



II SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

COLETÂNEA DE ARTIGOS

2018



EDITORA POISSON

Raíssa Alves Queiroga
Kaline Ventura Batista
(Organizadoras)

II Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de Campina
Grande: Coletânea de artigos

1ª Edição

Belo Horizonte
Poisson
2019

Editor Chefe: Dr. Darly Fernando Andrade

Conselho Editorial

Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais

Ms. Davilson Eduardo Andrade

Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia

Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC

Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy

Ms. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S612

**II Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Campina Grande: coletânea de artigos /
Organização Raíssa Alves Queiroga, Kaline
Ventura Batista - Editora Poisson - Belo
Horizonte - MG : Poisson, 2019**

130p

Formato: PDF

ISBN: 978-85-7042-048-0

DOI: 10.5935/978-85-7042-048-0

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

1. Engenharia 2. Engenharia Mecânica.

I. Título

CDD-620

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

www.poisson.com.br

contato@poisson.com.br

II Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande

Realização

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFCG/CCT

Organizadoras do livro

Raíssa Alves Queiroga
Kaline Ventura Batista

Comitê Organizador SiPGEM 2018

Eng. Petróleo - Raíssa Alves Queiroga – (Presidente)
Eng. Mecânica - Kaline Ventura Batista – (Vice-Presidente)
Eng. Mecânico - Marcélio Ronnie Dantas de Sá – (Secretário)
Eng. Mecânico - João Manoel de Oliveira Neto – (Secretário)
Eng. Mecânica - Aline Michelly do Nascimento – (Tesoureira)
Eng. Mecânico - Armando Wilmans Nunes da Fonseca Júnior – (Colaborador)
Eng. Mecânico - Felipe Silva Lima – (Colaborador)
Eng. Mecânico - Renan Di Pace Arruda – (Colaborador)

Comitê Científico SiPGEM 2018

Prof. Dr. Antônio Almeida Silva – UAEM
Prof. Dr. Celso Rosendo Bezerra Filho – UAEM
Prof. Dr. Renato Alexandre Costa de Santana – UABQ
Prof. Dr. Walman Benício de Castro – UAEM
Prof. Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior – UAEM
Eng. Mecânico Me. Armando Wilmans Nunes da Fonseca Júnior
Eng. Mecânico Me. Carlos Eduardo da Silva Albuquerque
Eng. Mecânico Me. José Jorge da Silva Júnior
Eng. Mecânico Me. José Ricardo Ferreira Oliveira
Eng. Mecânico Me. Paulo César Sales da Silva

APRESENTAÇÃO

Este livro foi concebido a partir de uma série de trabalhos que foram apresentados no II SiPGEM - Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - a partir de pesquisas em desenvolvimento nos laboratórios da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande (UAEM/UFCG). A proposta de melhorar a visibilidade e inserção social do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica teve sua primeira edição em 2017, por iniciativa dos alunos de mestrado que se dedicaram, contribuíram e evoluíram para essa nova formatação, que nesse ano adotou a temática “expandindo o horizonte do jovem engenheiro”. É destinado a ser um evento científico para a comunicação e divulgação da comunidade acadêmica local e regional e pretende envolver os discentes e docentes dos cursos de Graduação e Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFCG e de outras IES parceiras.

Tem como objetivos fomentar a integração entre alunos, a interdisciplinaridade, a divulgação dos resultados das pesquisas realizadas no âmbito das linhas de pesquisas em andamento na UFCG e colaborar na formação do pesquisador em aspectos relacionados à formação de recursos humanos de alto nível. Na sua programação inclui palestras, minicursos e seções técnicas com artigos científicos, bem como a participação de alunos de graduação, por meio das equipes de projetos de extensão (Grupos PET, ParahyBaja, Labem, Parahyasas e Scuderia), através de Stands com protótipos e painéis para divulgar os vários trabalhos em desenvolvimento na Engenharia Mecânica. Também conta com a participação de especialistas e profissionais da indústria em outras áreas trazendo novidades em temas relevantes e atuais visando motivar os alunos para a sua formação nesse ambiente acadêmico. Como parte dessa jornada tem-se buscado apoios em empresas locais e órgãos de fomento e divulgação visando aumentar o seu alcance e contribuir de maneira formal com os principais temas de pesquisa em andamento envolvendo aspectos teóricos (métodos computacionais e analíticos) e experimentais (pesquisas em laboratórios e trabalhos de campo), visando a expansão do conhecimento e potencial de aplicação de novas ferramentas com interesses compartilhados pela indústria, fortalecendo, sempre que possível, a interação da universidade com o setor produtivo.

Enfim agradecemos à UAEM/UFCG e a Editora Poisson que se propôs publicar os resultados desse evento na forma de capítulos de livro, além das agências que fomentam as pesquisas (CNPq, CAPES, Fapesq-PB), às empresas parceiras e a todos os alunos de graduação e pós-graduação envolvidos, especialmente a equipe da comissão organizadora, nesse ano representada pelas alunas Raissa Alves Queiroga e Kaline Ventura Batista, pelo empenho e dedicação na formatação do livro.

Antonio Almeida Silva

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFCG/CCT

Sumário

Capítulo 1: Mineração de criptomoedas utilizando energias renováveis.....	8
Agripino Pereira da Silva Filho, Heleno da Costa Neto, Maria Aparecida Souza de Andrade, Talles Caio Linhares de Oliveira	
Capítulo 2: Análise numérica de protótipo de ponte estaiada com elementos com memória de forma superelásticos em vibração forçada	19
Armando Wilmans Nunes da Fonseca Júnior, Marcelo Ronnie Dantas de Sá, Rômulo Pierre Batista dos Reis, Antonio Almeida Silva	
Capítulo 3: Influência dos elementos Berílio, Titânio e Boro na dureza de ligas do sistema Cu-Al passíveis do efeito memória de forma	31
Carlos Cássio de Alcântara, Lucas Daniel Martins Fernandes, José Joelson de Melo Santiago	
Capítulo 4: Análise numérica de uma prancha de skate fabricado em compósito estrutural submetida a esforços transversais	38
Álvaro Barbosa Rocha, Armando Wilmans Nunes da Fonseca Júnior, Felipe Silva Lima, Wanderley Ferreira de Amorim Júnior	
Capítulo 5: Caracterização microestrutural e mecânica de uma liga memória de forma do sistema Cu-Al-Mn	49
Carlos Cássio de Alcântara, Jéssica Menezes Alves, José Joelson de Melo Santiago	
Capítulo 6: Análise experimental quanto aos efeitos da dilatação térmica na gasolina automotiva e no etanol hidratado	58
João Manoel de Oliveira Neto, Marcelo Bezerra Grilo	
Capítulo 7: Análise numérica da influência da profundidade de operação no coeficiente de arrasto do casco de um veículo autônomo submarino.....	63
João Victor Nunes de Sousa, Antonio Gilson Barbosa de Lima	
Capítulo 8: Detecção dos danos de impacto em materiais compósitos via Termografia Infravermelha	74
Kaline Ventura Batista, Renan Di Pace Arruda, Gustavo Lima do Nascimento, Wanderley Ferreira de Amorim Júnior, Juscelino de Farias Maribondo	

Sumário

Capítulo 9: Simulação de um dispositivo giroscópio absorvedor do tremor da Doença de Parkinson 87

Marcelio Ronnie Dantas de Sá, Armando Wilmans Nunes da Fonseca Júnior, Aline Michelly do Nascimento, Antonio Almeida Silva

Capítulo 10: Revestimentos metálicos obtidos por eletrodeposição: Uma revisão da literatura 99

Raíssa Alves Queiroga, Mikarla Baía de Sousa, Josiane Dantas Costa, Arthur Figueira de Almeida, Renato Alexandre Costa de Santana

Capítulo 11: Estudo de caracterização mecânica em materiais processados através de modelagem por fusão e deposição (FDM)..... 111

Ramon Sales de Araújo Batista, Carlos José de Araújo

Capítulo 12: Simulação numérica do processo de separação gás/ óleo empregado em um vaso separador 121

Tuana Maria de Medeiros Costa, Endyara de Moraes Cabral, Severino Rodrigues de Farias Neto

Capítulo 1

MINERAÇÃO DE CRIPTOMOEDAS UTILIZANDO ENERGIAS RENOVÁVEIS

Agripino Pereira da Silva Filho

Heleno da Costa Neto

Maria Aparecida Souza de Andrade

Talles Caio Linhares de Oliveira.

Resumo: O cenário mundial ultimamente tem se inclinado para o desenvolvimento de tecnologias limpas e sustentáveis, com isso essas novas tecnologias requerem cuidados especiais para entrar com força total no mercado. A mineração de criptomoedas é uma prática muito comum em todo o mundo, porém no Brasil, devido às altas taxas cobradas das concessionárias de abastecimento de energia elétrica, não é viável. A partir disso, foi desenvolvido projeto para utilizar energia elétrica através de placas solares que conseguem suprir a necessidade de fornecimento de energia no processo de mineração. Esta pesquisa está dividida em duas partes principais. A primeira parte abrange todo um estudo teórico e comparativo e a segunda parte traz um levantamento dos equipamentos utilizados para o uso de energia sustentável e mineração e seus respectivos valores, indicando se o projeto é viável ou não. Após todos os cálculos realizados foi identificado que, aqui no Brasil, a prática de mineração de criptomoedas mostrou-se ser viável apenas com a utilização de um meio de energia sustentável, que no presente trabalho foi a energia solar.

Palavras-Chave: Energias renováveis. Criptomoedas. Mineração. Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

As preocupações com novas tecnologias e aplicações estão presentes em praticamente todos os segmentos, principalmente no setor industrial. Crescentemente o homem foi desenvolvendo máquinas de acordo com suas necessidades e aumentando suas capacidades industriais. Assim, o ritmo de crescimento populacional cresceu e em paralelo a isso o consumo de energia, ignorando o cuidado com recursos e consequências futuras. Há pouco tempo, os benefícios que a tecnologia vinha proporcionando como praticidade, conforto, redução de custos, aumento na produtividade etc., era até então as justificativas para realizar qualquer ação na engenharia e produção. Muito pouco se falava nos danos e impactos que poderiam ocorrer no meio ambiente e suas consequências irreversíveis (GOLDEMBERG, 2007).

Portanto, a forma com que a energia vem sendo produzida e consumida é discordante com o desenvolvimento sustentável. Exemplo disso, são as dimensões que as criptomoedas vem crescendo, e há a necessidade de máquinas com hardwares potentes e estão diretamente ligadas ao consumo excessivo de energia, pois a máquina necessita estar sempre ligada para ser realizada a mineração. Assim foi notado que a mineração de criptomoedas consome mais energia do que alguns pequenos e médios países. Com essa postura, também crescem as preocupações com o impacto ambiental, que além da eletricidade, encadeia-se os materiais para sua geração, já que os combustíveis fósseis são hoje seu principal fornecedor de energia elétrica (MORAIS, 2008).

Adjunto ao grande consumo de energia elétrica, está o segmento financeiro, pois no Brasil as taxas de energia são uma das mais caras no mundo, principalmente no quesito impostos, sem mencionar que as estiagens de chuvas baixam o nível dos reservatórios nas hidrelétricas que é o principal meio de geração de energia no país, e é necessário utilizar as termoelétricas, que é um meio caro e altamente poluente, alterando as tarifas com bandeira vermelha e elevando drasticamente o valor final das contas de energia.

Visto as carências encontradas é de fundamental importância à aplicação de energias sustentáveis para suprir este crescente consumo que não só estabiliza a

sua utilização, reduzirá as agressões ao meio ambiente e visam retornos financeiros a curtos prazos.

Deste modo, o projeto visa a utilização de energia solar para a mineração de criptomoedas, sendo realizados estudos de viabilidade de sua implementação e melhor localização. Um comparativo entre as cidades de Campina Grande, Paraíba, e Cidade do Leste, localizado no Paraguai. Identificando qual obterá menor prazo de retorno financeiro mediante as condições geográficas e climáticas qual será melhor localizada para a implementação da fazenda mineradora.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ENERGIAS SUSTENTÁVEIS

O cenário mundial tem se preocupado bastante com a questão de sustentabilidade, devido a essa preocupação tem se falado bastante em energias sustentáveis, fazendo com que as grandes indústrias se preocupem em adquirir selos de sustentabilidade, valorizando sua marca atraindo consumidores que aderem a utilização de energias limpas, algumas fontes de sustentabilidade podem estar entrelaçadas a produção de energias renováveis. Muitas fontes de energias são fornecidas pelo sol, uma parte é destinada para a irradiação solar que fornece calor, outra forma o vento, os potenciais hidráulicos dos rios (pela evaporação e condensação), as correntes marinhas e outras (GOLDEMBERG, 2007).

Todas as energias renováveis, como por exemplo, energias solares, eólicas, geotérmicas, biomassas e oceânicas são sustentáveis, pois são limpas, abundantes e estáveis. A grande maioria de países desenvolvidos já está buscando medidas para utilizar fontes alternativas de energia, cerca de 20% das carências mundiais de energia são provenientes de fontes renováveis. A energia sustentável entrou em cena principalmente para poder atender não só a demanda atual de energia, mas também fornecer opções para o futuro.

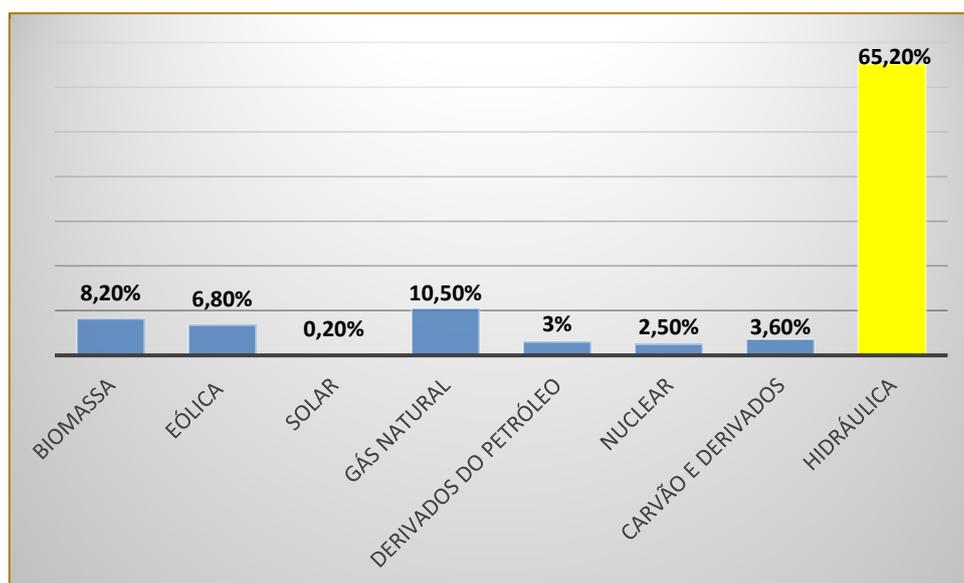
Energias solares tem se destacado bastante, pois é uma fonte interminável de energia, devido ao aquecimento global os níveis de irradiação solar tem aumentado gradativamente fazendo com que até os países com os mais baixos níveis de irradiação se tornem grandes produtores dessa tipo de energia. Um excelente exemplo

é a Alemanha que segundo: Bruno Pereira et al. (2017) tem um poder de irradiação 40% menor que o Brasil, entretanto é um dos países líderes em produção de energia solar, e vem sendo utilizado há cerca de 30 anos, indicando confiabilidade e durabilidade de geração.

A participação das fontes renováveis no Brasil vem aumentando gradualmente, porém sua diversidade ainda é baixa com pode ser notado na Figura 1. Pois, a questão

fundamental para o utilização das energias renováveis é a diminuição da liberação de gases responsáveis pelo efeito estufa. Assim, as energias renováveis ainda tem um custo elevado comparado com as fontes convencionais, mas as taxas sobre a poluição provenientes do combustíveis fósseis criaram um nível de preços onde ambas seriam competitivas. Porém, a hidráulica se sobressai como principal fonte de fornecimento energético (EPE, 2017).

Figura 1. Estrutura da oferta interna de energia elétrica no Brasil.



Fonte: adaptado EPE (2017).

2.2 CRIPTOMOEDAS

As criptomoedas têm chamando bastante atenção por vir utilizando as criptografias em controle das maiores transações mundiais, para a criação de novas moedas digitais. Assim, as criptomoedas usam a criptografia encravada em alguns algoritmos proporcionando a formação de novas moedas. Onde, o sistema utilizado é basicamente composto por duas chaves, uma pública e outra privada, na qual a privada é apenas do dono e se essa chave for roubada ou perdida não poderá ser resgatado um dos prejuízos da moeda. Pois, não existe um órgão regulador e conseqüentemente com quem reclame a respeito de fraudes e roubos. Já o ponto positivo é total anonimato do usuário (MOIA, 2014).

Uma das mais conhecidas é a criptomoeda bitcoin que foi desenvolvida em 2008 por um programador chamado Satoshi Nakamoto, o

modelo original foi o meio termo de criptografia e bancos de dados espalhados e distribuídos por pontos de redes P2P registrando as transações e utilizando funções básicas de segurança, para se certificar que os bitcoins só serão gastos pelo próprio dono eliminando gastos duplicados (SILVA e CRUZ, 2014).

Bitcoin tem seu funcionamento com a rede de pagamentos peer-to-peer e a moeda virtual, onde opera basicamente como dinheiro online, não dependendo se quer de alguma autoridade central, um dos principais atrativos do bitcoin fazendo do mesmo um dos pioneiros sistemas de pagamento global completamente descentralizado. Portanto, a criptomoeda bitcoin utiliza o sistema de criptografia de chave privada e pública para registrar as efetuações de transações realizadas pelo usuário, desta forma as transações que ocorrerem ficam registradas em um gigante banco de dados da rede da

criptomoeda denominado de blockchain (SILVA e CRUZ, 2014).

As criptomoedas ou moedas digitais sem dúvidas são uma das tecnologias mais inovadoras e complexas abrangendo tanto usuários leigos até profissionais na área da informática, e por envolver várias áreas de diferentes conhecimentos humanos, porém já é notório que esta tecnologia vem conquistando cada vez mais seu espaço e permanecerá no mercado.

2.3 MINERAÇÃO

As maiorias das moedas aderirão ao design do bitcoin, já que é o modelo de criptomoeda mais antigo. E para adquirir bitcoin, por exemplo, é utilizado o método de minerar bitcoin, ou seja, é utilizado um programa de computador gratuito ao qual coordena a mineração executada por meio do hardware de um computador aos quais computadores no mundo inteiro realizam complexos estorvos matemáticos.

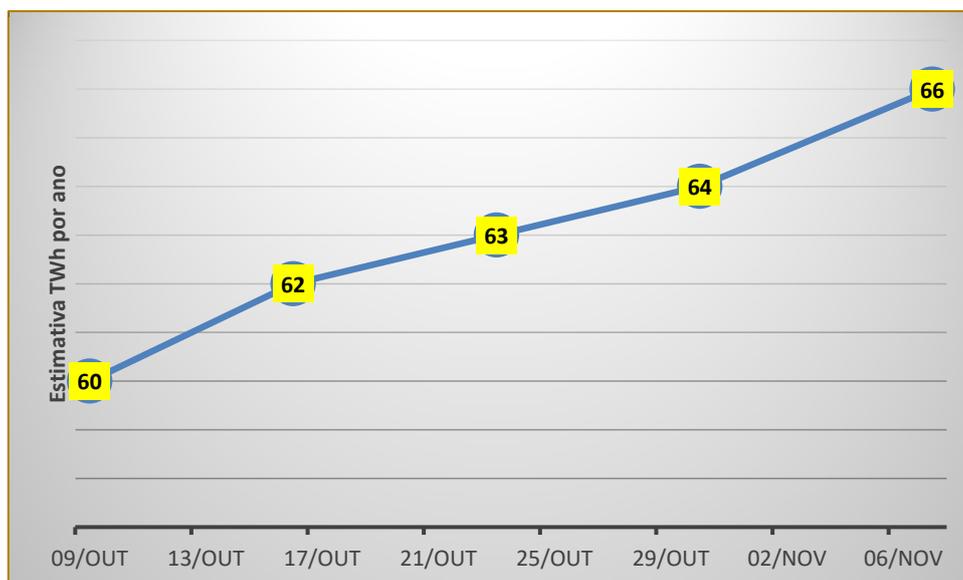
É utilizado o termo minerar, pois descreve perfeitamente o que ocorre no processo. A mineração funciona com a seguinte configuração, ao iniciar o programa de mineração das criptomoedas à rede inicia a utilização dos hardwares dos usuários e os utiliza para realizar funções matemáticas complexas, assim, o usuário contribuirá com cada problema resolvido com a rede aumentando a chance de adquirir bitcoins

como retribuição, dependendo diretamente da máquina utilizada e que quanto melhor e mais rápida a capacidade de processamento do equipamento melhores as chances de se receber bitcoins (PIRES, 2017).

Com a popularidade da mineração para se obter bitcoins tornou-se algo muito competitivo e complicado, pois cresceu consideravelmente o número de usuários minerando e a rede de criptomoedas começou a dificultar a quantidade de geração de moedas para não ter um aumento da inflação da moeda, e um dos pontos que faz a moeda tenha grande valor é sua escassez e a dificuldade em obtê-la. E pensando-se nisso foram criadas máquinas especialmente para executar a mineração bitcoin, um exemplo disso é o minerador Bitmain Antminer S9i. Uma gigantesca e poderosa máquina criada exclusivamente com a finalidade de mineração de criptomoedas.

A grande desvantagem da mineração de criptomoedas é a necessidade de máquinas extremamente potentes ligadas ininterruptamente para realizar a mineração, consumindo excessivamente energia elétrica. Segundo o Bitcoin Energy Consumption, em novembro de 2017 toda rede de bitcoin usou 76 milhões de quilowatts-hora, um total descontrolado no consumo desenfreado de energia elétrica. Como pode ser visto na Figura 2, em apenas um mês.

Figura 2. Gráfico de índice de consumo de energia entre os meses de outubro e novembro de 2018.



Fonte: adaptado BitcoinEnergyConsumption.com

3 METODOLOGIA

Diante das definições, este estudo, baseia-se em tipos de pesquisas e trabalhos, que dividem-se aos critérios de fins e meios.

De modo que, os fins devem ser viáveis a partir de pesquisas para a melhor viabilidade de implementação de sistemas solares a fim de obter o melhor retorno financeiro e um curto espaço de tempo, aceitando ou rejeitando o projeto. Tanto quanto aos meios, em virtude de pesquisas bibliográficas para a utilização de dados retirados de, matérias de portais de órgãos regulamentadores, livros, revistas científicas, outras formas de fontes e um estudo de caso, realizando uma pesquisa detalhada sobre o sistema a ser implantado com análises técnicas e sua real viabilidade. A escolha da região se deu através das necessidades e condições favoráveis que o sistema de geração de energia requeria, no caso placas solares, que estão diretamente ligadas a intensidade de irradiação solar, e conseqüentemente, realizando um comparativo entre cidades do Brasil e Paraguai, devido as suas diferentes localizações, climas, intensidade solar e preços de tarifas energéticas.

No primeiro instante, foi escolhido o equipamento de mineração mais eficiente no mercado, para obter competitividade e valores de consumo reais. Em seguida, foram levantados dados referentes ao consumo de energia elétrica que o equipamento minerador atingiria no final do mês em kWh, a partir de sua potência real, para a zona rural de Campina Grande e a Cidade do Leste, no Paraguai, e seus respectivos valores pagos

pelo serviço de fornecimento do último ano da concessionária local.

Diante disto, foi realizado o dimensionamento da quantidade necessária de placas solares fotovoltaicas para suprir o fornecimento de energia elétrica no minerador, analisando aspectos comerciais e técnicos. A escolha do equipamento solar se deu pela melhor eficiência de geração, reduzindo a quantidade de placas e a facilidade de adquirir o produtos em ambas as situações.

Por fim, foram utilizados métodos e análises de viabilidade dos projetos para a melhor decisão de investir ou não no projeto e em qual das cidades há um real retorno e lucro após sua instalação.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 MINERADOR

Para ser ter uma viabilidade real, foi selecionado um dos equipamentos de mineração mais eficientes fabricado no mercado até o presente momento, o modelo da Bitmain Antminer S9i com fonte integrada, Figura 3. Onde seu desempenho é superior devido a sua versatilidade de minerar vários tipos de moedas, sua velocidade de processamento de 14 Teras hashrate por segundo, que aumenta a estimativa de adquirir a criptomoeda mais rapidamente, tem um consumo de energia melhorado em relação ao seu antecessor, de 850 W de potência real, e fornece a interface de conectividade com outras mineradoras multiplicando o poder de processamento.

Figura 3. Equipamento de mineração Bitmain Antminer S9i com fonte original.



Fonte: safemagazine.com.br/bitmain

3.1.2 PAINÉIS SOLARES

A energia solar fotovoltaica é obtida através do efeito fotovoltaico. Esse efeito se dá devido a alguns materiais semicondutores, a partir de incidência da luz solar onde os fótons da luz excitam os elétrons a saltar da camada de condução, que acontece em condições controladas que favorecem a criação de uma tensão e corrente elétrica. A irradiação proveniente do sol fornece energia necessária para que os elétrons saltem para a banda de condução, com esse movimento entre a lacuna e a banda de condução que a energia elétrica é gerada e armazenada pelos condutores da célula (PORTOLAN, 2009).

Para este projeto foi utilizado placas solares com um módulo solar fotovoltaico de 265 W

de potência nas condições padrão, com área externa do módulo de 1,64 m² e eficiência energética de 15,9. Da fabricante Seraphin Solar System, com certificado do INMETRO. Onde a partir de comparativos há uma grande variação de fatores como, eficiência, fabricante, local de fabricação, dimensões e entre outros.

3.2 PROCEDIMENTOS UTILIZADOS

Após ser selecionado os equipamentos principais e ideias no mercado, foi realizado o cálculo de consumo mensal de energia elétrica em kWh consumido pelo minerador.

Logo para encontrar o consumo mensal será utilizada a seguinte equação 1:

$$C = P * t * nd \quad (1)$$

Onde:

C = consumo mensal (kWh/mês);

P = potência real (W);

t = tempo de funcionamento do equipamento (h);

nd = número de dias utilizados.

Em seguida será necessário realizar o cálculo do valor mensal em reais com a tarifa energética de acordo com a região e

concessionaria utilizada. Como pode ser expressa na equação 2:

$$Gm = C * Tf \quad (2)$$

Onde:

Gm = Gasto mensal em reais;

C = consumo mensal (kWh/mês);

Tf = tarifa energética por kWh.

Portanto, após identificar quanto um equipamento consumira mensalmente em kWh/mês, é preciso o dimensionamento das placas solares que seriam necessárias para suprir a demanda de consumo do minerador. Porém, é preciso levar em consideração que o Brasil é um país de vasta extensão territorial e com diferentes regiões climáticas, assim como, o Paraguai tem suas divergências e inconformidades geográficas. Logo, alguns locais têm grande incidência de chuvas, outros já são mais áridos e possuem diferentes variações de temperatura, onde todos esses fenômenos influenciam

diretamente na geração de energia elétrica por meio da energia solar.

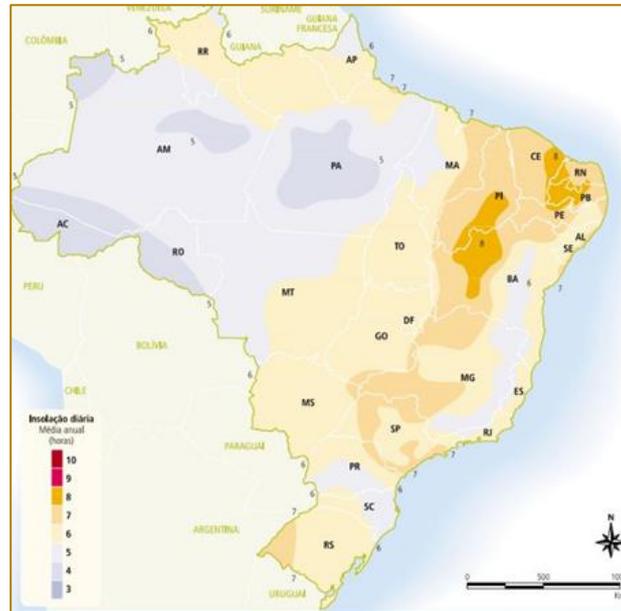
A partir disso, é indispensável a obtenção de dados com precisão e segurança de quantos painéis solares serão necessários para suprir corretamente a exigência do consumo do equipamento.

Foram realizadas estimativas de geração média que um módulo fotovoltaico, teria em ambas as regiões. Exemplo disto, em Campina Grande na região nordeste, como pode ser visto na Figura 4. Segundo parâmetros estabelecidos pelo Atlas do

potencial energético solar e eólico, o módulo solar fotovoltaico mais eficiente e utilizado tem potência de 265 W, sendo utilizado no nordeste, inclinado 20° e considerado as

perdas totais do sistema fotovoltaico, seja por aquecimento ou sujeira, em 20% da potência nominal.

Figura 4. Média anual de insolação diária no Brasil.



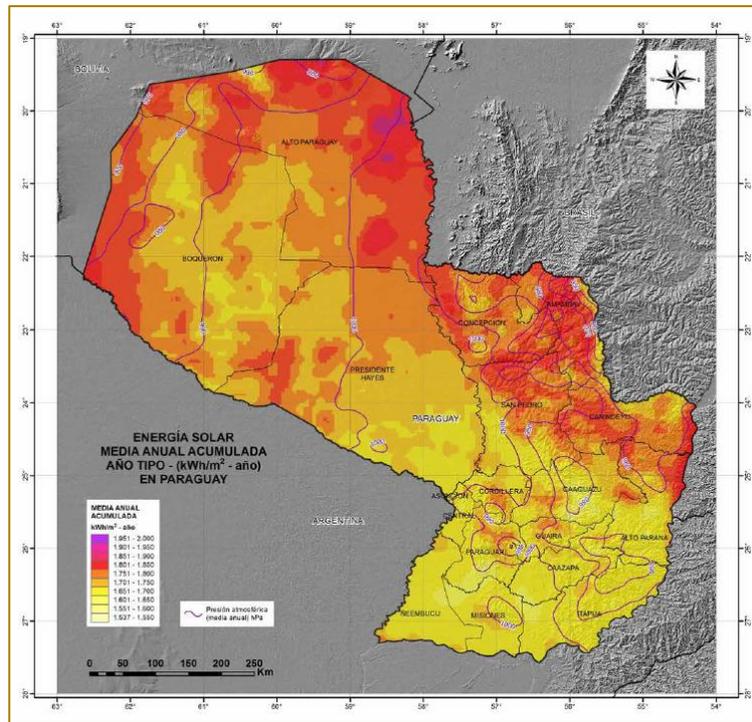
Fonte: ATLAS Solarimétrico do Brasil. Editora Universidade da UFPE, 2000.

Dessa maneira, na região nordeste, onde abrange a cidade Campina Grande no estado da Paraíba, tem-se em média, 4,93 horas diárias de irradiação útil à geração fotovoltaica.

Com tal característica, na Cidade do Leste no Paraguai, foi utilizada com base de informação e dados globais de irradiação solar gerados a partir de medições feitas

através de estações meteorológicas, Atlante do Governo de Canárias a Espanha, determinando potencial energético solar, onde um minuto de insolação é uma medida de energia recebida por metro quadrado por minuto, assim o valor de insolação em horas é aproximadamente 5,88 horas de irradiação útil. Como pode ser notado na Figura 5 (ATLAS, 2014).

Figura 5. Quantificação da energia solar média anual por unidade de superfície, em função da irradiação solar.

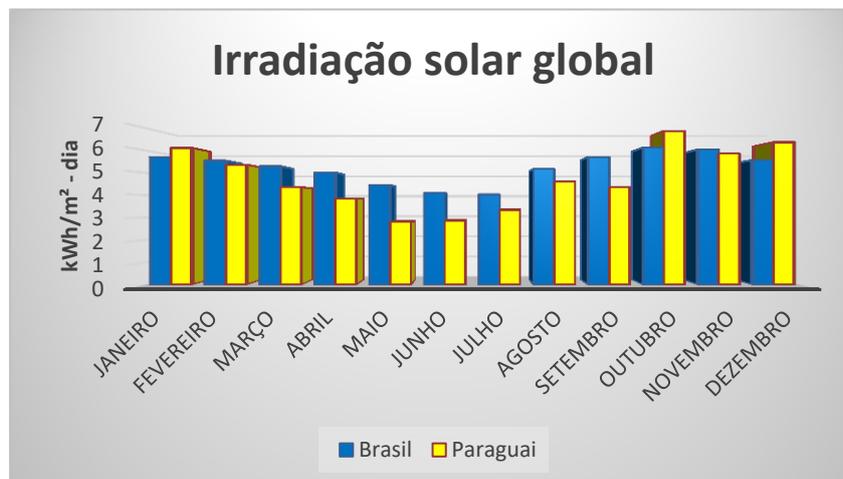


Fonte: simulação meteorológica meso-escala, (WRF-ARW) realizado em supercomputador Atlante do Governo de Canárias (Espanha). Com dados provenientes da National Center of Atmospheric Research dos Estados Unidos.

Após a observação isolada de irradiação solar média por ano em cada país, foi produzido um gráfico comparando ao longo dos meses o comportamento e as intensidades em cada época do ano, facilitando observar que por mais acentuados os picos de irradiação no

Paraguai, não se mantém uma constância. Ao inverso do Brasil, que o gráfico de irradiação se mantém o mais constante possível, o mais desejável em um sistema solar, como é observado na Figura 6.

Figura 6. Comparativo da irradiação solar entre Brasil e Paraguai.



Fonte: Dados extraídos do ATLAS do potencial energético solar – ITAIPU adaptado. 2014.

Portanto, considerando os parâmetros citados em ambas as situações, um módulo fotovoltaico com consequência da intensidade

de insolação diária útil, é definido quanto é gerado por dia a partir da Equação 3 a seguir:

$$E = P * t * \eta \quad (3)$$

Onde:

E = energia gerada;

P = Potência nas condições padrão (W);

t = tempo médio de radiação solar útil (h);

η = rendimento do módulo com perdas totais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CÁLCULO DE GASTOS MENSAIS DO CONSUMO DE ENERGIA

4.1.1 CÁLCULO DO CONSUMO MENSAL DE ENERGIA

O cálculo do consumo de energia, foi baseado no consumo mensal de uma unidade do minerador, modelo da Bitmain Antminer

S9j, A Tabela 1 mostra a relação entre o tempo de utilização do minerador e sua potência real.

Portanto, através da equação 1 o consumo mensal de um minerador utilizado diariamente, 24 horas por dia será de 612 kWh/mês.

Tabela 1: Dados do consumo mensal do minerador

Potência real (Watts)	850
Tempo de funcionamento (horas)	24
Número de dias	30

4.1.2 CÁLCULO DO VALOR MENSAL EM REAIS

O consumo mensal em reais será realizado a partir das tarifas energéticas de cada região, onde o minerador será utilizado, notando que na zona rural da cidade de Campina Grande, contará com duas tarifas energéticas, pois

nos últimos 4 meses do ano devido as estiagens será alterada para o adicional B vermelho, encarecendo seu valor final. A Tabela 2 mostra as diferentes taxas entre Campina Grande e Cidade do Leste.

Tabela 2: Valores tarifários de energia em Campina Grande e Cidade do Leste

Tarifas	Sem adicional	Com adicional B
Campina Grande (R\$/kWh)	0,34920	0,70356
Cidade do Leste(R\$/kWh)	0,2251	-

A partir dos dados coletados, utilizando a equação 2, teremos o gasto mensal na zona Rural de Campina Grande de R\$ 213,7104 nos oito primeiros meses e nos últimos 4 meses R\$ 430,58, assim adquira um gasto anual de R\$ 3.432,00. Consequentemente, na Cidade do Leste, no Paraguai, que possui

uma tarifa energética baixa, obtivemos um valor mensal de R\$ 139,7871, assim se o equipamento for instalado no Paraguai possuirá um gasto anual de R\$ 1677,4452. Aproximadamente a metade do valor encontrado no Brasil.

4.2 CÁLCULO DA ENERGIA GERADA

Como em ambas as regiões tem tempos médios de irradiação solar úteis diferentes,

altera diretamente na geração de energia. Na Tabela 3 fornece os dados necessários.

