá-lo clicando no ícone em formato de lápis e informando o nome do mesmo. Após selecionar o medicamento ele informará a data de início do tratamento, a quantidade que deverá ser ingerida por dose do medicamento (10ml, uma cápsula), o intervalo entre as doses (3h, 6h, 1 dia), o horário da primeira dose e o número de dias do tratamento (1 dia, 1 semana, 1 mês). Após terminar o cadastro o usuário clicará no botão de salvar e será redirecionado para a tela principal Fig. 9a e 9b.

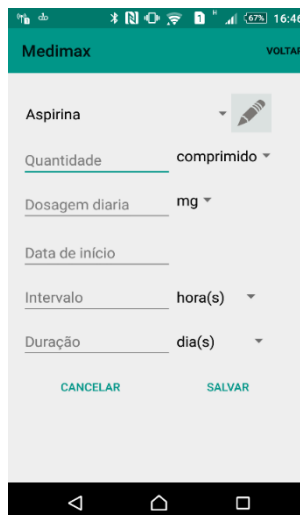


Figura 9a. Cadastro de lembrete de medicamento.

Método responsável por tratar as exceções como, não permitir que os campos sejam salvos em branco, referente a Fig. 9a.

```

public void process(View view) {
    if(edtQtdMedicamento.getText().toString().length() < 1) {
        edtQtdMedicamento.setError("Número maior que zero");
    }else if(edtQtdTipoMedicamento.getText().toString().length() < 1){
        edtQtdTipoMedicamento.setError("Número maior que zero");
    }else if(edtDataInicio.getText().toString().length() < 8){
        edtDataInicio.setError("Selecione uma data");
    }
}

```

```

}else if(edtIntervaloMedicamento.getText().toString().length() < 1 ){
    edtIntervaloMedicamento.setError("Número maior que zero");
}else if(edtDuracaoTratamento.getText().toString().length() < 1 ){
    edtDuracaoTratamento.setError("Número maior que zero");
}else {
    int idMedicamentoAgendamento = Integer.parseInt(spMedicamento.getTag().
toString());
    int tipoDosagem = Integer.parseInt(spTipoDosagem.getTag().toString());
    int tipoDuracao = Integer.parseInt(spDuracaoTratamento.getTag().toString());
    int tipoIntervalo = Integer.parseInt(spIntervaloTempo.getTag().toString());
    int qtdTipoMedicamento = Integer.parseInt(spTipoQuantidade.getTag().toString());
    int qtdIntervalo = Integer.parseInt(edtIntervaloMedicamento.getText().toString());
    int qtdDuracao = Integer.parseInt(edtDuracaoTratamento.getText().toString());
    double qtdDosagem = Double.parseDouble(edtQtdTipoMedicamento.getText().
toString());
    double qtdMedicamento = Double.parseDouble(edtQtdMedicamento.getText().
toString());

```

Método responsável por calcular os alarmes de acordo com o intervalo e o número de dias do tratamento que o usuário informou na tela de cadastro de lembretes, referente a Fig. 9a.

```

Date hora = new Date();
SimpleDateFormat formatterHr = new SimpleDateFormat("HH:mm:ss");
String horaString = formatterHr.format(hora.getTime());
String dataInicioString = edtDataInicio.getText().toString() + " " + horaString;
SimpleDateFormat formatter = new SimpleDateFormat("dd/MM/yyyy HH:mm:ss",
Locale.getDefault());
long dias = 1000 * 60 * 60 * 24;
long horas = 1000 * 60 * 60;
long minutos = 1000 * 60;

Long intervalo;

if (tipoIntervalo == 1) {
    intervalo = horas * qtdIntervalo;
} else {
    intervalo = minutos * qtdIntervalo;
}

```

```

Long duracao;
if (tipoDuracao == 1) {
    duracao = dias * qtdDuracao;
}else if(tipoDuracao == 2) {
    duracao = horas * qtdDuracao;
}else {
    duracao = minutos * qtdDuracao;
}

```

Método responsável por salvar um novo lembrete, referente a Fig. 9a.

```

Agendamento agendamentoSave = new Agendamento (qtdTipoMedicamento,
tipoDosagem, tipoIntervalo, tipoDuracao, qtdIntervalo, qtdDuracao, qtdMedicamento,
qtdDosagem, dataInicio, dataHrFim, dataInicio, dataHrFim, dataHrProxDosag,
medicamento, 0);
agendamentoDAO.save(agendamentoSave);
pendingId = agendamentoSave.getIdAgendamento();
msg = "Medicamento " + nomeMedicamento+" agendado! ";

```

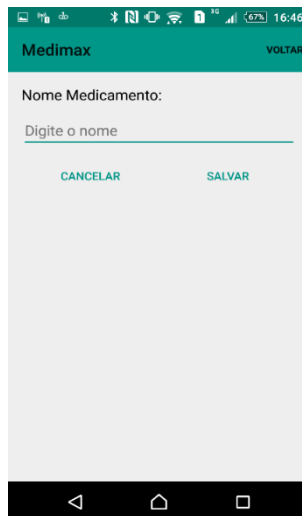


Figura 9b. Cadastro de um novo medicamento.

Método que responsável por cadastrar um novo medicamento e verificar se o campo referente ao nome do medicamento foi preenchido de forma correta, referente a Fig. 9b.

```

public void process(View view) {
String nomeMedicamento = edtNomeMedicamento.getText().toString();
String msg;
int resultIdMedicamento = 0;
if(edtNomeMedicamento.getText().toString().length() <= 2 ) {
    edtNomeMedicamento.setError("Mínimo 3 caracteres!");
}else{ (medicamento == null) {
    Medicamento medicamento = new Medicamento(nomeMedicamento);
    medicamentoDAO.save(medicamento);
    msg = "Medicamento cadastrado = " + nomeMedicamento;
    resultIdMedicamento = medicamento.getIdMedicamento();
}
}

```

O aplicativo informará o horário do remédio por meio de notificação e alarme sonoro. Essas opções poderão ser desativadas pelo usuário. O usuário poderá confirmar a ingestão ou adia-la por 5 minutos Fig.10.

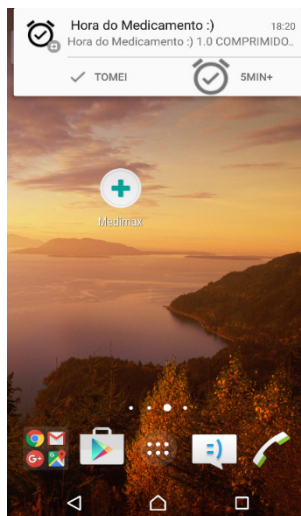


Figura 10. Notificação do sistema Medimax na tela inicial do celular referente ao lembrete previamente cadastrado.

Método responsável por mostrar novamente a notificação do lembrete após 5min quando o usuário clicar no botão "5MIN+" ao aparecer a notificação do lembrete agendado, referente a Fig. 10.

```

Long intervalo;
if (intervaloTipo == 1) {
    intervalo = horas * intervaloInt;
} else {
    intervalo = minutos * intervaloInt;
}
Long proxDataComIntervalo = dataProxDosagem.getTime() + intervalo;
if (proxDataComIntervalo < dataFimTratamento.getTime()) {
    try {
        // lembrar de alterar quando informado intervalo automatico após o primeiro envio
de alerta
        int qtdauto = 5;
        long minutointervalo= minutos * qtdauto;
        setAlarmeMedicamento(context, idAgendamento, proxDataComIntervalo,
minutointervalo);
        Date dataProxDosagemFormat = new Date(System.currentTimeMillis());
            agendamento.setDataHoraProxDosagem(dataProxDosagemFormat);
        agendamentoDAO.update(agendamento);
    } catch (Exception e) {
        e.printStackTrace();
    }
} else {
    cancelAlarmeMedicamento(context, idAgendamento);
}
}
}

```

O calendário da tela principal mostrará quais dias existem lembretes cadastrados. Clicando sobre o dia no calendário o sistema mostrará uma lista dos lembretes cadastrados para esse dia, informando o nome do medicamento e horário, distinguindo os que já foram administrados dos que ainda serão.

Clicando sobre um lembrete da lista será possível obter informações mais detalhadas como o número de dias que faltam para terminar o tratamento, a data de término, o intervalo das doses e outras. Se o remédio já foi ingerido o sistema informará também o horário e, se o usuário informou, o estado do usuário e a observação.

Para editar um lembrete o usuário deverá clicar sobre ele e na tela com as informações detalhadas do lembrete ele clicará no ícone que representa a opção de editar que estará na parte superior da tela Fig. 11.

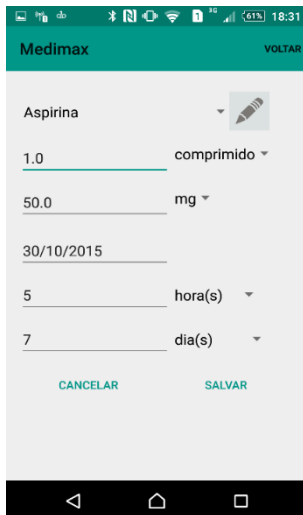


Figura 11. Tela de edição de lembrete com as informações do lembrete selecionado.

Método responsável por salvar as alterações feitas no lembrete feito pelo usuário ao editar o lembrete, referente a Fig. 11.

```
String msg;
Medicamento medicamento = new Medicamento();
medicamento.setIdMedicamento(int pendingId;
String nomeMedicamento = spMedicamento.getSelectedItem(
if (agendamento == null) {
    Agendamento agendamentoSave = new Agendamento(
        qtdIntervalo, qtdDuracao, qtdMedicamento, qtdDosagem,
        dataInicio, dataHrFim, dataInicio, dataHrFim,
        dataHrProxDosagem, medicamento, 0);
    agendamentoDAO.save(pendingId = agendamentoSave.
    msg = "Medicamento " + nomeMedicamento + " agendado! ";
} else {
    agendamento.setMedicamento(
    agendamento.setIdQtdDiariatiq(qtdTipoMedicamento);
    agendamento.setIdQtdDosagemTipo(tipoDosagem);
    agendamento.setIdQtdIntervaloTipo(tipoIntervalo);
    agendamento.setIdQtdDuracaoTipo(tipoDuracao);
    agendamento.setQtdIntervalo(qtdIntervalo);
    agendamento.setQtdDuracao(qtdDuracao);
    agendamento.setQtdDosagem(qtdDosagem);
```



```

agendamento.setDataInicioAgendamento(dataInicio);
agendamento.setDataHoraInicioAgendamento(dataInicio);
agendamento.setDataHoraProxDosagem(dataHrProxDosag);
agendamento.setDataFimAgendamento(dataHrFim);
agendamento.setDataHoraFimAgendamento(dataHrFim);
agendamento.setFlagConfirmaIngestao(0);
agendamentoDAO.update(
pendingId = agendamento.getIdAgendamento()
msg = "Medicamento " + nomeMedicamento + " atualizado!";
}

```

Para cancelar um agendamento o usuário deverá clicar sobre ele, o sistema mostrará uma mensagem de confirmação de exclusão.