Tabela 3: Dados médios de irradiação solar útil

Cidades analisadas	Campina G.	C. Leste
Potência do módulo fotovoltaico (Watts) e rendimento com perdas (%)	250/80	250/80
Tempo médio de radiação solar (horas)	4,93	5,88

Deste modo, utilizando a equação 3, fornecera que a energia gerado em um dia na cidade de Campina grande é de 1,045 kWh/dia e gerada por mês será de 31,35 kWh/mês. Seguidamente, a mesma placa solar instalada na Cidade do Leste fornecera 1,2466 kWh/dia e gerada por mês será de 37,40 kWh/mês.

Por fim, visto que o equipamento minerador consome 612 kWh/mês, é utilizado uma regra de Três simples para saber aproximadamente quantos painéis solares são necessários para gerar e suprir o consumo elétrico do equipamento. Logo, o painel fotovoltaico instalado em Campina Grande seriam

necessários 20 módulos, e na Cidade do Leste seriam necessários 17 módulos.

4.2.1 CUSTO DE INSTALAÇÃO E EQUIPAMENTOS

Após adquirimos todos os valores necessários de instalação em um equipamento de mineração utilizando energia solar, será realizado os cálculos para uma fazenda de mineração com 20 mineradores de criptomoedas. A Tabela 4 fornece as quantidades que serão utilizadas e seus respectivos valores.

Tabela 4: Valores e quantidades necessárias de equipamentos para instalação

Equipamento	Quantidade (unid.)	Valor p/ unidade (R\$)	Valor Total(R\$)
Placas solares	400	650,00	260.000,00
Minerador	20	5.880,00	117.600,00

Com base em comparativos no setor de instalação, foi adquirido o valor da mão de obra e acessórios dos equipamentos cotados em média no valor de R\$ 60.000,00. Portanto, o custo total inicial com, os mineradores, placas solares e instalação foi de aproximadamente R\$ 437.600,00.

4.3 RECEITA EM CRIPTOMOEDAS

Os retornos financeiros não são necessariamente apenas com a obtenção das criptomoedas, e sim através da mineração. Exemplo disso, é a mineração da moeda Bitcoin. Atualmente, essa moeda escolhida consegue gerar aproximadamente 0.01966 Bitcoin por mês, utilizando o equipamento utilizado na pesquisa, convertendo fornecera aproximadamente R\$ 552,37 por mês, considerando a taxa de conversão. Ou seja,

como a fazenda de mineração foi dimensionada com 20 mineradoras o lucro mensal será de R\$ 11.047,40 e anualmente de R\$ 132.568,88.

5 CONCLUSÃO

Neste estudo, foram analisados duas regiões distintas com a finalidade de obter um comparativo entre ambas para a melhor instalação de uma fazenda de mineração de criptomoedas, como a zona rural de Campina Grande, no estado da Paraíba, e a Cidade do Leste, localizada no Paraguai. Após análises iniciais nas tarifas de energia elétrica, foi visto que nesse quesito há dois extremos diferentes, onde o Brasil têm uma das tarifas de energia elétrica mais caras no mundo e o Paraguai entre as mais baixas na América do Sul, sem mencionar que nos últimos quatro

meses do ano o Brasil sofre com as estiagens, alterando a tarifa com adicional B Vermelho, encarecendo ainda mais seus valores. Em seguida, foram analisadas as questões de instalação de placas solares, que estão diretamente ligadas as condições geográficas, climáticas e especialmente a irradiação solar. Onde, foi visto que em cada região a um tempo médio de irradiação útil, que determina efetivamente o desempenho da instalação e utilização do sistema solar.

Portanto, na Cidade do Leste, no Paraguai, o investimento com as mineradoras e a utilização da energia elétrica da concessionária o retorno financeiro do projeto será em 1,9 anos. Assim, fica descartada a instalação de um sistema de energia solar, já que o retorno do investimento é breve, e os impostos são baixos, e não há histórico de grandes variações nos valores de taxas e tributos.

À vista disso, com a compra das mineradoras e a utilização da energia elétrica da

concessionária em Campina Grande, o retorno financeiro do projeto seria em aproximadamente 2,6 anos. Consecutivamente, utilizando o sistema de energia solar, o retorno financeiro do projeto seria em aproximadamente 3,2 anos.

Por fim, há uma grande viabilidade de instalação do sistema solar para a mineração de criptomoedas na zona rural de Campina Grande, por mais que a estimativa de tempo utilizando a concessionária elétrica seja menor, conseqüentemente irá variar, se observado o histórico do crescente aumento das tarifas de energia. Além de vários pontos positivos como, nos últimos quatro meses do ano, onde é a época crítica de escassez nos níveis dos reservatórios das hidrelétricas e há o aumento da tarifa, é observado os maiores índices de irradiação solar, favorecendo sua geração, o equipamento tem vida útil de 25 anos com baixíssimas manutenções e além de benefícios financeiros é a importante contribuição do uso da energia solar a consciência socioambiental.

REFERÊNCIAS

- [1] ATLAS. “Solar mede energia do sol disponível em qualquer ponto do estado”. Disponível em: (<https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/noticia/atlas-solar-mede-energia-do-sol-disponivel-em-qualquer-ponto-do-estad>). Acessado em 30 de Outubro de 2018.
- [2] Daniel P Et Al. “Paradigmas da energia solar no Brasil e no mundo”. Revista Eletrônica Em Gestão, Educação E Tecnologia Ambiental, V. 20, N. 1, P. 241-247, 2016.
- [3] Goldemberg, José; Lucon, Oswaldo. “Energias renováveis: um futuro sustentável”. REVISTA USP, São Paulo, n.72, p. 6-15, dezembro/fevereiro 2006-2007.
- [4] Moia, G. H. V; Henquires, M. A. A. “Avaliação da segurança de protocolos criptográficos usados em moedas virtuais”. Disponível em: (http://www.fee.unicamp.br/sites/default/files/departamentos/dca/artigos/a264v0_IESS.pdf) Acesso em: 26 de setembro de 2018.
- [5] Morais, J. F; Silva, W. S; Rabelo, P. F. R. “Impactos ambientais provenientes das novas tecnologias de telecomunicações”. Projeto de mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Fluminense, UFF, Niterói – RJ, 2008.
- [6] Pires, H. F. Bitcoin: a moeda do ciberespaço. Geosp – Espaço e Tempo (Online), v. 21, n. 2, p. 407-424, agosto. 2017. ISSN 2179-0892.
- [7] Portolan, I. S; “Integração de painéis solares fotovoltaicos em edificações residenciais e sua contribuição em um alimentador de energia de zona urbana mista”. Projeto de mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC. Florianópolis - SC. PPGEC. 2009.
- [8] Portal Solar LTDA.” Quanto Custa para instalar energia solar”. Disponível em: (<https://www.portalsolar.com.br/quanto-custa-para-instalar-energia-solar.html>) Acessado em 24 de Outubro de 2018.
- [9] Silva, M. W. S; Cruz, A. R. Bitcoin a moeda digital que se tornou realidade. Publicação em revista científica da UNESC. Curso de Análise e Desenvolvimento de Sistemas – UNESC. Rondônia/Cacoal. v. 12, n. 15 (2014).
- [10] Smaal, B. Techtudo. Bitcoin: “A mineração de moedas”. Disponível em: (<http://www.techtudo.com.br/artigos/noticia/2014/01/bitcoin-a-mineracao-de-moedas.html>) Acessado em: 30 de Agosto de 2018.

Capítulo 2

ANÁLISE NUMÉRICA DE PROTÓTIPO DE PONTE ESTAIADA COM ELEMENTOS COM MEMÓRIA DE FORMA SUPERELÁSTICOS EM VIBRAÇÃO FORÇADA

Armando Wilmans Nunes da Fonseca Júnior

Marcelio Ronnie Dantas de Sá

Rômulo Pierre Batista dos Reis

Antonio Almeida Silva.

Resumo: Entre os vários materiais utilizados atualmente para supressão de vibrações, estão as ligas com memória de forma (LMF). Estas vêm ganhando popularidade graças a sua capacidade de sofrer grandes deformações reversíveis, aliadas às suas propriedades de dissipação de energia. Neste contexto, esse trabalho tem como objetivo avaliar o uso de uma metodologia para estimar a resposta numérica em vibração forçada de uma estrutura do tipo ponte estaiada, em escala reduzida, com elementos com memória de forma superelásticos atuando como elementos dissipadores de energia. Os resultados mostraram boa coerência na determinação dos parâmetros modais da estrutura. Com maior erro associado ao segundo modo de vibrar do sistema. Concluiu-se que os modelos numéricos permitem uma boa previsão da resposta da estrutura.

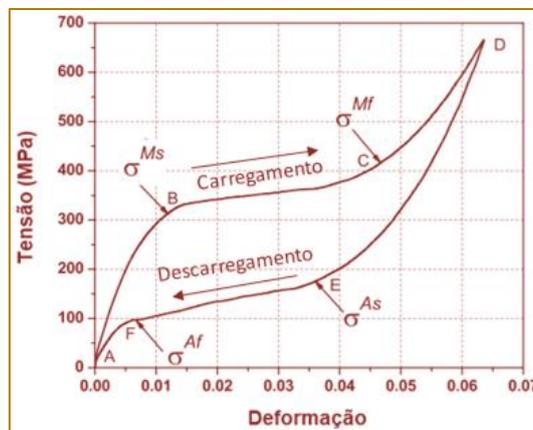
Palavras-chave: Análise numérica, Elementos Finitos, Ligas com Memória de Forma, Ponte Estaiada.

1 INTRODUÇÃO

Ligas com memória de forma (LMF) são ligas metálicas que sofrem transformações entre fases sólidas induzidas por mudanças de temperatura e/ou tensões apropriadas e que podem recuperar deformações aparentemente permanentes. Tais ligas possuem uma série de propriedades desejáveis, destacando-se o efeito de memória de forma (EMF) e a

superelasticidade (SE) (OTSUKA; WAYMAN, 1998). O comportamento superelástico (ou pseudoelástico) das LMFs está associado à capacidade destas de sofrer altas deformações induzidas por tensões a partir de carregamento aplicado e recuperar-se completamente destas mediante descarregamento. A Figura 1 ilustra o comportamento pseudoelástico típico de LMFs através de um diagrama tensão-deformação.

Figura 1: Carregamento cíclico típico de uma LMF superelástica (Lagoudas, 2008).



Pode-se notar que, durante o ciclo superelástico, as tensões de transformação direta ($\sigma_{Ms} \rightarrow \sigma_{Mf}$) e reversa ($\sigma_{As} \rightarrow \sigma_{Af}$) são diferentes. Isto resulta em uma histerese de tensão mecânica. O laço da histerese depende do material da LMF e das condições de teste utilizadas.

Fisicamente, essa histerese representa a energia recebida pelo material para sofrer a deformação. Durante o carregamento, a liga absorve energia para deformar-se e, mediante descarregamento, apenas parte dessa energia retorna ao sistema, sendo o restante dissipado para o meio na forma de calor. Isto implica em dizer que o material tem capacidade de dissipar uma parcela da energia utilizada para realizar o ciclo superelástico. Logo, quanto maior a histerese, maior a energia dissipada por cada ciclo. É devido a esta propriedade que as LMF superelásticas estão sendo cada vez mais utilizadas em dispositivos de controle passivo de vibrações.

Devido a essas propriedades, as LMF são objetos de estudo de muitos pesquisadores,

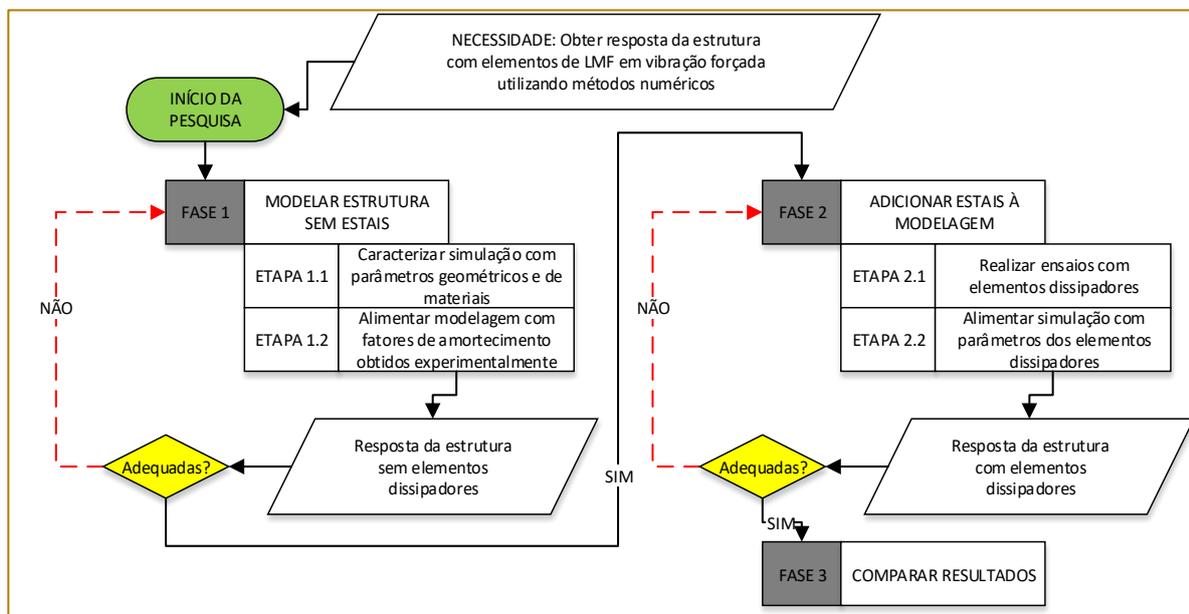
que desenvolvem modelos numéricos com o propósito de prever o comportamento dessas. Um dos modelos mais usados atualmente é modelo constitutivo proposto por Auricchio e Taylor (1997), usado em análises de estruturas de LMF pelo método dos elementos finitos. Entretanto, esse modelo não leva em consideração as propriedades dinâmicas do material, sendo apenas utilizado para aplicações estáticas ou quase estáticas.

Neste contexto, esse trabalho tem como objetivo avaliar o uso de uma metodologia que combina simulação e validação da análise experimental para estimar a resposta numérica em vibração forçada de uma estrutura do tipo ponte estaiada, em escala reduzida, com elementos com memória de forma superelásticos atuando como elementos dissipadores de energia utilizando o método dos elementos finitos. Comparando os resultados obtidos numericamente com aqueles obtidos através do protótipo experimental.

2 METODOLOGIA

A metodologia para a realização deste trabalho é ilustrada na Figura 2.

Figura 2: Metodologia para obtenção da resposta numérica do protótipo de ponte estaiada com elementos com memória de forma em vibração forçada.



As atividades foram desenvolvidas em três fases que serão melhores detalhadas nos tópicos a seguir.

2.1 FASE 1 – MODELAGEM DA ESTRUTURA SEM ESTAIS

Na Fase 1 é realizada a modelagem numérica inicial da estrutura sem estais em vibração

forçada. Essa foi executada utilizando o método dos elementos finitos através do software comercial Ansys® Mechanical APDL (Ansys Parametric Design Language) Release 16.0, mais especificamente por meio da ferramenta de análise harmônica completa, que consiste na resolução da Eq. 1.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} = F_0 \cos(\omega t) \quad (1)$$

Onde:

- [M] – matriz de massa;
- [C] – matriz de amortecimento;
- [K] – matriz de rigidez;
- $\{\ddot{u}\}$ – vetor nodal de aceleração;
- $\{\dot{u}\}$ – vetor nodal de velocidade;
- $\{u\}$ – vetor nodal de deslocamento;
- $\{F(t)\}$ – vetor de força.

Esta fase se subdivide em duas etapas que serão discutidas abaixo.

Na Etapa 2.1 o modelo numérico é caracterizado com os parâmetros

geométricos e de material similares ao do protótipo experimental, como ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1 Parâmetros geométricos e de material utilizados na modelagem numérica.

Parâmetros	Valores
Comprimento	1,5 m
Largura	0,25 m
Espessura	0,002 m
Modulo de Elasticidade (E)	71 GPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,33
Densidade (ρ)	2770 kg/m ³

A estrutura que representa o tabuleiro da ponte foi modelada através de uma viga bi apoiada, utilizando elementos do tipo casca (SHELL181). Além disso, com o propósito de simular condições similares ao experimento

realizado, uma força harmônica foi aplicada no ponto de 0,375 m do comprimento da estrutura, na lateral da mesma, como ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Modelo numérico do tabuleiro da estrutura de ponte.



Na Etapa 2.2, com o intuito de realizar uma melhor caracterização baseado no protótipo experimental, o modelo numérico, sem elementos dissipadores, foi alimentado com os fatores de amortecimento viscosos encontrados experimentalmente, calculados

via método de largura de banda em meia potência. O modelo foi também alimentado com os diferentes níveis de força excitadora associada a cada modo de vibrar da estrutura. Estes valores podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2: Fatores de amortecimento e força excitadora associados aos 3 primeiros modos de vibrar da estrutura.

	1º Modo (Flexão)	2º Modo (Flexão)	3º Modo (Flexão)
Fator de amortecimento viscoso (ζ)	0,039	0,0034	0,0036
Força excitadora (N)	0,195	0,120	0,240

Apenas os três primeiros modos de vibrar da estrutura foram escolhidos devido a apresentarem maiores amplitudes de

vibração. A partir do quarto modo de vibrar, a estrutura já não apresentava níveis significativos de vibração.

A conclusão desta fase permite avaliar o comportamento do modelo numérico sem os elementos dissipadores e comparar este com o protótipo experimental.

2.2 FASE 2 – ADIÇÃO DOS ESTAIS À MODELAGEM

Na Fase 2 os estais (atuando como elementos dissipadores) são adicionados à modelagem

numérica realizada na Fase 1, mais especificamente sob a forma do elemento mola/amortecedor COMBIN14, que possui associado a si uma constante de rigidez e amortecimento viscoso. O novo modelo numérico é ilustrado na Figura 4. Esta Fase se subdivide em duas etapas que serão melhores discutidas nos próximos parágrafos.

Figura 4: Modelo numérico com elementos COMBIN14.



Na Etapa 2.1 são realizados os ensaios de força – deslocamento dos elementos dissipadores em um analisador dinâmico (Dynamic Mechanical Analyzer, DMA) modelo Q800 da fabricante TA instruments. O propósito destes foi o de caracterizar os elementos dissipadores e identificar suas propriedades de rigidez e dissipação de energia para diferentes níveis de deslocamentos impostos.

Três diferentes deslocamentos, um associado a cada modo de vibrar da estrutura, foram

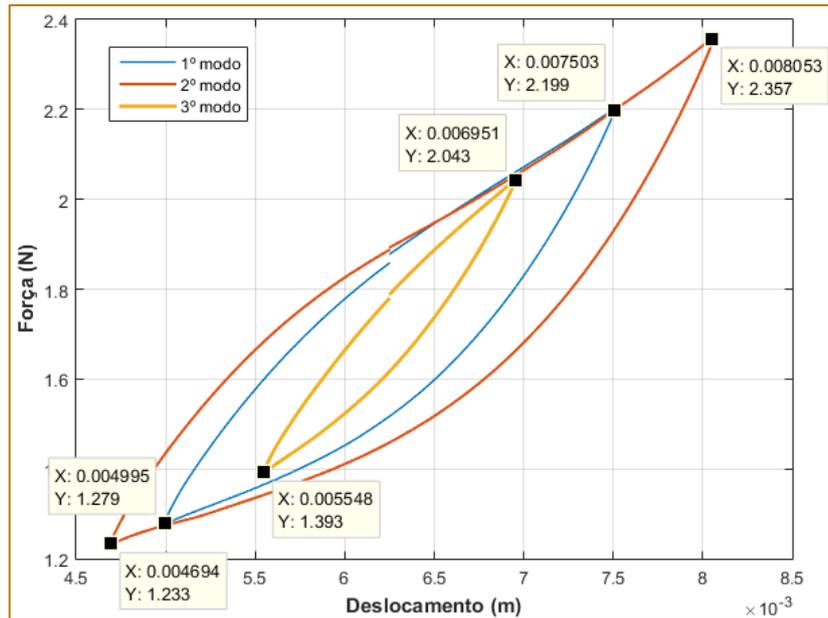
impostos aos elementos dissipadores. Levando em consideração a pré-carga de 6,25 mm que tinha como intuito fazer com que os elementos se encontrassem no centro de seu laço histerético, foi possível também calcular a elongação que estes irão sofrer em regime de trabalho. Todos estes valores estão ilustrados na Tabela 3.

Os ensaios de força – deslocamento dos elementos dissipadores são ilustrados na Figura 5.

Tabela 3: Níveis de elongação sofridos pelos elementos dissipadores associado a cada modo de vibrar da estrutura.

	1º Modo (Flexão)	2º Modo (Flexão)	3º Modo (Flexão)
Elongação do elemento (mm)	2,5	3,6	1,38
Elongação do elemento com pré-carga (mm)	6,25 ± 1,25	6,25 ± 1,80	6,25 ± 0,69

Figura 5: Ensaio de força - deslocamento dos elementos dissipadores associados aos diferentes modos de vibrar da estrutura.



Na Etapa 2.2, com a conclusão dos ensaios de força – deslocamento, é possível então obter os valores de rigidez equivalente (k_{LMF}) e constante de amortecimento histerético

(h_{LMF}) dos elementos dissipadores utilizando as Eq. 2 e 3, respectivamente. Estes valores são apresentados na Tabela 4.

$$k_{LMF} = \frac{F_{max} - F_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (2)$$

$$h_{LMF} = \frac{A_{laço}}{\pi X^2} \quad (3)$$

Tabela 4: Valores de rigidez e constante de amortecimento histerético dos elementos dissipadores.

	1º Modo (Flexão)	2º Modo (Flexão)	3º Modo (Flexão)
Rigidez equivalente (k_{LMF})	367,38 N/m	334,89 N/m	463,37 N/m
Constante de amortecimento histerético (h_{LMF})	30,48 N/m	27,25 N/m	25,90 N/m

Com a conclusão dessa fase é possível então analisar e validar a resposta numérica da estrutura com elementos dissipadores em vibração forçada.

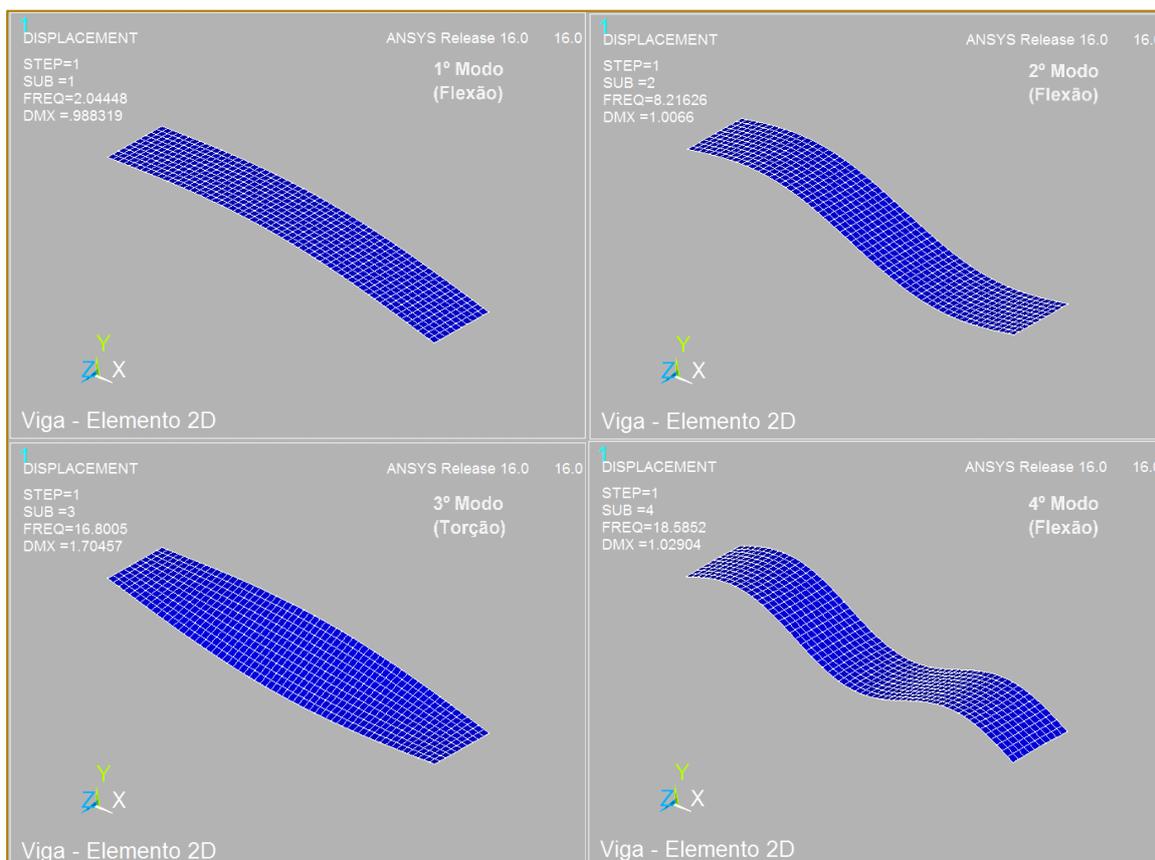
primeiramente foi realizada uma análise modal numérica no software Ansys APDL. Os modos de vibrar e as frequências naturais da estrutura associadas a cada um destes pode ser visualizado na Figura 6.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ANÁLISE MODAL DO MODELO SEM ELEMENTOS DISSIPADORES

Com o objetivo de identificar a semelhança entre o modelo numérico e experimental,

Figura 6: Modos de vibrar da estrutura sem elementos dissipadores.



Devido à ausência do modo de vibrar em torção no modelo experimental, este modo não foi levado em consideração nas análises subsequentes.

Foi possível então realizar uma comparação entre as frequências naturais experimentais da estrutura e aquelas obtidas via modelagem numérica, como ilustrado na Tabela 5.

Tabela 2: Frequências naturais numéricas e experimentais da estrutura sem elementos dissipadores.

	1º Modo (Flexão)	2º Modo (Flexão)	3º Modo (Flexão)
Modelo numérico	2,044 Hz	8,216 Hz	18,585 Hz
Protótipo experimental	2,063 Hz	8,563 Hz	19,250 Hz

Nota-se uma boa coerência entre os valores numéricos e experimentais, com o maior erro associado ao terceiro modo de vibrar em flexão da estrutura, com erro relativo de 4,8%. Isto ocorre devido ao modelo numérico não possuir uma representação adequada da rigidez da estrutura para os modos de vibrar mais elevados.

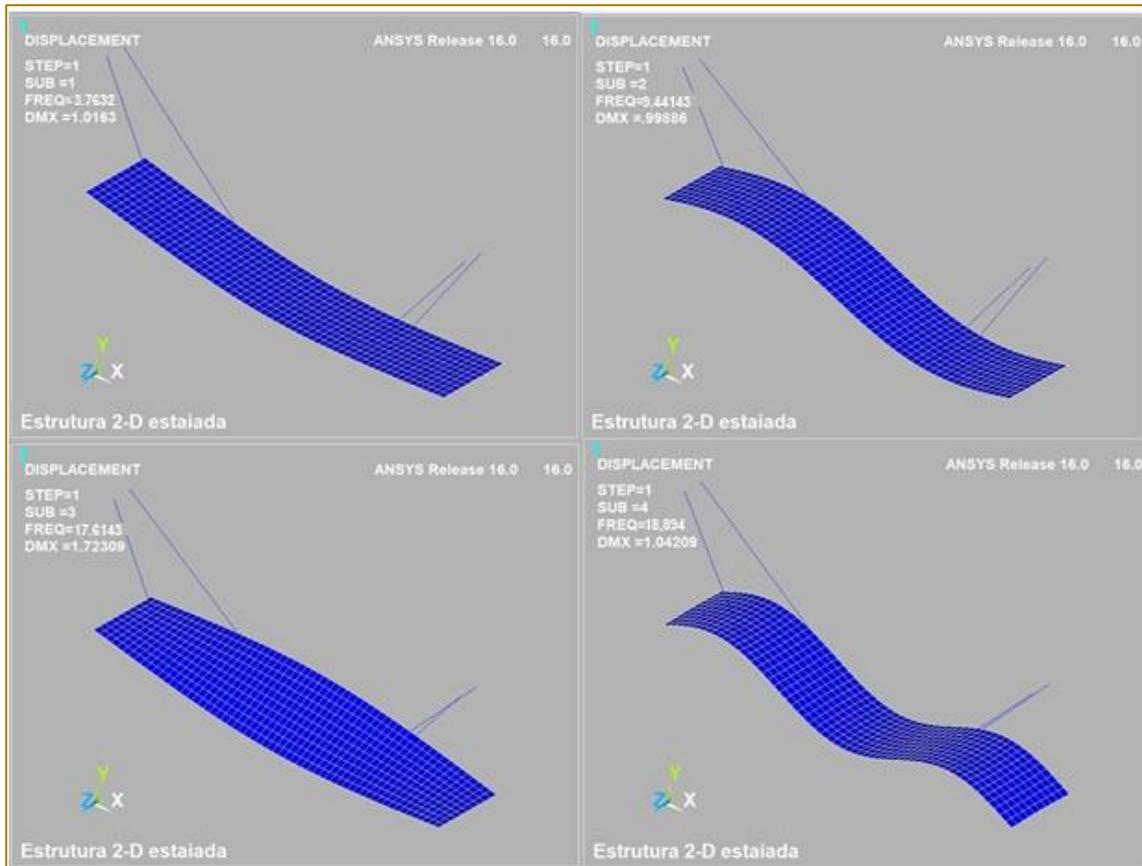
3.2 ANÁLISE MODAL DO MODELO COM ELEMENTOS DISSIPADORES

Um procedimento similar ao realizado no tópico anterior foi feito para a estrutura com os

elementos dissipadores, utilizando a rigidez dos elementos encontrados por meio dos ensaios de força-deslocamento, citados na seção 2.2 deste trabalho. Tendo em vista que a análise modal numérica só leva em consideração um valor de rigidez do elemento dissipador, o valor escolhido foi aquele associado ao primeiro modo de vibrar do sistema ($k_{LMF} = 367,38 \text{ N/m}$), pois este era o mais suscetível a quaisquer mudanças de parâmetros.

Os modos de vibrar e as frequências naturais do novo sistema podem ser visualizados na Figura 7.

Figura 7: Modos de vibrar e frequências naturais da estrutura com elementos dissipadores.



Mais uma vez, é possível realizar uma comparação entre as frequências naturais do

modelo numérico e do protótipo experimental. Estes podem ser visualizados na Tabela 6.

Tabela 3: Frequências naturais numéricas e experimentais da estrutura com elementos dissipadores.

	1º Modo (Flexão)	2º Modo (Flexão)	3º Modo (Flexão)
Modelo numérico	3,76 Hz	9,44 Hz	18,89 Hz
Protótipo experimental	3,81 Hz	9,50 Hz	19,6 Hz

Pode-se perceber que o maior erro relativo foi de 4,13%, associado ao terceiro modo de vibrar da estrutura, proveniente da dificuldade dos modelos numéricos de representar os modos de vibrar mais elevados.

3.3 RESPOSTA EM VIBRAÇÃO FORÇADA DO MODELO SEM ELEMENTOS DISSIPADORES

Na análise harmônica completa (Eq. 1), a matriz de amortecimento tem a seguinte definição:

$$[C] = \alpha[M] + \left(\beta + \frac{1}{\Omega}g\right)[K] + \sum_{i=1}^{N_{ma}} \alpha_i^m [M_i] + \sum_{j=1}^{N_{mb}} \left[(\beta_j^m + \frac{2}{\Omega}m_j + \frac{1}{\Omega}g_j^E)[K_j]\right] + \sum_{k=1}^{N_e} [C_k] \quad (4)$$

Onde:

[C] – matriz de amortecimento;	α – amortecimento α de Rayleigh;	[M] – matriz de massa;
β – amortecimento de β Rayleigh;	g – coeficiente de amortecimento estrutural constante;	Ω – frequência de excitação (em rad/s);
[K] – matriz de rigidez;	N_{ma} – número de materiais com amortecimento α de Rayleigh;	α_i^m – amortecimento α de Rayleigh para material i ;
[Mi] – parcela da matriz de massa estrutural associada ao material i ;	N_{mb} – número de materiais com amortecimento β de Rayleigh;	β_j^m – amortecimento de β Rayleigh para o material j ;
m_j – coeficiente de amortecimento estrutural constante para o material j ;	g_j^E – coeficiente de amortecimento estrutural para o material j ;	[Kj] – parcela da matriz de rigidez estrutural associada ao material j ;
N_e – número de materiais com amortecimento especificado;	[Ck] – matriz de amortecimento de elemento.	

Logo, os amortecimentos encontrados na seção 2.1 não puderam ser alimentados diretamente na simulação, sendo necessário

transformar em amortecimentos β de Rayleigh, associados as frequências naturais do modelo, utilizando a Eq. 5.

$$\beta = \frac{\zeta}{\pi f} \quad (5)$$

Utilizando as frequências naturais obtidas na seção 3.1, foi possível obter os valores de amortecimento β de Rayleigh associados a

cada modo de vibrar da estrutura, como ilustrado na Tabela 7.

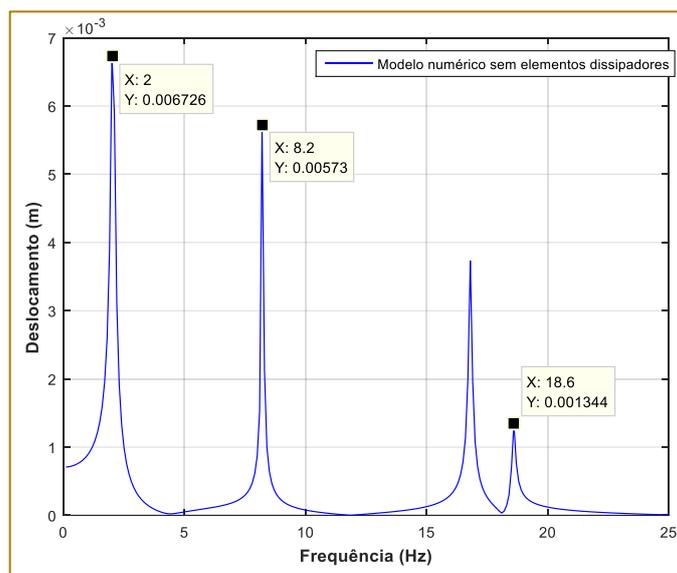
Tabela 7: Amortecimentos β de Rayleigh associados aos modos de vibrar do modelo numérico.

	1º Modo (Flexão)	2º Modo (Flexão)	3º Modo (Flexão)
Amortecimento β de Rayleigh	6 x 10 ⁻³ s	1,25 x 10 ⁻⁴ s	5,91 x 10 ⁻⁵ s

Com posse dessas informações e utilizando os valores de força excitadora encontrados na seção 2.1 deste trabalho, é possível obter a

resposta em frequência da estrutura sem elementos dissipadores em vibração forçada, como ilustrado na Figura 7.

Figura 3: Reposta do modelo numérico sem elementos dissipadores em vibração forçada.



A presença do terceiro pico na faixa de 17 Hz ocorre devido a primeira frequência natural em torção do modelo numérico. Este modo não foi observado no protótipo experimental.

É possível então realizar uma comparação das amplitudes de deslocamento nos três

primeiros modos de vibrar em flexão do modelo numérico e protótipo experimental, sem a presença de elementos dissipadores. Estes valores podem ser visualizados na Tabela 8.

Tabela 8: Amplitudes de deslocamento do modelo numérico e protótipo experimental associados aos três primeiros modos de vibrar em flexão.

	1º Modo (Flexão)	2º Modo (Flexão)	3º Modo (Flexão)
Modelo numérico	6,726 mm	5,730 mm	1,344 mm
Protótipo experimental	7,082 mm	5,048 mm	1,150 mm

Nota-se uma boa coerência entre os valores da modelagem numérica e do protótipo experimental, com o maior erro relativo de 16% associado ao terceiro modo de vibrar em flexão. Isto acontece devido a problemas da modelagem numérica de representar de forma fiel os modos de vibrar mais elevados.

3.4 RESPOSTA EM VIBRAÇÃO FORÇADA DO MODELO COM ELEMENTOS DISSIPADORES

Tendo em vista que o elemento COMBIN14 tem associado a si uma constante de amortecimento viscoso, é necessário transformar o amortecimento histerético dos elementos dissipadores encontrados na seção 2.2 deste trabalho. Isso é realizado utilizando a Eq. 6.

$$c_{eq} = \frac{h_{LMF}}{2\pi f} \quad (6)$$

Onde c_{eq} é a constante de amortecimento viscoso equivalente, h_{LMF} é a constante de amortecimento histerético e f é a frequência de interesse (em Hz).

Com a obtenção das frequências naturais que a estrutura terá com a implementação dos

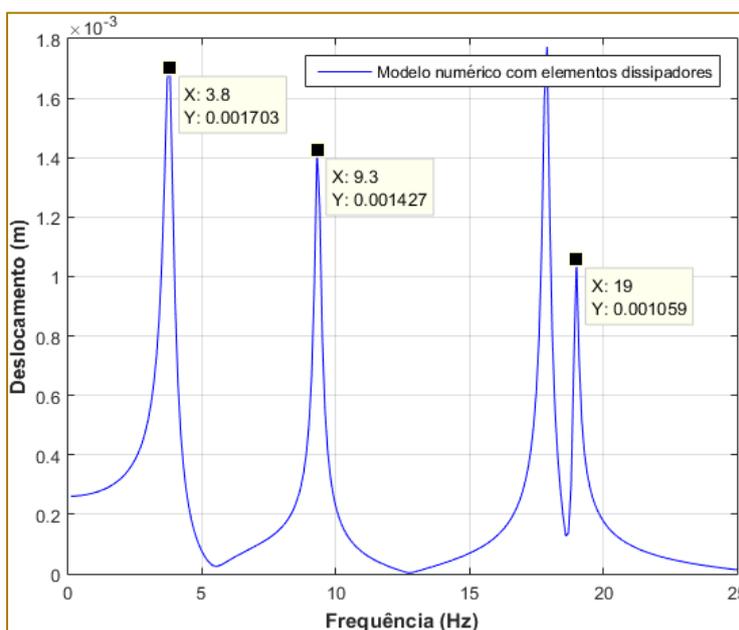
elementos dissipadores através da análise modal numérica (Seção 3.2), é possível realizar o cálculo do amortecimento viscoso equivalente destes últimos utilizando a Eq. 6 e os dados da Tabela 4. Estes valores podem ser visualizados na Tabela 9.

Tabela 9: Coeficiente de amortecimento viscoso equivalente dos elementos dissipadores associados a cada frequência natural.

	1º Modo (Flexão)	2º Modo (Flexão)	3º Modo (Flexão)
Constante de amortecimento viscoso (ceq)	1,287 N.s/m	0,459 N.s/m	0,219 N.s/m

Com a aquisição desses valores, o modelo numérico é alimentado e são realizadas novas análises harmônicas, ilustradas na Figura 8.

Figura 4: Resposta do modelo numérico com elementos dissipadores em vibração forçada.



Com esta análise é possível mais uma vez realizar a comparação das amplitudes de deslocamento associadas aos três primeiros

modos de vibrar em flexão do modelo numérico e do protótipo experimental, como ilustrado na Tabela 10.

Tabela 10: Amplitudes de deslocamento do modelo numérico e protótipo experimental com elementos dissipadores.

	1º Modo (Flexão)	2º Modo (Flexão)	3º Modo (Flexão)
Modelo numérico	1,70 mm	1,42 mm	1,06 mm
Protótipo experimental	1,66 mm	2,35 mm	0,98 mm

Utilizando os valores de rigidez e amortecimento dos elementos dissipadores, é possível notar boa coerência do primeiro e terceiro modo de vibrar em flexão da modelagem numérica com a resposta do protótipo experimental, com um erro relativo máximo de 8% no terceiro modo de vibrar.

No entanto, pode-se observar uma grande defasagem dos valores de amplitude no segundo modo de vibrar, com o maior erro relativo de 39%. Em todas as modelagens realizadas, pôde-se notar que o segundo modo de vibrar é o mais suscetível a quaisquer variações de parâmetros, isso se deve, em parte, à como o experimento foi realizado. Os pontos de captação de sinal de

resposta e de aplicação de força têm o maior impacto no segundo modo de vibrar. Além disso, as aproximações e linearizações que foram realizadas, torna a modelagem deste modo mais complexa.

4 CONCLUSÕES

A modelagem do sistema e comparação dos resultados numéricos iniciais descreveram de forma coerente os parâmetros de frequência natural e modos de vibrar do protótipo experimental, com um erro máximo da ordem de 4,8%, associado ao terceiro modo de vibrar da estrutura.

A resposta numérica em vibração forçada do modelo da estrutura sem elementos

dissipadores se mostrou muito próxima daquela obtida a partir do protótipo experimental. Os resultados numéricos utilizando os parâmetros dos elementos dissipadores se mostraram muito próximos do comportamento apresentado pelo protótipo experimental, para o primeiro e terceiro modo de vibrar, com maior erro relativo de 10%. Isto indica a capacidade que os modelos numéricos têm de prever a resposta da estrutura, mediante conhecimento dos parâmetros de trabalho dos elementos dissipadores. Houve uma dificuldade de modelar o segundo modo de vibrar da estrutura, decorrente de como o experimento em vibração forçada foi executado e das aproximações e linearizações que foram realizadas.

REFERÊNCIAS

[1] AURICCHIO F., TAYLOR R.L., Shape-memory alloy modeling and numerical simulations of the finite-strain superelastic behavior, *Computer Methods of Application Mechanics and Engineering*, 143, 175-194, 1997.

[2] FONSECA JÚNIOR, A. W. N.. Modelagem e Análise de Protótipo de Ponte Estaiada sob Cargas Dinâmicas Incorporando Molas de Nitinol Superelásticas para Supressão de Vibrações. 2018, 182 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2018.

[3] FONSECA JÚNIOR, A. W. N.; DAMASCENO, F. O.; SILVA, A. A., Modelagem e Análise Dinâmica de Estruturas do Tipo Ponte de Vigas Incorporando Elementos com Memória de Forma. In: X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2018. Anais do X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.

[4] LAGOUDAS, D. C. Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications. New York: Springer, 2008. v. 1

[5] OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M. Shape Memory Materials. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

Capítulo 3

INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS BERÍLIO, TITÂNIO E BORO NA DUREZA DE LIGAS DO SISTEMA CU-AL PASSÍVEIS DO EFEITO MEMÓRIA DE FORMA

Carlos Cássio de Alcântara

Lucas Daniel Martins Fernandes

José Joelson de Melo Santiago

Resumo: As ligas memória de forma têm potencial para diversas aplicações, desde as mais simples até aplicações complexas. Dentre os vários tipos de aplicações destacam-se os dispositivos utilizados nas áreas médicas e odontológicas. Neste contexto o objetivo deste trabalho foi a elaboração e caracterização de ligas memória de forma do sistema Cu-Al contendo berílio e titânio-boro nos seguintes percentuais: Cu-11,8%Al (Liga 1), Cu-11,8%Al-0,6% Be (Liga 2) e Cu-11,8%Al-0,6%Be-0,5%Ti-0,1%B (Liga 3) (% em peso). As ligas foram elaboradas em forno sob atmosfera ambiente, tratadas termicamente e então caracterizadas por ensaios de microscopia óptica e ensaio de dureza Brinell. Constatou-se que a adição de pequenos teores de Berílio, altera as temperaturas de transformação devido à mudança da composição da matriz, visto que ocorre uma redução do tamanho médio do grão, e conseqüentemente da dureza. Enquanto que os precipitados da liga mãe Titânio-Boro inibem o crescimento do grão.

Palavras-chave: Ligas memória de forma. Liga Cu-Al-Be-Ti-B. Efeito memória de forma.

1 INTRODUÇÃO

É notório perceber que o desenvolvimento e o avanço da humanidade desde os primórdios vêm atrelado às habilidades dos seus integrantes de manipular ferramentas para satisfazer suas necessidades. Segundo Salluste (1971), os primeiros povos tinham disponíveis uma pequena quantidade de materiais, tendo como destaque os materiais encontrados na natureza, tais como pedra, argila e pele de animais.

Os primeiros relatos históricos da utilização do cobre datam da época de transição do período Paleolítico para o Neolítico, no qual o homem deixou de ser um indivíduo nômade e passou a ser sedentário, ou seja, o homem deixou de mudar de localização periodicamente e passou a fixar-se em determinadas regiões. O cobre foi um dos fatores primordiais para que essa fixação tenha tornando-se possível, visto que esse elemento acabou substituindo a pedra na fabricação de ferramentas, armas, recipientes e utensílios.

Inicialmente a utilização do cobre e alumínio era restrita apenas ao estado sólido, visto que o ponto de fusão dos mesmos é em torno de 1083°C e 660,3°C, respectivamente. A fusão de tais materiais tornou-se possível apenas com a invenção das fornalhas. Com o tempo o homem descobriu que as propriedades de um material podem ser alteradas por meio de tratamentos térmicos e pela adição de outros elementos. Com isso foi possível a fundição de cobre adicionando outros metais, obtendo as ligas metálicas à base de cobre com o intuito de melhorar algumas características como resistência mecânica, ductilidade, estabilidade térmica, tenacidade e dureza.

Segundo Heinz (1995), as ligas à base de Cu possuem baixo custo de obtenção e conformação em relação às outras ligas memória de forma (LMF). Dentre as várias combinações de ligas à base de Cu, destacam-se as ligas Cu-Zn (latões), Cu-Sn (bronze), Cu-Ni, Cu-Ni-Zn, Cu-Al, Cu-Al-Be.

Para Nava (2013), tais ligas possuem uma vasta gama de aplicações, como juntas, engrenagens, parafusos, tubulações, instrumentos cirúrgicos, elementos funcionais de sensores e atuadores que funcionam

através da variação das temperaturas dos materiais, visto que dependendo do tratamento térmico elas podem apresentar memória de forma, fazendo das LMFs.

As LMFs são metais que têm a capacidade de retornar à sua forma original, após sofrerem uma deformação pseudoplástica, quando aquecidas a uma determinada temperatura (CALLISTER, 2008).

Wilkes, Liaw e Wilkes (2000), dizem que as principais LMFs são as ligas de Cu-Al-Ni e Ni-Ti, devido as suas propriedades, embora existam várias outras LMF, tais como a liga Cu-Al-Be e Cu-Al-Mn. Sun e Huang (2009) dizem que as LMFs podem existir em duas fases diferentes, com três diferentes estruturas cristalinas, martensita maclada, martensita e austenita.

Nesse sentido, para Padilha (1997) os materiais metálicos que possuem essa interessante propriedade funcional, podem ser empregados nos mais diversos segmentos da Indústria metalúrgica, que vão desde aplicações aeroespaciais, eletroeletrônica, construção civil, robótica a bioengenharia.

Nas últimas décadas, as ligas memória de forma têm sido aplicadas na confecção de vários dispositivos comerciais, tais como: acoplamento de tubos, fixadores mecânicos (ZAK; KNEISSL; ZATULSKIJ, 1996), válvulas, implantes, aparelhos médicos e ainda atuadores mecânicos (CZECHOWICZ; LANGBEIN, 2015).

Neste trabalho foram analisadas as influências da adição de Berílio e da liga mãe de Ti-Bo no tamanho do grão, dureza e fases presentes na matriz de ligas a base de Cu-Al visto que de acordo com Garcia, Spim e Santos (2012), a adição de elementos em ligas metálicas pode modificar as propriedades mecânicas das mesmas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades desenvolvidas foram inteiramente realizadas nas instalações da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). A metodologia adotada está apresentada no fluxograma da Figura 1.

Figura 1- Fluxograma da sequência metodológica



Foram elaboradas ligas de Cu-Al (liga 1), Cu-Al-Be (liga 2) e Cu-Al-Be-Ti-B (liga 3). Na

Tabela 1 é apresentada a porcentagem de elementos usados nas ligas.

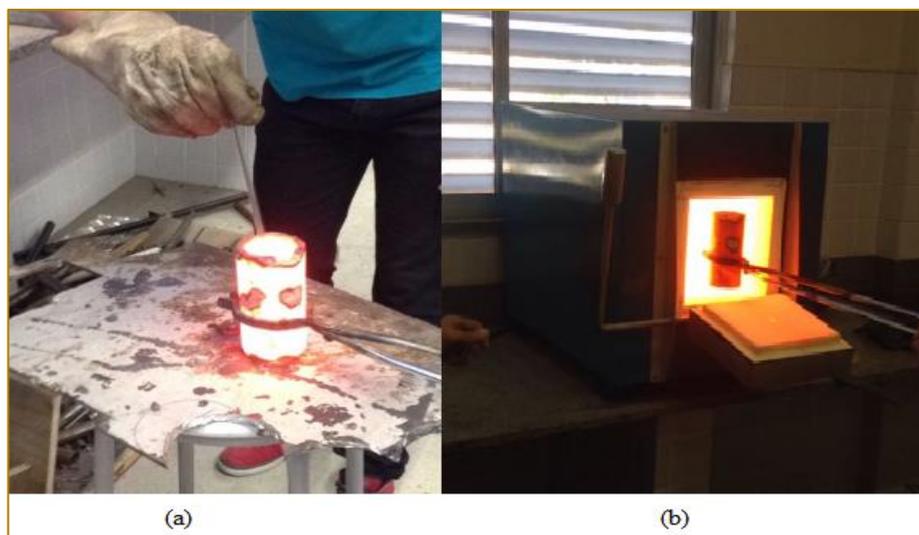
Tabela 1 - Valores das Composições nominais das ligas fundidas.

	Cu	Al	Be	Ti	B
	Percentuais [%]				
Liga 1	88,2	11,8	0	0	0
Liga 2	87,6	11,8	0,6	0	0
Liga 3	87	11,8	0,6	0,5	0,1

Após a determinação das porcentagens de elementos a serem utilizados os materiais foram pesados em uma balança analítica da marca Shimadzu modelo TX323L. A fundição foi realizada em forno da marca Lucadema e modelo Luca 200. O forno foi mantido a

1200°C e os elementos são colocados em um cadinho de material inerte a base de argila-grafite de forma sequencial, na qual os primeiros materiais a serem fundidos são os com maiores pontos de fusão. O processo de fundição pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 - Processo de Fundição. (a) Elementos de liga sendo misturados. (b) Posicionamento do cadinho no forno.



Após a fundição, as ligas foram vazadas em moldes cerâmicos, com a solidificação do material as mesmas foram usinadas com o intuito de preparar corpos de provas (CPs) para serem analisados através dos ensaios de metalográficos e de dureza Brinell. Os CPs foram submetidos a dois tratamentos térmicos inicialmente foram homogeneizadas a 850°C

durante 12 horas em um forno da marca Lucadema e modelo Luca 200, com subsequente tempera em água a 25°C para obtenção do efeito memória de forma.

Os CPs foram preparados para metalografia com a sequência de lixamento de granulação 80, 120, 220, 300, 600 e 1200. Polimento com alumina e finalizando com ataque químico

com reagente Cloreto de ferro III (5g FeCl_3 , 30 ml de HCl fumegante 37% e 100 ml de H_2O destilada).

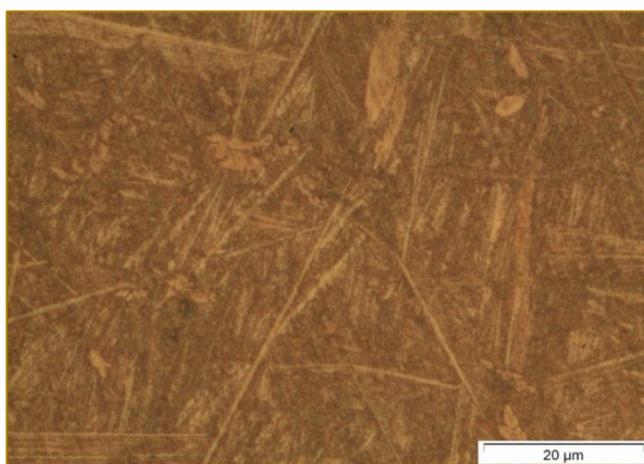
A análise foi realizada com auxílio do software IPWIN32 na qual foram determinados os diâmetros dos furos que o penetrador fez sobre a superfície de cada amostra. A esfera do penetrador utilizada foi de 2,5 mm com uma carga de 187,5 N como determina a norma ASTM (2014) para determinação da dureza.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 METALOGRAFIA.

De acordo com Barbosa (2014) as ligas de Cu-Al com 10% de alumínio, o aquecimento a uma temperatura superior a 850°C resulta em uma microestrutura constituída unicamente por fase β , e o resfriamento rápido leva à formação de uma microestrutura totalmente martensítica. Por isso a presença de plaquetas de agulhas no qual sugere a presença da fase martensítica à temperatura ambiente nos corpos de prova temperados observadas na imagem de micrografia apresentadas na Figura 3.

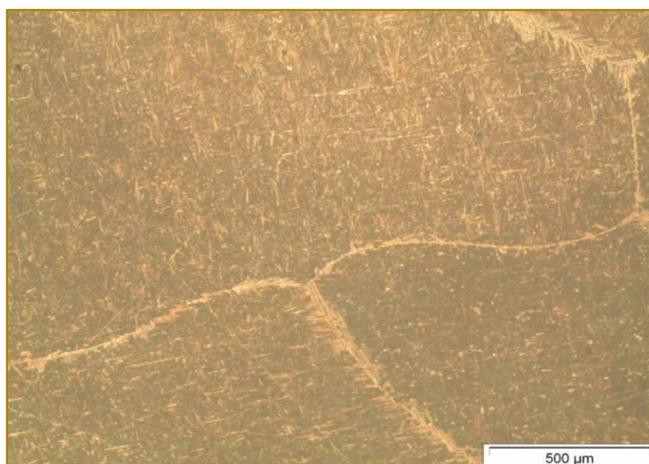
Figura 3- Micrografia da liga Cu-Al da liga Cu-Al temperada com aumento de 100x.



O tamanho de grão foi determinado pela medição dos grãos nas imagens com aumento de 5x. O tamanho médio do grão da

liga Cu-Al foi de aproximadamente 1,17mm. A imagem da micrografia com aumento de 5x pode ser visualizado na Figura 4.

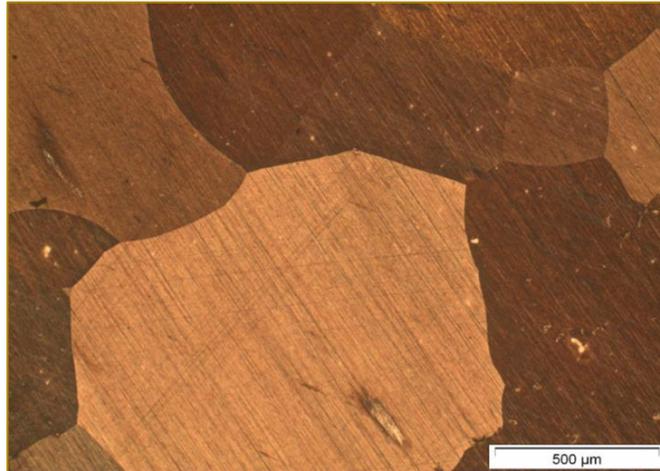
Figura 4 – Micrografia da liga Cu-Al temperada com aumento de 5x



Por meio da análise da micrografia da liga Cu-Al-Be mostrada na Figura 5, identifica-se apenas a fase austenítica CCC do tipo β_2 com tamanho de grão de aproximadamente 0,760

mm. O Berílio atuou como refinador de grão, reduzindo o tamanho médio de grão em torno de 35%, em relação à liga Cu-Al.

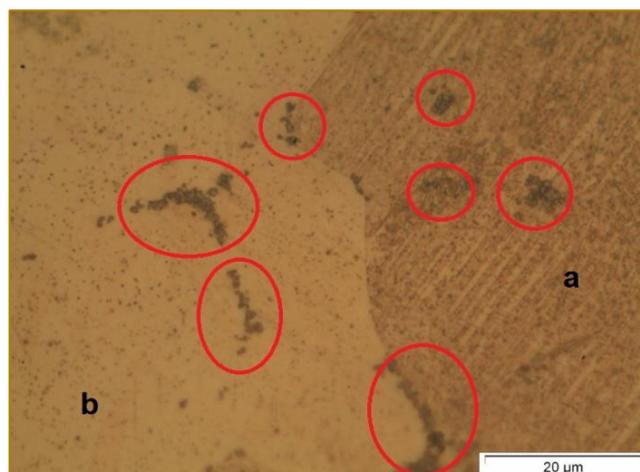
Figura 5 - Micrografia da Liga Cu-Al-Be temperada. Aumento de 5x.



Por meio da análise da Figura 6 percebe-se que a liga Cu-Al-Be-Ti-B apresentou a fase martensítica representada por (a), devido à presença de agulhas, e a fase austenítica representado por (b), devido à ausência de agulhas. Em certos pontos do grão ocorre a

presença de aglomerados com pigmentação preta, que estão circunscritos, tais aglomerados são precipitados de elementos químicos que pode estar relacionado ao Titânio que devido à baixa solubilidade não dissolve na matriz do grão.

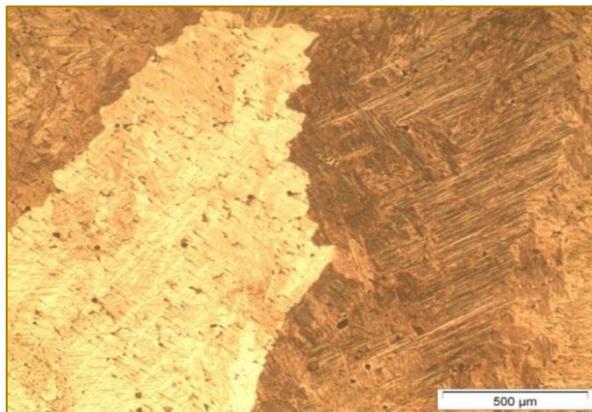
Figura 6 - Micrografia da Liga Cu-Al-Be-Ti-B temperada. Aumento de 100x



O tamanho de grão da liga Cu-Al-Be-Ti foi determinado através da Figura 7, na qual é de aproximadamente 0,6813mm ocorrendo uma

redução percentual em relação as ligas Cu-Al e Cu-Al-Be de aproximadamente 41% e 10% respectivamente.

Figura 7 - Micrografia da Liga lig Cu-Al-Be-Ti-B, com aumento de 5x.



3.2 DUREZA BRINELL.

Na análise de dureza Brinell das Ligas CuAl, Cu-Al-Be e Cu-Al-Be-Ti-B os valores obtidos estão apresentados na Tabela 2.

De acordo com Barbosa (2014), as ligas de Cu-Al com 10% de alumínio, o aquecimento a uma temperatura superior a 850°C e o resfriamento rápido torna essa liga com dureza Brinell de cerca de 250 HB. Para Sutou (2008), alumínio aumenta o ordenamento da fase β , promovendo maior rigidez a liga. Com isso, os valores de dureza média encontrado de 268,66 HB nos ensaios são coerentes com a literatura, visto que o desvio padrão é de aproximadamente 6,2 e a

porcentagem de alumínio utilizado na liga foi de 11%.

Os valores de dureza encontrados para liga Cu-Al-Be são coerentes com a literatura, o acréscimo de Be na liga Cu-Al gerou aumento de aproximadamente 14,5% na dureza em relação a liga Cu-Al. De acordo com Peng (1997), os valores de dureza com a adição de Ti na liga Cu-Al deveriam melhorar as propriedades mecânicas do material, como por exemplo, a dureza, porém a dureza para a liga 3 (Al-Cu-Be-TiB) encontrada foi aproximadamente 11,5% menor do que da liga 1 (Cu-Al), e isso deu-se possivelmente pela retirada de Ti da matriz por parte do precipitado.

Tabela 2 - Valores de Dureza Brinell.

Ligas	Dureza [HB]	Desvio Padrão
Liga 1	268,70	6,2
Liga 2	307,33	7,5
Liga 3	237,88	5,2

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho ligas Cu-Al, Cu-Al-Be e Cu-Al-Be-Ti-B foram fabricadas com sucesso pelo processo de fundição sob atmosfera ambiente e caracterizadas por microscopia óptica e ensaios de dureza.

A partir dos resultados obtidos é possível concluir que a metalografia foi suficiente para determinar as fases presentes em cada uma das ligas, o tamanho dos grãos e identificar precipitados. Foram realizados tratamentos térmicos

Os resultados de dureza encontrados estão de acordo com a literatura mencionada no decorrer do trabalho.

O acréscimo de elementos de liga, promoveu uma redução do tamanho do grão e um aumento de dureza para a liga Cu-Al-Be,

O acréscimo de elementos de liga promoveu uma diminuição na dureza na liga CuAlBeTiB, que pode estar relacionado com precipitação do TiB na matriz da liga.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) pelo apoio a realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] ALCÂNTARA, C. C. Influência do crescimento anormal de grão nas propriedades mecânicas de ligas superelásticas qualmntib e cualmn. 2017. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - Paraíba, 2017.
- [2] ARAÚJO FILHO, O. O. Obtenção e caracterização da liga quaternária β -cu-zn-al-ni com efeito memória de forma. Dissertação de mestrado. DEMEC/ UFPE, 2000.
- [3] AMERICAN ASSOCIATION STATE HIGHWAY. ASTM E10: Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. Eua: Astm, 2014.
- [4] AWAN, I. Z. fascinating shape memory alloys. Institute Charles Gerhard, Ecole Nationale Supérieure de Chimie, Montpellier, France, 2018. 02p.
- [5] BARON, M. P. Etude du comportement des interfaces austenite/martensite et martensite/martensite de deux alliages a effet memoire de forme: le CuCnAl et le CuAlBe. Tese de doutorado, pp. 189. L' Institut National Dês Sciences Appliquees de Lyon, França. 1998.
- [6] BARBOSA, C. Metais não Ferrosos e suas Ligas: Microestrutura, Propriedades e Aplicações. Rio de Janeiro: E-papers, 2014.
- [7] BELKAHLA S. Elaboration et caracterisation de nouveaux alliages à mémoire de forme basse temperature type CuAlBe. Tese de doutorado, pp. 132, L'Institut National Dês Sciences Appliquees de Lyon, França. 1990.
- [8] CAHN, R.W.; HAASEN, P. Physical Metallurgy. North Holland (1983).
- [9] CÂMARA, Alexandre Sandri. Avaliação das alterações geométricas e dimensionais dos instrumentos de niti do sistema protaper para o sistema protaper universal e o efeito destas sobre a flexibilidade e a resistência torcional. Universidade Estadual Paulista. ARARAQUARA, 2008. 25p
- [10] CZECHOWICZ, Alexander; LANGBEIN, Sven. Shape Memory Alloy Valves. New York: Springer, 2015.
- [11] CALLISTER, Willian D.. Ciência e Engenharia de Materiais. Utah: Ltc Editora, 2002.
- [12] COLPAERT; Hubertus. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns, 3ª Edição, Editora Edgarg Blücher Ltda, São Paulo – 1974.
- [13] FERREIRA, R.A.S. Transformação de fase. Aspectos cinéticos e morfológicos, Editora da UFPE, 2002.
- [14] GUNTHER, E. Arco de E. Horn: Materiais com memória de forma . In: A revista . Vol. 9, No. 1 , 1998.
- [15] FERNANDES, FRANCISCO MANOEL BRAZ. Ligas com Memória de Forma, Universidade Nova Lisboa CENIMAT. Abril de 2003.
- [16] FERNANDES JUNIOR, Paulo. Ensaio metalograficos. São Paulo: ., 2011.
- [17] GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. Ensaio dos Materiais. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc Editora, 2012.
- [18] GONZALEZ, C. H. Etude des comportements electro-thermomécaniques et de la stabilisation martensitique d'alliages monocristallins à mémoire de forme base cuivre. Tese D. Sc., INSA de Lyon, France. 2002.
- [19] GUNTHER, Eggeler, E. Hornbogen: Werkstoffe mit Formgedächtnis. In: Das Magazin. Jg. 9, Nr. 1, 1998
- [20] Kuhn G, Jordan L. Fatigue and mechanical properties of nickel – titanium endodontic instruments. J Endod. 2002.
- [21] LAGOUDAS, Dimitris C.. Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications. Tx, Usa: Springer, 2008.
- [22] LANZINI, F., ROMERO, R., CASTRO, M. L. Influence of Be addition on order-disorder transformations in β Cu-Al. Journal Intermetallics. 2008.
- [23] LECCE, Leonardo; CONCILIO, Antonio. Shape Memory Alloy ENGINEERING for Aerospace, Structural and Biomedical Applications. Naples: Elsevier Ltd, 2015.
- [24] LEXCELLENT, Christian. Shape-memory Alloys Handbook. ISTE Ltd, Great Britain, 2013.
- [25] MONTENCINOS, S., CUNIBERTI, A., R., CASTRO, M. L. Kinetics of isothermal decomposition in polycrystalline b CuAlBe alloys. Journal Intermetallics. 2009.
- [26] MONTECELLI, C. A. A competitividade da indústria brasileira de fundição. Dissertação – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1994.
- [27] NAVA, Marcelo. Estudo das Cinéticas de Recristalização e Crescimento de Grãos de Ligas com efeito memória de forma. UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, Brasília. 2013.
- [28] NISHIYAMA, Z. Martensitic Transformation, Mats. Academoc Press, New York, 1978.
- [29] Otsuka K, Wayman CM. Shape memory materials. Cambridge: Cambridge Univ. Press; 1998. 284p.
- [30] Otsuka K, Ren X. Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys. Progress in Materials Science. 2005.

Capítulo 4

ANÁLISE NUMÉRICA DE UMA PRANCHA DE SKATE FABRICADO EM COMPÓSITO ESTRUTURAL SUBMETIDA A ESFORÇOS TRANSVERSAIS

Álvaro Barbosa Rocha

Armando Wilmans Nunes da Fonseca Júnior

Felipe Silva Lima

Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

Resumo: O crescente desenvolvimento tecnológico em aplicações de engenharia tem demandado cada vez mais o emprego de materiais sofisticados com propriedades excepcionais, as quais apenas os materiais convencionais não têm sido capazes de suprir. Uma boa resposta a este cenário, são os compósitos, devido à variedade de combinação que seus microconstituintes podem assumir, derivando em produtos com economia de peso da ordem de 20% a 30% comparado com os materiais tradicionais. Face a isto, este trabalho apresenta uma análise numérica do comportamento mecânico de configurações arquitetadas em materiais compósitos como solução ao arranjo original em madeira para importante produto de desporto, o skate. Para a realização das análises foi utilizado o método de elementos finitos com o auxílio do software comercial ANSYS®, especificamente a extensão ACP (Ansys Composite Pre and Post) e ANSYS® Mechanical™ Academic Student Release 19.1. O método cumpriu as etapas de definição da geometria inicial, geração da malha do modelo e aplicação de uma análise estática para verificação do comportamento da estrutura frente as solicitações imputadas. O modelo numérico atestou que as distintas associações de materiais influenciam significativamente na seleção da constituição do compósito estrutural permeando uma análise mais objetiva da estrutura erguida.

Palavras-chave: Análise numérica, Skate, Materiais compósitos

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico contemporâneo é cada vez mais significativo, subsistindo a possibilidade de alçar produtos para diversas áreas de aplicação, que incorporam características dispareas como, por exemplo elevada resistência mecânica e facilidade de fabricação adjunta a baixa massa específica. Estrategicamente, em qualquer das situações almeja-se lograr produtos de qualidade e suficientemente confiáveis, fruto da combinação de novos materiais e tecnologias, sendo um diferencial competitivo a aposta no desempenho estético e funcional, sem se desvencilhar de aspectos relativos aos custos produtivos.

O desporto avulta-se como um campo, em que a Engenharia é levada ao limite de suas potencialidades, compelindo centros de referência a desenvolver pesquisas, na expectativa que atletas arregimentem vitórias acompanhadas de marcas extraordinárias. Notadamente, o avanço destes objetivos passa pela tecnologia dos materiais, despontando como uma opção de destaque os compósitos, materiais cuja constituição detém ao menos dois componentes escolhidos para trabalhar em sinergia predispondo-se a obter uma peça com as propriedades requeridas para a aplicação fim (CHAWLA, 1998).

A indústria de esportes radicais deposita grande expectativa no lançamento de produtos funcionais que abarquem as características supracitadas acima. Um item esportivo pertinente a esta discussão é o *skate*, que desde o seu surgimento a partir do *surf*, vem continuamente modificando não só suas formas, assim como os materiais que as

constituem, com a prerrogativa de suprir o ávido mercado consumidor da categoria, reservado a competidores e indivíduos, que usufruem do esporte para lazer e diversão, totalizando cerca de 10 milhões de praticantes só nos EUA (MAIA, 2015).

Poucos estudos centralizaram como tema o *skate* e suas características mecânicas, entretanto algumas pesquisas se sobressaem como Maia (2015), que desenvolveu e testou inúmeros protótipos de pranchas (*Shape*) fabricados em material compósito avaliando parâmetros de rigidez, peso e som, a fim de encontrar uma configuração competitiva a um modelo comercial já existente. Já, Munshi e Walame (2017) estimam o comportamento mecânico de um *shape* concebida mediante o emprego de compósitos laminados reforçados por fibra de bambu. Outros trabalhos enfocam, a tarefa de conceber novos modelos de *skate*, como Andrade (2015), que colabora com a criação de um produto específico que atenda as demandas das modalidades *downhill* e *freeride*.

No âmbito deste trabalho será efetuada uma análise numérica de diferentes disposições de um compósito sanduíche para prancha de *skate*, contemple a Fig. 1, com faces constituídas por laminados reforçado por fibras e um núcleo em material polimérico desenvolvido no software ANSYS®, que é baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). Esta vertente é acolhida, de maneira a compreender o comportamento físico de materiais compósitos, quando submetidos a esforços inerentes a aplicação de destino. Este estudo se faz necessário, uma vez que na atualidade existe uma grande demanda da utilização de materiais compósitos em diversos setores da indústria.

Figura 1: Diferentes formatos de pranchas (*Shape*)



Fonte: Autoria própria (2018)

2 METODOLOGIA

O desenvolvimento do presente estudo empregou o software comercial de elementos finitos *ANSYS Workbench 19.1* em sua versão Acadêmica, especificamente o módulo *ANSYS Composite Pre/Post (ACP)* e *Structural*. O plano de consecução principiou com a construção e especificação da geometria, material, malha de elementos finitos e, por fim as condições de contorno, que segmentam em etapas os procedimentos mais importantes adotados nas simulações numéricas.

2.1 MODELAGEM DO MATERIAL EMPREGADO

A prancha é idealizada como uma viga sanduíche, desta forma optou-se por faces compostas por laminados cuja matriz incide em um polímero do tipo epóxi reforçado com fibras de carbono ou fibras de vidro, visto que garantem altas propriedades mecânicas de resistência e rigidez, baixo peso, grande durabilidade, somado a facilidade de fabricação. Por sua vez, o núcleo (enchimento) destas estruturas é formado por uma espuma polimérica de PVC entremeada aos laminados citados, seu uso deve-se a sua baixa densidade e compatibilidade química com o material das faces. Acompanhe na Tabela 1, as principais propriedades dos constituintes.

Tabela 1: Propriedades mecânicas dos materiais em estudo

Propriedades	Fibra de Vidro/Epóxi	Fibra de Carbono/Epóxi	Espuma de PVC
Densidade (g/cm^3)	1,85	1,63	0,06
Módulo de Young (GPa)	39,5	215	0,01
Resistência a Tração (MPa)	965	1240	0,53

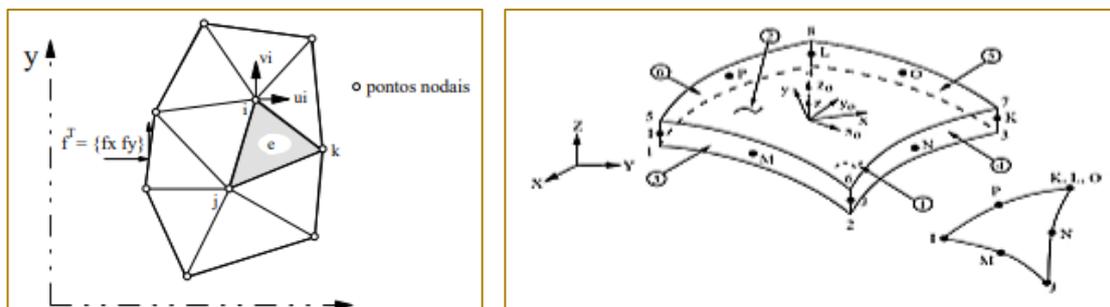
Fonte: Autoria própria (2018)

2.2 MODELAGEM DO ELEMENTO ESTRUTURAL

O elemento utilizado para as simulações da prancha tem natureza bidimensional, em razão da eficiência computacional e sua melhor compatibilidade com o módulo de compósitos do software *ANSYS®*. O elemento bidimensional, *SHELL281*, apropriado para

aplicações lineares, de grande rotação e/ ou de grande tensão não linear de estruturas não maciças (elementos de casca) tendo as mesmas, estruturas finas ou moderadamente grossas. O elemento possui oito nós com seis graus de liberdade em cada nó: translações nos eixos x , y e z e rotações em torno dos eixos x , y e z , observe sua representação abaixo.