Com isso é esperado que o usuário siga os tratamentos de uma forma mais rígida respeitando horários, doses e dias além de ter um controle maior sobre os medicamentos que tomou e os tratamentos que fez por meio do histórico do aplicativo.

### 4.3 Testes e Resultados

No início do uso dos computadores buscava-se desenvolver softwares “amigáveis” mas, segundo [26], este termo é considerado inapropriado, “primeiro, porque os usuários não precisam de máquinas que sejam amigáveis com eles, eles apenas necessitam de máquinas que não atrapalhem a realização de uma tarefa; e segundo, essa classificação simplista implica que as necessidades do usuário podem ser descritas ao longo de uma única dimensão por sistemas que são mais ou menos amigáveis. Na verdade, usuários diferentes possuem necessidades diferentes e um sistema que seja amigável com um pode ser muito tedioso para outro”.

A Interação Homem Máquina (IHC) pode ser considerada como uma área do conhecimento relacionada ao projeto. A IHC foi definida por [27] como “os meios pelos quais cada um desses dois subsistemas se comunica com o outro” dando-se por meio da interface com o usuário, tendo suas raízes nas áreas de ergonomia, psicologia, sociologia, antropologia, engenharias, ciência da computação e desenho industrial [28]. Desta forma a interface têm um papel fundamental em qualquer sistema interativo, pois é por meio dela que ocorrem as interações homem máquina, assim, “quanto maior for a usabilidade da interface, mais fácil será a comunicação. A usabilidade passa então a ser um objetivo a ser atingido durante todo o projeto da interface com o usuário.” [28].

Segundo [26], “o objetivo de definir o conceito abstrato de “usabilidade” em termos de seus componentes mais precisos e mensuráveis, nós podemos chegar a uma disciplina de engenharia, onde a usabilidade não é simplesmente discutida, mas é sistematicamente aproximada, aperfeiçoada e avaliada (possivelmente mensurada)”.

[28] defende que “As técnicas de usabilidade podem e devem ser aplicadas em várias fases durante o ciclo de desenvolvimento do produto, desde técnicas aplicadas nas fases iniciais do projeto até testes de usabilidade realizados com o produto final em campo, cujos resultados irão subsidiar o desenvolvimento de novas versões ou até mesmos novos produtos”.

Para [29] a usabilidade é um dos componentes da aceitabilidade de um produto. A utilidade de um produto se refere à combinação entre as necessidades do usuário e as funcionalidades do produto, enquanto que a usabilidade se refere à habilidade do usuário em poder utilizar essas funcionalidades na prática.

Medir a usabilidade é uma parte muito importante no ciclo da Engenharia de Usabilidade para verificar se os objetivos de usabilidade foram efetivamente atingidos e para comparar a usabilidade entre produtos concorrentes [26].

Existem diversas técnicas para medir a usabilidade que podem ser utilizadas durante o desenvolvimento de um projeto, sendo diferentes com relação ao tipo e quantidade de problemas que identificam, à sistematização de seus resultados, à facilidade de aplicação e às chances que seus resultados apresentam para convencer os projetistas das necessidades de mudanças na interface. Podendo ser classificadas em três categorias [30]:

- **Prospectivas:** Este tipo de técnica está baseado na aplicação de questionários/entrevistas com o usuário para avaliar sua satisfação ou insatisfação em relação à interface e sua operação. Ela mostra-se bastante pertinente na medida em que é o usuário a pessoa que melhor conhece a interface, seus defeitos e qualidades em relação aos objetivos em suas tarefas [31].
- **Preditivas/Analíticas:** buscam prever os erros de projeto de interfaces sem a participação direta de usuários. As avaliações são baseadas em verificações e inspeções feitas por especialistas em usabilidade ou projetistas. São exemplos de técnicas preditivas [32]: Análise Hierárquica da Tarefa, Avaliação Heurística, Inspeções Ergonômicas via Checklists, Inspeção Cognitiva.
- **Objetivas/Empíricas:** buscam constatar os problemas a partir da observação do usuário interagindo com o sistema. São os Ensaios de Interação, também chamados Testes de Usabilidade [28].

Nesta pesquisa utilizamos técnicas prospectivas pois foi aplicado um questionário aos alunos que testaram o aplicativo para avaliar a satisfação deles com o aplicativo. A eficácia das técnicas prospectivas depende da objetividade do instrumento de coleta adotado, quanto mais dirigido aos dados a serem analisados e menos ambíguo, mais eficaz será o instrumento [15].

Os testes de usabilidade são uma técnica bem elaborada, que envolve uma simulação de situações de uso do sistema, a facilidade ou dificuldade para a realização deste teste dependerá do nível de exigência requerido para os resultados, da generalidade do produto e a disponibilidade de recursos e de usuários [40].

Pode-se definir o teste de usabilidade por meio de cinco características [36]:

- O objetivo é a promoção da usabilidade do produto;
- Os participantes representam usuários reais;
- Os usuários executam tarefas reais;
- Os avaliadores observam e registram os participantes;
- Os avaliadores analisam os dados e recomendam mudanças.

Questionários são ferramentas muito úteis para avaliar a interação do usuário com a interface de software. É muito utilizado para coletar informações subjetivas sobre a qualidade da interface, dados sobre o perfil dos usuários e os problemas encontrados nas interações com o software. Essas informações são tão (ou mais) importantes quanto a performance do sistema e não podem ser obtidas de outra forma senão perguntando aos usuários [18]. Grandes empresas de software utilizam desta técnica regularmente durante o desenvolvimento de seus projetos buscando melhorar a qualidade de seus softwares. Esses questionários mostram-se pertinentes, uma vez que é o usuário quem melhor conhece o software, seus defeitos e suas qualidades em relação aos seus objetivos e às suas tarefas [15].

Questionários de avaliação de satisfação são considerados aplicáveis às fases finais do projeto de software. Geralmente sendo aplicados após a conclusão do produto, servindo para calibrar a qualidade do produto, para implementar novos recursos ou ainda para corrigir falhas de interação ou performance [18]. Esses questionários devem ser sucintos, com poucas questões. Infelizmente eles podem ter uma baixa taxa de devolução, uma vez que no máximo 30% deles retornam [33].

A utilização dos questionários aumenta a efetividade de avaliações analíticas, realizadas por meio das respostas, centrando suas análises sobre os pontos problemáticos do software, podendo assim diagnosticar problemas de usabilidade [33]. Os dados dos problemas detectados no uso são analisados para verificar se o aplicativo suporta o ambiente e as tarefas do usuário. Um teste de usabilidade emprega como participantes pessoas que representam o público-alvo em uma avaliação para adequação do aplicativo a critérios de usabilidade [35].

Uma das maiores vantagens do uso de questionários para a avaliação é a quantidade de usuários dispersos geograficamente ou divididos por meio de perfis, podendo ser aplicados todos ao mesmo tempo utilizando o ambiente Web [34].

Dos 209 (duzentos e nove) questionários enviados, até o momento, 41 (quarenta e um) foram respondidos. Logo, apenas os dados dos quarenta e um questionários foram tabulados e utilizados nesta pesquisa.

Ao submetermos as respostas no SPSS, para validação da confiabilidade, obtivemos coeficiente 0,9193, desta forma, o questionário está excelente para a pesquisa, conforme

apresenta a Tabela1.

Valor de alfa	Confiabilidade
Maior do que 0,9	Excelente
0,8 - 0,9	Bom
0,7 - 0,8	Aceitável
0,6 - 0,7	Questionável
0,5 - 0,6	Pobre
Menor do que 0,5	Inaceitável

Tabela 1. Resultados de alfa de cronbach.

Fonte: ALIZO, Nilda Chavez. Introduccion a la investigacion educativa. Maracaibo: Columna, 2001.

Cada questionário apresentou onze questões onde, Q1(Este aplicativo tem uma apresentação agradável e legível.), Q2(De modo geral considero rápido o acesso às informações do aplicativo.), Q3(É fácil a navegação neste aplicativo.), Q4(É simples cadastrar, alterar ou remover um lembrete.), Q5(Foi fácil aprender a usar este aplicativo.), Q6(O aplicativo atende às minhas necessidades.), Q7(Eu usaria este aplicativo com frequência.), Q8(A organização dos menus e botões é lógica, permitindo encontrá-los facilmente na tela.), Q9(Eu achei o aplicativo consistente. Por exemplo, todas as funções podem ser realizadas de uma maneira semelhante.), Q10(Eu recomendaria este aplicativo para outra pessoa.) e Q11(Eu me senti seguro no aplicativo.). O questionário foi baseado nos trabalhos de [18] e [19].

O SPSS também forneceu o coeficiente de alfa de cronbach referente a cada questão, conforme o gráfico 1.

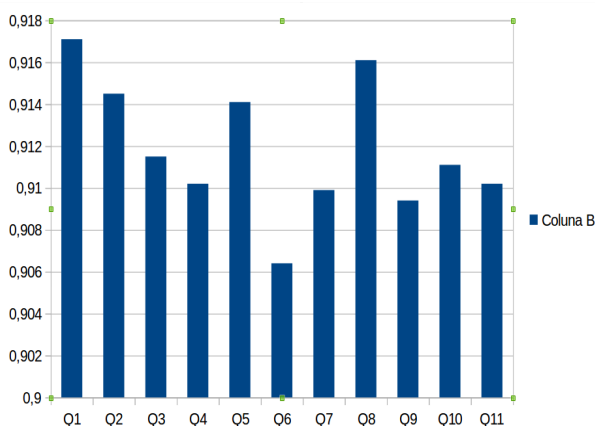


Gráfico 1: Coeficiente alfa de cronbach por questão do questionário de usabilidade aplicado.

Observamos que o coeficiente alfa de cronbach das respostas de todas as questões

ficou acima de 0,9, sendo assim, todas as questões possuem um excelente nível de confiabilidade, conforme a Tabela 1.

As questões Q1 e Q8 foram as que obtiveram maior coeficiente, as duas questões são referentes aos componentes gráficos do aplicativo.

As questões Q2 e Q5 obtiveram um bom coeficiente tratam do acesso às informações do aplicativo e o quanto o aplicativo é intuitivo.

As questões Q3, Q4, Q7, Q9, Q10 e Q11 foram as que obtiveram a média, essas questões tratam das funções do aplicativo e sua utilização.

A questão Q6 foi a que obteve o menor coeficientes, esta questão verifica se o aplicativo atende as necessidades do usuário.

Cada questão do questionário possuía cinco opções como resposta, sendo elas, concordo fortemente, concordo, indeciso, discordo e discordo fortemente. Levando em consideração as respostas recebidas podemos observar no gráfico 2 a frequência das respostas por questão.

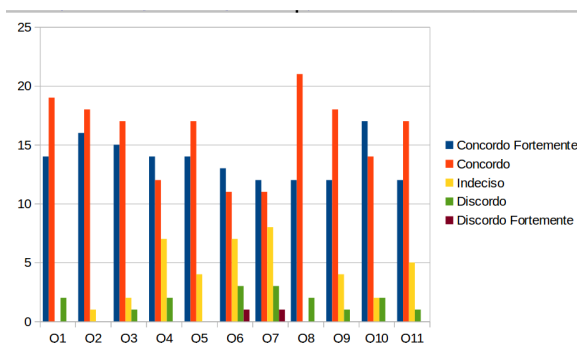


Gráfico 2: Frequência das respostas do questionário de usabilidade aplicado.

Através do gráfico foi possível verificar que a maioria das questões foi respondida com 'Concordo Fortemente' ou 'Concordo'. Sendo a questão 8 a que teve o maior número de respostas iguais.

Através do gráfico 3 verificamos que a questão Q1, que trata da parte gráfica do aplicativo, obteve uma boa aceitação por parte da grande maioria dos usuários. Apenas 5% dos usuários que testaram o aplicativo não aprovaram a parte gráfica.

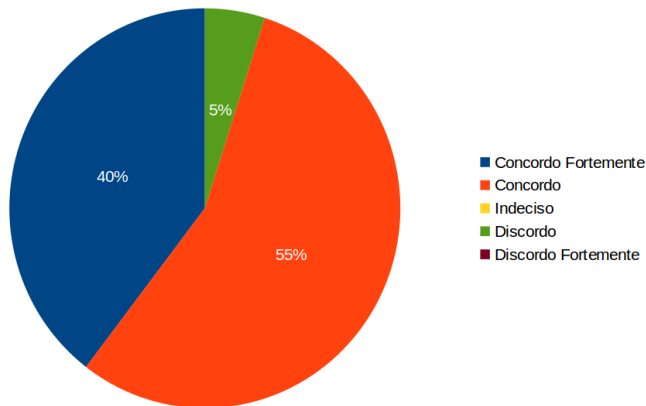


Gráfico 3: Porcentagem das respostas recebidas pela Q1 no questionário de usabilidade do aplicativo MediMax.

O gráfico 4 mostra a porcentagem de cada resposta referente a questão Q2 que trata do desempenho do aplicativo. Esta questão teve um grau de aceitação alto uma vez que nenhum usuário selecionou como resposta as opções descordo ou descordo fortemente. Assim, podemos concluir que o aplicativo obteve um bom desempenho rodando nos mais diversos aparelhos dos usuários.

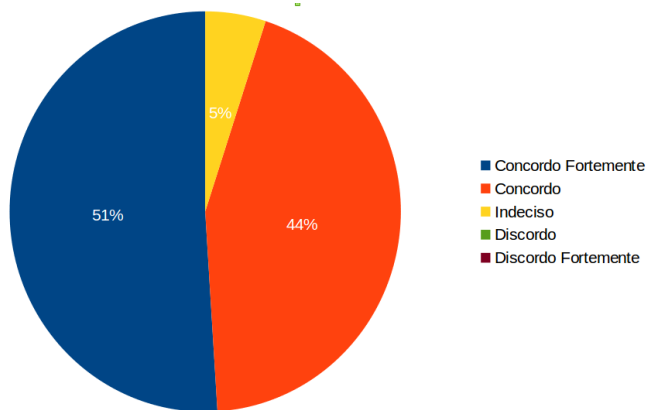


Gráfico 4: Porcentagem das respostas recebidas pela Q2 no questionário de usabilidade do aplicativo MediMax.

A questão Q3 obteve um grau de discordância um pouco maior do que o das questões Q1 e Q2. Esta questão trata da navegação no aplicativo e, como não foi estipulado um hardware mínimo para o teste, alguns usuários podem ter encontrado problemas com a disposição de alguns itens na tela.

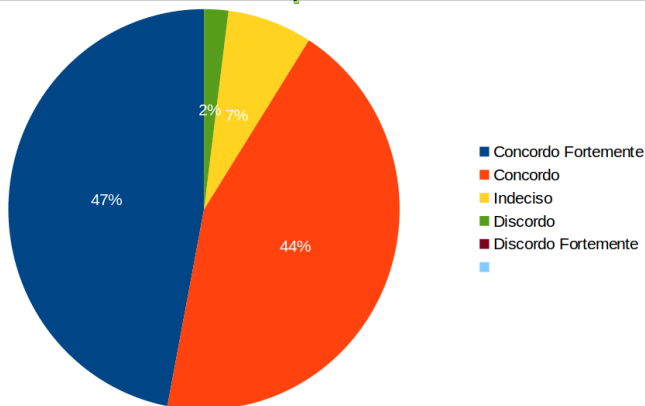


Gráfico 5: Porcentagem das respostas recebidas pela Q3 no questionário de usabilidade do aplicativo MediMax.

O gráfico 6 apresenta a porcentagem das respostas recebidas pela questão Q4, através do gráfico verificamos que alguns usuários apresentaram alguma dificuldade com relação as funções de cadastrar, editar e excluir lembretes no aplicativo, uma vez que esta questão se refere as funcionalidades referentes aos lembretes.

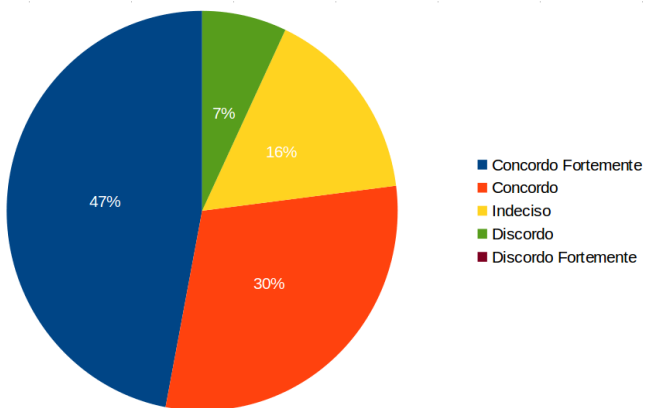


Gráfico 6: Porcentagem das respostas recebidas pela Q4 no questionário de usabilidade do aplicativo MediMax.

Através do gráfico 7 verificamos que a questão Q5, que trata do quanto o aplicativo é intuitivo para o usuário. Esta questão não obteve nenhuma resposta referente as opções Discordo e Discordo Fortemente, logo, podemos afirmar que os usuários não apresentaram dificuldades no manuseio do aplicativo em geral.

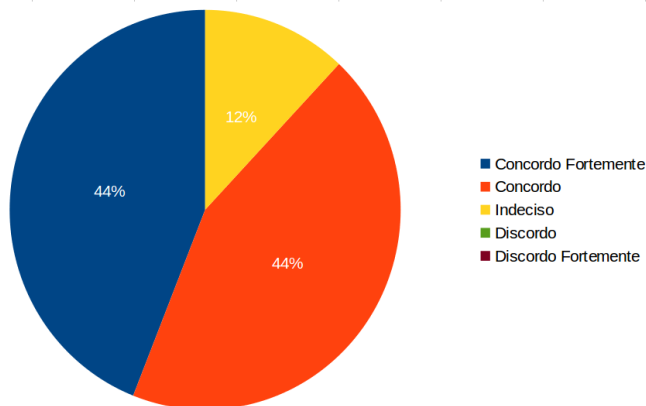


Gráfico 7: Porcentagem das respostas recebidas pela Q5 no questionário de usabilidade do aplicativo MediMax.

A questão Q6 foi uma das questões que obteve maior nível de rejeição. Esta questão trata do uso do aplicativo, assim, verificamos que nem todos os usuários que responderam ao questionário acreditam que o aplicativo atende as suas necessidades.

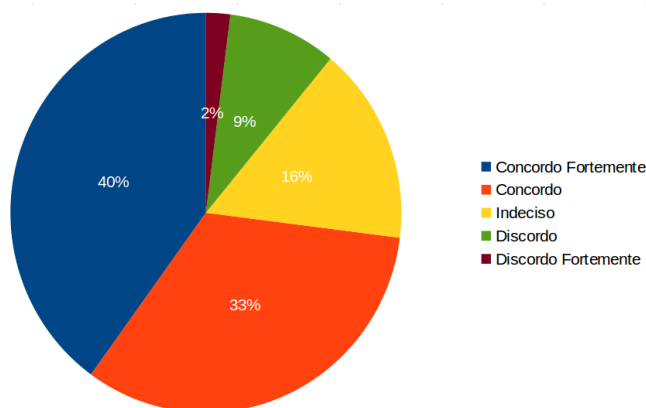


Gráfico 8: Porcentagem das respostas recebidas pela Q6 no questionário de usabilidade do aplicativo MediMax.

Através do gráfico 9 verificamos que a questão Q7 foi a questão que obteve o menor índice de respostas Concordo Fortemente e Concordo, obtendo o mesmo número de respostas Discordo e Discordo Fortemente da Q6. Esta proximidade das respostas da Q6 e Q7 deve-se a elas serem questões complementares, a Q6 sonda o usuário sobre o atendimento de suas necessidades e a Q7 o verifica se ele utilizaria o aplicativo com frequência.



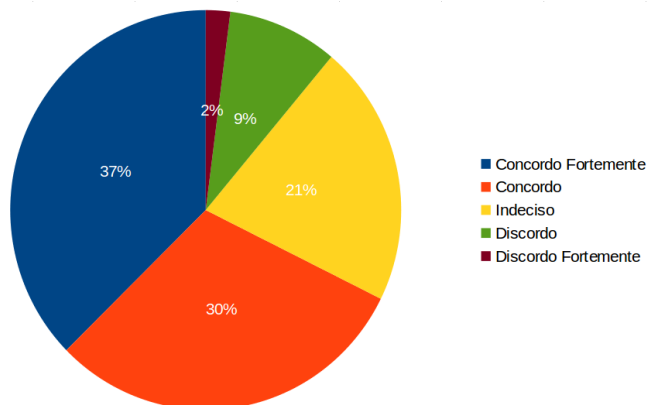


Gráfico 9: Porcentagem das respostas recebidas pela Q7 no questionário de usabilidade do aplicativo MediMax.

A questão Q8 tem por objetivo verificar se o usuário encontrou algum problema com relação a encontrar os menus e botões da aplicação durante o teste. Analisando o gráfico 10 é possível verificar que a maioria dos usuários não encontram nenhuma dificuldade e que alguns tiveram um pouco de dificuldade optando assim pela opção Concorde e, que apenas uma pequena parcela encontrou dificuldades suficientes para obter pela opção Discordo.