Figura 2: Prancha elaborada em casca.



Fonte: ANSYS (2013).

A discretização do domínio baseia-se no princípios dos deslocamentos virtuais, tomando a igualdade entre o trabalho virtual

interno e externo do sistema. A igualdade entre o trabalho interno e externo pode ser expresso pela equação (1).

$$\delta.W = \int_{V_e} \delta u^t b dv + \int_V u^t m \ddot{u} dv \quad (1)$$

Onde $\delta.\Omega$ corresponde ao trabalho virtual externo, $\delta\varepsilon^r$ ao vetor das deformações virtuais, b ao vetor da força de volume real, u o vetor de deslocamento nodal da estrutura, m a matriz de densidade de massa e \ddot{u} o vetor da aceleração do deslocamento nodal da estrutura.

Em função da ocorrência de deformações ou deflexões virtuais, provocadas por um dado

vetor de tensões reais para um elemento genérico e com volume V_e e, são resolvidas equações matriciais para a rigidez (K), amortecimento (C), massa (M) e forças nodais (F), de modo que a equação geral do movimento, equação (6) é satisfeita.

$$K = \sum_{n=1}^{ne} K_e \quad (2)$$

$$M = \sum_{n=1}^{ne} M_e \quad (3)$$

$$C = \alpha.K + \beta.M \quad (4)$$

$$F = \sum_{n=1}^{ne} F_e \quad (5)$$

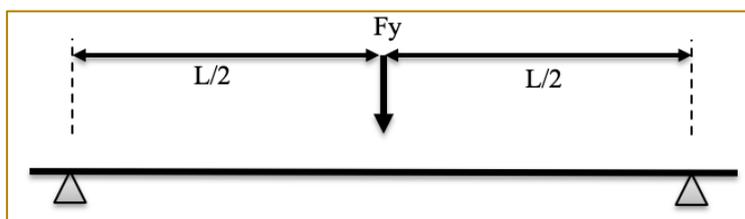
$$K.u + C.\dot{u} + M\ddot{u} = F \quad (6)$$

Onde n_e é a matriz função de forma do elemento ou matriz de interpolação dos deslocamentos correspondentes, K_e como a matriz de rigidez de cada elemento empregado na discretização da geometria o, M_e a matriz de massa de cada elemento empregado na discretização da geometria, F_e a matriz de força correspondente a cada elemento empregado na discretização da geometria, \dot{u} como o vetor da velocidade de deslocamento nodal da estrutura e α e β como coeficientes de ponderação.

2.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno empregadas para a modelagem da problemática, aproximando o sistema real do sistema computacional, foram formulados tomando a prancha com as condições de fixação esboçada na Fig. 3. O apoio simples (simply supported) introduz vínculo na estrutura, impedindo o deslocamento somente em uma direção, produzindo reações equivalentes a uma força com linha de ação conhecida, portanto remete a situação de uma viga em bi apoiada.

Figura 3: Ilustração da localização dos vínculos.

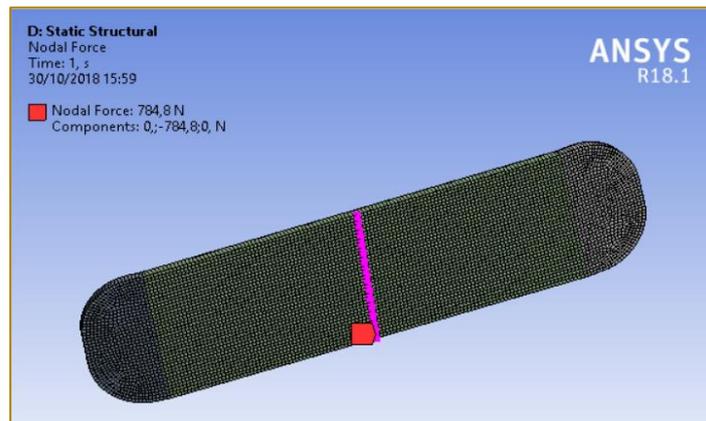


Fonte: Autoria própria (2018)

O valor de referência para o carregamento, corresponde ao emprego de uma força dinâmica de impacto equivalente ao peso de 80 kg, equivalente a 787,8 N, localizado na

região central da prancha, situação extrema de esforço para a estrutura em apreço, vide Fig.4.

Figura 4: Ilustração da localização do carregamento sobre a estrutura.



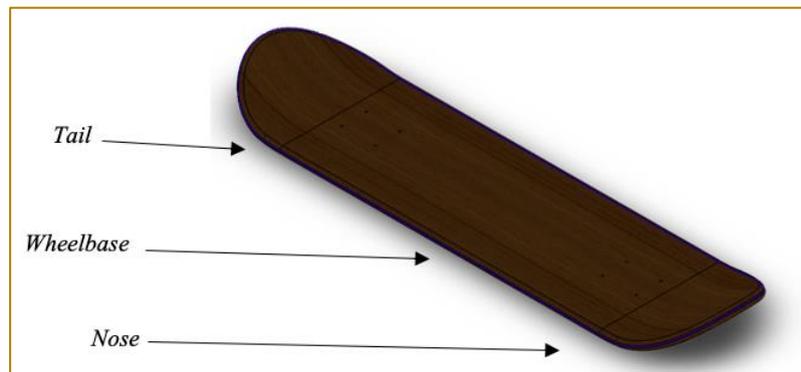
Fonte: Autoria própria (2018)

2.4 MODELO GEOMÉTRICO

Atualmente, os skates são formados por diversos componentes. O enfoque, especificamente, dado neste estudo é sobre o elemento denominado de prancha ou mais

popularmente conhecido por *shape*, que corresponde a interface de contato direto com o usuário, observe a Fig. 5. Quanto maior for o *shape* mais estabilidade proporcionará em altas velocidades, porém apresenta menor agilidade para curvas e rápidos desvios.

Figura 5: Prancha de Skate com seus respectivos elementos.

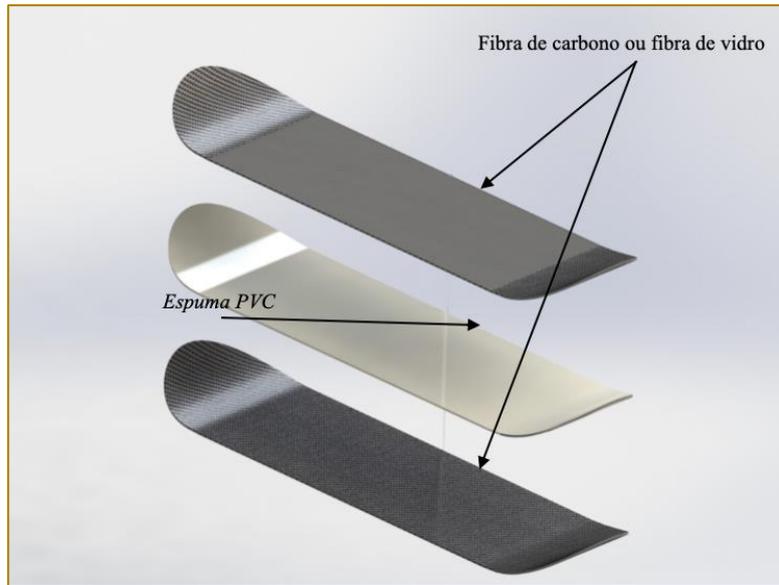


Fonte: Autoria própria (2018)

Na análise proposta assumisse, que a prancha possui dimensões equivalentes a 81,3 cm (32") de comprimento e 20,3 cm (8") de largura, e aproximadamente 1,3 cm (1/2") de espessura considerado o modelo mais comercializado pelos fabricantes de *skates*. A

modelagem da estrutura é baseada na criação de uma estrutura em sanduiche, conforme figura 3, vindo a apresentar 3 camadas intercaladas com fibra de carbono ou de vidro e espuma PVC, com camadas de espessuras média de 0,4 cm.

Figura 4: Composição da prancha de Skate, ilustrando as camadas intercaladas com espessura média de 0,4 cm.



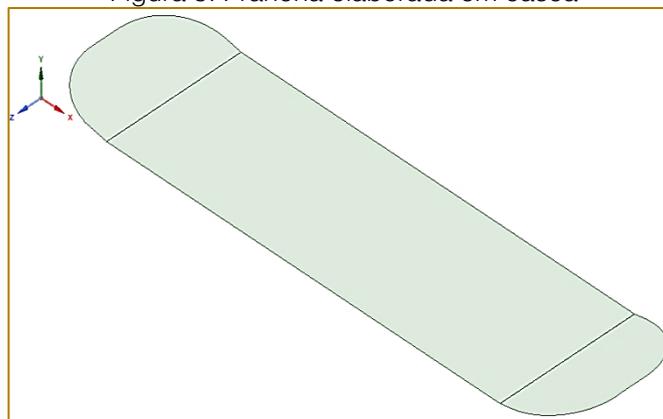
Fonte: Autoria própria (2018)

A execução da simulação em ambiente ANSYS®, especialmente caso de materiais compósitos, exige modificações na geometria prévia, o que implica na transformação da estrutura sólida 3D, para uma superfície correspondente a uma casca de espessura virtualizada, implicando em uma superfície com o perfil da estrutura a ser simulada. O processo de virtualização da espessura permite que as propriedades das múltiplas camadas de compósitos seja um dado qualitativo inserido na matriz de equações que avaliam o quadro de tensão e

deslocamento e não um dado gráfico, permitindo que a maior fração do poder computacional seja direcionado a resolução das equações.

As geometrias foram erguidas em um software CAD (Computer-Aided Design) de modelagem 3D, denominado SpaceClaim, encarregado da criação, edição e porventura reparo da geometria, vide a Fig. 5. O emprego desta plataforma sucedeu-se, em função da flexibilidade e facilidade nos comandos, aliado a integração com o software CAE (*Computer-Aided Engineering*) ANSYS®.

Figura 5: Prancha elaborada em casca



Fonte: Autoria própria (2018)

Uma vez definida a geometria da estrutura, para o desenvolvimento deste trabalho é utilizado um pré-processador denominado

ACP (*ANSYS Composite Pre and Post*), a fim de modelar o compósito, material partícipe do componente estrutural em julgamento.

2.5 GERAÇÃO DA MALHA

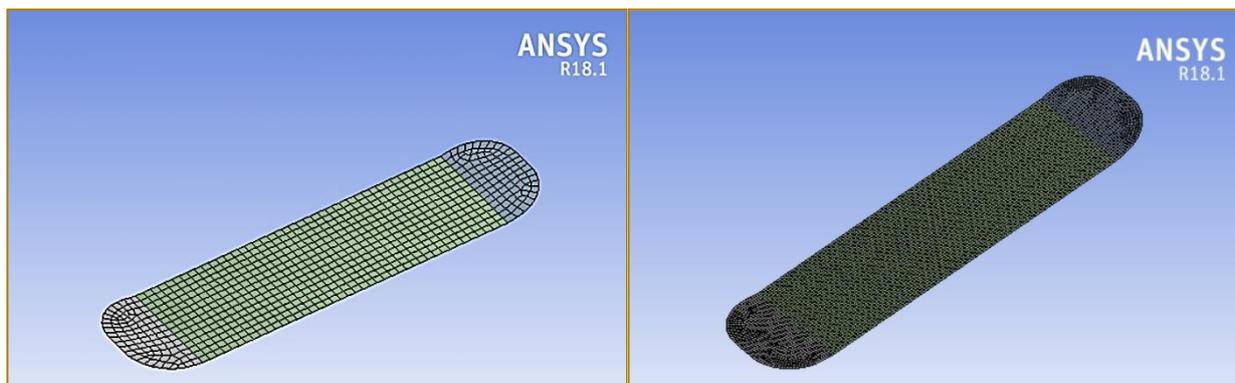
A malha retrata a partição da estrutura em elementos, que descrevem aproximadamente o comportamento real do sistema em apreço. O *ANSYS®* permite ao usuário alterar parâmetros de malha dependendo da simulação em específico. O presente estudo transcorreu com a utilização de uma malha com relevância + 100, considerada o extremo valor – grosseira (-100) e refinada (+100) – em escala ofertada pelo *Software*.

Os comandos para dimensionamento (*sizing*) da malha, singularmente o centro de relevância (*relevance center*), suavização (*smoothing*), centro do ângulo de expansão

(*span angle center*), foram configurados para valores demasiadamente estreitos, a fim de garantir a acurácia na convergência de resultados. Ademais foi imputado a condição de *agressive mechanical*, com perspectiva a avaliar deformações apreciáveis e materiais com comportamento intrincado (não-linear). Ao final, somado a esses procedimentos foi estabelecido um controle de malha que associou o *face sizing* e *mapped face meshing*, almejando uma malha estruturada nas superfícies da peça.

O arranjo final contou com 6558 Nós e 6379 elementos, observe a Fig. 6 que expõe o refinamento gerado da configuração inicial para a configuração final.

Figura 6: Aspectos da malha criada



Fonte: Autoria própria (2018)

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 MODELAGEM NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS

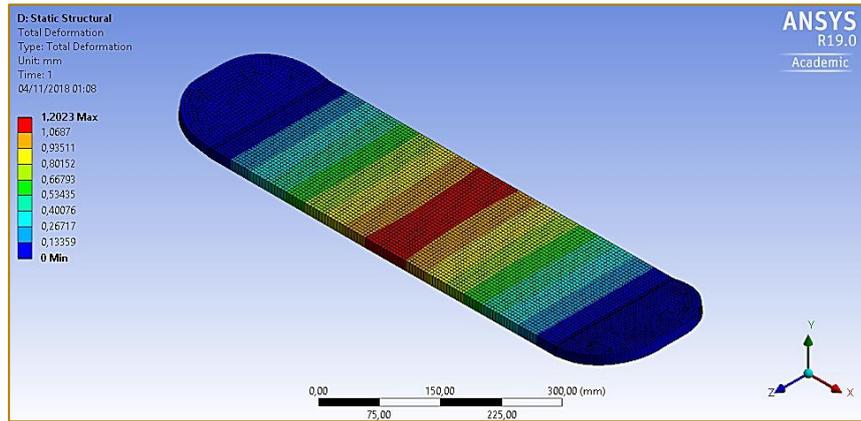
Por meio da modelagem da geometria empregando materiais distintos e, fazendo uso de um ambiente multifísico do *ANSYS®*, foi possível determinar a partir da análise do material compósito, com número de camadas pré-determinadas, qual seria melhor empregado para a carga máxima teórica de 80 kgf. Para as análises apresentadas, a seguir foram analisados e apresentados

somente os critérios de deformação devido a formação de flecha na estrutura.

3.1.1 FIBRA DE CARBONO

A prancha reforçada por fibra de carbono embebida a uma matriz polimérica de epóxi, foi idealizada como uma viga sanduíche, no qual entre as faces laminadas a um material de enchimento a base de espuma polimérica. Ao presente arranjo constata-se uma deformação apresentada segundo as Fig. 7 e 8.

Figura 7 – Deformação sofrida pela prancha confeccionada em fibra de carbono.



Ao confrontar a Fig. 7, percebe-se que o maior deslocamento ocorre ao centro da estrutura, local de aplicação do esforço, resultando em uma flexa máxima de 1,2023mm. Por outro lado, os pontos onde se localizam os mancais de fixação das rodas tem deformação nesta área de aproximadamente 0,3000 mm.

A formação da flexa pela prancha pode ser facilmente visualizada na Fig. 8. Em

contrapartida na Fig. 9 a), constata-se a partir do parâmetro denominado de *Safety Margin* (margem de segurança) diretamente ligado ao fator de segurança da estrutura (*Safety Factor*), o fato que o corpo em apreço resiste a uma carga superior a duas vezes o valor inicial, exprimindo na região em contraste exibida, em detalhes, na Fig. 9 b) uma potencial área de colapso conforme os criterios de falha adotados (Tsai-Wu).

Figura 8 – Formação de flecha sofrida pela geometria confeccionada em fibra de carbono.

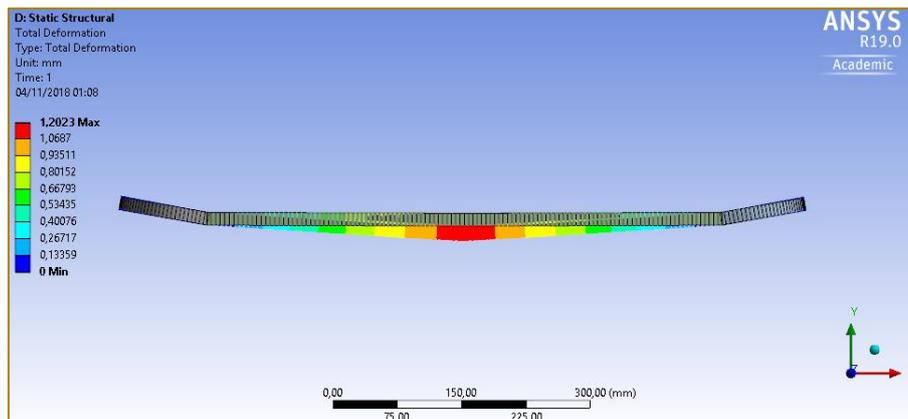
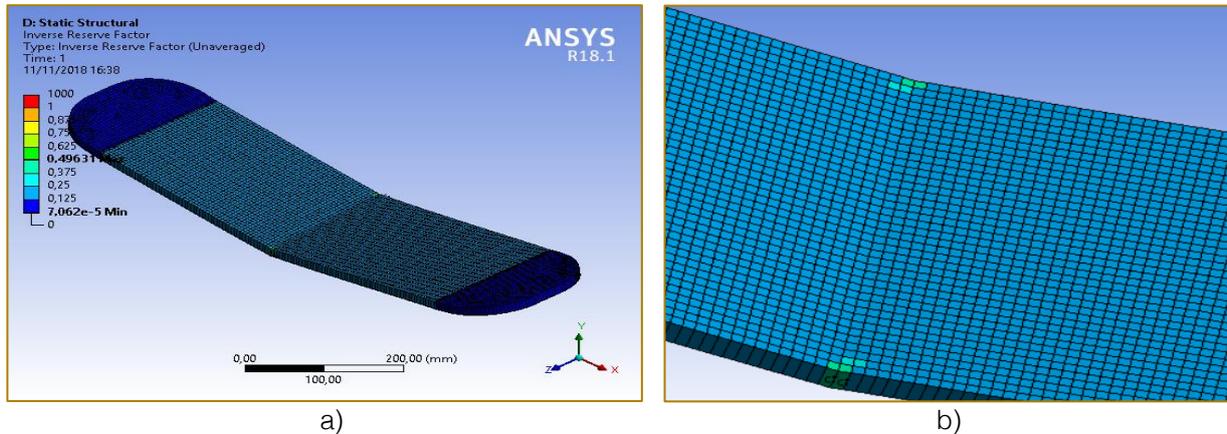


Figura 9 – a) Esboço da margem de segurança por região; b) detalhe de um local de atenção para o projetista.

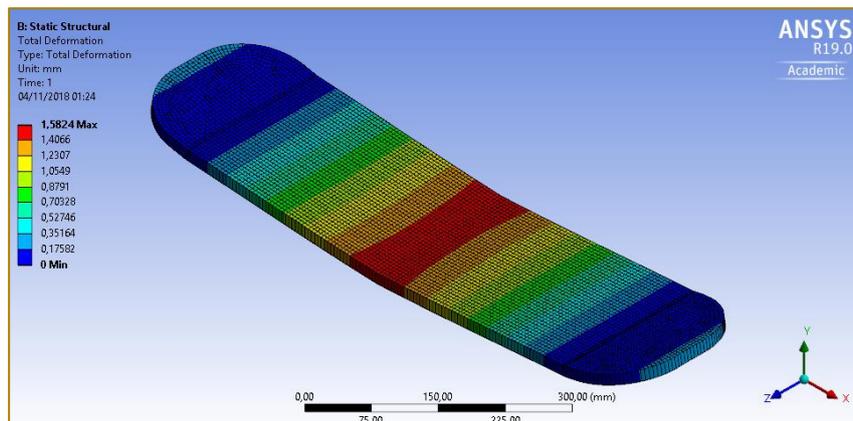


3.1.2 FIBRA DE VIDRO

Já a prancha em apreço foi modelada da mesma maneira, entretanto o reforço passa a ser fibra de vidro. Para o presente material a

deformação é apresentada segundo as Figuras 10 e 11.

Figura 10 – Deformação sofrida pela prancha confeccionada em fibra de vidro.



Segundo a Fig. 10, o deslocamento máximo ocorre ao centro da estrutura originando uma flexa máxima para este caso de 1,5824 mm. A deformação na região próxima aos mancais de fixação das rodas beira 0,3515 mm. Diferentemente do caso anterior, a fibra de vidro promove uma deformação maior, justificável pelas propriedades intrínsecas do próprio reforço inferiores mecanicamente as propriedades da fibra de carbono.

A formação da flecha pode ser vislumbrada na Figura 11. Em outra perspectiva na Fig. 12 a), desprende-se que a estrutura reforçada em fibra de vidro apresenta um comportamento muito semelhante a reforçada por fibra de carbono com uma margem de segurança um pouco menor, por conseguinte fica a cargo do executor do projeto a tarefa de ponderar os fatores como resistência mecânica e custo, a princípio nesta situação conflitantes.

Figura 11 – Formação de flecha sofrida pela geometria confeccionada em fibra de vidro.

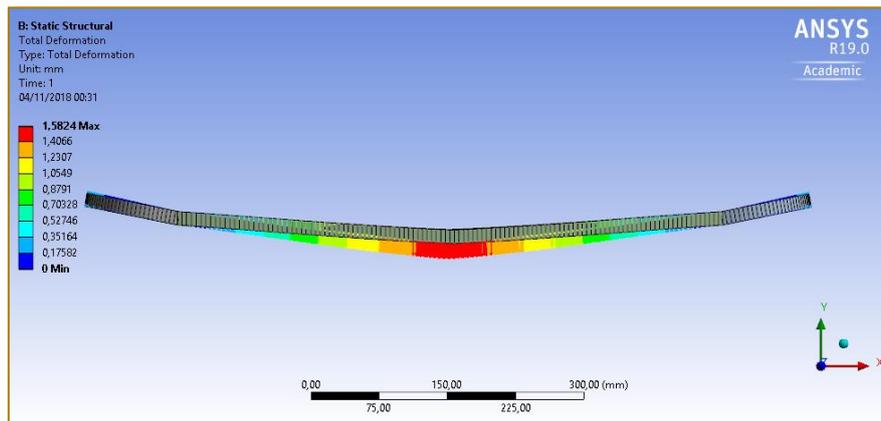
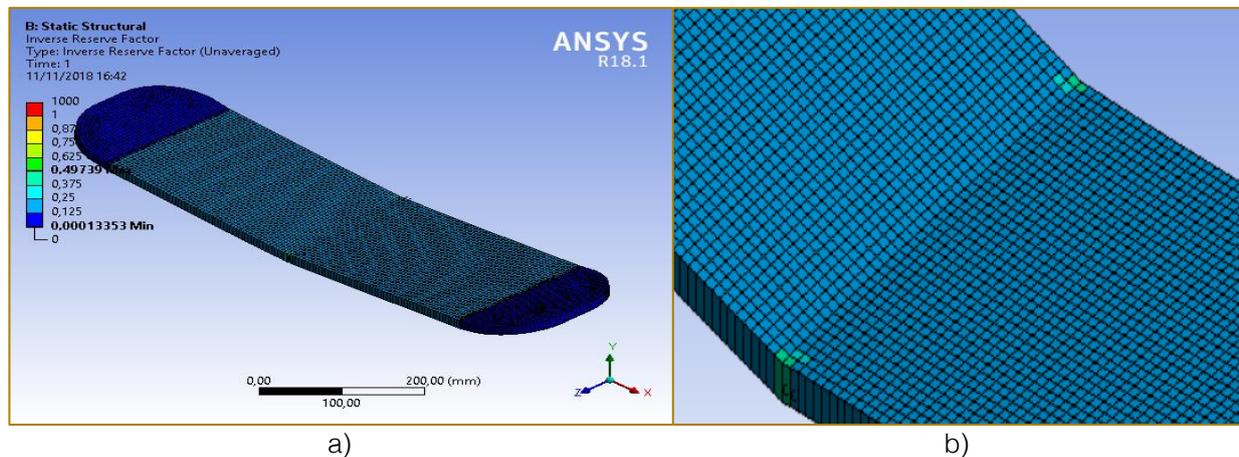


Figura 12 – Formação de flecha sofrida pela geometria confeccionada em fibra de carbono.



4 CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados obtidos, pode-se concluir que as modificações no comportamento estático repercutem uma grande flexibilidade no que diz respeito as faixas de utilização do material compósito, entretanto, por uma ótica análoga, essa característica pode se transformar em uma grande desvantagem, sendo esta a dificuldade na fabricação de materiais que reproduzam o comportamento esperado.

Pode-se afirmar que dentro da análise estática, tem-se um material mecanicamente superior, a disposição com fibra de carbono como material de reforço, exibiu uma deflexão ao ser exposta a um carregamento transversal inferior a cerca de 30 % a deflexão enfrentada pela fibra de vidro, ou seja, promovendo o direcionamento dos eixos adequadamente de forma a se obter uma maior resistência do sistema segundo o critério de falha adotado (Tsai-Wu), entretanto sopesa sobre essa

opção o fator orçamentário necessitando a posteriori uma análise de otimização, do qual conjuntamente são ponderados resistência e custo em uma mesma função matemática.

As zonas de fixação dos mancais das rodas expuseram deformações semelhantes para ambos os casos, com uma deformação de aproximadamente 0,3000 mm para a estrutura em fibra de carbono e de 0,3515 mm para a estrutura em fibra de vidro, sendo que a diferença entre as deformações são justificáveis pelo comportamento intrínseco do material usado como reforço e da presença de furos, que atuam como concentradores de tensão e promovem um quadro de deformação considerável.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES.

REFERÊNCIAS

- [1] ANSYS. ANSYS Composite PrepPost User's Guide. Canonsburg: Sas Ip, Inc., 2013.
- [2] ANDRADE, P.N.B., 2015, "Chimpá longboard". (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação – Departamento de Design, Bauru.
- [3] CHAWLA, K. K. Composite Materials, Science and Engineering. Springer Verlag, 1998.
- [4] LIU, H.; COOTE, T.; AIOLOS, C. 2017 "Skateboard deck materials selection" IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v.128, 2018.
- [5] MAIA, G.C., 2015, "Tábua de Skate em resina poliéster reforçada com fibra de vidro". (Dissertação de Mestrado) – Instituto Superior de Engenharia do Porto – Departamento de Engenharia Mecânica, Porto.
- [6] MALLICK, P.K. Composites Engineering Handbook. Marcel Dekker, Inc., NY, 1997.
- [7] MUNSHI, I.A; WALAME, M.V., 2017 "Finite Element Analysis of Skate Board Made of Bamboo Composite". International Research Journal of Engineering and Technology, v.4, 2017.

Capítulo 5

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E MECÂNICA DE UMA LIGA MEMÓRIA DE FORMA DO SISTEMA CU-AL-MN.

Carlos Cássio de Alcântara

Jéssica Menezes Alves

José Joelson de Melo Santiago

Resumo: Neste trabalho foi realizado a caracterização mecânica e microestrutural de uma liga do sistema Cu-Al-Mn passível de efeito memória de forma. As ligas foram elaboradas em forno sob atmosfera ambiente, tratadas termicamente por homogeneização e têmpera, e analisadas por ensaios de microscopia óptica, difração de raios-x, microdureza e tração uniaxial. Os resultados obtidos dos ensaios de DRX mostraram que a liga bruta de fundição a temperatura ambiente ($T_{amb} \approx 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$) apresentou a fase β , fase γ e Al_8Mn_5 . A liga tratada termicamente apresentou a temperatura ambiente a fase Austenítica β e após os ensaios de tração exibiu fases martensíticas γ' de fórmula estrutural AlCu_3 , fase β e fase γ . O ensaio de microdureza determinou a dureza das fases presentes contribuindo para a classificação das fases encontradas. O ensaio de tração mostrou um comportamento linear associado à deformação da fase austenítica presente na liga à temperatura ambiente.

Palavras-chave: Ligas memória de forma. Liga Cu-Al-Mn. Efeito memória de forma.

1 INTRODUÇÃO

As ligas com memória de forma (LMF) são metais que, após sofrerem uma deformação, têm a capacidade de retornar à sua forma original quando aquecidas a determinada temperatura. Tais ligas possuem propriedades características, tais como: transformação martensítica, efeito memória de forma (EMF) e superelasticidade (SE) (CALLISTER, 2008). A transformação martensítica é uma transformação de fase no estado sólido que ocorre sem difusão de átomos. Essa transformação é responsável pela mudança de forma entre a fase de alta temperatura denominada austenita (A), e a fase de baixa temperatura chamada martensita (M) (CANBAY; GENC; SEKERCİ, 2014). A transformação de fase é reversível e não dependente do tempo, uma vez que só distorce a rede atômica sem causar migração de átomos de longo alcance. Outra forma de obter a transformação martensítica é através da aplicação de tensão. Essa tensão necessária para promover a transformação de fase é chamada de Tensão de Indução Martensítica (CANBAY; GENC; SEKERCİ, 2014).

As LMF têm sido extensivamente estudadas, nos últimos anos, para aplicação em diversas áreas (Rao, et al., 2015). Pode-se destacar aqui as ligas, Ni-Ti, Cu-Al-Ni, Cu-Al-Be e Cu-Al-Mn, como as ligas mais utilizadas. Dentre estas as ligas Ni-Ti, são as que possuem melhores propriedades termoelásticas e que em particular, são amplamente utilizadas em muitas aplicações de engenharia e biomédicas. Algumas das desvantagens que essas ligas sofrem são baixas temperaturas de transformação, dificuldade na produção e processamento e alto custo. Por outro lado, as ligas com memória de forma baseadas em cobre são mais fáceis para produzir, processar e são menos onerosas (CALUËTE, 2012). Portanto desenvolver ligas memória de forma do sistema Cu-Al com propriedades

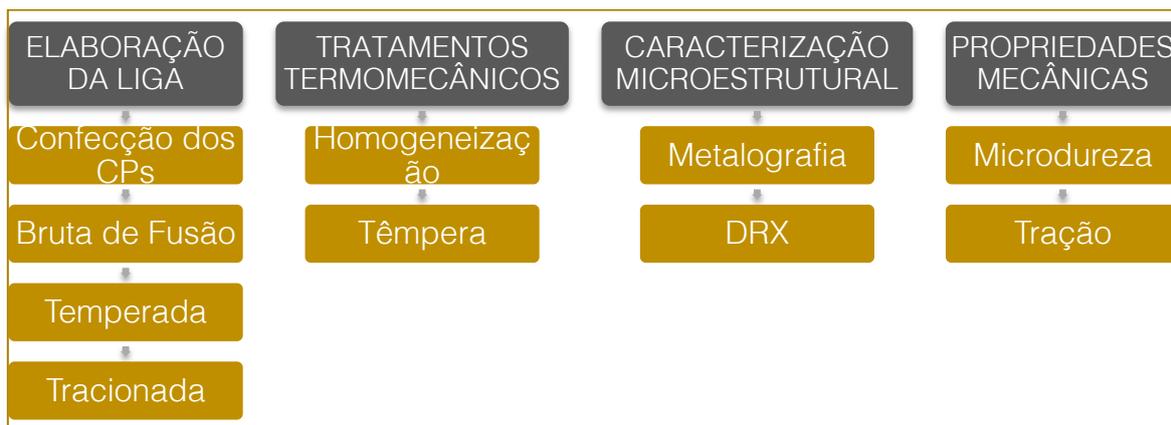
adequadas podem potencializar e aumentar suas aplicações em diversas áreas. Visando modificar as propriedades térmicas e mecânicas de ligas à base de cobre, é realizada a inserção de um terceiro ou quarto elemento na composição deste sistema, modificando assim: temperaturas de transformação, grau de deformação, ductilidade, tamanho de grão entre outras propriedades metalúrgicas. As vantagens das ligas ternárias Cu-Al-Mn, comparadas com metais comuns e outras ligas memória de forma, são a boa resistência mecânica e alta capacidade de amortecimento. As ligas Cu-Al-Mn têm baixo custo de produção em relação a ligas NiTi, devido a não necessidade de fundição a vácuo. As temperaturas de transformação podem ser ajustadas de -180°C até 230°C , através da composição química, adição de elementos quaternários, processos de fabricação ou pelos tratamentos térmicos subsequentes. Sabe-se que para baixos teores de Al, as ligas exibem boa ductilidade e capacidade de trabalho a frio. Adicionalmente, o Mn promove o aumento da fluidez da liga no processo de fundição (MIELCZAREK et al., 2008). Neste contexto o objetivo deste trabalho é elaborar uma liga Cu-Al-Mn e avaliar as características microestruturais através de ensaios de microscopia óptica, difração de raio X, microdureza e tração uniaxial.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades desenvolvidas foram inteiramente realizadas nas instalações da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). A metodologia adotada está apresentada no fluxograma da Figura 1.

Neste trabalho foi elaborada a liga policristalina Cu-Al-Mn a partir de elementos de alta pureza (99,99%) na composição Cu-17%Al-11,2%Mn (% at.)

Figura 1- Fluxograma da sequência metodológica



Os elementos foram previamente pesados em uma balança analítica da marca Shimadzu modelo TX323L. O manganês, antes da pesagem, foi submetido ao processo de decapagem para retirada da camada superficial de óxido. Para isso, uma certa quantidade do elemento foi imersa em uma solução aquosa com ácido nítrico 10%, de composição H₂O-5% HNO₃ (% em volume). A liga foi fundida em forno tipo mufla da marca Lucadema, modelo LUCA 2000, em cadinho de argila-grafite, sob atmosfera ambiente e vazada em um molde de seção retangular com dimensões 120mm de comprimento x 22mm de largura x 40mm de altura. O lingote bruto de fundição foi homogeneizado a 850°C por um período de 12 horas com resfriamento lento dentro do próprio forno. Após a homogeneização, foram confeccionados corpos de prova (CPs) adaptados. As dimensões dos CPs estão dispostas na Figura 2. No processo de confecção foi utilizada uma máquina de eletroerosão a fio, modelo Electrocut AR 1300.

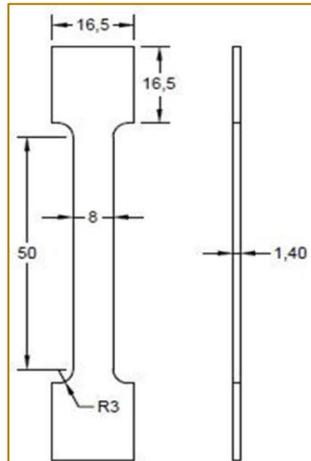
Os corpos de prova foram divididos em 3 grupos: Bruto de Fundição (BF), Temperado e Tracionado. As amostras do grupo BF foram apenas homogeneizadas. As amostras do grupo Temperada foram submetidas a tratamentos de homogeneização e têmpera.

As amostras do grupo Tracionada além da têmpera e homogeneização foram tracionadas até a ruptura.

O tratamento de homogeneização foi realizado a 850°C por um período de 12 horas com resfriamento lento dentro do próprio forno. A têmpera foi realizada com aquecimento a 850°C, mantido por 30min, seguido de resfriamento em água a temperatura ambiente ($T_{amb} \approx 25 \text{ }^\circ\text{C}$).

A análise microestrutural foi realizada com o auxílio de um microscópio óptico AxioTech 30 da Carl Zeiss. As amostras foram submetidas a lixamento manual com lixas de numeração granulométrica 80, 100, 320, 600 e 1200, seguidas de polimento mecânico em alumina 1µm. Para a visualização dos contornos de grão foi utilizado o método de ataque por esfregação, onde uma porção de algodão foi imersa em um reativo de cloreto de ferro III (5g FeCl₃, 30 ml de HCl 37% e 100ml de H₂O destilada) e esfregada contra a superfície das amostras. O tamanho de grão das amostras foi realizado através da determinação do comprimento médio do intercepto (DCMI) na direção longitudinal pelo processo de Heyn, descrito pela Asociación Mercosur de Normalización (2001).

Figura 2 - Dimensões dos CPs.



A identificação das fases foi realizada através de difração de raios-x. O ensaio foi realizado com o auxílio de um difratômetro da marca Shimadzu, modelo Lab X/XRD-6000, passo de $0,02^\circ$, varredura de 10 a 90° e tempo de passo de $1s$, utilizando a radiação K-alfa do cobre como fonte de radiação monocromática. Os dados gerados no ensaio foram interpretados através do software X'Pert HighScore Plus, sendo possível a coleta do 2θ e do espaçamento interplanar (d_i) referentes aos picos de difração. Essas informações coletadas foram comparadas com o banco de dados de fases e estruturas do aplicativo Crystmet, permitindo a identificação das fases presentes nos CPs. Todas as análises foram realizadas em temperatura ambiente.

O ensaio de microdureza foi realizado com auxílio de um microdurômetro da marca Shimadzu modelo HMV-2 Series, com carga 0.100 kgf e tempo de aplicação da carga de

$10s$. Os ensaios foram realizados à temperatura de 20°C .

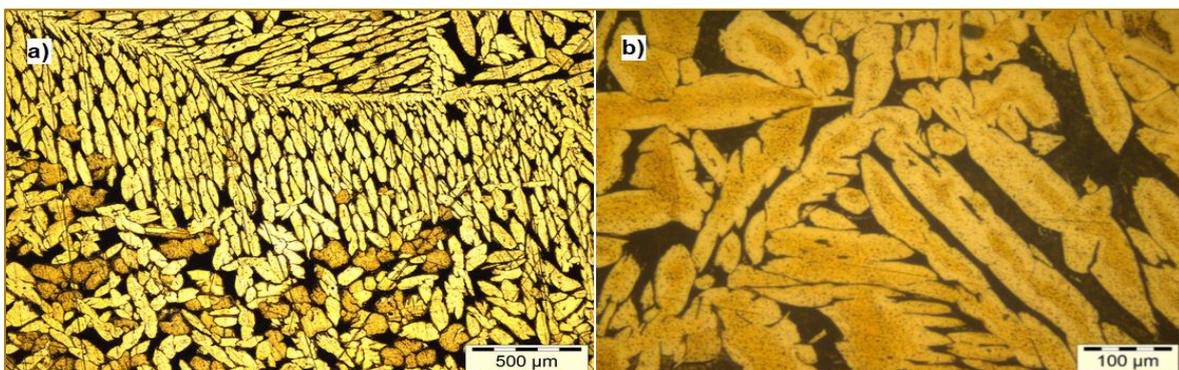
As propriedades mecânicas da liga foram determinadas através de um ensaio de tração uniaxial, com auxílio de uma máquina da AUTOGRAPH modelo AG-X 10kN , nos CPs Temperado. A velocidade de aplicação da carga no ensaio foi de $0,5\text{ mm/min}$, até a ruptura. Desse ensaio foram obtidos a tensão de indução martensítica através do método das tangentes, o limite de resistência à tração e a deformação máxima.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 METALOGRAFIA.

A micrografia das amostras BF pode ser visualizada na Figura 3 que revela a presença de três regiões distintas: a região clara, a região escura ao fundo e os precipitados sob a forma de esferas no interior dos grãos.

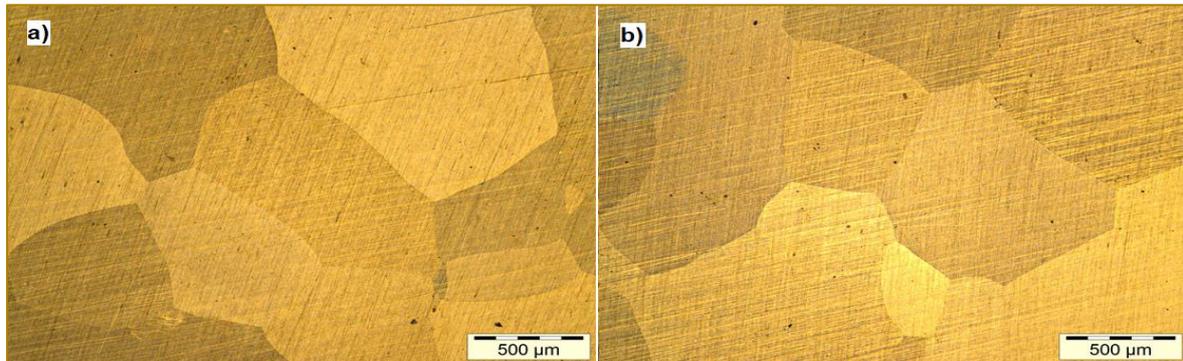
Figura 3 - Micrografia das amostras BF: a) Micrografia com aumento $5x$. b) Micrografia com aumento de $20x$.



A micrografia das amostras do grupo Temperada, ilustrada na Figura 4, revela a presença da fase austenítica β . Um fator que corrobora com essa ideia é a ausência de

plaquetas ou agulhas características da fase martensítica. O tamanho de grão mensurado nas amostras foi de 662 μm .

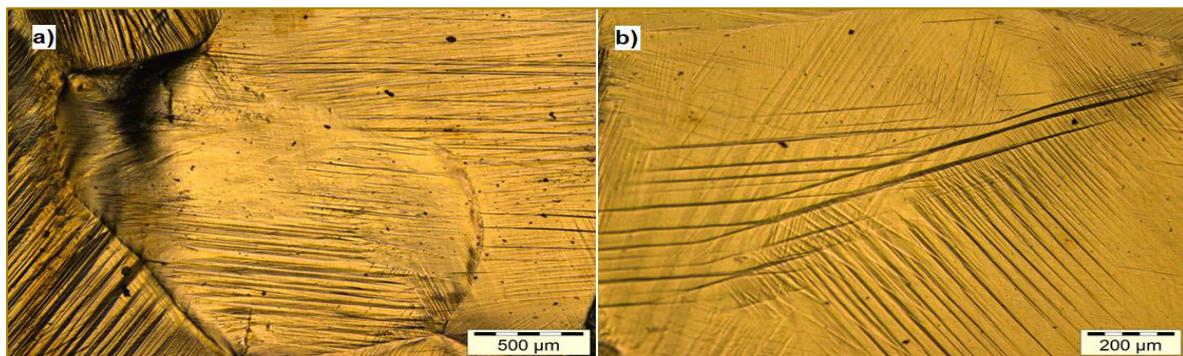
Figura 4 - Micrografia das amostras tratadas termicamente



Nas micrografias das amostras do grupo Tracionada, Figura 5, pode-se observar a presença de agulhas provenientes da

transformação martensítica induzida por tensão

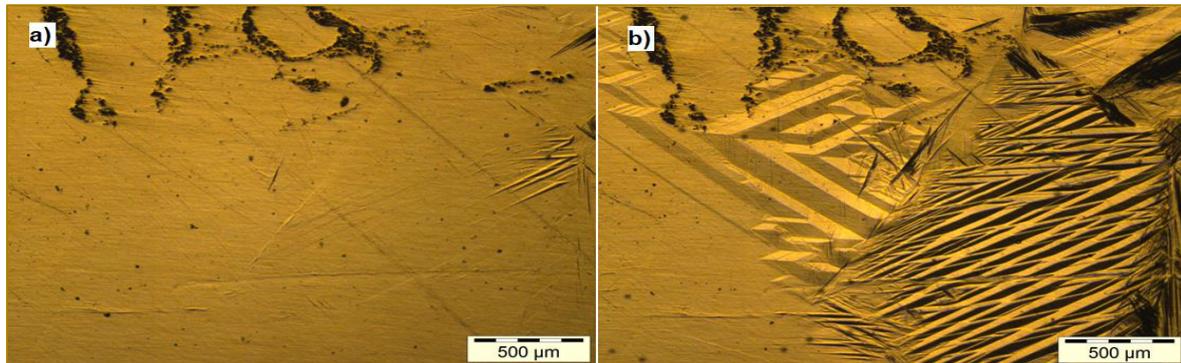
Figura 5 - Micrografia dos CPs temperados após ensaios de tração: a) Micrografia com aumento 5x. b) Micrografia com aumento de 10x



As micrografias obtidas através do resfriamento em nitrogênio líquido das

amostras do grupo Temperada podem ser visualizadas na Figura 6.

Figura 6 - Micrografia com Nitrogênio Líquido dos Corpos de prova tratados termicamente: a) Micrografia no início da transformação de fase. b) Micrografia no fim da transformação de fase.



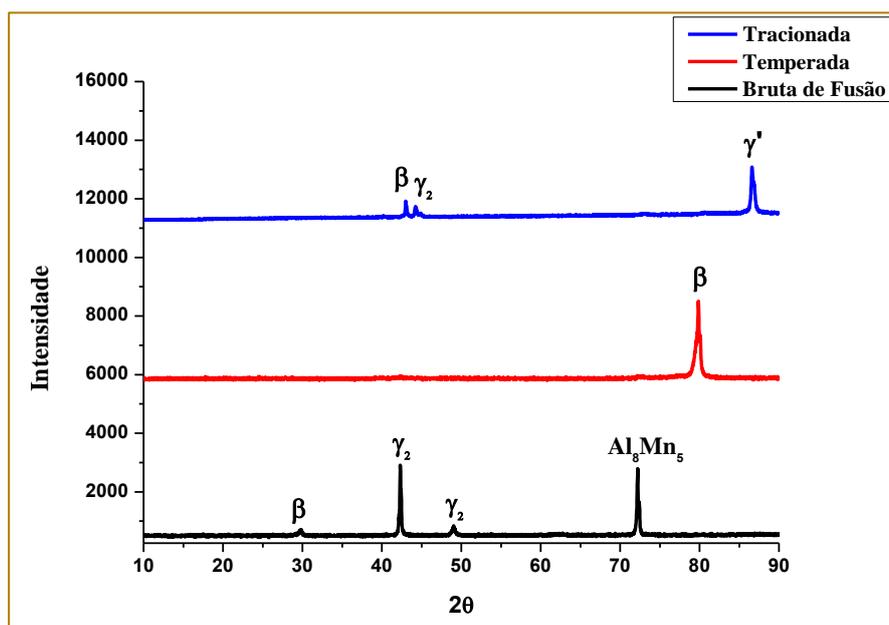
3.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

A Figura 7 apresenta os resultados obtidos do ensaio de DRX realizado nas amostras BF, Temperada e Tracionada.

Na amostra BF é possível identificar a fase β , de estrutura L21 e grupo espacial Fm3m, cujo plano de difração é (2 0 0). Os planos (3 0 0) e (3 3 2) são referentes à fase γ , que apresenta estrutura Cu9Al4 e grupo espacial P-43m. Uma terceira fase, cujo plano de difração é o (4 4 4), é identificada sob a forma de Al_8Mn_5 , de estrutura CCC e grupo espacial I-43m. Na amostra Temperada é possível notar a supressão das fases existentes na amostra bruta de fundição após

a têmpera. A amostra exibe apenas a fase austenítica β , de estrutura L21 e grupo espacial Fm3m, essa com plano de difração (4 2 2). A amostra Tracionada exibe a fase β de plano (2 2 0), a fase γ de plano (3 3 0) e a fase martensítica ortorrômbica γ' , de fórmula estrutural $AlCu_3$ e grupo espacial P2mm, sob os planos (5 1 1) e (1 2 10), que representa uma das duas fases martensíticas que podem ser formadas em ligas Cu-Al-Mn. Sua sequência de empilhamento, segundo a notação de Ramsdell, é 2H (OBRADÓ et al., 1998, p. 14245).

Figura 7 - Difratoograma das amostras.



3.3 MICRODUREZA

Ensaio de microdureza foram realizados para a obtenção da dureza das regiões contrastadas na micrografia. Esses resultados serão utilizados juntamente com os resultados

do ensaio de DRX para a classificação das fases. A Tabela 1 mostra o valor de dureza dessas fases.

Tabela 1 - Dureza das fases presentes na amostra bruta de fusão

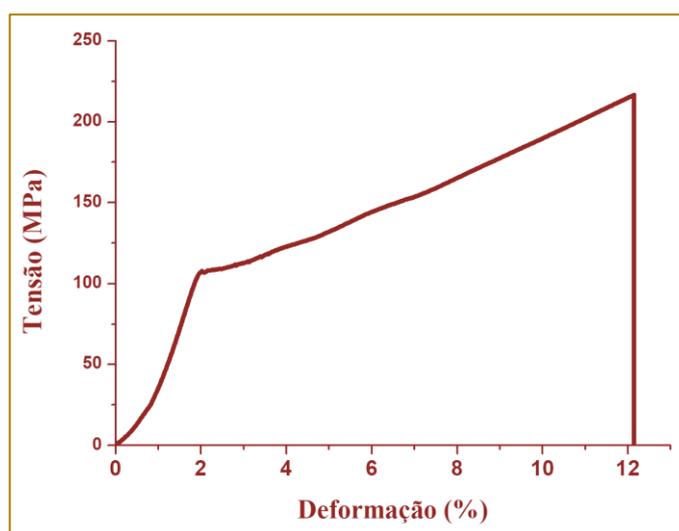
FASE	CARGA (GF)	DUREZA (HV)
Escura	HV0.100	395
	HV0.100	419
	HV0.100	380
	Média	398
	Desvio	19,67
Clara	HV0.100	110
	HV0.100	115
	HV0.100	98,1
	Média	107,70
	Desvio	8,68

3.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

Na Figura 8 está mostrada uma curva obtida do ensaio de tração. Nesta curva, verifica-se em um primeiro estágio um comportamento linear associado à deformação da fase austenítica presente na liga à temperatura ambiente. Em seguida, observa-se um decaimento na inclinação da curva. Esse decaimento está relacionado às deformações

pseudoplásticas de ordenamento das diversas variantes da martensita. Logo após, um novo comportamento linear, agora, com menor inclinação, é desenvolvido. Este se associa ao menor módulo de elasticidade que a variante martensítica predominante apresenta em relação à sua respectiva fase austenítica. Por fim, termina-se com a queda repentina do valor de tensão, caracterizando a ruptura do material.

Figura 8 - Gráfico Tensão x Deformação da Liga Cu71,8Al17,0Mn11,2



Na Tabela 2 estão os valores das propriedades obtidos no ensaio de tração. Os baixos valores da Tensão de Indução sugerem que a temperatura de trans-

formação está próxima da temperatura na qual foi realizado o ensaio de tração. Os dados referentes ao Limite de Resistência à

Tração da liga apresentaram pouco desvio e

alcançaram uma média de 253,841 MPa.

Tabela 2 - Gráfico Tensão x Deformação da Liga Cu71,8Al17,0Mn11,2

CORPO DE PROVA	TENSÃO DE INDUÇÃO MARTENSÍTICA (MPA)	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPA)	DEFORMAÇÃO MÁXIMA (%)
1	113	260,9	18,6
2	127	210,3	7,6
3	100	208,0	8,3
4	118	252,7	16,0
5	120	269,0	13,9
6	123	292,5	14,5
7	69	266,0	11,8
8	115	248,9	12,4
9	50	276,2	15,2
Média	103,9	253,8	13,2
Desvio Padrão	20,6	28,4	3,6

4 CONCLUSÕES

Os CPs temperados apresentaram tamanho de grão médio de 662 μm .

O processo de têmpera promoveu a supressão das fases γ e Al8Mn5, e exibe apenas a fase β .

Houve a formação da fase martensítica γ' nos CPs tracionados.

Através do ensaio de microdureza foi possível determinar as durezas das fases na amostra Bruta de Fusão e na Temperada.

Do ensaio de tração uniaxial foram obtidos a Tensão de Indução Martensítica, o Limite de Resistência à Tração e a Deformação Máxima dos CPs Temperados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) pelo apoio a realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

[1] ALCÂNTARA, C. C. de. INFLUÊNCIA DO CRESCIMENTO ANORMAL DE GRÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE LIGAS SUPERELÁSTICAS CuAlMnTiB e CuAlMn. 2017. 67 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal da Paraíba.

[2] ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. NM241:2001 - Determinação do tamanho de grão em materiais metálicos. 2001.

[3] AZEVEDO, M. R. D. ESTUDO DO SISTEMA DE LIGAS Cu-Al PASSÍVEIS DO EFEITO MEMÓRIA DE FORMA. 2011. Monografia (Bacharel em Ciência e Tecnologia) — Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA.

[4] BUEHLER, W. J.; GILFRICH, J. W.; WILLEY, R. C. Effect of low temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi. J. Appl. Phys, n. 34, p. None – 1475, 1963.

[5] CALLISTER, W. D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 7. ed. LTC, 2008. ISBN 978-85-216-1595-8.

[6] CANBAY, C. A.; GENC, Z. K.; SEKERCI, M. Thermal and structural characterization of Cu–Al–Mn–X (Ti, Ni) shape memory alloys. Applied Physics: Materials Science & Processing, A, n. 115, p. 371 – 377, Apr 2014.

[7] CZECHOWICZ, A.; LANGBEIN, S. Shape Memory Alloy Valves: Basics, Potentials, Design. Springer, 2015. ISBN 978-3-319-19081-5.

[8] LECCE, L.; CONCILIO, A. Shape Memory Alloy ENGINEERING for Aerospace, Structural and Biomedical Applications. : Elsevier, 2015. ISBN 978-0-08-099920-3.

[9] MALLIK, U.; SAMPATH, V. Influence of quaternary alloying additions on transformation temperatures and shape memory properties of Cu–Al–Mn shape memory alloy. Journal of Alloys and

Compounds, v. 469, p. 156 – 163, Feb 2009. ISSN 0925-8388.

[10] MIELCZAREK, A. et al. Mechanical and fatigue properties of Cu - Al - Mn shape memory alloys with influence of mechanical cycling on amplitude dependence of internal friction at room temperature. *Solid State Phenomena*, v. 137, p. 145 – 154, Mar 2008.

[11] OBRADÓ, E. et al. Order-disorder transitions of Cu-Al-Mn shape-memory alloys. *PHYSICAL REVIEW B*, v. 58, n. 21, p. 14 245 – 14 255, 1998.

[12] OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M. Shape memory materials. University Press, 1998.

[13] PINA, E. A. C. de. ESTUDO DA ESTABILIZAÇÃO NA LIGA Cu-Al-Mn COM EFEITO

MEMÓRIA DE FORMA. 2006. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Pernambuco.

[14] SUTOU, Y. et al. Ductile Cu–Al–Mn based shape memory alloys: general properties and applications. *Materials Science and Technology*, v. 24, n. 8, p. 896 – 901, 2008.

[15] Rao, A., Sirivasa, A. R., Reddy, J.N., 2015. Design of Shape Memory Alloy (SMA) Actuators. Springer International Publishing, Texas, 1st edition.

[16] ZAK, G.; KNEISSL, A.; ZATULSKIJ, G. SHAPE MEMORY EFFECT IN CRYOGENIC Cu-Al-Mn ALLOYS. *Scripta Materialia*, v. 34, n. 3, p. 363 – 367, 1996. Software CRYSMET

Capítulo 6

ANÁLISE EXPERIMENTAL QUANTO AOS EFEITOS DA DILATAÇÃO TÉRMICA NA GASOLINA AUTOMOTIVA E NO ETANOL HIDRATADO

João Manoel de Oliveira Neto

Marcelo Bezerra Grilo

Resumo: O objetivo deste estudo é verificar experimentalmente a influência da dilatação térmica sobre a gasolina automotiva e o etanol hidratado combustível, comercializados no município de Campina Grande (PB). O universo pesquisado consistiu em coletar as amostras de combustível em vinte e quatro (24) postos de comercialização, que foram visitados nos períodos noturno e diurno. Para avaliar os efeitos da dilatação térmica, no momento da coleta, em janeiro de 2016, foi realizado o teste do densímetro e aferida a temperatura das amostras coletadas. Os resultados obtidos foram, com uma variação média relativa entre os períodos diurno e noturno, de 0,004 g/ml para o etanol e 0,005 g/ml para a gasolina. Estes resultados mostram que a temperatura tem influência sobre os volumes comercializados, especialmente para a gasolina, por possuir um maior coeficiente de dilatação térmica. Este problema pode ser resolvido quando o combustível for comercializado em massa (kg) ao invés de volume (litro).

Palavras-Chave: Dilatação térmica, etanol hidratado, gasolina automotiva, biocombustíveis e temperatura.

1 INTRODUÇÃO

A diferença de temperatura entre o período mais quente e mais frio, ao longo do dia, faz com que o consumidor final acabe adquirindo quantidades diferentes de massa de combustível. [1]. Isto acontece devido ao fenômeno da dilatação térmica dos líquidos. Fenômeno esse mais notável no município de Campina Grande-PB, caracterizado por dias quentes e noites frias, ou seja, com grande amplitude térmica diária. É esperado que devido esta influência de temperatura ao longo do dia, o consumidor final acabe adquirindo uma menor massa de combustível, seja gasolina ou etanol, no período diurno (período em que são apresentados maiores valores de temperatura). Uma análise experimental, no que diz respeito a aferição da massa dos combustíveis nos postos de comercialização (simulação da atividade de abastecimento), pode ser comprovado se realmente essa variação é significativa.

Motivado pelo crescimento da frota automotiva nas cidades e rodovias brasileiras e pelo respectivo aumento no preço e no consumo do etanol e da gasolina, faz-se necessário este estudo, referente a influência da variação de temperatura sob estes combustíveis, de modo que a comercialização ocorra da forma que o consumidor final venha a ser o mais beneficiado.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram coletadas vinte e quatro amostras de cada combustível, no que diz respeito a gasolina automotiva comum tipo C e etanol hidratado no volume padrão de um litro. Para seguir os procedimentos recomendados pelas NBRs 5992 e 7148, as coletas para o período noturno ocorreram no horário após 20:00 h, e para o período diurno, o horário de coleta foi entre as 14:00 e 16:00 h, períodos de menor e

maior temperatura respectivamente. Para o período noturno, o horário escolhido foi após as 20:00 h, devido a maioria dos postos de comercialização fecharem as 22:00 h. E pela manhã, boa parte desses abre após as 7:00 h, o que dificulta os experimentos.

Na sequência, as amostras coletadas foram acondicionadas em vidros âmbar (cor marrom) de um litro, tamponados com batoques, e etiquetadas com o código numérico para identificação da amostra referente ao posto, de acordo com a relação previamente registrada no Laboratório Experimental de Máquinas Térmicas (LEMT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Sendo identificados por códigos alfa numéricos de PG1, PE1, PG2, PE2,, PG24.

Logo em seguida, após a coleta de cada amostra, o combustível foi despejado em um recipiente graduado em 500 ml. Foi aferida a temperatura do combustível com o auxílio de um termômetro de mercúrio e realizado o teste do densímetro em uma superfície plana por mais ou menos dois minutos, ainda no posto de distribuição visando simular o abastecimento e evitar a perda de energia dos combustíveis, onde foi obtida a leitura da massa específica, similar ao que é exigido pelas NBRs 5992 e 7148. Após realizadas as aferições de massa específica e temperatura, foi verificado nas NBRs 7148 e 5992 se as amostras atendiam as requisitos exigidos mediante a qualidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foi constatado de acordo com a Tabela 1 que para a gasolina houve uma variação média de temperatura e densidade de 5,04 °C e 0,005 g/ml entre os períodos diurno e noturno e as amostras encontravam-se em conformidade no que diz respeito a qualidade referente ao teste do densímetro.

Tabela 1: Variação da densidade (g/ml) da gasolina tipo C comum em função da variação da temperatura, com as coletas simulando o abastecimento noturno e diurno, nas regiões central e periférica – janeiro 2016.

Posto	T (°C) (Noturno)	Massa específica (noturno) (g/ml)	T (°C) (Diurno)	Massa específica (diurno) (g/ml)	$\Delta\rho$ (g/ml)
PG1	26,9	0,740	32,2	0,735	0,005
PG2	26,0	0,741	31,2	0,736	0,005
PG3	26,2	0,741	31,6	0,736	0,005
PG4	26,1	0,741	31,3	0,736	0,005
PG5	28,3	0,739	33,4	0,734	0,005
PG6	27,4	0,740	32,1	0,736	0,004
PG7	27,6	0,740	32,8	0,735	0,005
PG8	26,0	0,741	30,7	0,736	0,005
PG9	26,8	0,742	31,6	0,738	0,004
PG10	27,1	0,741	31,1	0,737	0,004
PG11	26,2	0,741	31,0	0,736	0,004
PG12	26,3	0,745	30,4	0,741	0,004
PG13	26,0	0,741	31,4	0,736	0,005
PG14	26,3	0,741	31,8	0,736	0,005
PG15	26,4	0,740	31,6	0,735	0,005
PG16	27,0	0,741	32,6	0,736	0,005
PG17	26,6	0,742	31,9	0,737	0,005
PG18	26,3	0,741	31,1	0,737	0,004
PG19	26,2	0,741	31,4	0,735	0,005
PG20	26,1	0,741	31,7	0,736	0,005
PG21	26,4	0,742	32,0	0,736	0,005
PG22	26,9	0,740	31,8	0,735	0,005
PG23	27,1	0,740	30,2	0,737	0,003
PG24	27,0	0,741	33,2	0,736	0,005

Para o etanol, de acordo com a Tabela 2, houve uma variação média de temperatura e densidade de 4,55 °C e 0,004 g/ml entre os períodos diurno e noturno e as amostras

encontravam-se em conformidade no que diz respeito a qualidade referente ao teste do densímetro.

Tabela 2: Variação da densidade (g/ml) do etanol comum em função da variação da temperatura, com as coletas simulando o abastecimento noturno e diurno, nas regiões central e periférica – janeiro 2016.

Posto	T (°C) (Noturno)	Densidade (noturno)	T (°C) (Diurno)	Densidade (diurno)	$\Delta\rho$ (g/ml)
PE1	26,1	0,802	30,9	0,798	0,004
PE2	26,2	0,802	30,4	0,798	0,004
PE3	25,7	0,804	32,2	0,798	0,006
PE4	26,0	0,802	30,3	0,798	0,004
PE5	26,4	0,802	31,8	0,798	0,004
PE6	26,3	0,802	30,2	0,799	0,003
PE7	26,2	0,802	32,1	0,798	0,004
PE8	27,3	0,800	30,3	0,798	0,002
PE9	27,1	0,802	31,2	0,798	0,004
PE10	27,1	0,802	31,3	0,798	0,004
PE11	26,6	0,802	30,1	0,798	0,004
PE12	27,2	0,802	31,3	0,798	0,004
PE13	27,0	0,800	31,5	0,796	0,004
PE14	26,3	0,802	30,2	0,798	0,004
PE15	27,8	0,802	32,4	0,798	0,004
PE16	26,4	0,802	31,1	0,798	0,004
PE17	27,2	0,800	30,2	0,798	0,002
PE18	27,8	0,802	32,7	0,798	0,004
PE19	27,1	0,802	31,4	0,798	0,004
PE20	26,4	0,800	30,9	0,796	0,004
PE21	27,1	0,802	32,2	0,798	0,005
PE22	26,5	0,802	31,0	0,798	0,004
PE23	27,7	0,802	32,8	0,798	0,004
PE24	26,2	0,802	31,9	0,796	0,006

4 CONCLUSÕES

De acordo com os dados obtidos quanto a variação da massa específica da gasolina e do etanol, foi obtido uma média de 0,005 e 0,004 g/ml para uma variação média de temperatura de 5,04 e 4,55°C, entre os períodos diurno e noturno. Esses dados comprovam que o efeito da dilatação térmica sobre ambos os combustíveis, havendo uma certa sensibilidade decorrente de um gradiente de temperatura, que influencia diretamente no aumento do seu volume.

No momento da compra dos combustíveis, os mesmos são vendidos em volume (litros). Como a massa varia em função da temperatura, o consumidor final, acaba

levando uma maior quantidade em massa (kg) para um volume fixo de combustível, quando realiza o abastecimento no período noturno. Essa variação é significativa quando é comprado combustível em grandes quantidades. Para uma logística mais eficiente, gerando maior satisfação ao consumidor final e máxima eficiência energética dos combustíveis, os fatores explanados no presente trabalho devem ser levados em consideração, ou seja, o combustível deveria ser vendido em massa, e não em volume. Enquanto forem vendidos em volume, preferencialmente realizar o abastecimento no período noturno, onde os efeitos da dilatação térmica são menores.

REFERÊNCIAS

[1] ALMEIDA SILVA, Felipe Augusto. Estudo sobre a Qualidade da Gasolina Comercializada em Campina Grande e da Variação de sua Massa Específica em função do Horário de Abastecimento. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia), Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB. 2014.

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5992: Álcool etílico e suas misturas com água - Determinação do teor de álcool etílico anidro combustível (AEAC) – Método do densímetro, Rio de Janeiro, 2008.

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7148: Petróleo e produtos de petróleo: Determinação da massa específica,

densidade relativa e °API - Método do densímetro. Rio de Janeiro, 2013.

[4] CASULO DE ARAÚJO, Helder Giuseppe. Estudo experimental sobre a qualidade da gasolina comercializada no estado da Paraíba com o uso da norma ABNT 13992:2008 e do planejamento fatorial. 2013. 91 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2013.

[5] DOMINGOS, I. S. et al., Determinação do aspecto, massa específica e teor de etanol de amostras de gasolina tipo C comum, comercializadas em Patu-RN. In: I CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, número 1. 2015, Campina Grande, PB. Anais... Campina Grande: Editora Realize, 2015. 7p.

[6] GONÇALVES, Dalton. Física: Termologia, ótica, ondas. Vol. 1, 3ª edição. Capítulo 2: dilatação térmica, São Paulo: editora moderna, 1979.

[7] OLIVEIRA NETO, J. M., EMERENCIANO, L. F., GRILO, M. B., Análise experimental da gasolina comercializada em Campina Grande, incluindo a influência do horário de abastecimento e a localização do posto de combustível. In: I CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, número 1. 2015, Campina Grande, PB. Anais... Campina Grande: Editora Realize, 2015. 8p.

[8] OLIVEIRA NETO, J. M., GRILO, M. B., Análise experimental da variação de massa da gasolina comercializada na cidade de Campina Grande-PB devido os efeitos da dilatação térmica. In: II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, número 2. 2016, Natal, RN. Anais... Natal: Editora Realize, 2016. 8p.

Capítulo 7

ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DE OPERAÇÃO NO COEFICIENTE DE ARRASTO DO CASCO DE UM VEÍCULO AUTÔNOMO SUBMARINO

João Victor Nunes de Sousa

Antonio Gilson Barbosa de Lima

Resumo: Os AUVs formam uma classe avançada de veículos submarinos, capazes de realizar missões pré-estabelecidas, sem comunicação física com a terra ou intervenção humana. Durante os últimos anos a pesquisa e o desenvolvimento dessa classe de veículos vêm crescendo, devido às suas excelentes características, ideais para a sua aplicação em setores como o militar, o científico ou o industrial. Diante disso, esse artigo tem como objetivo avaliar a influência da profundidade de operação de um AUV no coeficiente de arrasto do seu casco, visando obter dados que auxiliem pesquisadores e projetistas. Para essa análise foi utilizado o software ANSYS-CFX 15.0, que é uma poderosa ferramenta CFD para a solução de problemas envolvendo a Mecânica dos Fluidos.

Palavras-chave: Veículo Autônomo Submarino, Coeficiente de Arrasto, Simulação Numérica

1 INTRODUÇÃO

Define-se como Veículo Autônomo Submarino, ou AUV (sigla em inglês para Autonomous Underwater Vehicle), um veículo que viaja submerso, sem comunicação física com a terra e sem a necessidade de operador humano. Os AUVs estão inseridos no grupo dos Veículos Submarinos Não-Tripulados, mais conhecidos como UUVs (sigla em inglês para Unmanned Underwater Vehicles).

Durante as últimas décadas, vários AUVs têm sido desenvolvidos e pesquisas na área são cada vez mais frequentes, tendo em vista as características extremamente favoráveis que esses veículos possuem, tais como a possibilidade de operar de forma autônoma em ambientes hostis, como áreas inexploradas, águas de território inimigo, áreas contaminadas ou águas profundas. Todas essas características tornam o uso dos AUVs muito interessante para os setores militar, científico e industrial.

A aplicação de AUVs vem sendo impulsionada em virtude dos constantes avanços na eletrônica e na robótica, permitindo a execução de missões de alta precisão, a diminuição do custo e o aumento do nível de processamento dos computadores embarcados, bem como devido às novas tecnologias de baterias e gerenciamento de energia, possibilitando o aumento da autonomia, manutenção e segurança na operação desses veículos (Dantas, 2014).

Visando manter os AUVs como ferramentas de alto desempenho, seus projetos devem passar por constantes evoluções, refletindo necessidades presentes e futuras. Para tanto, se faz necessário o desenvolvimento teórico e tecnológico nas mais diversas áreas de projeto desses veículos, tais como na mecânica, hidrodinâmica, navegação e controle.

O uso de técnicas numéricas para a solução de problemas de engenharia é hoje uma realidade graças ao desenvolvimento de computadores de alta capacidade de processamento. Essas técnicas apresentam inúmeras vantagens, podendo resolver problemas complexos, sem soluções analíticas exatas, e que muitas vezes não podem ser reproduzidos em experimentos,

em pouco tempo e com baixo custo quando comparado às técnicas experimentais.

Atualmente, as ferramentas de Fluido-Dinâmica Computacional, ou CFD (sigla em inglês para Computational Fluid Dynamics), são integradas com outras ferramentas numéricas, criando um ambiente de projeto completo, onde os experimentos são feitos apenas para ajustes finais e testes.

A maioria dos AUVs existente utiliza baterias como fonte de energia para o seu sistema de propulsão. Quanto maior o arrasto gerado durante o deslocamento do veículo, mais energia esse sistema necessitará e, conseqüentemente, menor será a autonomia do AUV, o que é indesejável por qualquer projetista.

Nesse contexto, esse artigo avalia, numericamente, a influência da profundidade de operação, que é um parâmetro operacional básico, no coeficiente de arrasto do casco de um AUV, visando obter dados que auxiliem pesquisadores e projetistas em trabalhos/concepções futuras.

2 METODOLOGIA

2.1 GEOMETRIA DO CASCO

O casco de AUV analisado é do tipo torpedo, ou seja, corpo cilíndrico com alta razão entre seu comprimento e diâmetro, com perfis suaves em sua proa e popa, devido às suas boas características de projeto, tais como baixo arrasto hidrodinâmico, bom volume interno, simplificação do acesso a toda a aparelhagem existente e redução do custo de fabricação (Madham et al., 2006), esse tipo de casco é utilizado atualmente pelos principais fabricantes comerciais dessa classe de veículos.

Para modelar os perfis da proa e popa do veículo recorreu-se às equações de Myring. Essas equações teóricas descrevem contornos para as extremidades de corpos do tipo torpedo que geram o menor coeficiente de arrasto possível (Myring, 1976). As equações são da seguinte forma:

a) Proa:

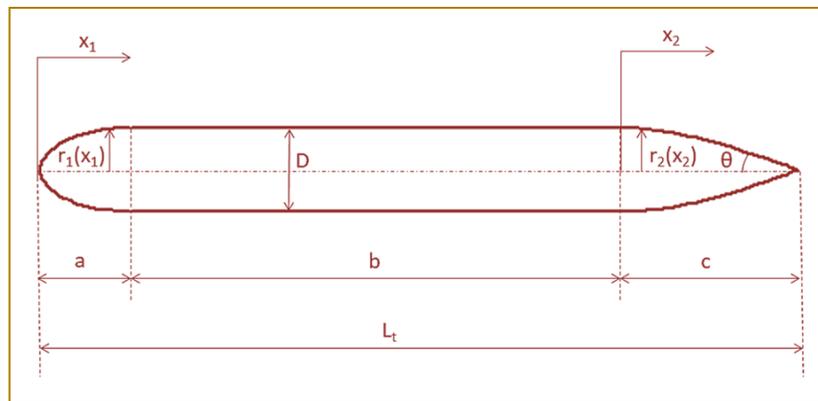
$$r_1(x_1) = \frac{1}{2}D \left[1 - \left(\frac{x_1 - a}{a} \right)^2 \right]^{1/n} \quad (1)$$

b) Popa:

$$r_2(x_2) = \frac{1}{2}D \left[\frac{3D}{2c^2} - \frac{tg\theta}{c} \right] x_2^2 + \left[\frac{D}{c^3} - \frac{tg\theta}{c^2} \right] x_2^3 \quad (2)$$

onde todos os parâmetros de alimentação das equações, com exceção do parâmetro potencial n , são geométricos, e estão mostrados na Figura 1.

Figura 1: Representação dos parâmetros geométricos necessários para alimentação das equações de Myring



O casco analisado tem suas características geométricas baseadas nas do casco Afterbody1 (Tab. 1), estudado por Jagadeesh et al. (2009). Essa escolha se deu em virtude

de estarem disponíveis na literatura dados experimentais que possibilitaram a validação da modelagem numérica-matemática utilizada no presente artigo.