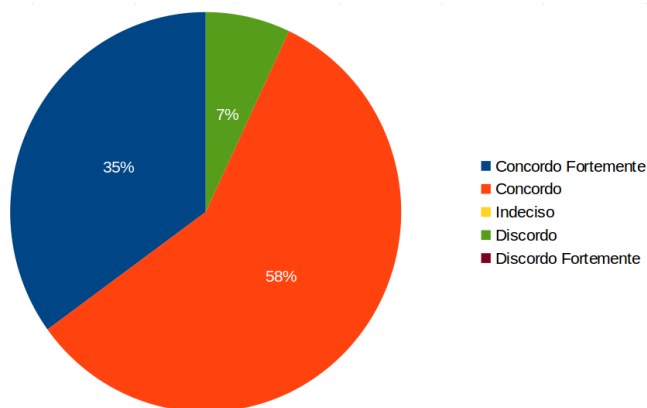


Gráfico 10: Porcentagem das respostas recebidas pela Q8 no questionário de usabilidade do aplicativo MediMax.

Analisando o gráfico 11 que se refere as respostas da questão Q9 percebe-se que a maioria dos usuários concordam que as funções e as telas do aplicativo estão padronizadas, assim, não causando nenhuma dificuldade de interação do usuário com a aplicação.

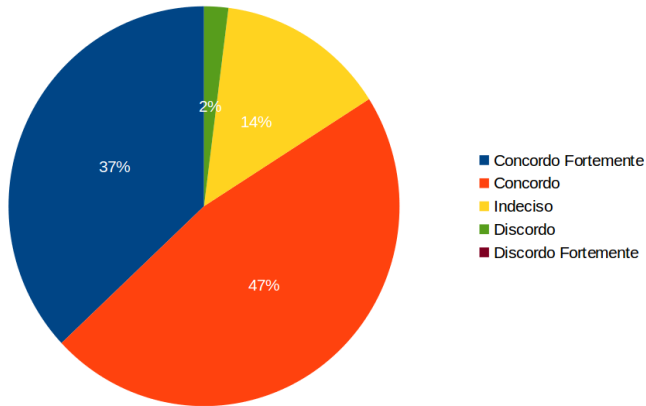


Gráfico 11: Porcentagem das respostas recebidas pela Q9 no questionário de usabilidade do aplicativo MediMax.

Através do gráfico 12, referente as respostas da questão Q10, podemos verificar que apenas uma pequena parcela dos usuários que testaram o aplicativo não sabe ou acredita que que o aplicativo não atenderia as necessidades de outras pessoas.

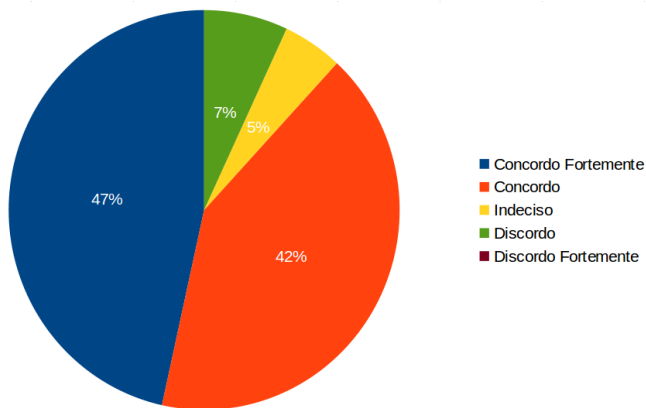


Gráfico 12: Porcentagem das respostas recebidas pela Q10 no questionário de usabilidade do aplicativo MediMax.

O gráfico 13 referente a questão Q11, através de sua análise é possível verificar que a maioria dos usuários se sentiram seguros utilizando o aplicativo.

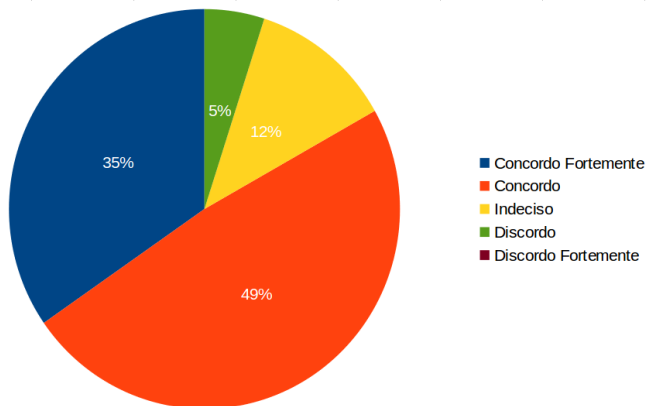


Gráfico 13: Porcentagem das respostas recebidas pela Q11 no questionário de usabilidade do aplicativo MediMax.

Analisando as respostas agrupadas por opção de resposta, gráfico 14, é possível visualizar que o aplicativo obteve uma boa avaliação referente a sua usabilidade, onde aproximadamente 84,67% das respostas foram positivas.

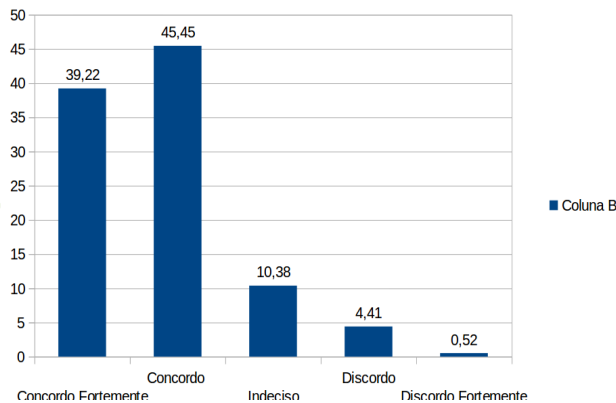


Gráfico 14: Total de respostas agrupadas por opção de resposta do questionário de usabilidade aplicado.

## 5 | CONSIDERAÇÕES

Este trabalho visou o desenvolvimento de um aplicativo protótipo e verificou-se sua usabilidade por meio de um questionário aplicado após o teste do mesmo. A primeira parte do trabalho centrou-se no desenvolvimento do aplicativo, esta foi a parte mais longa do trabalho uma vez que, primeiramente foi feito um estudo e a engenharia do aplicativo para, então, iniciar-se o desenvolvimento.

Para verificarmos a usabilidade do aplicativo optamos por enviar o aplicativo

juntamente com um questionário aos alunos do curso de Sistemas de Informação do Centro Universitário Estácio da Amazônia. Infelizmente recebemos um número pequeno de questionários respondidos.

Ao aplicarmos as respostas ao coeficiente de Cronbach para a verificação da confiabilidade do questionário obtivemos 9,1, o que segundo a tabela de 41 significa que o questionário tem um nível excelente de confiabilidade. Assim, consideramos que obtivemos êxito na elaboração do questionário.

Ao analisarmos as respostas do questionário de usabilidade do aplicativo pudemos perceber um alto nível de aceitação, sendo que a questão que obteve menor índice de aceitação foi a que se referia ao atendimento das necessidades do usuário. Acreditamos que caberia um estudo mais detalhado sobre quais necessidades não foram atendidas e como poderíamos inseri-las no aplicativo.

Como trabalhos futuros pretendemos adicionar duas funcionalidades no aplicativo, testar sua usabilidade e produzir uma versão final do aplicativo. Serão inseridas as opções de visualização do histórico do aplicativo através de gráficos e de monitoramento cardíaco. Com isso pretendemos deixar o aplicativo mais completo.

## REFERÊNCIAS

1. Brasil. Presidência da República. Secretaria de Comunicação Social. Pesquisa brasileira de mídia 2015: hábitos de consumo de mídia pela população brasileira. – Brasília: Secom, 2014.
2. NONNENMACHER, Renata Favretto. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO CONSUMIDOR DE APLICATIVOS MÓVEIS. Departamento de Ciências Administrativas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2012.
3. WORLD HEALTH ORGANIZATION. The world health report 2008: Primary Health Care – Now More Than Ever. WHO: Geneva. 2008.
4. BONOME, Karoline da Silva et al. Disseminação do uso de aplicativos móveis na atenção à saúde. XIII Congresso Brasileiro em Informática em Saúde – CBIS. 2012.
5. CANÇADO Figueiredo, Márcia, Jardim, Lucas Eduardo, Couto Barone, Dante Augusto, Lamb Wink, Gabriel. A utilização da computação móvel na armazenagem de dados de paciente em atendimentos domiciliares de saúde ConScientiae Saúde [online] 2013.
6. NAVARRO, Beatriz R.; SANTOS, Jéssica dos; Baklizky, Maruscia; Wagner, Priscilla K.; ARAÚJO, Luciano V. ADAFARMA: Aplicativo para Auxílio na Fase de Aderência ao Tratamento. In: XIII Congresso Brasileiro em Informática em Saúde – CBIS 2012, Universidade de São Paulo (USP), 2012.
7. PATRICK, K. Griswold, WG. Raab, F. & Intille, SS. Health and the Mobile Phone. American Journal of Preventive Medicine. 35(2): 177–181, 2008.
8. SILVA, Fabiana Cristina Neves da; COIADO, Jonatas Roberto; OLIVEIRA, Renata Valero Santos; OLIVEIRA, Rosimeiry Alves de. AUTOMEDICAÇÃO POR UNIVERSITÁRIOS DA FUNDAÇÃO EDUCACIONAL DE FERNANDÓPOLIS-SP. Faculdades Integradas de Fernandópolis, São Paulo, 2012.