Tabela 1: Parâmetros geométricos do casco de AUV estudado

$L_t = a + b + c$ (mm)	1.400
a (mm)	250
b (mm)	700
c (mm)	450
D (mm)	140
n (-)	2
θ (°)	20

2.2 DOMÍNIO FÍSICO E MALHA NUMÉRICA

Optou-se por um domínio fluido de forma semicilíndrica, visando a obtenção de uma malha numérica com menor quantidade de volumes de controle, quando comparado a um domínio paralelepípedo, reduzindo assim o custo computacional para solução do problema.

As dimensões desse domínio (Fig. 2) foram escolhidas baseadas no trabalho de Sousa et. al. (2014), que estudou o escoamento ao redor do casco de um AUV tipo torpedo com $L_t / D=9$, e são informadas na Tabela 2. Para geração da geometria que representa o domínio estudado, bem como para elaboração da malha numérica (Fig. 3), foi utilizado o software comercial ICFM-CFD 15.0.

Já para as simulações, foi utilizado o software comercial ANSYS-CFX 15.0, que faz uso do método dos volumes finitos baseado em

elementos finitos para solução do problema em estudo.

Figura 2: Domínio fluido de estudo

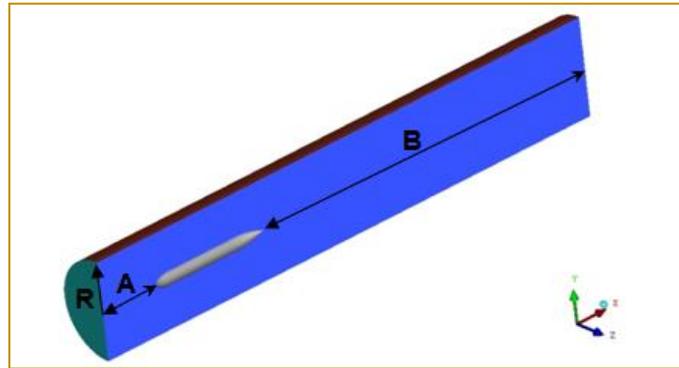
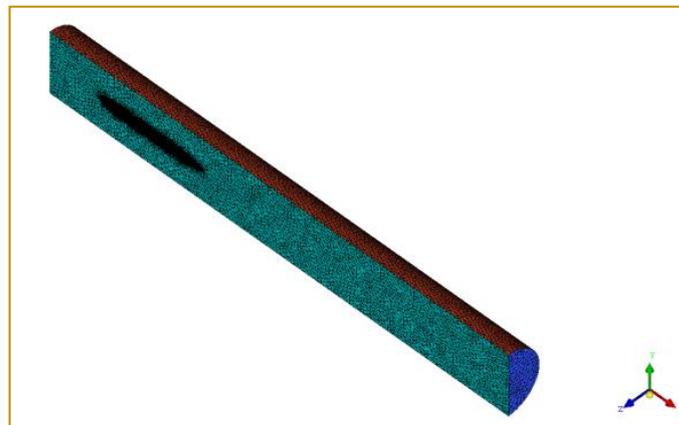


Tabela 2: Parâmetros geométricos que definem as dimensões do domínio fluido estudado

A (mm)	0,5 Lt = 700
B (mm)	3 Lt = 5.200
R (mm)	3 D = 420

Figura 3: Malha numérica criada sobre o domínio de estudo, que contempla 454.950 volumes de controle, dentre tetraedros e prismas



Muitos cuidados devem ser tomados ao se construir malhas numéricas para resolver problemas de escoamento externo, sendo necessário levar em conta diversos parâmetros nessa construção, sendo um deles a espessura aproximada da camada-limite hidrodinâmica, δ . Ansys (2014) traz uma

equação que estima essa espessura (Equação 3), sendo recomendada a construção de uma malha com grande refinamento nessa região (Fig. 4), visando capturar precisamente os efeitos viscosos atuantes ao redor do casco do AUV.

$$\delta = 0,035LRe^{-1/7} \quad (3)$$

onde:

L é um comprimento de referência; e

Re é o número de Reynolds, Re , que pode ser definido como:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (4)$$

onde:

ρ é a massa específica;

U é a velocidade de referência do escoamento; e

μ é a viscosidade dinâmica.

O número de Reynolds pode ainda ser definido em base volumétrica, passando a ser

chamado de número de Reynolds volumétrico, Re_V , calculado pela expressão:

$$Re_V = \frac{\rho UV^{1/3}}{\mu} \quad (5)$$

onde

V é o volume do corpo sujeito a escoamento externo.

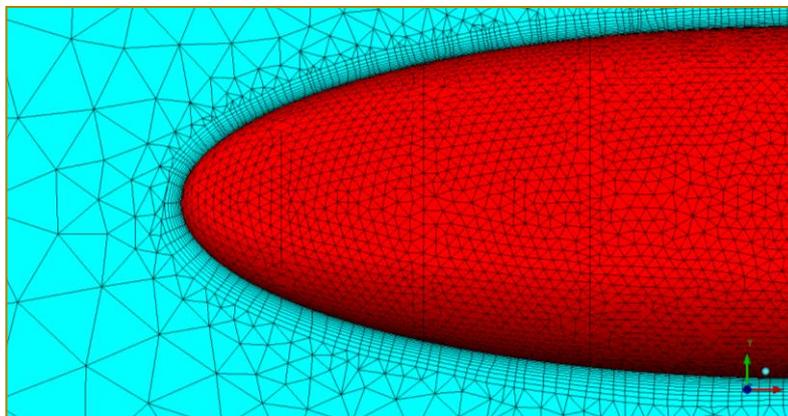
2.3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Para investigar o escoamento ao redor do casco do AUV analisado, foi considerado que esse escoamento é monofásico, tridimensional, em regime permanente,

incompressível, isotérmico e turbulento, apresentando camada-limite hidrodinâmica totalmente turbulenta.

As equações gerais de conservação que regem o problema são:

Figura 4: Detalhe da proa do casco de AUV analisado (em vermelho), com destaque para o refinamento da malha na região da camada-limite hidrodinâmica



A) Equação da conservação da massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (6)$$

B) Equação da conservação da quantidade de movimento linear:

$$\frac{\partial(\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \vec{U}) = -\nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \vec{U})^T + \rho \vec{g} \quad (7)$$

onde:

μ_{eff} é a viscosidade efetiva, que contabiliza os efeitos turbulentos, e é definida como:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (8)$$

Onde

μ_t é a viscosidade turbulenta;

p' é a pressão corrigida; e

\vec{g} é o vetor aceleração da gravidade.

Além das equações básicas supracitadas, se faz necessário adicionar ao modelo equações que regem o fenômeno da turbulência presente no escoamento. A turbulência consiste de flutuações no campo de fluxo no tempo e no espaço. É um processo complexo e pode ter um efeito significativo sobre as características do escoamento. A turbulência ocorre quando as forças de inércia agindo no fluido se tornam significativamente maiores que às forças viscosas, e é caracterizada por um elevado número de Reynolds do escoamento.

Foi utilizado o modelo de turbulência SST (Shear Stress Transport). Esse modelo é

baseado na modelagem k- ω . Utilizou-se esse modelo devido ao seu bom tratamento de problemas envolvendo escoamento externo com altos números de Reynolds e à sua boa precisão em prever a separação do fluxo quando o mesmo é submetido a gradientes de pressão adversos (Ansys, 2014).

O modelo SST introduz duas variáveis ao problema, que são a variável k, que é a energia cinética turbulenta, e a variável ω , que é a frequência turbulenta. Essas variáveis são calculadas através das equações:

C) Equação da energia cinética turbulenta:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{c_k} \right) \nabla k \right] + P_k - C_{k2} \rho k \omega \quad (9)$$

D) Equação da frequência turbulenta:

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \omega) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{C_{\omega 1}} \right) \nabla \omega \right] + C_{\omega 2} P_k \frac{\omega}{k} - C_{\omega 3} \rho \omega^2 \quad (10)$$

onde:

C_{k1} , C_{k2} , $C_{\omega 1}$, $C_{\omega 2}$ e $C_{\omega 3}$ são constantes, e valem, respectivamente, 2; 0,09; 2; 5/9; e 0,075; e P_k é a produção de turbulência, que é modelada por meio da equação:

$$P_k = \mu_t \nabla \vec{U} \cdot (\nabla \vec{U} + \nabla \vec{U}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{U} (3\mu_t \nabla \cdot \vec{U} + \rho k) \quad (11)$$

O modelo SST assume que a viscosidade turbulenta está associada à energia cinética

turbulenta e à frequência turbulenta através da relação:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (12)$$

O modelo SST assume também que a pressão corrigida, p' , é modelada através da equação:

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k \quad (13)$$

Onde

p é a pressão.

Sempre que existir uma velocidade relativa entre um corpo sólido e o fluido que o circunda surgirá uma força resultante \vec{F} sobre este corpo (Fox et al., 2011). O módulo, direção e sentido dessa força dependerão de diversos fatores, tais como a velocidade relativa entre o sólido e o fluido, a forma e dimensões do sólido e as propriedades do fluido. A componente de \vec{F} paralela à direção

do movimento relativo entre o sólido e o fluido é definida como força de arrasto, \vec{F}_d .

Essa força de arrasto é comumente expressa em termos de um número adimensional, o coeficiente de arrasto, C_d . Em base volumétrica, esse coeficiente passa a se chamar coeficiente de arrasto volumétrico, e pode ser definido da seguinte forma:

$$C_{dv} = \frac{\vec{F}_d}{\frac{1}{2} \rho V^2 / 3U^2} \quad (14)$$

2.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO E PROPRIEDADES DOS FLUIDOS

A Figura 5 mostra informações relativas às condições de contorno adotadas nas simulações.

Foram utilizados os seguintes fluidos nas simulações:

- Água pura (Tab. 4): Para as simulações de validação; e

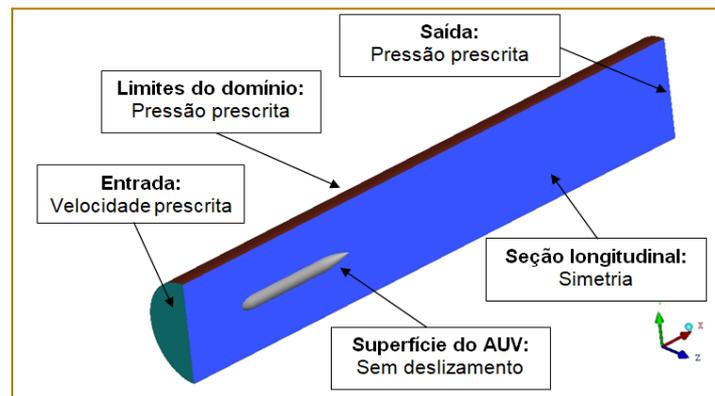
- Água do mar: Para as demais simulações, que avaliam a influência da profundidade de operação no coeficiente de arrasto do casco de AUV estudado.

Tabela 4: Propriedades da água pura utilizadas nas simulações*

Densidade (kg/m ³)	997
Viscosidade dinâmica (mPa.s)	0,8899

Fonte: Ansys, 2014

Figura 5: Condições de contorno do domínio



Schmiegelow (2004) informa que, para regiões equatoriais e tropicais, o comportamento médio da temperatura da água do mar em função da profundidade oceânica pode ser dividido em três regiões:

- Camada de mistura: Região de até 500 m de profundidade, onde não há grandes variações na temperatura da água (região isotérmica);
- Termoclina principal: Região entre 500 e 1.000 m, onde há grandes gradientes de temperatura; e

- Camada de fundo: Região de profundidades superiores a 1.000 m, onde não há grandes variações na temperatura da água (região praticamente isotérmica).

Baseado no perfil vertical médio de temperatura das águas oceânicas, para regiões equatoriais e tropicais, e considerando a salinidade média dessas águas como sendo 35 g/kg, chegou-se às propriedades da água do mar descritas na Tabela 5, que foram utilizadas nas simulações.

Tabela 5: Propriedades da água do mar utilizadas nas simulações*

Profundidade (m)	Temperatura (°C)	Densidade (kg/m ³)	Viscosidade dinâmica (mPa.s)
500	25	1.023	0,9600
750	15	1.026	1,2300
1.000	3	1.028	1,7200

Fonte: The Engineering Toolbox, 2018

RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

Para validação da modelagem numérica-matemática utilizada no presente trabalho, comparou-se resultados experimentais obtidos por Jagadeesh et al. (2009) com as simulações executadas no presente artigo, obtendo uma aproximação satisfatória entre os coeficientes de arrasto volumétricos para em ambas as situações, com um desvio máximo inferior a 10% em todos os casos (Fig. 6). Baseado nesses resultados, confirma-se que a modelagem numérica-matemática adotada representa bem o fenômeno do escoamento ao redor do casco de AUV analisado, tendo sido observado um desvio médio de 7,2% entre os resultados numéricos e os experimentais. Esse pequeno desvio pode ser justificado em virtude de erros experimentais, erros numéricos e/ou devido à pequena variação entre a geometria do casco

simulada computacionalmente e a utilizada nos experimentos.

3.2 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DE OPERAÇÃO NO COEFICIENTE DE ARRASTO

A Tabela 6, a Figura 7 e a Equação 15 trazem os dados referentes ao coeficiente de arrasto volumétrico em função da profundidade de operação do casco de AUV analisado, para uma velocidade de escoamento de 1,0 m/s. Verifica-se um comportamento linearmente crescente do coeficiente de arrasto volumétrico com o aumento da profundidade. Esse fenômeno pode ser explicado em virtude do aumento significativo da viscosidade da água do mar, que se dá devido à queda considerável da temperatura à medida que se avança para as camadas oceânicas mais profundas.

Tabela 6: Coeficiente de arrasto volumétrico em função da profundidade de operação do casco de AUV

Profundidade (m)	Re x 10 ⁻⁵ (-)	ReV x 10 ⁻⁵ (-)	C _{dv} (-)
500	14,92	2,71	0,0399
750	11,68	2,12	0,0421
1.000	8,37	1,52	0,0447

Figura 6: Comparativo entre os coeficientes de arrasto volumétricos em função do número de Reynolds volumétrico, obtidos experimentalmente e numericamente

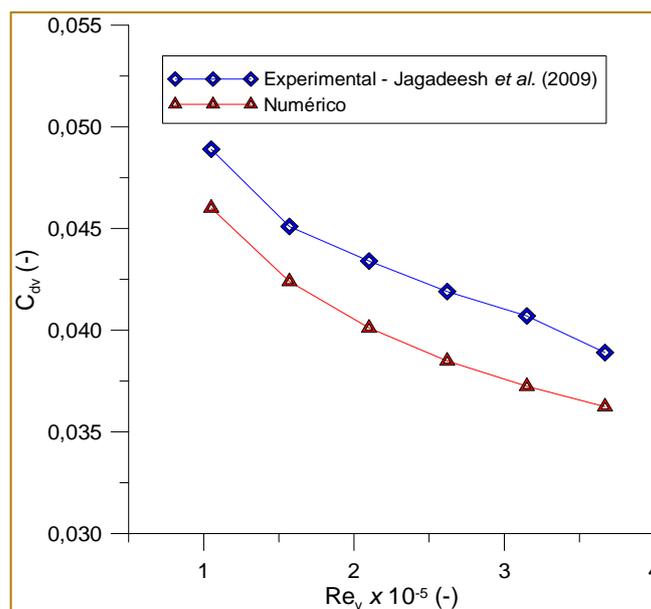
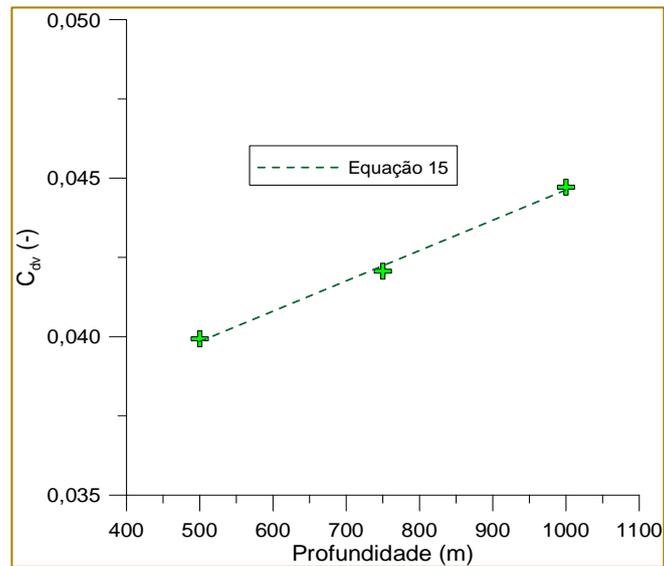


Figura 7: Coeficiente de arrasto volumétrico em função da profundidade de operação do casco de AUV analisado



$$C_{dv} = 0,0351 + 0,0956(\text{profundidade} \cdot 10^{-4}) \quad (15)$$

onde o coeficiente de correlação foi de 99,61%.

4 CONCLUSÃO

Baseado nos resultados expostos, conclui-se que a modelagem numérica-matemática utilizada no presente artigo representou bem o fenômeno do escoamento ao redor do casco de AUV estudado. Conclui-se ainda que a profundidade de operação do AUV, na faixa entre 500 e 1.000 m, tem forte influência sobre o arrasto do seu casco, e conseqüentemente, sobre o arrasto total do veículo, tendo sido verificado um incremento de cerca de 12% no arrasto do casco quando

se passa de 500 m para 1.000 m de profundidade de operação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), ao Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos (LCTF) e a todos os autores das Referências Bibliográficas por viabilizarem a produção do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Ansys, "CFX-Theory Manual". Ansys Inc. 2014.
- [2] Dantas, J.L.D. "Metodologia Numérica para Estimativa da Manobrabilidade de Veículos Autônomos Submarinos". Tese de doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade de São Paulo, 2014.
- [3] Fox, R.W.; McDonald, A.T.; Pritchard, P.J. "Introdução à Mecânica dos Fluidos". 7ª edição. LTC Editora, 2011.
- [4] Jagadeesh, P.; Murali, K.; Idichandy, V.G. "Experimental Investigation of Hydrodynamic Force Coefficients over AUV Hull Form". Ocean Engineering, 36, 113-118, 2009.
- [5] Madham, R.; Desa, Elgar.; Prabhudesai, S.; Sebastião, L.; Pascoal, A.; Desa, Ehrlich; Mascarenhas, A.; MAURYA, P.; Navelkar, G.; Afzulpurkar, S.; Khalap, S. "Mechanical Design and Development Aspects of a Small AUV – MAYA". National Institute of Oceanography (India) and Institute for Systems and Robotics (Portugal), 2006.

[6] Myring, D. F. "A Theoretical Study of Body Drag in Subcritical Axisymmetric Flow". *Aeronautical Quarterly*, 27(3):186–94, August 1976.

[7] Schmiegelow, J.M.M. "O Planeta Azul – Uma Introdução às Ciências Marinhas". 1ª edição. Editora Interciência, 2004.

[8] Sousa, J.V.N.S.; Macêdo, A.R.L.; Amorim Junior, W.F.; Lima, A.G.B. "Numerical Analysis of

Turbulent Fluid Flow and Drag Coefficient for Optimizing the AUV Hull Design". *Open Journal of Fluid Dynamics*, 2014, 4, 263-277.

[9] The Engineering Toolbox. "Sea Water Properties". Disponível em <https://www.engineeringtoolbox.com/sea-water-properties-d_840.html>. Acesso em: 28 de set. de 2018.

Capítulo 8

DETECÇÃO DOS DANOS DE IMPACTO EM MATERIAIS COMPÓSITOS VIA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

Kaline Ventura Batista

Renan Di Pace Arruda

Gustavo Lima do Nascimento

Wanderley Ferreira de Amorim Júnior

Juscelino de Farias Maribondo

Resumo: O objetivo deste trabalho é detectar danos de impacto em materiais compósitos via Termografia Infravermelha com o auxílio de uma câmara de isolamento térmico. Os métodos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa foram a fabricação de compósitos poliméricos laminados e posterior ensaio de impacto utilizando uma máquina por queda de peso, a fabricação de câmara de isolamento térmico, aquecimento por exposição à lâmpadas halógenas e execução do ensaio não destrutivo através da termografia ativa. Os resultados encontrados mostram que a Termografia Infravermelha é capaz de detectar os danos de impacto em materiais compósitos poliméricos e que existe influência no uso do isolamento térmico e na forma geométrica na percepção dos danos de impacto.

Palavras-chave: Compósitos, Dano de impacto, Termografia Infravermelha, Aplicação Aeronáutica.

1 INTRODUÇÃO

O avanço da utilização de materiais compósitos na indústria tem demandado um amplo estudo em torno de suas propriedades. Em certas aplicações, esses materiais se apresentam como uma alternativa interessante em relação aos materiais metálicos. Dentre os pontos fortes da sua utilização se destaca a alta resistência específica, ou seja, esses materiais são capazes de fornecerem alta resistência mecânica associado a uma baixa densidade, promovendo assim uma redução do uso de combustível e um aumento na capacidade de carga das aeronaves.

Esses compósitos são, em geral, formados a partir de duas fases distintas. A primeira é denominada como reforço, que em geral são fibras, e têm a função de melhorar o desempenho mecânico. A segunda fase do compósito é dada por um material ligante, conhecida como matriz, que é responsável pela união dos demais constituintes e de transmitir os esforços entre as fibras. Além disso, a matriz tem a função de proteger as fibras individuais contra danos superficiais que são capazes de causar a formação de trincas (CALLISTER; RETHWISCH, 2007).

Além das propriedades específicas já declaradas, esses materiais possuem, em geral, elevada resistência à fadiga, alta resistência a corrosão, elevada estabilidade térmica e baixa condutibilidade, além de serem dados como excelentes amortecedores para vibração (JUNIOR, 2014). Entretanto, apresentam uma grande perda de propriedades na presença de algum defeito, que são muitas vezes microscópicos. Essa incerteza no seu comportamento, portanto, faz com que tenham grandes dispersões associadas a durabilidade de estruturas que utilizam esses materiais. Além disso, esses materiais são sensíveis em relação a seu processo de produção, possuem uma análise complexa e uma alta sensibilidade em relação ao dano sofrido. O dano de impacto pode reduzir significativamente as propriedades mecânicas residuais de compósitos, embora dificilmente visível. (ZHANG et al., 2018).

Grande parte da utilização de materiais compósitos na indústria aeronáutica é dada pela utilização do laminado reforçado com

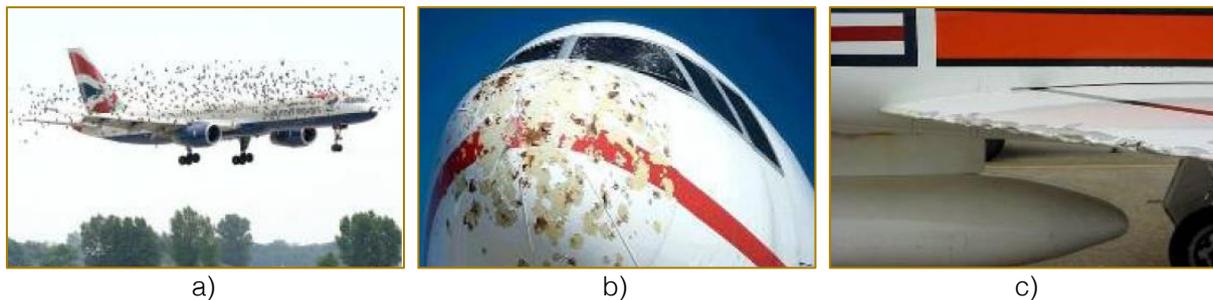
fibra de vidro ou com fibra de carbono. Segundo (MEOLA et al., 2016) no mundo de hoje há uma demanda crescente de estruturas leves e de alto desempenho que explica o crescente interesse em relação aos materiais compósitos. Sua combinação pode oferecer propriedades específicas adequadas ao uso, em termos de resistências mecânica e rigidez por peso específico. Dessa forma, o uso de materiais compósitos na indústria aeronáutica aumentou exponencialmente nos últimos anos. Grande parte dos equipamentos utilizados na fuselagem, ailerons e spoilers, por exemplo, são feitos a partir de materiais compósitos. Em casos como o do Boeing 787, cerca de 50% da sua estrutura é feita através de compósitos avançados (HALE, 2008).

Porém, a combinação carbono-epóxi e vidro-epóxi apresenta resistência baixa aos impactos e a fadiga. Isso influi nos danos causados por baixa velocidade, que acabam por gerar danos de difícil verificação nos laminados, o que pode acarretar em reduções significativas em suas propriedades mecânicas (ALMEIDA, 2010).

Devido a esses problemas, geralmente são utilizados critérios de resistência tanto para seleção do material quanto para o carregamento, o que acaba acarretando em custos extras (CUARTAS et al., 2014). Esses defeitos geralmente geram danos superficiais ou subsuperficiais e são causados tanto no processo de construção, como na utilização e manutenção de aeronaves. Estes danos variam em relação ao módulo de energia e ao tipo de impacto. A detecção visual desses defeitos é complicada devido à sua pequena dimensão.

As aeronaves, quando estão em condições reais de funcionamento, seja em voo ou em manutenção, estão sujeitas a diversas fontes de impacto em sua estrutura. (ALMEIDA, 2010) mostra que estes danos podem ser originados desde choque com pássaros, chuva de granizo, fragmentos levantados na decolagem ou aterrissagem, queda de ferramenta até o contato com outra aeronave. Na Figura 1 pode-se ver situações onde a aeronave está sujeita a danos de impacto e também as consequências dos mesmos.

Figura 1 – (a) Choque com pássaros durante uma decolagem; (b,c) Efeitos do impacto de chuva de granizo e consequências dos danos de impacto



Fonte - (ALMEIDA, 2010)

Nesse contexto, o setor aeronáutico utiliza cada vez mais de ensaios não-destrutivos para a visualização rápida e precisa dos materiais compósitos. A utilização do ensaio termográfico é ainda um ensaio em desenvolvimento na indústria aeronáutica. Utilizando de radiação térmica para detecção de falhas nos compósitos, essa técnica vem sendo cada vez mais estudada pela sua eficiência e facilidade de operação.

A termografia infravermelha é baseada na medida do fluxo térmico ou radiação eletromagnética emitida por uma peça por ondas infravermelhas (FRAMEZELLE et al., 2011). Este fluxo é diretamente proporcional a temperatura da superfície da peça e, com o auxílio de uma câmera infravermelha é possível fazer a representação térmica do corpo em questão. A energia infravermelha é proveniente da vibração e agitação das moléculas, ou seja, um corpo com maior temperatura terá uma maior agitação molecular emitindo assim uma maior quantidade de energia infravermelha.

As principais vantagens da utilização da termografia infravermelha são: a rapidez da inspeção, a interpretação simples das imagens, a análise pode ser feita em tempo real, a radiação emitida pela peça é não letal, a geometria da peça não se apresenta sensível na detecção do dano, pode ser utilizado em grandes superfícies e pode ser feita também a inspeção total da peça. As poucas desvantagens do método incluem: a falta de uniformidade de aquecimento eo custo elevado do equipamento. (ALMEIDA, 2010).

Devido a esses fatores, a utilização da termografia tem se tornado bastante abrangente, visando uma promissora redução de custos na manutenção. Na indústria aeronáutica, por exemplo, os ensaios são

feitos através da utilização de uma fonte de calor externa. Esse processo é denominado por termografia ativa e é visto que o objeto de estudo deve ser energeticamente estimulado (por exemplo, através de fontes térmicas simples como lâmpadas, flashes e ar quente, ou então, por meios mais elaborados, tais como ondas ultrassônicas, correntes parasitas, micro-ondas e laser e células de Peltier), de forma que um fluxo interno de calor seja gerado na parte inspecionada.

Estes tipos de estratégias de aquecimento possibilitaram o acompanhamento dos fenômenos térmicos desenvolvidos na parte inspecionada, permitindo a identificação e a caracterização de danos impingidos por impacto aos laminados. Uma vez que, a presença de defeitos na região inspecionada irá causar uma perturbação desse fluxo, fazendo com que a câmera termográfica acuse o aparecimento de um gradiente térmico na descontinuidade do componente inspecionado (TARPANI et al., 2009).

Dessa forma, esse trabalho tem o objetivo de analisar danos de impacto em materiais compósitos, através da técnica da termografia ativa. Os corpos de prova foram fabricados e impactados com danos provenientes de diferentes níveis de energia de impacto. As imagens obtidas foram analisadas a partir de diferentes tipos de câmaras de isolamento térmico, identificando as diferenças nas imagens, a partir de um aquecimento semelhante para todos os casos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

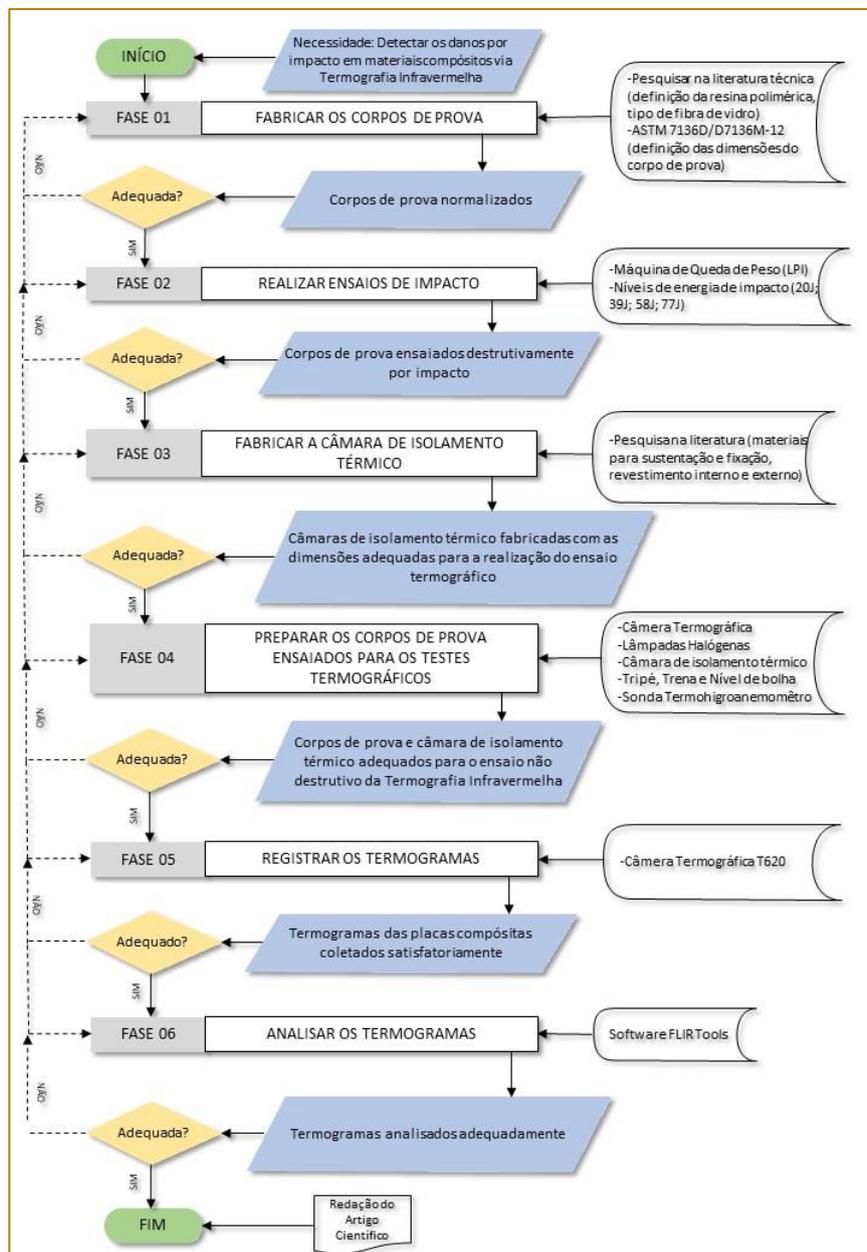
Segundo (GIL, 2002) a pesquisa se classifica segundo a natureza como aplicada em função de ter como objetivo gerar conhecimento para uma aplicação prática e buscar a solução do problema em questão. Neste caso, trata-se da

avaliação da capacidade da técnica da Termografia detectar danos em materiais compósitos. Por tratar-se de uma pesquisa quantitativa, as informações são expressas em valores numéricos, onde serão então classificadas e analisadas para a obtenção dos resultados. Para este trabalho, são obtidos valores de temperatura que indicam a presença do dano a partir da temperatura do corpo de prova estudado. Portanto, quanto aos objetivos, esta pesquisa se enquadra como descritiva, pois busca esclarecer um determinado assunto já conhecido.

Também (GIL, 2002) classifica a pesquisa com relação aos procedimentos técnicos, este estudo trata-se de uma pesquisa experimental, pois a partir da determinação de um objeto de estudo, como a detecção de danos em materiais compósitos, são selecionadas as variáveis que as influenciam, suas formas de controle e observados seus efeitos gerados.

Todas as fases de realização deste trabalho estão apresentadas em um fluxograma único (Fluxograma 1), o qual é detalhado em seguida.

Fluxograma 1 – Fluxograma da metodologia utilizada



Fonte - Autoria própria

A partir da necessidade esclarecida que levou ao desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se o processo metodológico apresentado no Fluxograma¹, o qual é composto por seis fases assim denominadas: Fabricar os corpos de prova (Fase 1), Realizar ensaios de impacto (Fase 2), Fabricar a câmara de isolamento térmico (Fase 3), Preparar corpos de prova para os testes termográficos (Fase 4), Registrar os termogramas (Fase 5) e Analisar os termogramas (Fase 6).

A Fase 1 se destina a fabricar os corpos de prova em material compósito. Para executá-la utilizou-se a norma ASTM 7136D/D7136M e fez-se uso da técnica de laminação manual. As placas apresentam como reforço fibra de vidro-E e como matriz a resina cristalina, ambas obtidas pela Empresa EquiFiber Equipamentos de Fibra LTDA., localizada no distrito industrial de Campina Grande, Estado da Paraíba, Brasil.

Na Fase 2, realiza-se o ensaio de impacto. Para tanto, utilizou-se as diretrizes estabelecidas pela norma ASTM – D7136M (Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event), a máquina utilizada foi projetada para ensaios por queda de peso desenvolvida por (JUNIOR, 2014), conforme mostrado na Figura 2 e encontra-se disponível para realização de pesquisas científicas e acadêmicas na Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina grande (UFCG) no Laboratório de Projetos e Instrumentação laboratório (LPI).

A máquina possui as seguintes propriedades:

- 5 níveis de energia de impacto - 20, 39, 58, 77 e 96 J;
- Altura de queda dos pesos de 1,3 metros;
- Impactador de ponta semiesférica com diâmetro de 16 mm e dureza 57 HRC.

Figura 2 – Máquina de impacto por queda de peso.



Fonte – (JUNIOR, 2014)

Na Fase 3 fabrica-se a câmara de isolamento térmico, sendo assim foi necessário projetar uma câmara de isolamento térmico, que comportasse o objeto de estudo com o intuito de que o livrasse das interferências de radiações térmicas do ambiente.

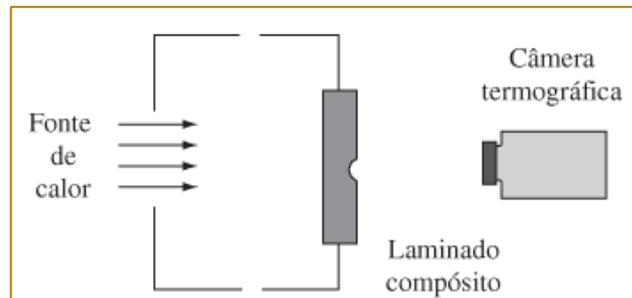
Na Fase 4 foram preparados os corpos de prova ensaiados para os testes termográficos,

para isso inicialmente utilizou-se as diretrizes indicadas pelo manual da câmara termográfica na qual indica os parâmetros que devem ser ajustados antes dos registros, tais como: Emissividade, Temperatura Aparente Refletida, Distância, Umidade relativa e Temperatura atmosférica. Por optar pela técnica da termografia ativa (Figura 3) na

qual o objeto de estudo é energeticamente estimulado de forma que um fluxo interno de calor seja gerado na parte inspecionada, se fez necessário a escolha da fonte de calor

para o de aquecimento dos espécimes, assim como o tempo de aquecimento e a distância da fonte para o corpo de prova impactado.