9. FARHAAN, M. Norris, T. & Stockdale, R. Mobile technologies and the holistic management of chronic diseases. *Health Informatics Journal*, 2008.
10. Android Studio Overview. Disponível em: <<http://developer.android.com/intl/pt-br/tools/studio/index.html>>. Acesso em: [30/10/2015].
11. SANTOS, Glauber Eduardo de Oliveira. *Cálculo amostral*: calculadora on-line. Disponível em: <<http://www.calculoamostral.vai.la>>. Acesso em: [30/10/2015].
12. World Health Organization, Global Observatory for eHealth. *mHealth, New Horizons for Health through Mobile Technologies*. Geneva (Switzerland): WHO; 2011.
13. MORESI, Eduardo. *Metodologia da Pesquisa. Programa De Pós-Graduação Stricto Sensu Em Gestão Do Conhecimento E Tecnologia Da Informação*. Universidade Católica De Brasília – UCB. 2003.
14. PMKT – Revista Brasileira de Pesquisas de Marketing, Opinião e Mídia (ISSN 1983-9456 Impressa e ISSN 2317-0123 On-line), São Paulo, Brasil, V. 15, p. 1-16, outubro, 2014. Disponível em <[www.revistapmkt.com.br](http://www.revistapmkt.com.br)> Acesso em [03/11/2015]
15. MEDEIROS, M. A. ISO 9241: uma proposta de utilização da norma para avaliação do grau de satisfação de usuários de software. Florianópolis, 1999. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da UFSC.
16. Rev. Cir. Traumatol. Buco-Maxilo-Fac., Camaragibe v.5, n.3, julho/setembro 2005. Disponível em <<http://www.revistacirurgiabmf.com/2005/v5n3/v5n3%20pdf/editorial.pdf>> Acesso em [04/11/2015].
17. HORA, H. R. M., Monteiro, G. T. R., & Arica, J. (2010). Confiabilidade em Questionários para Qualidade: Um Estudo com o Coeficiente Alfa de Cronbach. *Produto & Produção*, 11, 85-103. Disponível em <<http://www.seer.ufrgs.br/ProdutoProducao/article/viewFile/9321/8252>> Acesso em [04/11/2015].
18. PADILHA, A.V. Usabilidade na Web: uma Proposta de Questionário para Avaliação do Grau de Satisfação de Usuários do Comércio Eletrônico. Florianópolis, 2004. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da UFSC.
19. OLIVEIRA, R.J. Proposta De Um Questionário Pós-Teste Para Medir Usabilidade De Aplicativos De Celulares Touchscreen. Florianópolis, 2013. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Informática e Estatística da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Bacharel em Sistemas de Informação.
20. SARITA, Paula et al. Competição no setor de telefonia móvel brasileiro. p. 145 – 170, 2011.
21. DAVIS, Alexandre; Guimarães, Dilson; ARCANJO, Filipe; BRUNORO, Gustavo. SOFTWARE LIVRE EM PLATAFORMAS MÓVEIS UM FUTURO INCERTO?. Congresso Nacional Universidade, EAD e Software Livre v.2, n.2, 2011.
22. Dohrenwend, B. S. (1965). Some effects of open and closed questions on respondents' answers. *Human Organization*, 24 (Summer), 175-184.
23. Jacobson, I., Booch, G., Rumbaugh, J. (1998), *The Unified Software Development Process*, Indianapolis – IN, USA: Addison-Wesley.

24. Booch, G., Rumbaugh, J., Jacobson, I. (1998), The Unified Modeling Language User Guide. Indianapolis — IN, USA: Addison-Wesley.
25. Android Studio Overview. Disponível em: <<http://developer.android.com/intl/pt-br/tools/studio/index.html>>. Acesso em: [30/10/2015].
26. NIELSEN, Jakob. Usability Engineering. San Francisco (California), Morgan Kaufmann, 1993. 362p.
27. MAYHEW, Deborah J. Principles and Guidelines in Software User Interface Design. Englewood Cliffs (New Jersey), PTR Prentice Hall. 1992. 619p.
28. BETIOL, A.H. Avaliação De Usabilidade Para Os Computadores De Mão: Um Estudo Comparativo Entre Três Abordagens Para Ensaio De Interação. Florianópolis, 2004. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.
29. Shackel, B. Usability – context, framework, design and evaluation. In Shackel, B. and Richardson, S. (eds.). Human Factors for Informatics Usability. Cambridge University Press, Cambridge, 21-38, 1991.
30. Cybis, W. Ergonomia de Interfaces Humano-Computador. Florianópolis: 2002.
31. CYBIS, W. A.; Abordagem Ergonômica para IHC. Relatório Técnico apresentado junto ao DINF/UFSC, 1996. Disponível em: <<http://www.joaobelias.com/biblioteca/apostila%20ergonomia%20interfaces.pdf>> Acesso em 04/11/2015.
32. Nielsen, J., Mack, R.L. Usability Inspection Methods. USA: John Wiley & Sons, 1994.
33. CYBIS, W. de A. Ergonomia de Interfaces Homem-Computador. Apostila para o Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, 2000. Disponível em: <<http://www.labiutil.inf.ufsc.br/apostila.htm>>. Acesso em 04/11/2015.
34. DIAS, C. Avaliação de usabilidade: conceitos e métodos. Disponível em: <[http://www.ii.puc\\_campinas.br/revista\\_ii/Segunda\\_edicao/Artigo\\_02/Avaliacao\\_de\\_usabilidade.pdf](http://www.ii.puc_campinas.br/revista_ii/Segunda_edicao/Artigo_02/Avaliacao_de_usabilidade.pdf)>. Acesso em 04/11/2015.
35. MATIAS, M., CheckList : Uma Ferramenta de Suporte à Avaliação Ergonômica de Interfaces, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis, SC, 1995.
36. Tdah.Net.Br Tudo Sobre Transtorno De Déficit De Atenção E Hiperatividade. Comorbidade. Disponível em: <<http://www.tdah.net.br/comorb.html>>. Acessado em 11/11/2015.
37. Dicio. Anamnese. Disponível em: <<http://www.dicio.com.br/anamnese/>>. Acessado em 11/11/2015.
38. Astah. Astah Community. Disponível em <<http://astah.change-vision.com>>. Acesso em 11/11/2010.

39. YOSHIDOME, E.Y.C.; SOUSA, M.R.A.; LIRA W.M.P.; OLIVEIRA S.R.B.; VASCONCELOS A.M.L. Uma Apoio Sistematizado à Implementação do Processo de Desenvolvimento de Requisitos do MPS. BR e CMMI a partir do Uso de Ferramentas de Software Livre. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação – Instituto de Ciências Exatas e Naturais – Universidade Federal do Pará (UFPA) Belém – PA – Brasil.

40. CYBIS, W. Ergonomia e Usabilidade: conhecimentos, métodos e aplicações/ Walter Cybis, Adriana Holtz Betiol, Richard Faust. São Paulo: Novatec Editora, 2007.

## VIBRATIONS ANALYSIS UNCOUPLED AND COUPLED FLUID-STRUCTURE BETWEEN SHELL AND ACOUSTIC CAVITY CYLINDRICAL FOR VARIOUS BOUNDARY CONDITIONS

*Data de aceite:* 02/08/2021

*Data de submissão:* 04/05/2021

### Davidson de Oliveira França Júnior

Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) – Grupo de Dinâmica e Fluido-Estrutura (GDFE), Brasília-DF.  
<https://orcid.org/0000-0001-8822-7178>

### Lineu José Pedroso

Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) – Grupo de Dinâmica e Fluido-Estrutura (GDFE), Brasília-DF.  
<https://orcid.org/0000-0001-8822-7178>

**ABSTRACT:** In this work the free and harmonic vibrations of an empty and partially filled cylindrical reservoir with an inviscid and incompressible liquid are studied. The reservoir is modeled by a cylindrical shell and the fluid represented by an acoustic cavity. The analytical approach is through the variational calculation implemented in MAPLE software with the Rayleigh-Ritz method for the resolution of the equations of the frequencies. The fluid-structure interaction is made by incorporating the effect of the fluid on the cylindrical shell through an additional mass of fluid. The numerical discretization is through using the finite element method (MEF) through ANSYS software. The forced vibration is applied from a punctual harmonic loading in the shell, in which the response in frequency domain were

investigated for the uncoupled and coupled shell with fluid. The analysis of the harmonic response captured the natural frequencies obtained in the modal analysis and the operational modal forms of the structure, characterizing a good agreement between the analytical and numerical results for vibrations uncoupled and coupled with fluid.

**KEYWORDS:** Free and Harmonic Vibrations, Cylindrical Shell, Fluid-Structure Interaction, Finite Element Method.

### ANÁLISE DE VIBRAÇÕES DESACOPLADAS E ACOPLADAS FLUIDO-ESTRUTURA ENTRE CASCA E CAVIDADE ACÚSTICA CILÍNDRICA PARA VÁRIAS CONDIÇÕES DE VINCULAÇÃO

**RESUMO:** Neste trabalho são estudadas as vibrações livres e harmônicas de um reservatório cilíndrico vazio e parcialmente cheio com um líquido invíscido e incompressível. O reservatório é modelado por uma casca cilíndrica e o fluido representado por uma cavidade acústica. A abordagem analítica se dá por meio do cálculo variacional implementado no *software* MAPLE com o método de Rayleigh-Ritz para a resolução das equações das frequências. A interação fluido-estrutura é feita incorporando o efeito do fluido na casca cilíndrica por meio de uma massa adicional de fluido. A discretização numérica se dá através da utilização do método dos elementos finitos (MEF) por meio do *software* ANSYS. A vibração forçada é aplicada através de um carregamento harmônico pontual na casca, em que as respostas no domínio da frequência foram investigadas para a casca desacoplada e acoplada com fluido. A análise da resposta



harmônica capturou as frequências naturais obtidas na análise modal e as formas modais operacionais da estrutura, caracterizando uma boa concordância entre os resultados analíticos e numéricos para vibrações desacopladas e acopladas com fluido.

**PALAVRAS - CHAVE:** Vibrações Livres e Harmônicas, Casca Cilíndrica, Fluido-Estrutura, Método dos Elementos Finitos.

## 1 | INTRODUCTION

The cylindrical shells are characterized by a curved surface object with a small thickness compared to their other dimensions, being generally made of solid material. Despite extensive theoretical studies on vibrations in cylindrical shells, most works are limited to classical boundary conditions: pinned-pinned, clamped-clamped, and clamped-free. However, it is known that in engineering applications, the walls of cylindrical shells are generally connected to other structural components (cover, bottom plate, etc) through various types of connections, in which the idealization of different conditions (Fig. 1) represents a fundamental role in the analysis of these situations in the mathematical and/or numerical model.

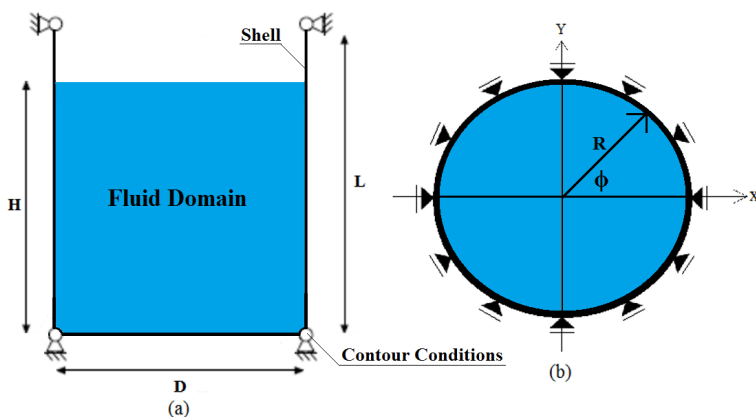


Figure 1: A Diagram of the tank: (a) the cross-section; (b) the transversal section.