Figura 3 – Termografia Ativa



Fonte - (TARPANI et al., 2009)

Para determinação da temperatura aparente refletida utilizou-se o método direto apresentado na norma ABNT NBR 16292-14 para precisar a distância entre o CP e a câmera termográfica utilizou-se uma fita métrica convencional. A emissividade é determinada pelo próprio manual da câmera para vários tipos de materiais, para

mensuração das condições ambientais, tais como umidade relativa e temperatura atmosférica utilizou-se a Sonda AMI 300 (Figura 4), esse equipamento foi disponibilizado pelo Laboratório de Ergonomia e Engenharia de Segurança do Trabalho (LEEST) da UFCG.

Figura 4 – Sonda AMI 300.

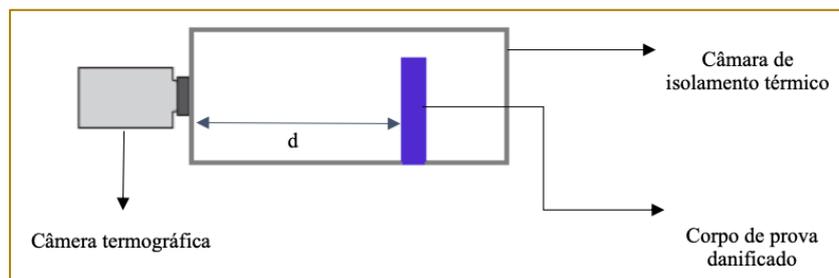


Fonte – Autoria própria.

Em seguida monta-se a bancada do experimento. Os ensaios foram realizados no

laboratório LEEST. Um croqui da montagem do sistema pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 – Ilustração da bancada de ensaios.



Fonte – Autoria própria.

Na Fase 5 registra-se os termogramas, para isso se fez a utilização da câmera térmica T620 da FLIR SYSTEMS (Figura 6), a qual

pertence ao Laboratório de Ergonomia e Engenharia de Segurança do Trabalho (LEEST) da UFCG.

Figura 6 – câmera térmica T620 da FLIR SYSTEMS.



Fonte – Autoria própria

Na Fase 6 analisa-se os termogramas, para isso procura-se conferir, utilizando o software FLIR tools e gráficos por meio do Microsoft Excel, os dados obtidos com os parâmetros de referência para o estudo a fim de verificar a existência de anomalias durante o acionamento do sistema. Após a finalização da Fase 6 realizou-se a redação deste trabalho.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Fase 1 obteve-se a placa confeccionada com o intuito de utilização na máquina de ensaio por queda de peso. Portanto as suas dimensões foram baseadas segundo a norma ASTM D7136/D7136M-12. O corpo de prova utilizado apresenta as seguintes características: 100 mm de largura; 150 mm de comprimento; e 2 mm de espessura.

Na Fase 2, realizou-se o ensaio de impacto de queda de peso onde os níveis de energia foram selecionados de acordo com as pesquisas realizadas na literatura. Sabe-se que uma aeronave pode sofrer um dano devido a queda de um martelo, isso pode ocorrer quando o avião está em processo de manutenção, até choque com pássaro quando a aeronave está em voo. Para simular impactos reais, determinou-se quatro níveis de energia a partir dos dados da Tabela 1 e das limitações da máquina de impacto por queda de peso utilizada para realizar os ensaios, realizou-se com os parâmetros da máquina dados da seguinte maneira:

- 4 níveis de energia de impacto – 20, 39, 58 e 77 Joules;
- Altura de queda dos pesos de 1,3 metros;
- Impactador de ponta semiesférica com diâmetro de 16mm e dureza 57 HRC.

Tabela 1 – Tipos comuns de danos de impacto na estrutura de uma aeronave

Descrição	Energia (J)	Massa (g)	Velocidade (m/s)	Circunstâncias
Queda de equipamento	6	330	> 6	Manutenção
Queda de elementos removíveis	4	220	> 6	Movimento de carga
Componente de manutenção	16	910	> 6	Manutenção
Granizo (até 51 mm)	43	62	37,3	Decolagem e voo
Choque com pássaros	3,8-81 (kJ)	1800	65-300	Decolagem e voo
Fragmentos de pista	2-40	9	20-94	Decolagem e voo
Carga concentrada	50	-	Estática	Movimento de carga

Fonte - (ALVES; CHAVES; BIRCH, 2003)

Os corpos de prova analisados foram nomeados com códigos específicos, sendo CP o prefixo que significa corpo de prova seguido por dois números, os quais significam

o nível de energia que o objeto foi impactado. Assim, obteve-se a Tabela 2 que apresenta a nomenclatura utilizada.

Tabela 2 – Nomenclatura utilizada para os corpos de prova

Corpos de Prova	Nomenclatura
Corpo de prova impactado com 20 J	CP20
Corpo de prova impactado com 39 J	CP39
Corpo de prova impactado com 58 J	CP58
Corpo de prova impactado com 77 J	CP77

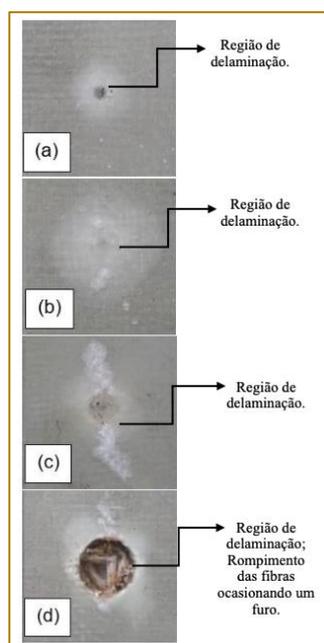
Fonte – Autoria própria

A Figura 7 apresenta os danos obtidos de acordo com o aumento do nível de energia.

É possível verificar que a delaminação cresce conforme a energia que foi realizada no ensaio aumenta. Vale ressaltar que, devido ao caráter qualitativo do trabalho, as dimensões

do defeito causado pelo impacto não foram analisadas, uma vez que o objetivo do trabalho é verificar se é possível a detecção dos danos de impacto através dos termogramas.

Figura 7 – Região impactada após o ensaio. (a) CP20; (b) CP39; (c) CP58; (d) CP77 J.



Fonte - Autoria Própria

Na Fase 3, a concepção da câmara de isolamento térmico se deu a partir de processo manual e a geometria selecionada foi retangular devido a facilidade construtiva. Para o dimensionamento da estrutura se levou em consideração o comprimento focal mínimo estabelecido pelo fabricante da câmera termográfica que é de 42 cm, a altura do CP é de 15 cm e a largura do CP é de 15 cm. Diante dessas condições determinou-se uma câmara retangular com as seguintes dimensões: 62 cm de comprimento, 17 cm de largura e 22 cm de altura, pois essa concepção possibilitou o encaixe e retirada do CP facilmente da estrutura.

A câmara possui uma abertura na face frontal para o encaixe da câmera termográfica [Figura 8(a)] e, a uma distância de 41 cm da face frontal se localiza o corpo de prova em análise, pois está é a distância focal mínima que o fabricante da câmera sugere [Figura 8(b)].

Em relação ao projeto da câmara térmica, vale destacar que foi projetada com a parte superior móvel. Dessa forma, foi possível realizar, de forma mais fácil, o posicionamento do corpo de prova aquecido no local especificado para que a região do dano fosse centralizada. Além disso, essa parte móvel foi projetada para ser facilmente realocada após o posicionamento do corpo de prova.

Figura 8 – Câmara de isolamento térmico: (a) Câmara fechada; (b) Câmara aberta.



Fonte - Autoria Própria

O material utilizado para sua concepção foi o Poliestireno Expandido (conhecido como Isopor), pois dificulta a dissipação de calor e permite manter a temperatura ambiente. Para o revestimento interno foi utilizado o Etil-Vinil-Acetato (conhecido por EVA) de cor preta e emborrachado (fosco), pois esse material atua como uma barreira radiante amortecendo o fluxo de calor e conserva a temperatura interna de um equipamento em que os materiais empregados apresentam baixa condutividade. De forma a reduzir o ganho de calor pelos corpos circunvizinhos foi então necessário o uso de Papel Alumínio, pois é um material de alta refletância e baixa emissividade, (SILVA, 2017). Para a junção

das partes da câmara foi utilizado cola quente de silicone com o auxílio de pequenos bastonetes de madeira assim como, a inserção do isolamento interno e externo.

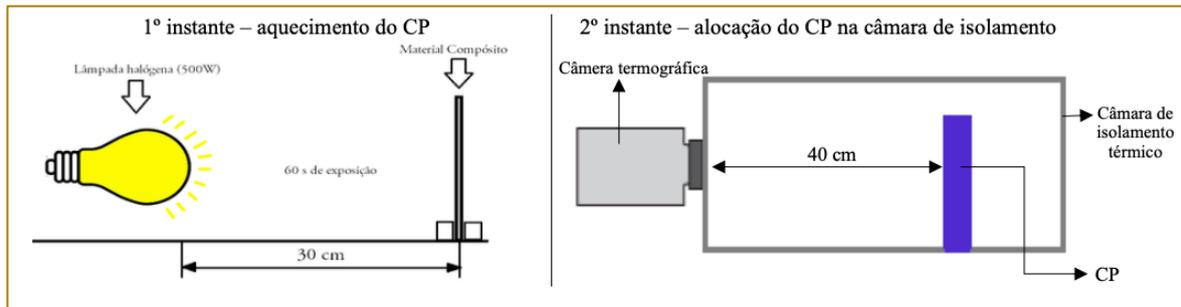
Na Fase 4, as condições ambientais encontradas no laboratório foram mensuradas pelo aparelho descrito na metodologia, obteve-se a temperatura ambiente média de 23°C e umidade relativa média de 57%. Ainda foi medido a velocidade da corrente de ar em torno dos compósitos expostos ao ambiente que foi de 0,0 m/s por se encontrar enclausurado dentro da câmara de isolamento térmico. Uma propriedade importante para a medição termográfica é a Emissividade, para este estudo utilizou-se um

valor de 0,94 de emissividade, pois segundo o manual da máquina utilizada FLIR T620 esse é o valor que o material compósito laminado com fibra de vidro apresenta.

Como fonte de calor utilizou-se lâmpadas halógenas, as quais foram usadas para

aquecer a superfície dos corpos de prova. O CP foi aquecido por duas lâmpadas halógenas de 500W (totalizando 1.000W), por um tempo de 60 segundos. Após isto, o CP foi transferido para o interior da câmara de isolamento térmico de forma a não ocorrer a perda de calor para o ambiente.

Figura 9 – Posicionamento metodológico de aquecimento do corpo de prova.

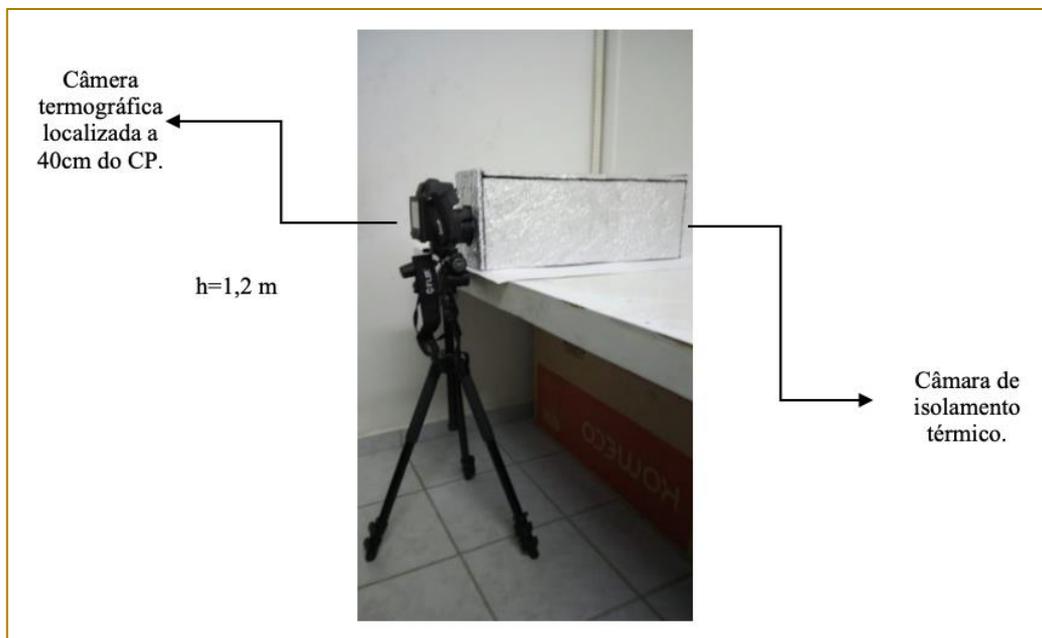


Fonte - Autoria própria.

Na Fase 5 realizou-se o registro dos termogramas, uma vez que, a câmara já

estava posicionada na câmara de isolamento como apresenta a Figura 10.

Figura 10 – Posicionamento da câmara na câmara de isolamento térmico.

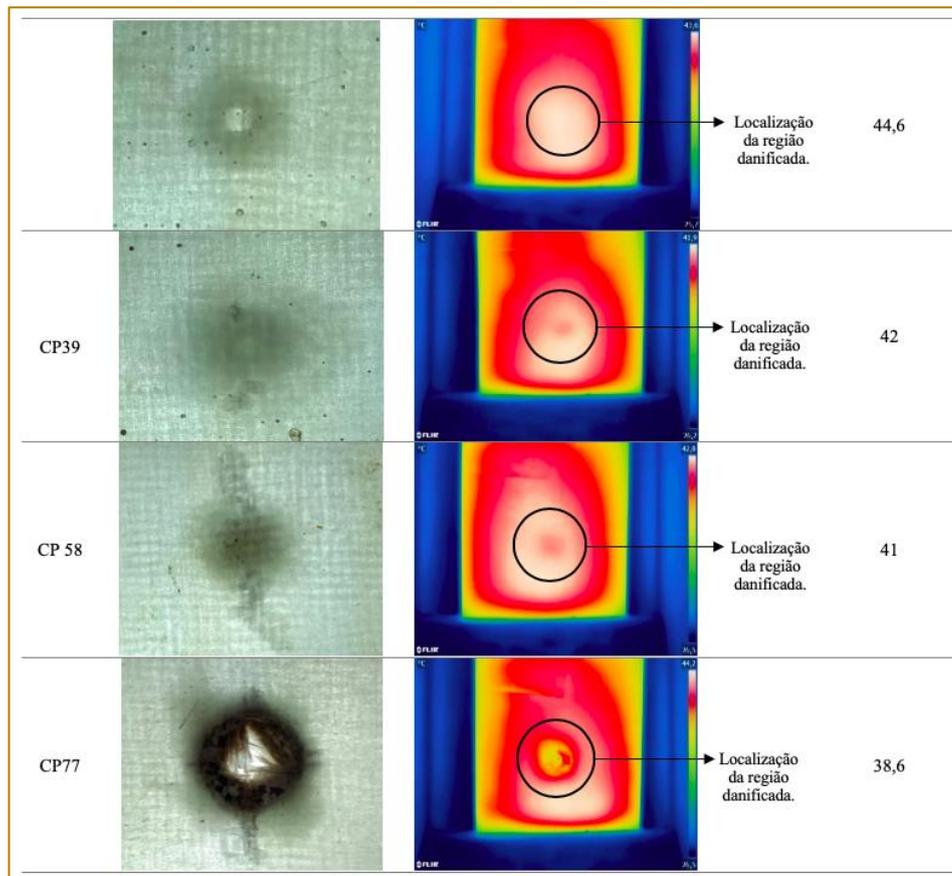


Fonte - Autoria própria

Os termogramas foram obtidos para os impactos obtidos pelos quatro níveis de energia estabelecidos anteriormente. Na

Tabela 3 pode-se ver os termogramas qualitativos e quantitativos registrados.

Tabela 3 – Termogramas dos corpos de prova danificados por diferentes níveis de energia de impacto.

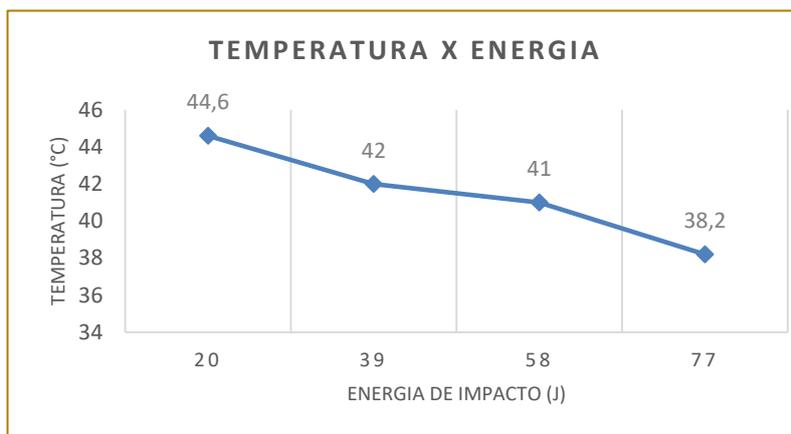


Fonte - Autoria Própria.

Na Fase 6 se analisou os termogramas, é visto nas imagens térmicas na Tabela 3 que o aquecimento por radiação térmica através da exposição da placa compósita às lâmpadas halógenas obteve-se uma distribuição semelhante em todos os casos. Os corpos de prova atingiram uma temperatura máxima de aproximadamente 45°C com o tempo de exposição ao calor, e então o dano originado anteriormente por impacto é mostrado no centro da placa por diferentes níveis de calor emitido (observado pela diferente coloração).

Uma análise qualitativa nos termogramas observa-se que a região do impacto quando estimulada dissipa calor mais rápido ou absorve menos energia, portanto há um decréscimo na leitura da temperatura em função do maior dano, ou seja, quanto maior o impacto, maior o dano e menor a temperatura ensaiada como pode ser observado no Gráfico 1. É possível visualizar nos termogramas da Tabela 3 que ao redor da localização do impacto apresenta cores de temperatura maior do que na região danificada.

Gráfico 1 – Temperatura na região de dano versus a energia de impacto.



Fonte - Autoria Própria.

O dano originado no compósito pode ser visto, segundo esta metodologia, a partir do nível de energia de 39J, este nível de energia corresponde ao mesmo nível de energia quando uma aeronave sofre choque com um pássaro de 0,5kg voando a 12m/s.

Os termogramas obtidos do CP39, CP58 e CP77 mostram claramente a extensão da área danificada. O maior dano é mostrado no último termograma da Tabela 3, onde a variação de temperatura no local do dano é de alguns graus de diferença.

4 CONCLUSÕES

Ao longo deste trabalho buscou-se estudar o seguinte problema: “analisar danos de impacto em materiais compósitos, através da técnica da termografia ativa”.

REFERÊNCIAS

- [1] ALMEIDA, E. G. R. DE. Inspeção termográfica de danos por impacto em laminados compósitos sólidos de matriz polimérica fortalecida com fibras de carbono. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2010.
- [2] ALVES, M.; CHAVES, C. E.; BIRCH, R. S. Impact on aircraft. 17th International Congress of Mechanical Engineering, p. 1–8, 2003.
- [3] CALLISTER, W.; RETHWISCH, D. Materials science and engineering: an introduction. 7th. ed. New York, NY: [s.n.]. v. 94
- [4] CUARTAS, V. M. et al. Utilisation de la thermographie infrarouge et de l'émission acoustique pour l'identification de l'endommagement d'un composite stratifié carbone-époxy. OATAO, 2014.

Para tanto realizou-se uma revisão na literatura envolvendo os seguintes temas: termografia, danos em materiais compósitos aeronáuticos e ensaio não-destrutivo para materiais compósitos.

Após estabelecer a metodologia do trabalho, apresentar e discutir os resultados, pode-se concluir que com a realização do ensaio não-destrutivo de termografia é possível visualizar danos de impacto em materiais compósitos mesmo com pouco tempo de aquecimento dos corpos de prova, provando ser um ensaio rápido e seguro para o cientista, também foi possível observar que quanto maior for a energia do impacto melhor e mais rápida será a detecção através deste ensaio e que quando as áreas de inspeção forem ensaiadas, as regiões onde houver danos serão detectadas por apresentarem cores de menor temperatura.

- [5] FRAMEZELLE, G. et al. Contrôle Non Destructif De Structures Composites Pour L'Aéronautique. NDT.net, p. 1–15, 2011.
- [6] GIL, A. C. Como Elaborar Projetos de Pesquisa. 4a Edição ed. São Paulo - SP: [s.n.].
- [7] HALE, J. Boeing 787 from the Ground Up. AeroMagazine, p. 9, 2008.
- [8] JUNIOR, F. G. Desenvolvimento de uma máquina de impacto por queda de peso para materiais compósitos. [s.l.] Universidade Federal de Campina Grande, 2014.
- [9] MEOLA, C. et al. New perspectives on impact damaging of thermoset- and thermoplastic-matrix composites from thermographic images. Composite Structures, v. 152, p. 746–754, 2016.

[10] SILVA, J. F. DA. Estudo do mapeamento térmico das mãos para o auxílio ao diagnóstico da LER. [s.l.] Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

[11] TARPANI, J. R. et al. Inspeção termográfica de danos por impacto em laminados

[13]

de matriz polimérica reforçados por fibras de carbono. *Polímeros*, v. 19, p. 318–328, 2009.

[12] ZHANG, H. et al. Thermographic Non-Destructive Evaluation for Natural Fiber-Reinforced Composite Laminates. *Applied Sciences*, v. 8, n. 2, p. 240, 2018.

Capítulo 9

SIMULAÇÃO DE UM DISPOSITIVO GIROSCÓPIO ABSORVEDOR DO TREMOR DA DOENÇA DE PARKINSON

Marcelio Ronnie Dantas de Sá

Armando Wilmans Nunes da Fonseca Júnior

Aline Michelly do Nascimento

Antonio Almeida Silva.

Resumo: Neste trabalho é proposto a simulação de um aparato capaz de absorver parte dos tremores em pacientes com a doença de Parkinson. Para isso é sugerido a utilização de um sistema giroscópio, uma vez que esses dispositivos são bastantes simples de serem construídos, além de seu alto poder de absorção de vibração quando dimensionados da forma correta. Essa necessidade surge a partir da carência de novos métodos de controle dos tremores em pessoas que sofrem por conta desse sintoma, já que os medicamentos apresentam fortes efeitos colaterais e as cirurgias envolvem grandes riscos aos pacientes. Todo o desenvolvimento é realizado a partir de um ambiente virtual, iniciado com a modelagem matemática do sistema e utilizando um software de interação matemática para se obter as respostas do sistema sob diversos aspectos. Os resultados apresentados sugerem boas perspectivas de sucesso em relação ao aparelho, alcançando uma redução de 70,8% para um paciente com frequência de tremor em 7Hz. Portanto, o dispositivo giroscópio surge como mais uma alternativa de controle dos tremores, de modo que possibilite aos pacientes parkinsonianos a realização de atividades manuais simples do dia a dia.

Palavras-chave: Doença de Parkinson, Tremores, Absorvedor giroscópio.

1 INTRODUÇÃO

O tremor é classificado como um movimento rítmico e involuntário que pode afetar qualquer parte do corpo, sendo causado por fenômenos físicos ou psicológicos (ABBASI; SAFAIE; AFSHARFARD, 2018). Quando esse ocorre em pessoas saudáveis, é considerado tremor psicológico, por outro lado, uma manifestação descontrolada e permanente é associada a uma patologia, denominando assim de tremor patológico (GEBAL et al., 2016). Dentre as doenças mais comuns relacionadas com o tremor, a doença de Parkinson (DP) e o Tremor Essencial (TE) são observadas mais frequentemente em pacientes. Elas surgem principalmente em pessoas com idade mais avançada, geralmente acima de 65 anos, tendo seus sinais amplificados com o passar dos anos (CICHACZEWSKI et al., 2014).

Segundo Pinheiro et al. (2017), a DP é a segunda doença neurodegenerativa mais prevalente no mundo, representando cerca de 2% da população mundial acima de 60 anos. Só no Brasil são 200 mil pessoas, onde 75% delas possuem o tremor como sintoma principal.

A DP não se caracteriza como uma doença primordialmente ligada ao tremor, porém 80% dos pacientes sofrem com esse sintoma. Possui uma faixa de frequência entre 3 a 7 Hz, podendo chegar a um máximo de 12Hz em alguns casos, podendo aparecer como flexão-extensão ou pronação-supinação no antebraço (BUKI et al., 2018).

Apesar do tremor não ser um sintoma fatal, ele é responsável por dificultar bastante a vida de qualquer pessoa, uma vez que as atividades diárias são realizadas principalmente com as mãos, seja vestir-se, comer, beber e escrever (ABBASI; SAFAIE; AFSHARFARD, 2018). Portanto, para amenizar essa situação, se faz necessário o tratamento desse sintoma, que pode ser por medicações ou cirurgias. As drogas são as mais utilizadas, porém somente cerca de 50% dos pacientes respondem bem a esse método. Outra maneira de tratar é através de cirurgias, porém mais indicadas em casos mais severos da doença, já que é um procedimento invasivo que envolvem grandes riscos (ZHANG et al., 2011).

Embora a medicina tenha se esforçado bastante em prol de novas tecnologias, o tremor patológico se tornou um problema multidisciplinar, indo além do controle por

meio de medicamentos. Isso foi possível graças ao desenvolvimento de dispositivos capazes de absorver a vibração transmitida pelo membro afetado.

Nos últimos anos diversos trabalhos foram desenvolvidos, a exemplo do bracelete absorvedor de Buki et al. (2018), os absorvedores dinâmicos de vibração desenvolvidos por (GEBAL et al., 2016) e (LANA et al., 2007). Sendo todos os dispositivos anteriores elaborados utilizando o princípio passivo de absorver o tremor. Por outro lado, exemplos de atenuadores ativos estão nos trabalhos de (KAZI; MAILAH; ZAIN, 2014) que utilizam atuadores piezelétricos; a colher desenvolvida por (ABBASI; SAFAIE; AFSHARFARD, 2018) ao qual consegue ler, interpretar e atuar para reduzir a vibração causada pela mão e, por fim, o trabalho realizado por Taheri, Case e Richer (2011), que foi desenvolvido com a intenção de criar um algoritmo que possa ser utilizado em uma órtese, possibilitando a leitura e supressão do tremor.

Dentro desse contexto surge a proposta deste trabalho, ao qual será simulado a utilização de um aparelho giroscópico para atenuar o tremor das mãos. Esse dispositivo se baseia na conservação do momento angular, o que permite que ele reaja a qualquer movimento que o "perturbe". Ele é composto basicamente por um disco, que pode ser acoplado a um motor elétrico para que possa fornecer a energia cinética, e uma gaiola que é responsável por alocar o dispositivo e permitir o seu movimento (HE; LI; CHEN, 2014).

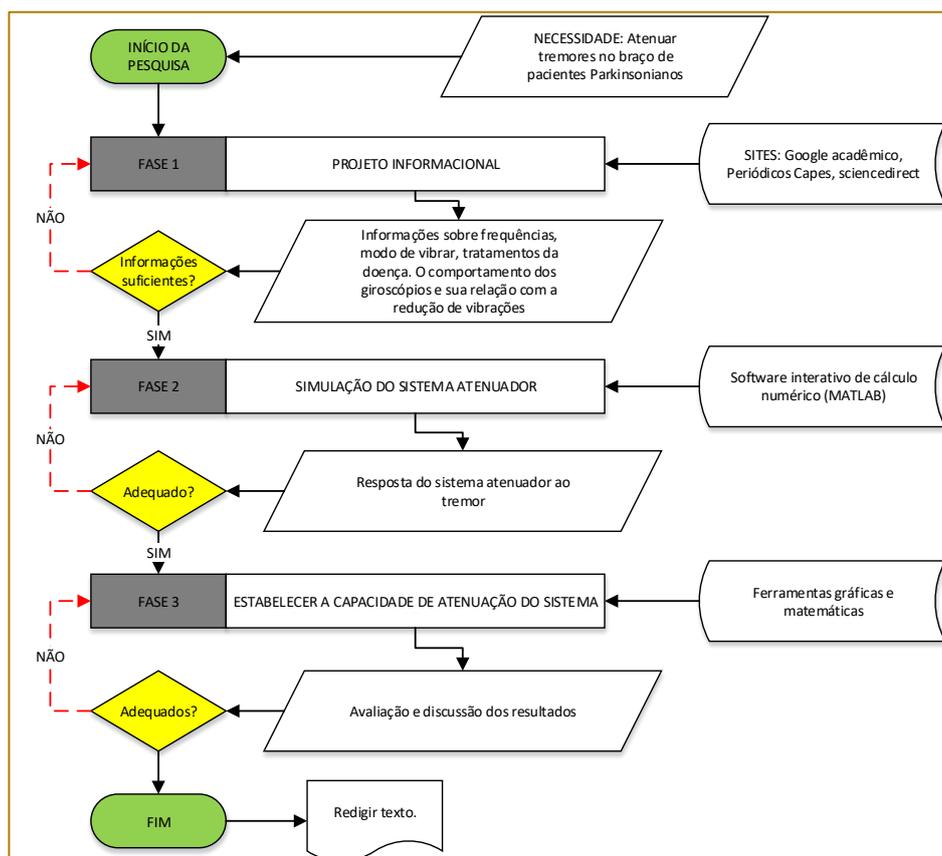
A reação giroscópica é a responsável pela absorção da energia do sistema, uma vez que, quando o dispositivo está girando em altas velocidades e sofre um torque perturbador, esse reage precessando. A precessão ocorre quando o eixo de rotação é deslocado do seu eixo fixo do estado inicial, fazendo com que o mesmo gire ao redor desse eixo fixo. Dessa forma, essa reação é a responsável pelo torque estabilizador, uma vez que ela atua como uma resposta à alteração de seu estado inicial, respeitando, portanto, a terceira lei de Newton. O torque reativo gerado pelo giroscópio será sempre igual e oposto ao torque perturbador e foi utilizando esse princípio que surgiram os primeiros absorvedores giroscópicos (SCARBOROUGH, 1958).

Dentro desse contexto, este trabalho busca utilizar os princípios giroscópios para desenvolver uma tecnologia barata e eficaz na redução dos tremores causados pela doença de Parkinson, uma vez que ela é a principal patologia neurodegenerativa que envolve tremuras e responsável pela queda drástica na qualidade de vida dos pacientes.

2 METODOLOGIA

Com o intuito de cumprir de forma metódica todos os objetivos necessários a obtenção dos resultados, foi estabelecido o fluxograma da Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma da metodologia de atividades.



Fonte: Autoria Própria.

2.1 PROJETO INFORMACIONAL

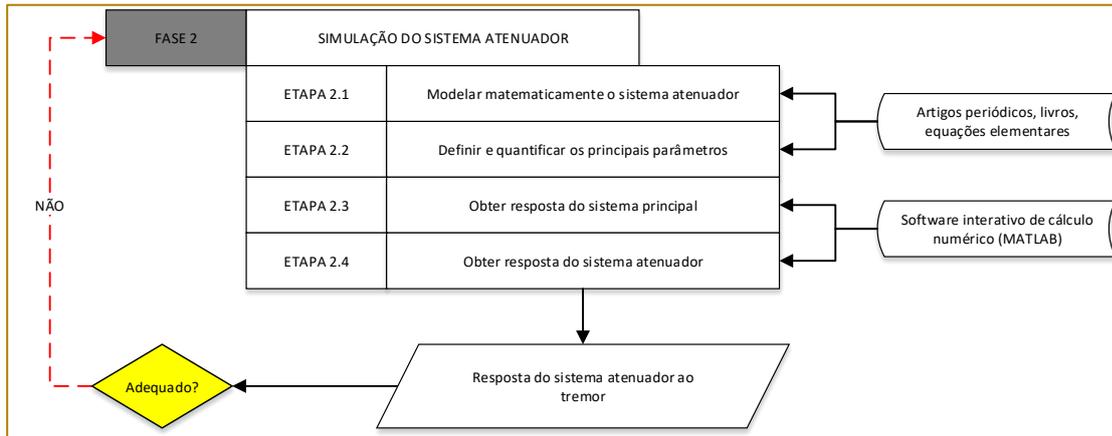
A pesquisa surgiu a partir da necessidade de novos métodos de controle dos tremores em pacientes com Parkinson, dessa forma foi realizada a primeira fase dessa pesquisa que se baseia na obtenção das principais informações que serão necessárias ao estudo, permitindo assim, obter os parâmetros elementares no que diz respeito a doença de Parkinson e ao seu controle. Portanto, consta nessa primeira fase as informações sobre as características do tremor, a relação desse

com a doença, os principais métodos de tratamento, as informações acerca dos giroscópios e a utilização do mesmo como um atenuador. Sendo todos os pontos citados e fundamentados na Seção 1.

2.2 SIMULAÇÃO DO SISTEMA ATENUADOR

Para a realização da simulação e obtenção das respostas do sistema, foi seguido o fluxograma da Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma de metodologia de simulação do sistema atenuador.



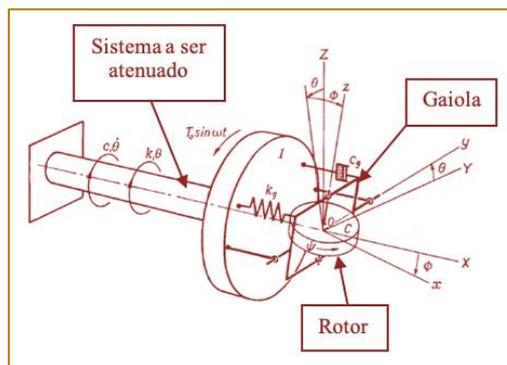
Fonte: Autoria Própria.

2.2.1 MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA DE CONTROLO GIROSCÓPICO

A modelagem parte do princípio da acoplagem do sistema atenuador ao segmento representativo do braço, sendo

toda essa estruturação matemática e física desenvolvida a partir do livro de Arnold (1961). Na Figura 3 é possível visualizar o diagrama esquemático da configuração.

Figura 3 – Diagrama esquemático do sistema giroscópico atenuador de vibrações



Fonte: Arnold (1961).

Os principais elementos que configuram o sistema são denominados abaixo, onde:

I – Momento de Inércia do sistema atenuado;

k_1 – Rigidez do sistema a ser atenuado;

c_1 – Amortecimento do sistema a ser atenuado;

$T_0 \text{sen}(\omega t)$ – Torque desenvolvido pelo sistema a ser atenuado;

k_g – Rigidez do sistema giroscópico;

c_g – Amortecimento do sistema giroscópico;

C – Momento de inércia do disco do sistema giroscópico;

$\dot{\psi}$ – Velocidade angular do disco;

$\theta(t)$ – Deslocamento angular em torno do eixo X;

$\phi(t)$ – Deslocamento angular em torno do eixo Y;

$Oxyz$ – Conjunto de eixos móveis;

$OXYZ$ – Conjunto de eixos fixos;

Ao ser perturbado pelo torque $T_0 \text{sen}(\omega t)$ deslocando o sistema atenuado em torno do eixo x , o sistema giroscópico precisa deslocando-se em torno do eixo y , sendo esse deslocamento responsável pela criação do torque atenuador ao qual é igual e oposto ao torque fornecido pelo braço.