Several studies have theoretical analytical, numerical and experimental approaches to the study of vibrations in cylindrical shells for different boundary conditions, such as Kurylov & Amabili (2010), Qu *et al.* (2013), Mendes *et al.* (2014), Ma *et al.* (2014), Tang *et al.* (2017), França Júnior *et al.* (2017) and Li *et al.* (2018).

In this work, the free and harmonic vibrations of an empty, fully filled cylindrical reservoir with an inviscid and incompressible liquid are studied for various boundary conditions. The reservoir is modeled by a cylindrical shell and the fluid represented by an acoustic cavity. The analytical solution is based on the variational calculation through the

energy theory implemented in MAPLE software. The fluid is modeled by the wave equation and the fluid-structure interaction performed by incorporating an additional mass of fluid into the dynamic equations of motion of the shell. The numerical discretization is done with the finite element method (FEM) using the software ANSYS. The forced vibration comes from a harmonic point load in the shell, in which the frequency domain response spectra were investigated for the uncoupled and coupled shell with fluid for different boundary conditions.

## 2 | ANALYTICAL FORMULATION

The cylindrical shell (Fig. 1) is composed of thin walls of length  $L$ , median radius  $R$ , radial angle  $\phi$  and thickness  $h$ . The shell material is considered to be elastic with Young's modulus  $E$ , Poisson coefficient  $\nu$  and specific mass  $\rho$ . The coordinates of the displacement vector on the surface of the shell in the axial, circumferential and radial direction are respectively  $u$ ,  $v$  and  $w$ .

The deformations and the changes in the curvature of the shell assumed based on the linear theory of Flügge (1934). The dynamic motion equations can be obtained through the Rayleigh-Ritz procedure through the Lagrangian function ( $\Gamma$ ). The Lagrangian function (Equation 3), the internal energy of deformation (Equation 1) and the kinetic energy (Equation 2) of the cylindrical shell, according to Brush and Almroth (1975), is given by:

$$E_P = \frac{1}{2} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_0^{2\pi} \int_0^L (\sigma_z \varepsilon_z + \sigma_\phi \varepsilon_\phi + \sigma_{z\phi} \varepsilon_{z\phi}^*) dv \quad (1)$$

$$E_C = \frac{\rho R h}{2} \int_0^{2\pi} \int_0^L \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right] dz d\phi \quad (2)$$

$$\Gamma = E_{C_{m\acute{a}x}} - E_{P_{m\acute{a}x}} \quad (3)$$

where  $\varepsilon_z$  and  $\varepsilon_\phi$  represent the membrane and transverse strains, respectively,  $\varepsilon_{z\phi}$  denotes the shear distortions,  $\sigma_z$ ,  $\sigma_\phi$  and  $\sigma_{z\phi}$  are stress based on Hooke's law,  $E_{C_{m\acute{a}x}}$  is the maximum kinetic energy of the shell and  $E_{P_{m\acute{a}x}}$  is the internal energy of the maximum deformation of the cylindrical shell. Part of the beam modes presented by Blevins (1979).

When applying the Rayleigh-Ritz procedure ( $\partial\Gamma/\partial A=0$ ;  $\partial\Gamma/\partial B=0$ ;  $\partial\Gamma/\partial C=0$ ) in the Lagrangian function, we have a system of three equations of motion. These equations can be expressed in matrix form, by symmetric terms, in which for nontrivial solutions, the determinant of the characteristic matrix is defined as zero. This yields the characteristic polynomial in which the roots characterize the natural frequencies.

Through the analyzed analytical procedure, for a cylindrical shell with boundary condition pinned-pinned, the coupling is performed by the additional mass of fluid imposed

in the shell equation in terms compounded by the mass of the structure. The expression of the additional mass was developed by Lindholm *et al.* (1962) and imposing such a parameter has a hydrodynamic pressure of the transformed fluid in an additional virtual mass in the shell structure. The complete analytical procedure and the development of the equations for shell uncoupled and coupled with fluid are found in França Júnior (2018) and França Júnior *et al.* (2019).

### 3 | NUMERICAL SIMULATION

In the modeling the following properties of the materials were adopted: the steel shell considered to be made with Young's modulus  $E=200$  GPa, Poisson Coefficient  $\nu=0,29$  and specific mass  $\rho_s=7760$   $Kg/m^3$ ; the liquid is water with specific mass  $\rho_f=1000$   $Kg/m^3$  and speed of sound propagation in water  $c=1500$   $m/s$ . For the geometric properties, were adopted: the cylindrical shell with radius  $R=0,175$   $m$ , length  $L = 0,664$   $m$  and thickness  $h = 0,00102$   $m$ ; the acoustic cavity with radius  $R = 0,175$   $m$  and length  $L = 0,664$   $m$ . The formulation used was U-P, displacement for structure and pressure for the fluid.

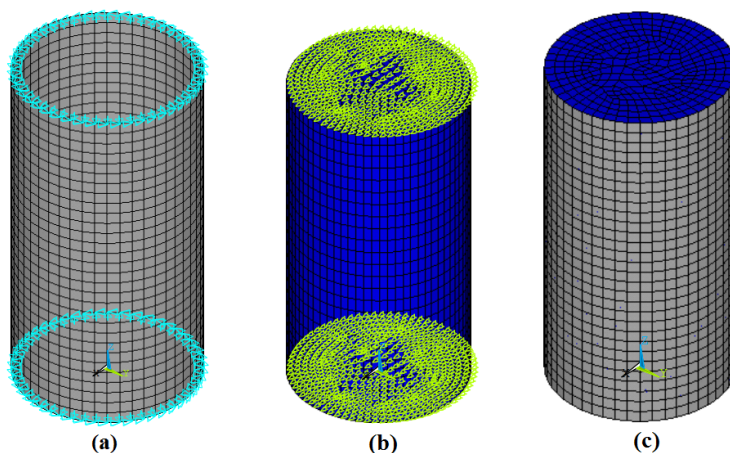


Figure 2: Numerical models: (a) Uncoupled shell; (b) Uncoupled fluid and (c) Fluid-Structure interaction.

### 4 | RESULTS

The analytical results were compared with the numerical results and are presented in Figure 3. The study was limited to a low-frequency range ( $m = 1$ ) and different numbers of circumferential waves.

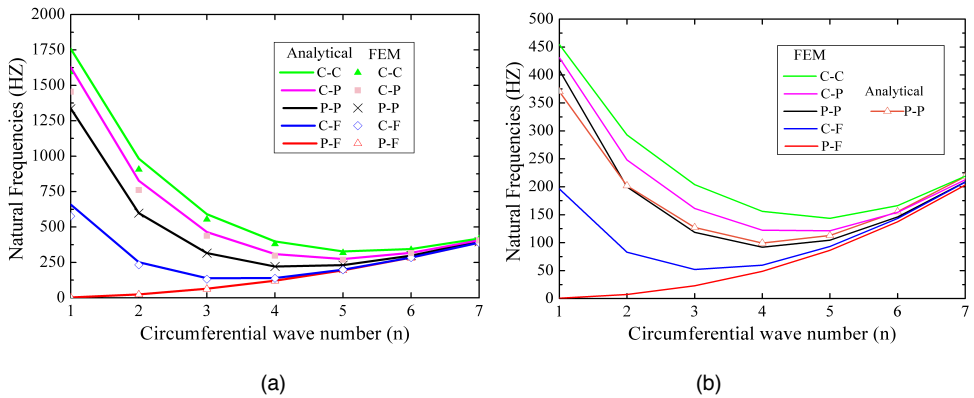
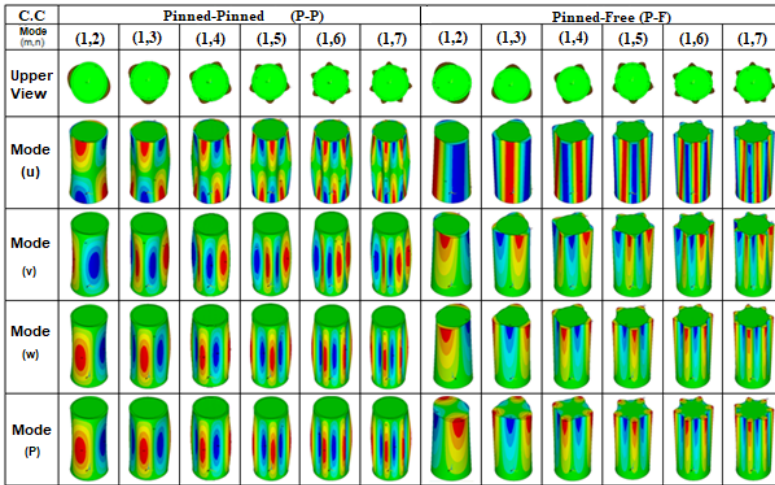


Figure 3: Natural frequencies of the mode shape  $m = 1$  for different boundary conditions for (a) uncoupled shell and (b) shell coupled with fluid: (P-P) pinned-pinned, (P-F) pinned-free, (C-C) clamped-clamped, (C-F) clamped-free and (C-P) clamped-pinned.

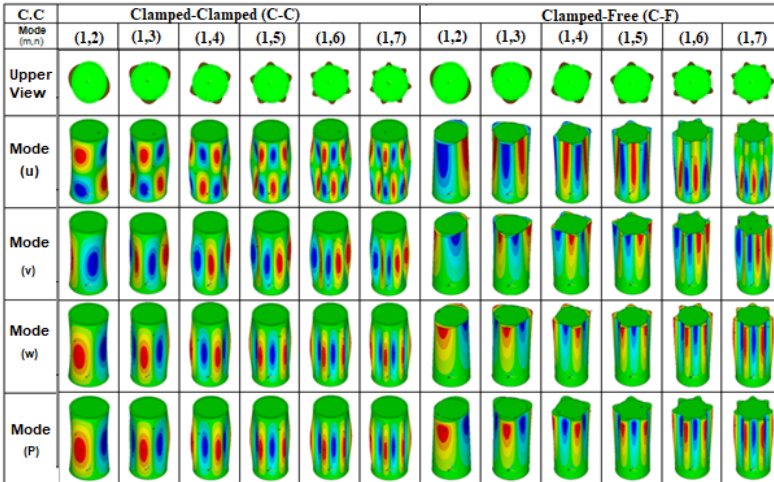
Based on Figure 3, it is possible to observe that the analytical and numerical results practically coincide, validating the analytical technique and numerical modeling in ANSYS®.

It is observed that the lower natural frequencies of the cylindrical shell do not necessarily occur for small values of  $n$ , both for the uncoupled shell and for the shell coupled with fluid, and also, as  $n$  increases, natural frequencies tend to be common values. Such a phenomenon is justified by the fact that when the shell vibrates in small circumferential modes the energy of membrane extensional deformation predominates in the total deformation energy of the system. However, as the number of modes  $n$  increases, the flexural deformation energy becomes predominant in the system.

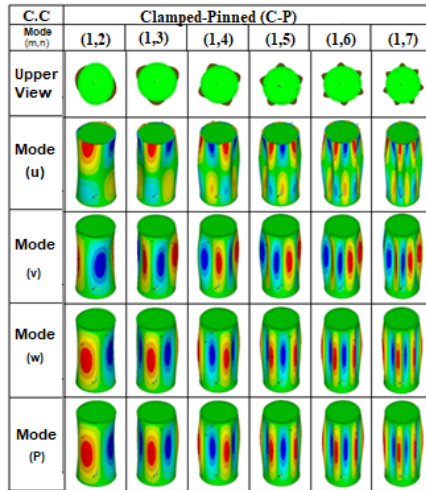
The vibration modes shapes of the structure in the axial ( $u$ ), circumferential ( $v$ ), radial ( $w$ ) direction and the coupled fluid pressure modes (P) for the different boundary conditions are presented.



Pinned-Pinned (P-P) and Pinned-Free (P-F)



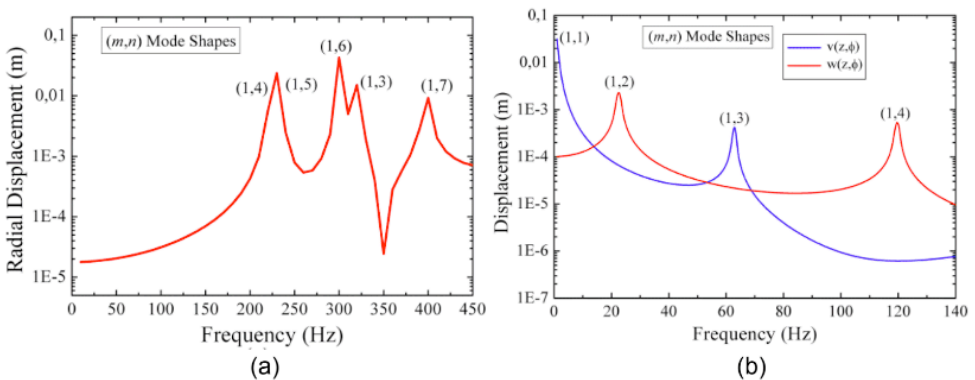
Clamped-Clamped (C-C) and Clamped-Free (C-F)

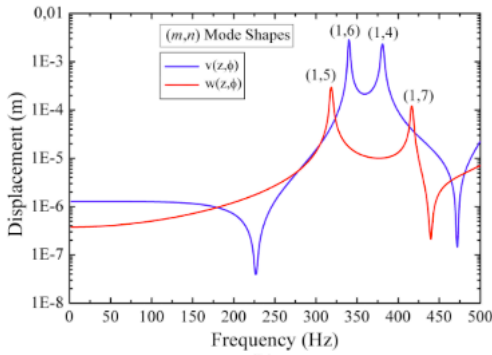


Clamped-Pinned (C-P)

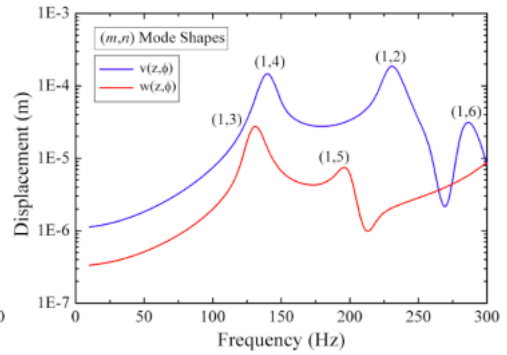
Figure 4: Modes shapes of the structure in the axial (u), circumferential (v), radial (w) direction and the coupled fluid pressure modes (P) for the different boundary conditions.

The presence of the fluid reduced the natural frequencies, showing that the mode of additional mass in which the structure predominates over the fluid is predominant during vibration. From the numerical modeling validated in the analysis in free vibrations, the harmonic point load was imposed on the cylindrical shell,  $P(z, \phi, t) = 100 \sin(\omega t)$ , in the radial direction, at the center of the cylindrical shell ( $z=L/2$ ) and for its angle  $\phi=0^\circ$ . The excitation frequency ( $\omega$ ) of the load was varied from 0 to 2500 rad/s and the damping ratio adopted was equal to two percent ( $\xi = 2\%$ ). Thus, it was possible to obtain the displacement amplitude curves as a function of this applied excitation frequency.

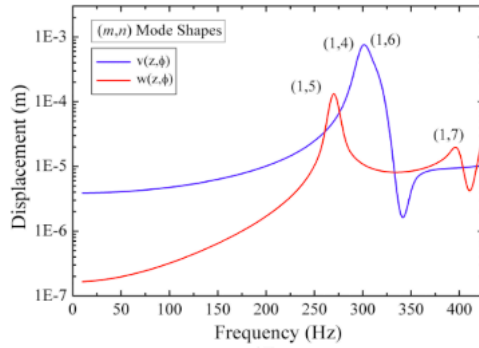




(c)

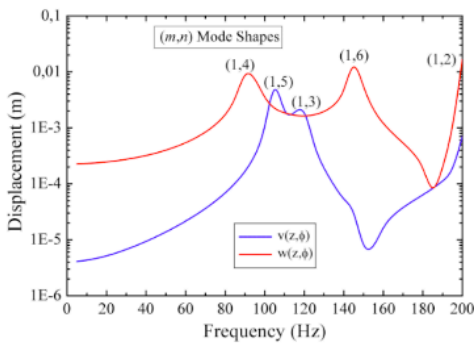


(d)

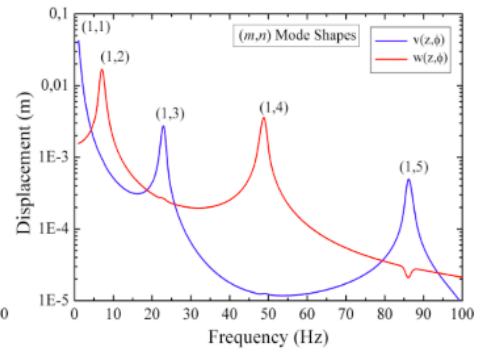


(e)

Figure 5: Frequency spectrum for a cylindrical shell uncoupled (empty) for position in  $z = L/2$  and  $\phi = 180^\circ$ : (a) pinned-pinned, (b) pinned-free, (c) clamped-clamped, (d) clamped-free e (e) clamped-pinned.



(a)



(b)

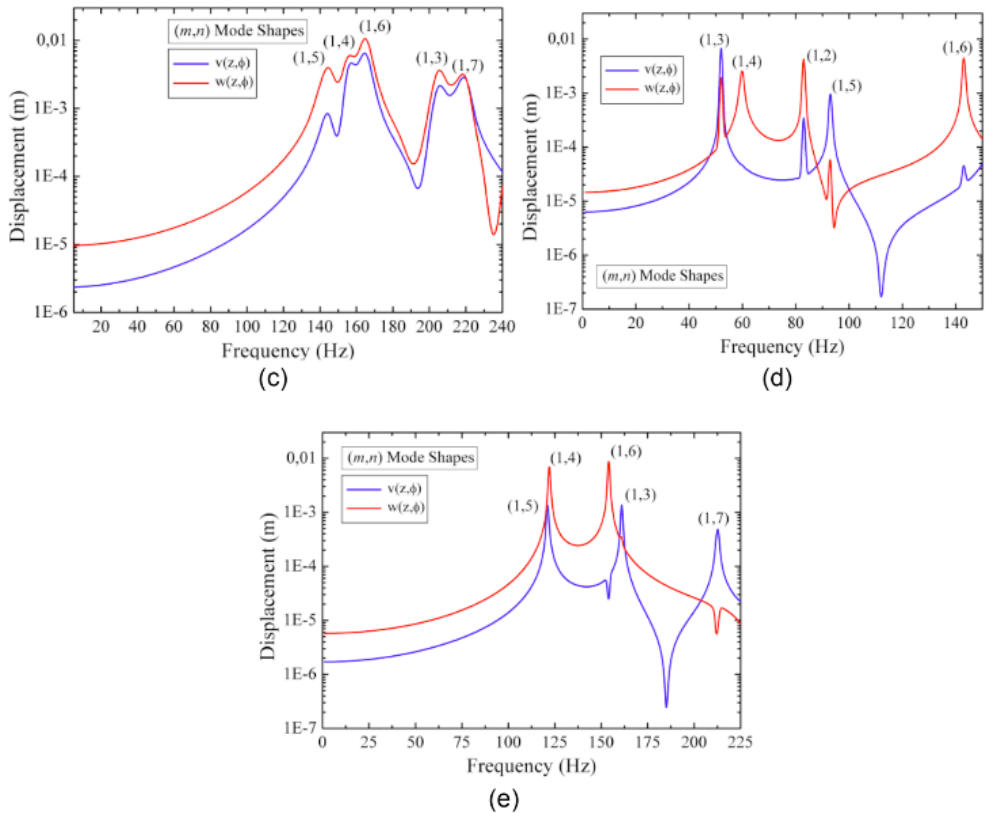


Figure 6: Frequency spectrum for a cylindrical shell coupled with fluid for position in for  $z = L / 2$  and  $\phi=180^\circ$ : (a) pinned-pinned, (b) pinned-free, (c) clamped-clamped, (d) clamped-free e (e) clamped-pinned.

Based on the frequency spectra shown, it can be concluded that the peaks of the curves with the displacement amplitudes occur at applied frequencies approximately equal to the first natural frequencies at which the shell is excited. This is observed for all boundary conditions, where the difference between the applied and the natural frequency did not exceed 3%. As can be analyzed, the largest amplitudes were identified both in the radial ( $w$ ) direction of the shell and in the circumferential direction, showing that for forced vibrations the circumferential displacement becomes important in the analysis.

## 5 I CONCLUSIONS

In this work the free vibrations were studied for cylindrical reservoir empty and filled with an inviscid and incompressible liquid. With the numerical modeling, it was possible to analyze the effect of the fluid-structure coupling through the identification of the dominant modes of the system. This fact was fundamental to observe that even having influence in the dynamic behavior, the different boundary conditions produce typical characteristic



modes of the structure.

In general, both for the uncoupled and coupled fluid-structure problem it can be concluded that the boundary conditions with one or both free edges cause the lower frequencies, i.e. it is clear that a reduction of system rigidity occurs and consequently a decrease in natural frequencies. By imposing the harmonic point load on the uncoupled and coupled cylindrical shell, it was possible to show the way of obtaining the operational modes, since the analytical treatment in these situations is more complex.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the University of Brasília (UNB) and the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES) for the resources received.

## REFERENCES

Blevins, R. D., (1979). **Formulas for Natural Frequency and Mode Shape**. First Edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York, United States.

Brush, D. O.; Almroth, B. O.; (1975). **Buckling of Bars, Plates, and Shells**. New York: McGraw-Hill. 379 p.

Flugge, W., (1934). **Statik und Dynamic der Schalen**. Berlin, Julius Springer.

França Jr, D. O., Pedroso, L. J. & Mendes, N. B., (2017). **Estudo de Vibrações Livres Desacopladas e Acopladas Fluido-Estrutura em Cascas Cilíndricas para Diferentes Condições de Contorno**. CILAMCE 2018 – XXXVIII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Florianópolis, SC, Brasil, 20 p.

França Jr, D. O., Ribeiro, P. M. & Pedroso, L. J. (2019). **Simplified expressions for dynamic behavior of cylindrical shells uncoupled and coupled with liquids**. In: Latin American Journal of Solids and Structures. Vol. 16, Nº 6. //doi.org/10.1590/1679-78255546.

França Junior, D. O. (2018). **Estudo analítico-numérico em vibrações livres fluido-elásticas em cascas cilíndricas para diferentes condições de contorno**. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Publicação E.DM-003A/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 128p.

Kurylov Y. & Amabili M. (2010). **Polynomial versus trigonometric expansions for non linear vibrations of circular cylindrical shells with diferente boundary conditions**. In: Journal Sound and Vibration; 329 (9): 1435–49.

Li, H; Luo, H.; Wei S. & Wen B.; (2018). **The Influence of Elastic Boundary on Modal Parameters of Thin Cylindrical Shell**. International Journal of Acoustics and Vibration, Vol. 23, pp. 93–105.

Lindholm, U. S., Kana, D. D. & Abramson, H. N. (1962). **Breathing vibrations of a circular cylindrical shell with an internal liquid**. In: Journal Aerospace Science. 29, 1052-1059.

Ma X., Jin G., Xiong Y. & Liu Z. (2014). **Free and forced vibration analysis of coupled conical-cylindrical shells with arbitrary boundary conditions**. International Journal Mechanical Sciences; 88:122–37.

Mendes, N. B., Pedroso, L. J. & Ribeiro, P. M. V., (2014). **Um estudo de vibrações livres acopladas em cascas cilíndricas com anéis enrijecedores e contendo fluido**. CILAMCE 2014 – XXXV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Fortaleza, CE, Brasil, 19 p.

Qu Y.; Hua H. & Meng G.; (2013). **A domain decomposition approach for vibration analysis of isotropic and composite cylindrical shells with arbitrary boundaries**. In: Journal Composite Structures. 95 (2013) pp. 307-321.

Tang D., Yao X., Wu G. & Peng Y. (2017). **Free and forced vibration analysis of multi-stepped circular cylindrical shells with arbitrary boundary conditions by the method of reverberation-ray matrix**. In: Journal Thin-Walled Structures. 116 (2017) 154-168.

## **SOBRE O ORGANIZADOR**

**ERNANE ROSA MARTINS** - Doutor em Ciência da Informação com ênfase em Sistemas, Tecnologias e Gestão da Informação, na Universidade Fernando Pessoa, em Porto/Portugal, reconhecido como equivalente ao curso de Doutorado em Ciência da Informação, da UnB. Professor de Informática do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG). Pesquisador do Núcleo de Inovação, Tecnologia e Educação (NITE), certificado pelo IFG no CNPq. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1543-1108>.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Algoritmo 9, 59, 60, 62, 63, 64, 65, 66, 127, 172, 211, 320, 323, 324, 343, 350, 355, 370

Algoritmos de seleção 9, 342, 343, 347, 348, 353

ANSYS 9, 172, 173, 176, 177, 178, 180, 181, 204, 208, 266, 267, 272, 273, 399, 401

Aplicativo 9, 16, 65, 88, 89, 90, 92, 93, 273, 366, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 381, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395

Aprendizado 9, 59, 60, 63, 64, 65, 66, 87, 230, 232, 233, 235, 240, 242, 244, 281, 290

Artificial Intelligence 16, 60, 354, 355

### B

Blender 231, 236, 237

### C

Classificação 9, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 384

Computational Vision 355, 356

Comunicação 9, 85, 94, 95, 194, 230, 231, 232, 242, 243, 281, 283, 286, 304, 306, 307, 367, 384, 395

Coronavírus 59, 60, 65

Covid-19 11, 59, 60, 62, 65

### D

Desempenho 9, 12, 11, 12, 13, 14, 19, 23, 62, 67, 113, 114, 173, 186, 257, 267, 310, 342, 343, 345, 346, 350, 352, 353, 354, 367, 370, 373, 374, 389

Diagnóstico 15, 127, 313, 314, 316, 317, 318, 328, 329, 371

Diagramas 115, 283, 284, 371, 372

Dispositivo Móvel 10, 16, 366, 368, 370, 371

### E

Educação 24, 85, 86, 87, 88, 93, 94, 230, 232, 233, 235, 240, 241, 242, 243, 244, 279, 292, 303, 313, 342, 351, 353, 354, 369, 410

Enem 16, 342, 343, 344, 345, 347, 348, 350, 351, 353, 354

Energia Elétrica 9, 113, 114, 116, 126, 245, 257, 314

Ensino 9, 12, 14, 85, 86, 87, 89, 90, 92, 93, 95, 230, 231, 232, 233, 235, 236, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 281, 292, 342, 343, 351, 352, 353, 354

Equações 11, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 22, 24, 25, 26, 27, 29, 33, 34, 37, 95, 399

Estruturação de dados 194

## F

Finite Differences 38, 156, 157, 158, 159, 160, 162, 163, 165, 169, 170, 171

Fracture Mechanics 332, 334, 341

## G

Genetic Algorithm 128, 129, 130, 132, 133, 136, 137, 172, 180

Geração Fotovoltaica 12, 113, 115, 124, 125

## I

Image Processing 128, 130, 136, 356, 364

Indústria 4.0 9, 15, 303, 304, 305, 306, 308, 309, 310, 312

Informação 9, 37, 85, 86, 92, 94, 188, 195, 196, 230, 231, 232, 233, 242, 243, 280, 281, 282, 283, 304, 308, 319, 351, 366, 367, 368, 371, 395, 396, 410

Inteligência Artificial 11, 59, 304, 307, 308, 355, 356

Interface 51, 144, 146, 150, 152, 232, 235, 236, 239, 283, 284, 286, 332, 333, 334, 341, 369, 372, 376, 384, 385, 386, 397

Interpolation 13, 1, 4, 101, 102, 103, 178, 210, 215, 216, 217, 218, 221, 227

## L

Labyrinth Seals 13, 172, 174, 176, 179, 181, 182

## M

Máscara 9, 11, 59, 61, 62, 63, 64, 65, 66

MASK R-CNN 9, 355, 356, 359, 360, 361, 362, 364, 365

Method 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 38, 44, 55, 57, 67, 68, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 82, 83, 107, 112, 128, 129, 130, 131, 136, 141, 145, 156, 157, 158, 163, 169, 170, 171, 174, 175, 177, 178, 180, 181, 198, 199, 208, 210, 211, 215, 216, 217, 226, 227, 228, 229, 258, 259, 260, 264, 313, 336, 357, 399, 401, 409

Metodologias Ativas 231, 232, 244

Mineração de dados 343, 344, 345, 354

M-Learning 9, 12, 85, 86, 87, 88, 89, 92, 93, 94

Modelagem 17, 18, 211, 236, 237, 271, 284, 312, 371, 372, 374, 375

Modelo distribuído 9, 11, 11, 14, 22

Modelo Numérico 259, 271

Monitoramento 9, 10, 12, 60, 66, 113, 114, 115, 116, 118, 120, 122, 124, 125, 246, 248, 253, 279, 280, 283, 285, 290, 313, 314, 328, 366, 367, 368, 395

Motor de Indução 15, 313, 314, 316, 318, 319, 321

## **P**

Probabilidade 24, 31, 32, 34, 185, 332, 375

Protótipo 9, 234, 240, 241, 242, 283, 285, 286, 289, 366, 368, 371, 372, 374, 394

Pulsed compression reactor 172, 173, 175, 181, 182

## **R**

Realidade Virtual 9, 14, 94, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 239, 240, 241, 242, 243, 244

Rectilinear grids 13, 210, 212, 218, 227

Redes Neurais Artificiais 60, 62, 355, 364

RFID 15, 279, 280, 282, 283, 285, 286, 287, 288, 290, 291

## **S**

Setup 13, 138, 139, 140, 146, 147, 148, 149, 150, 152, 153, 154, 155

Sistema 9, 12, 14, 15, 11, 15, 18, 64, 88, 90, 91, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 120, 123, 124, 125, 126, 172, 184, 185, 186, 194, 195, 196, 231, 233, 234, 245, 246, 247, 248, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 272, 279, 280, 283, 284, 285, 286, 287, 289, 290, 291, 292, 293, 297, 299, 300, 306, 307, 312, 356, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 374, 375, 376, 381, 382, 384, 385, 386

Sistema de controle 194, 290

Sistema Estrutural 272, 292, 293, 297, 299, 300

Smartphone 90, 91, 94, 376

Sociedade 5.0 9, 15, 303, 304, 305, 306, 308, 309, 310

Sociedade Criativa 303, 304, 306, 308, 309

Software 9, 28, 67, 74, 137, 138, 139, 156, 157, 163, 176, 177, 200, 209, 231, 236, 266, 267, 282, 284, 287, 291, 292, 293, 298, 321, 323, 324, 325, 328, 344, 347, 371, 372, 375, 376, 386, 396, 397, 398, 399, 401

## **T**

Tecnologia 9, 24, 85, 86, 87, 91, 93, 94, 114, 230, 231, 232, 239, 240, 241, 242, 244, 267, 279, 280, 281, 282, 283, 290, 292, 301, 302, 304, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 313, 332, 342, 366, 367, 368, 396, 410

TICs na Educação 85, 93

Torpedo anchors 138, 139, 140, 148, 150, 152, 155

Transformação Digital 9, 15, 303, 304, 305, 307, 308, 309, 310, 311

## **U**

Uncertainty Quantification 15, 332, 336, 341

Usabilidade 9, 234, 366, 368, 372, 374, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393,

394, 395, 396, 397, 398

## **V**

Virtual 9, 12, 14, 85, 86, 87, 88, 89, 93, 94, 100, 101, 209, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 309, 402

Virtual Reality 9, 12, 85, 86, 87, 88, 231, 243, 244

## **W**

Web 10, 35, 279, 280, 283, 286, 287, 290, 304, 344, 386, 396

COLEÇÃO

# DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

## ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO 2





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



COLEÇÃO

# DESAFIOS DAS ENGENHARIAS:

## ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO 2

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