Assumindo que os momentos de inércias da gaiola e rotor são definidos por (A,B,C) e (A',B',C') respectivamente sobre os eixos móveis Oxyz. As componentes das

$$\omega_1 = \dot{\theta} \cos(\phi)$$

$$\omega_2 = \dot{\phi}$$

$$\omega_3 = \dot{\theta} \sin(\phi)$$

$$h_1 = (A + A') \dot{\theta} \cos(\phi) \quad (1)$$

$$h_2 = (B + B') \dot{\phi} \quad (2)$$

$$h_3 = (C + C') \dot{\theta} \sin(\phi) + C \dot{\psi} \quad (3)$$

velocidades angulares e as quantidades de movimento sobre os eixos móveis Oxyz são dadas por:

Substituindo os termos nas equações diferenciais do movimento sob eixos móveis e assumindo que o disco giroscópico tenha momentos de inércia iguais nos eixos x e y, ou

seja, $A = B$ e $n = (\dot{\psi} + \dot{\theta} \sin \phi)$ seja a velocidade angular total sobre o eixo Oz, tem-se então que:

$$T_1 = (A + A') \ddot{\theta} + C n \dot{\phi} \quad (4)$$

$$T_2 = (A + B') \ddot{\phi} - C n \dot{\theta} \quad (5)$$

$$T_3 = 0 \quad (6)$$

A equação do movimento do sistema sobre o eixo fixo OX é dada por:

$$I \ddot{\theta} = T_0 \sin(\omega t) - T_1 \cos(\phi) - c_1 \dot{\theta} - k_1 \theta \quad (7)$$

Analogamente sobre o eixo Oy, tem-se que:

$$T_2 = -c_2 \dot{\phi} - k_1 \phi \quad (8)$$

Substituindo os termos das Equações (4), (5) e (6) nas equações (7) e (8), tem-se então:

$$\begin{cases} I_1 \ddot{\theta} + c_1 \dot{\theta} + k_1 \theta + C n \dot{\phi} = T_0 \sin(\omega t) \\ I_g \ddot{\phi} + c_2 \dot{\phi} + k_1 \phi - C n \dot{\theta} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Onde:

$$I_1 = (I + A + A');$$

$$I_g = (A + B')$$

Assumindo a solução da equação (9) sendo da forma $\theta = \theta_1 \sin(\omega t + \epsilon)$ em relação ao eixo

longitudinal do sistema a ser atenuado, obtém que a sua solução geral é dada por:

$$\theta(t) = \sqrt{\frac{d_1^2 + e_1^2}{d_2^2 + e_2^2}} T_0 \sin\left(\omega t + t g^{-1} \frac{e_1}{d_1} - t g^{-1} \frac{e_2}{d_2}\right) \quad (10)$$

Onde:

$$d_1 = (k_g - I_g \omega^2)$$

$$d_2 = (k_1 - I_1 \omega^2)(k_g - I_g \omega^2) - \omega^2(c_1 c_g + C^2 n^2)$$

$$e_1 = c_g$$

$$e_2 = c_1(k_g - I_g \omega^2) + c_g(k_1 - I_1 \omega^2)$$

Dessa forma, pode-se assumir uma série de fatores adimensionais a fim de simplificar a solução da Equação (10), sendo esses relacionados em dois grupos, o primeiro relativo ao sistema principal que movimentará

sobre o eixo longitudinal do conjunto a ser atenuado e o segundo correspondente ao sistema giroscópico que se movimenta em torno do eixo y da Figura 3. O Quadro 1 refere-se aos sistemas citados.

Quadro 1 – Parâmetros adimensionais relativos ao sistema principal e ao sistema giroscópico.

Parâmetros	Sistema Principal	Sistema Giroscópico	Torque aplicado
Amplitude de vibração	θ_1/θ_0	ϕ_1/ϕ_0	
Fator de amortecimento	β_1	β_g	
Relação de frequência		f	r
Efetividade dinâmica		Δ	

Fonte: Autoria Própria.

Onde f é a razão de frequência do sistema giroscópico, definida pela relação da frequência natural do giroscópio ω_{ng} e r é a razão de frequência da aplicação do torque ao sistema, que por definição é considerado a relação entre a frequência de excitação ω e a frequência natural do sistema principal ω_n .

Utilizando as relações adimensionais do Quadro 1 na Equação (10), é possível obter a relação de amplitude do sistema que é definida por:

$$\frac{\theta_1}{\theta_0} = \sqrt{\frac{(f^2 - r^2)^2 + (2\beta_g r)^2}{[(1 - r^2)(f^2 - r^2) - 4\beta_1 \beta_g r^2 - \Delta r^2]^2 + 4r^2[\beta_1(f^2 - r^2) + \beta_g(1 - r^2)]^2}} \quad (11)$$

Os termos definidos por θ_1/θ_0 e ϕ_1/ϕ_0 sugerem as relações de amplitudes tomadas em relação as condições θ_0 , ϕ_0 . A efetividade dinâmica fornecerá dados importantes acerca

da escolha do tamanho do giroscópio e sua relação com a velocidade angular que o mesmo tem. Seu parâmetro é definido por:

$$\Delta = \frac{(cn)^2}{I_1 I_g p_1^2}, \text{ onde } p_1 \text{ é a frequência natural do sistema principal.} \quad (12)$$

A Equação (12) retrata os principais elementos a serem manipulados de tal forma que mesmo ao alterar qualquer parâmetro, será possível ainda obter a mesma efetividade dinâmica Δ . A ênfase é dada principalmente em relação ao tamanho do disco, definida na

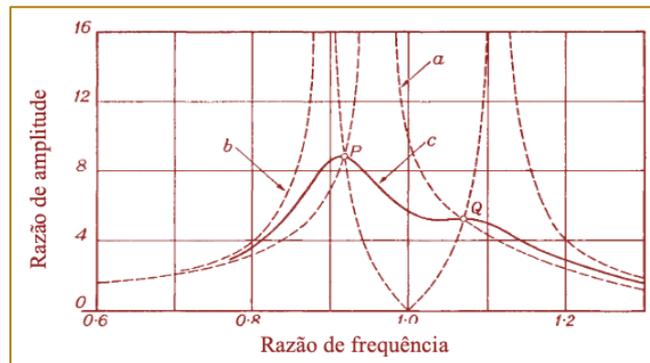
Equação (12) por C e a velocidade do mesmo dada por n .

O sistema a ser atenuado possui uma região em que sua resposta terá um pico máximo, conhecido como região de ressonância,

representado pela linha tracejada *a* no gráfico da Figura 4. Porém a adição do dispositivo giroscópico acrescentará mais um grau de liberdade ao sistema e, portanto, sendo possível observar mais um pico no gráfico designado pela linha tracejada *b*. Além do mais, a adição de amortecimento ao sistema fará com que a amplitude nesses dois picos diminua, em contrapartida, a região de antirressonância onde antes possuía amplitude zero, agora passa a ser maior, conforme visto no gráfico através pela linha contínua *c*. Apesar de se ter uma redução na absorção da vibração, ganha-se bastante em relação a redução das amplitudes caso o

sistema passe por qualquer um desses novos pontos de ressonância. Além do mais, existem dois pontos *P* e *Q* significantes que independente do amortecimento adicionado esses irão passar. Portanto, é necessário encontrar o ajuste ideal de modo que os pontos *P* e *Q* no gráfico estejam no mesmo nível de amplitude e evitando que independente do sistema passar por qualquer região de ressonância, seu pico não atingirá níveis elevados. Esse ajuste é encontrado definindo os valores a partir do fator de amortecimento β_g e a relação de frequência do giroscópio *f*.

Figura 4 – Curvas de respostas de sistema com 1GDL sem amortecimento e com 2GDL sem e com amortecimento.



Fonte: Arnold (1961).

2.2.2 MELHOR RAZÃO DE FREQUÊNCIA DO SISTEMA GIROSCÓPIO *f*

Partindo do princípio que é necessário encontrar a melhor condição em que os pontos *P* e *Q* tenham picos iguais, foi utilizado

a Equação (11) de modo a deixá-la na forma da Equação (13), assumindo que o termo β_1 seja muito pequeno e que a razão de amplitude independa do amortecimento β_g . Nessas condições, é obtido que:

$$\frac{\theta_1}{\theta_0} = \sqrt{\frac{E_1 + F_1 \beta_g^2}{E_2 + F_2 \beta_g^2}} \quad (13)$$

Logo, a condição imposta só será satisfeita quando $E_1/E_2 + F_1/F_2$, que conduzirá a uma equação do segundo grau em r^2 cuja as

soluções apresentadas serão as abscissas dos dois pontos *P* e *Q* definidas por:

$$r^4 - (f^2 + 1 + \Delta/2)r^2 + f^2 = 0 \quad (14)$$

As ordenadas desses pontos são obtidas ao considerar $\beta_g = \infty$ na Equação (11), logo:

$$\frac{1}{1-r^2} = -\frac{1}{1-r^2} \quad (15)$$

Sendo assim, $(r_1^2 + r_2^2) = 2$ é a soma das raízes da Equação (14):

$$f^2 + 1 + \Delta/2 = 2 \quad (16)$$

$$f = f_0 = \sqrt{1 - \Delta/2} \quad (17)$$

Esse resultado permite não só definir a razão de frequência do sistema giroscópio como também limitar o dispositivo a uma efetividade dinâmica $\Delta < 2$.

Uma vez ajustado o absorvedor para a frequência definida pela Equação (17) na Equação (14), tem-se que:

2.2.3 MÁXIMA RAZÃO DE AMPLITUDE $(\theta_1/\theta_0)_m$ PARA $\Delta < 2$

$$r^4 - 2r^2 + (1 - \Delta/2) = 0 \quad (18)$$

$$r^2 = 1 + \sqrt{\Delta/2} \quad (19)$$

Utilizando a Equação (19) na Equação (11) quando $\beta_g = \infty$, obtém-se que:

$$\left(\frac{\theta_1}{\theta_0}\right)_m = \pm \frac{1}{1-r^2} = \sqrt{2/\Delta} \quad (20)$$

2.2.4 MELHOR CONDIÇÃO DO FATOR DE AMORTECIMENTO β_g

A melhor condição do fator de amortecimento pode ser obtida através da escolha da amplitude de $\sqrt{2/\Delta}$ no ponto referente a r_m .

sendo esse o valor médio entre os pontos P e Q . Portanto, ao definir $r_m = 1$ e $f = \sqrt{1 - \Delta/2}$ na Equação (11), é encontrado as seguintes relações:

$$\frac{z}{\Delta} = \frac{(\Delta/2)^2 + 4\beta_g^2}{\Delta^2} \quad (21)$$

$$\beta_g = \beta_0 = \frac{1}{4}\sqrt{\Delta(\beta - \Delta)} \quad (22)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram obtidos seguindo o procedimento metodológico apresentado na Figura 5, sob as melhores condições descritas a partir da modelagem do sistema.

3.1 INFORMAÇÕES DO BRAÇO DO PACIENTE

Utilizando a fundamentação deste artigo, foi elaborado o Quadro 2 que define os principais parâmetros do braço de um paciente parkinsoniano. Foi estabelecido o momento de inércia a partir do estudo antropométrico realizado pela NASA (2010) para um antebraço e mão esquerda de um homem possuindo uma frequência característica do tremor.

Quadro 2 – Parâmetros relativo a um antebraço de um paciente parkinsoniano.

Parâmetro	Valor
Momento de Inércia	$2,43 \cdot 10^{-3} (kg \cdot m^2)$
Frequência do tremor	7 (Hz)

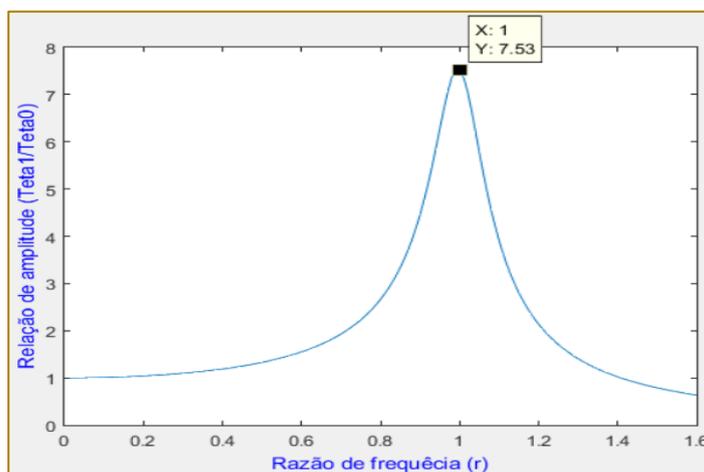
Fonte: Autoria Própria.

3.1.1 RESPOSTA DO MOVIMENTO DO BRAÇO DE UM PACIENTE SOB TREMOR DE 7HZ

A curva de resposta em frequência do antebraço do paciente com Parkinson é

apresentada na Figura 5 ao qual é interpretada como um sistema com um grau de liberdade cuja ressonância ocorre no ponto $r=1$.

Figura 6 – Curva de resposta em frequência do antebraço do paciente com Parkinson.



Fonte: Autoria Própria.

A razão de frequência relacionada ao torque aplicado r mostrada no gráfico refere-se ao ponto em que a frequência de excitação alcança a frequência natural do braço, ou seja, em 7Hz e conseqüentemente é obtida a amplitude máxima de 7,53 para esse ponto.

3.2 INFORMAÇÕES QUANTO AO SISTEMA GIROSCÓPICO ABSORVEDOR

É apresentado um dispositivo cujo momento de inércia seja 30% do momento de inércia do antebraço do paciente, uma vez que o peso do aparelho é um parâmetro bastante

relevante. Outro ponto importante é a quantificação do diâmetro do disco que compõe o giroscópio, que não deve ser maior que 120 mm sendo fabricado em alumínio e pesando 50g para manter as condições de tamanho e peso mínimo aliado a uma boa capacidade de absorção. Além disso, o motor que deverá fornecer a energia cinética não deverá ultrapassar os 5000 rpm de modo que sua aquisição não seja dispendiosa. De uma forma mais simplificada, é expressa na Tabela 1 a quantificação dos parâmetros:

Tabela 1 – Parâmetros relativos ao sistema giroscópio

Momento de inércia do dispositivo giroscópio	$7,29 \cdot 10^{-4} (kg \cdot m^2)$
Momento de inércia do disco giroscópio	$8 \cdot 10^{-5} (kg \cdot m^2)$
Rotação do disco	4200 (rpm)

Fonte: Autoria Própria.

Dessa forma é obtido a efetividade dinâmica do dispositivo é obtido a partir da Equação (12), em que:

$$\Delta = 0,3613$$

Ou seja, respeitando o pré-requisito da seção 2.2.2 onde sugere o $\Delta < 2$.

A escolha da melhor frequência do sistema giroscópio é encontrada a partir da Equação (17), portanto:

$$f_0 = 0,9052$$

Dessa maneira, essa é a melhor condição levando em consideração o dimensionamento do dispositivo.

amortecimento, de modo que os pontos P e Q tenham picos iguais, predefinidos na seção 2.2.1, logo:

Por fim, baseando-se na Equação (22), é possível estabelecer o melhor fator de

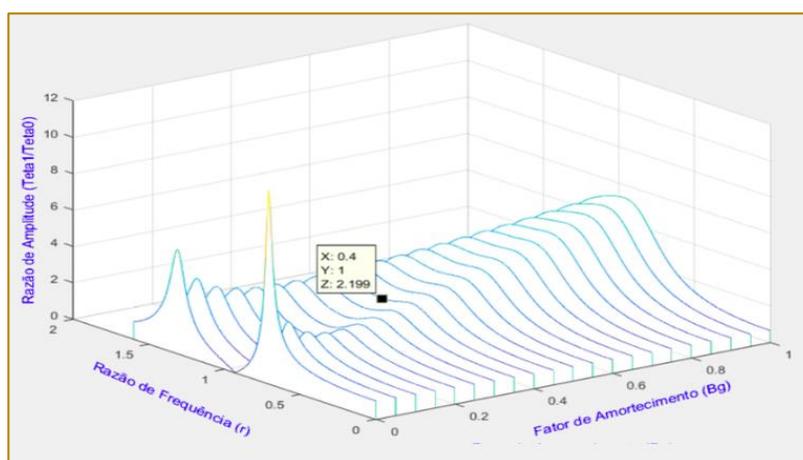
$$\beta_0 = 0,4153$$

3.2.1 RESPOSTA DO SISTEMA ABSORVEDOR

Com a utilização da Equação (11) é possível plotar a curvas das respostas sob diversos

efeitos do fator de amortecimento e para uma análise mais adequada, é apontado a melhor curva aplicando os parâmetros calculados na seção 3.2, sendo esses dados apresentados na Figura 7.

Figura 7 - Curvas das respostas sob diversos efeitos do fator de amortecimento.



Fonte: Autoria Própria.

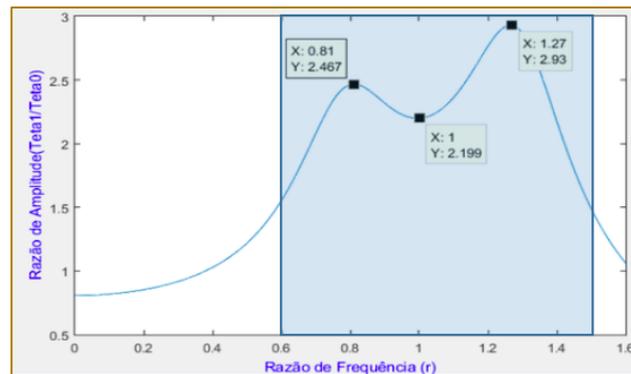
A partir da análise da Figura 7 é perceptível a redução da amplitude no braço devido ao dispositivo como também a atenuação nos dois picos de ressonância do sistema,

especialmente onde a curva apresenta o mínimo local, sendo esse a uma razão de amplitude da ordem de 2,199.

Uma análise mais sucinta acerca da efetividade do absorvedor é apresentada na Figura 8 que apresenta na região azul a faixa de frequência relativa a absorção do tremor, tomando como referência a faixa de tremor da doença de Parkinson, sendo essas apresentadas por $0.6 \leq r \leq 1.5$, ou seja, nas

frequências de 4,2Hz a 10,5Hz. Portanto, qualquer paciente que possuir a frequência do tremor dentro dessa região, será beneficiado pelo dispositivo. A condição mais severa do sistema ocorre quando o paciente apresentar uma frequência de 8,89Hz, onde a curva tem o seu maior pico de amplitude.

Figura 5 – Região de atuação giroscópica relativo a frequência do tremor de Parkinson.



Fonte: Autoria Própria.

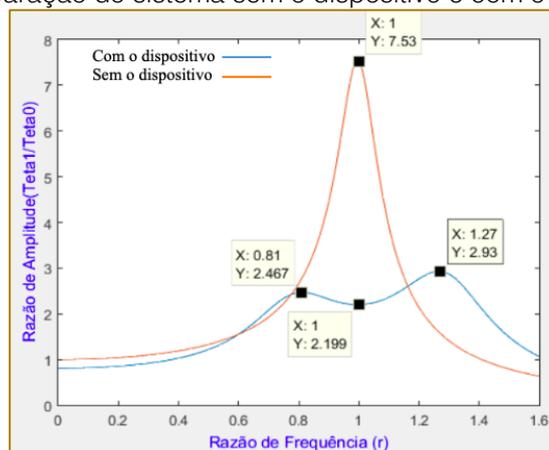
Para uma análise comparativa, a Tabela 2 fornece os dados sobre o quanto o dispositivo é efetivo:

Tabela 2 – Tabela comparativa da efetividade do giroscópio.

	Sem o Absorvedor Giroscópico	Com o Absorvedor Giroscópico	Redução
Pico	7,53	2,199	70,8%

Fonte: Autoria Própria.

Figura 9 - Gráfico de comparação do sistema sem o dispositivo e com o dispositivo atuando.



Fonte: Autoria Própria.

Considerando a Figura 9, é fácil observar a capacidade de absorção da amplitude que o dispositivo consegue alcançar mesmo nos dois pontos de ressonância comum em um

sistema com dois graus de liberdade. A Tabela 3 define a amplificação nesses dois pontos tomando como referência o valor mínimo de amplitude:

Tabela 3 – Tabela de análise da amplificação do sistema.

Parâmetro	Valor	Amplificação
Pico de referência	2,199	-
Pico 1	2,467	12,19%
Pico 2	2,93	33,24%

Fonte: Autoria Própria.

Percebe-se então a grande importância do sistema ajustado segundo os parâmetros de razão de frequência e amortecimento do sistema giroscópico, já que garante uma boa absorção de energia pelo dispositivo dentro de uma larga faixa de frequência.

4 CONCLUSÕES

A partir do estudo baseado na simulação do dispositivo, foram obtidos os resultados relativos a sua capacidade de absorção de amplitude do tremor. A análise permite observar bons resultados, chegando na casa dos 70% de redução para um paciente com tremor a uma frequência de 7Hz. A grande vantagem em relação a outros dispositivos é o seu custo, uma vez que o dispositivo

giroscópio é bastante simples de ser construído além de permitir uma variedade de desenhos para a sua construção.

Embora o desenvolvimento do dispositivo tenha sido realizado a partir de um ambiente simulado, os elementos que compõe o dispositivo são bastante simples de ser adquirido, além de fácil construção. Porém, fatores como elevados ruídos devido ao motor elétrico que fornece energia cinética ao disco.

De uma forma geral, a proposta desse dispositivo absorvedor giroscópio é uma tecnologia relativamente nova, mas altamente eficiente na redução de vibração, por isso surge como mais uma alternativa capaz de oferecer melhoria na qualidade de vida dos pacientes que possuem a Doença de Parkinson.

REFERÊNCIAS

- [1] ABBASI, M.; SAFAIE, J.; AFSHARFARD, A. Design of a Noninvasive Hand Tremor Suppression System with Active Control. p. 1–7, 2018.
- [2] BUKI, E. et al. Vib-bracelet: a passive absorber for attenuating forearm tremor. *Medical and Biological Engineering and Computing*, v. 56, n. 5, p. 923–930, 2018.
- [3] CARPENTER, M. D.; PECK, M. A. Reducing Base Reactions With Gyroscopic Actuation of Space-Robotic Systems. v. 25, n. 6, p. 1262–1270, 2009.
- [4] CICHACZEWSKI, E. et al. Características eletrofisiológicas do tremor na doença de parkinson e tremor essencial. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*, v. 72, n. 4, p. 301–306, 2014.
- [5] GAGNE, J. et al. Active heart stabilization using adaptive noise cancelling techniques with gyroscopic actuation. 2010, *BioRob 2010*, p. 802–807, 2010.
- [6] GEBAI, S. et al. Tremor Reduction at the Palm of a Parkinson's Patient Using Dynamic Vibration Absorber. *Bioengineering*, v. 3, n. 3, p. 18, 2016.
- [7] HE, H.; LI, R.; CHEN, K. High-rise Structure Vibration Control with Gyroscopes. n. *Icmce*, p. 227–232, 2014.
- [8] KARNOPP, D. Tilt Control for Gyro-Stabilized Two-Wheeled Vehicles. *Vehicle System Dynamics*, v. 37, n. 2, p. 145–156, 2002.
- [9] KAZI, S.; MAILAH, M.; ZAIN, Z. Suppression of Hand Postural Tremor Via Active Force Control Method 3 Dynamic Model of Human Hand 2 Background of Hand Tremor. p. 76–82, 2014.
- [10] LANA, R. C. et al. Percepção da qualidade de vida de indivíduos com Doença de Parkinson através do PDQ-39. *Revista Brasileira de Fisioterapia*, v. 11, n. 5, p. 397–402, 2007.
- [11] NASA Handbook (2010) NASA Human Integration Design Handbook (HIDH)-NASA, Vol. 3407. SP-2010.
- [12] PINHEIRO, W. C. et al. Parkinson's Disease Tremor Suppression A Double Approach Study - Part 1. Vol 1: Biodevices, n. Biostec, p. 149–155, 2017.
- [13] SCARBOROUGH, J. B. *The gyroscope; Theory and applications*, 1958.
- [14] TAHERI, B.; CASE, D.; RICHER, E. Active Tremor Estimation and Suppression in Human Elbow Joint. *ASME 2011*, Volume 2, p. 115–120, 2011.
- [15] TOWNSEND, N. C.; SHENOI, R. A. Control strategies for marine gyrostabilizers. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 39, n. 2, p. 243–255, 2014.
- [16] ZHANG, D. et al. Neural oscillator based control for pathological tremor suppression via functional electrical stimulation. *Control Engineering Practice*, v. 19, n. 1, p. 74–88, 2011.

Capítulo 10

REVESTIMENTOS METÁLICOS OBTIDOS POR ELETRODEPOSIÇÃO: UMA REVISÃO DA LITERATURA.

Raíssa Alves Queiroga

Mikarla Baía de Sousa

Josiane Dantas Costa

Arthur Filgueira de Almeida

Renato Alexandre Costa de Santana.

Resumo: A eletrodeposição é considerada uma técnica rápida, fácil e econômica para a obtenção de revestimentos metálicos. Uma ampla variedade de propriedades para revestimentos pode ser obtida selecionando diferentes parâmetros de eletrodeposição. Os revestimentos metálicos compostos de cromo, cobre, tungstênio, zinco, cobalto e molibdênio são empregados em muitos campos, como corrosão, desgaste, aplicações magnéticas e elétricas e materiais eletrocatalíticos. Neste estudo, apresenta-se uma revisão da literatura de alguns dos metais mais utilizados como revestimentos, sendo de grande valia para guiar futuras pesquisas. O processo de eletrodeposição, parâmetros efetivos, propriedades e aplicação de tais ligas foram resumidas considerando os estudos anteriores.

Palavras-Chave: Eletrodeposição. Ligas Metálicas. Revestimentos Metálicos. Corrosão.

1 INTRODUÇÃO

Devido à variedade de materiais (metais, ligas metálicas, polímeros, etc.) o papel de escolha destes, por um profissional, para uso em estruturas ou equipamentos se torna difícil. O material ideal terá que apresentar três características importantes: propriedades desejadas, menor custo possível e durabilidade. Porém, quando se relaciona a durabilidade do material com a sua resistência à corrosão, prever como será seu comportamento se torna trabalhoso. Isto porque a natureza do meio corrosivo e as condições de exposição do material a este meio têm que ser consideradas (AZEVEDO et al., 2015).

Neste aspecto, os problemas causados pela corrosão de materiais se tornam frequentes em diversos setores da atividade humana (construção civil, automobilística, ferroviária, marítima, odontológica, indústria química, etc.) proporcionando grandes gastos econômicos diretos (substituição e prevenção dos materiais) e indiretos (consequência da corrosão dos materiais). Destas perdas, as mais prejudiciais são as indiretas, pois são de difícil avaliação e na maioria das vezes de custos bem mais elevados. Algumas dessas perdas indiretas são: paralisações acidentais, perdas de produtos, contaminações de produtos, etc. (GENTIL, 2007).

Deve-se considerar a importância social com relação a fatores de segurança à saúde humana, em que acidentes devido à corrosão são imprevisíveis. Mediante estes problemas que abrangem diversas áreas, causando gastos econômicos e riscos de vida, o estudo da corrosão, no que se refere à melhor forma de evitá-la ou até mesmo minimizá-la, tem crescido e se mostrado importante do ponto de vista tecnológico, econômico e social na preservação da natureza e do homem.

Uma forma de se minimizar a corrosão em materiais metálicos é revesti-los com outros materiais que apresentam características mais nobres. Dessa forma, o revestimento metálico é uma das formas de pretensão anticorrosiva. Estes revestimentos podem ser obtidos através de deposição em fase gasosa, eletrodeposição, metalização, imersão a quente, redução química, etc. Em consequência do desenvolvimento dos geradores de corrente contínua e por ser economicamente viável, a prática da eletrodeposição tornou-se o processo mais

utilizado para a proteção dos metais (NOCE et al., 2014).

A eletrodeposição é o processo pelo qual um revestimento metálico é aplicado sobre uma superfície através de uma corrente elétrica, geralmente contínua. A deposição pode ser feita em superfície condutora (metais e ligas metálicas: aço carbono, latão) ou não condutora (plásticos, couro, madeira). Através da eletrodeposição é possível obter materiais metálicos com propriedades satisfatórias como dureza, resistência à corrosão, propriedades catalíticas, boa ductilidade, etc.

A eletrodeposição possibilita o controle de parâmetros experimentais, como composição da solução eletrolítica, temperatura de deposição, densidade de corrente aplicada, carga a ser depositada e pH da solução. O controle destes parâmetros favorece o estudo das características físicas e químicas dos revestimentos (WHITE; BOCKRIS; CONWAY, 1995).

Nos últimos anos o interesse pela eletrodeposição de ligas tem aumentado devido as suas propriedades, tais como alta condutividade elétrica, resistência mecânica, alta condutividade térmica e boas propriedades catalíticas (SILVA, 2006). Essas ligas são aplicadas nas mais diversas áreas, como por exemplo, nas indústrias químicas, petrolíferas, navais, de construções civis e automobilísticas em decorrência de algumas características especiais, como alta resistência à corrosão e desgaste.

2 CONCEITOS E APLICAÇÕES

A eletrodeposição de metais e ligas permite a obtenção de materiais que podem ser utilizados numa variedade de aplicações (HAMID e HASSAN, 2012), desde que os depósitos obtidos apresentem propriedades convenientes, tais como: resistência à corrosão, resistência ao desgaste, propriedades magnéticas e ópticas desejadas, etc. Todas estas características dependem da composição química e da microestrutura obtida em revestimentos e/ou da topografia da superfície do metal tratado. Deste modo, os processos de eletrodeposição vêm sendo intensivamente estudados com o objetivo de controlar a microestrutura e composição dos depósitos, visando à otimização de propriedades que melhorem seu desempenho para as diferentes aplicações.

A eletrodeposição é o método mais importante para a produção comercial de revestimentos protetores. É um processo comumente utilizado, pois se consegue revestimento muito fino e relativamente livre de poros, evitando-se excesso do metal eletrodepositado. A partir do momento em que a técnica da eletrodeposição passou a ser utilizada na produção de revestimentos finos e multicamadas, ela passou a ter um papel de destaque na indústria eletrônica com as deposições de materiais condutores ou camadas magnéticas. Além do mais, a eletrodeposição se apresenta como sendo uma técnica de baixo custo de implantação e de produção (BELTOWSKA-LEHMAN, 2012). As coberturas por eletrodeposição são de espessuras mais uniformes do que as obtidas por imersão a quente, menos porosas do que as vaporizadas e de maior pureza. O método permite facilmente o controle da espessura da camada depositada.

Devido à sua facilidade de aplicação em substratos com as mais variadas formas e tamanhos possíveis, este processo é adequado quando se tem peças relativamente pequenas como parafusos e rebites, chapas e fios produzidos em processos contínuos, para uso em ambiente interno e em ambientes externos pouco poluídos. Para que seja possível obter eletrodepósitos com as características físicas e químicas desejadas é necessário inicialmente entender o processo de eletrodeposição; portanto, é importante lembrar que um grande número de variáveis deve ser considerado no estudo de eletrodeposição. Isto faz com que diferentes técnicas eletroquímicas possam ser empregadas nestes estudos e que haja uma grande inter-relação de diferentes áreas para estudar a cinética de formação de recobrimentos metálicos e em seguida caracterizar o material formado.

O processo de eletrodeposição é, essencialmente, uma reação eletroquímica que ocorre na área catódica da célula eletroquímica para produzir depósitos sólidos na superfície de substratos (TOMACHUK, 1998). A formação dos depósitos está associada com reações de oxirredução de espécies químicas (na reação de oxidação a espécie perde elétrons, tornando-se mais positiva, e na reação de redução recebe elétrons, tornando-se mais negativa). Tais reações são produzidas pela passagem de uma corrente elétrica entre dois eletrodos

submersos em um eletrólito contendo o banho de deposição (GAMBURG e ZANGARI, 2011; ZOLDAN, 2007).

As correntes dentro do eletrólito provêm da movimentação das espécies iônicas, que pode ocorrer via migração, convecção e difusão, e subsequente oxidação/redução nos eletrodos. A migração é um mecanismo de movimentação iônica originada a partir da influência que o campo elétrico gerado pela diferença de potencial existente entre os eletrodos submersos na solução causa nas partículas carregadas. A convecção é o transporte hidrodinâmico que ocorre devido à diferença nas densidades naturais de concentração causadas por flutuações na temperatura e na concentração da solução. A difusão ocorre devido à diferença de concentração da espécie a ser depositada em função da posição (gradiente). Para eletrólitos não muito concentrados, o crescimento do depósito na superfície do eletrodo é controlado pelo transporte de massa difusivo (regime difusivo). Para eletrólitos muito concentrados, o crescimento da camada depositada é controlado pela taxa das reações de oxirredução (regime cinético) (ZOLDAN, 2007).

De acordo com a lei de Faraday para a eletrólise, a quantidade de todos os elementos liberados no cátodo ou no ânodo durante a eletrólise é proporcional à quantidade de eletricidade que se passa através da solução. Desde que no cátodo íons hidrogênio sejam descarregados ao mesmo tempo em que os íons metálicos, a eficiência do processo pode ser, e geralmente é menor que 100%. De qualquer modo, sob quaisquer condições, a espessura do depósito é proporcional ao tempo de deposição.

O ânodo desta célula é, geralmente, do mesmo metal a ser depositado, mas pode ser também de algum material altamente condutor (inerte como a platina), insolúvel no banho nas condições atuantes. Dessa forma, devido à diferença de potencial, os íons metálicos entram na solução por dissolução, movem-se na direção do cátodo, onde são depositados na forma metálica (MOURA, 2005).

3 ELETRODEPOSIÇÃO DE LIGAS

No caso de eletrodeposição de ligas deve-se analisar a possibilidade da codeposição dos metais. A codeposição de dois metais A e B

ocorre a velocidades apreciáveis quando em uma determinada densidade de corrente os potenciais de redução de dois metais se igualam. A pré-condição para formação de qualquer liga é a codeposição dos metais em velocidades apreciáveis. A modificação de parâmetros como densidade de corrente, a concentração de íons metálicos e a alteração da composição das soluções fazem com que seja induzida a codeposição, mesmo no caso em que os potenciais reversíveis sejam diferentes. Observa-se então que uma das primeiras etapas na investigação do processo de eletrodeposição de ligas é desenvolver o banho de eletrodeposição, ou seja, as soluções que serão utilizadas no processo. Isto requer um conhecimento prático da eletroquímica dos elementos que constituirão a liga, da solubilidade de seus sais e da química de seus complexos (SANTANA et al., 2003).

Brenner (1963) classificou as ligas eletrodepositadas em cinco classes distintas de codeposição, levando em consideração a composição do depósito, sendo estas:

- Codeposição regular: ocorre quando o processo está sendo controlado por difusão. Os efeitos das variáveis do processo na composição dos depósitos são determinados pelas mudanças na concentração dos íons metálicos na camada de difusão catódica e são, conseqüentemente, previstos pela teoria de difusão. A porcentagem do metal mais nobre eletrodepositado é aumentada pela diminuição da densidade de corrente, elevação da temperatura, aumento da concentração total do metal e agitação. Este tipo de codeposição ocorre geralmente em banhos contendo íons metálicos livres, mas pode ocorrer também com íons metálicos complexados. Nesta classe podem-se encontrar ligas de estanho-chumbo, bismuto-cobre etc.
- Codeposição irregular: caracteriza-se por ser controlada em maior extensão pelo potencial de ativação do que pelo fenômeno de difusão. Os efeitos de algumas variáveis do processo influenciam na composição dos eletrodepósitos de acordo com a teoria de difusão, entretanto outras variáveis podem ter comportamento contrário a esta teoria. Também se observa um efeito menor das variáveis do processo na composição dos eletrodepósitos em relação a um sistema regular. A codeposição ocorre geralmente em soluções contendo íons complexos. Nesta classe, podem ser incluídas ligas de cobre-

zinco e cobre-estanho em soluções de cianeto.

- Codeposição de equilíbrio: caracteriza-se pela deposição a partir de uma solução que está em equilíbrio químico com os metais eletrodepositados. Este sistema é o único em que a razão molar dos íons metálicos no banho é igual à razão dos metais no eletrodepósito. Poucas ligas que pertencem a este grupo são conhecidas. Dentre elas pode-se citar: cobre-níquel, eletrodepositada a partir de banhos de tiosulfato; estanho-chumbo e cobre-bismuto eletrodepositadas a partir de banhos ácidos.
- Codeposição anômala: é o tipo de deposição onde o metal menos nobre é depositado preferencialmente. Esta característica ocorre somente sob condições bem determinadas de concentração e variáveis de operação. Pode ocorrer com íons livres ou complexados e está frequentemente associada à eletrodeposição de ligas contendo um dos três metais do grupo do ferro (cobalto, níquel e ferro).
- Codeposição induzida: caracteriza-se pela deposição de ligas contendo metais como molibdênio, tungstênio ou germânio. Estes metais não podem ser eletrodepositados na forma metálica individualmente, mas se depositam formando ligas com metais do grupo do ferro.

Os três primeiros são denominados de codeposição normal, pois se caracterizam por apresentarem a deposição preferencial do metal mais nobre. Os dois últimos são denominados de codeposição anormal porque há deposição preferencial do metal menos nobre.

Em 1994, Landolt publicou um artigo propondo três principais mecanismos de eletrodeposição de ligas que explicam os principais tipos de deposição propostos por Brenner. Landolt na década de 90 se mostrava envolvido em uma série de estudos relacionados a processos de eletrodeposição de ligas, assim como Brenner na década de 60.

A partir deste trabalho os sistemas de eletrodeposição passaram a ser classificados como:

- Sistemas acoplados por transporte de massa (onde a corrente parcial de um metal depende do transporte de massa do outro);

- Sistemas acoplados por transferência de carga (onde as correntes de deposição de cada metal são dependentes uma da outra);
- Sistemas não interativos (onde as correntes de deposição de cada metal são independentes uma da outra).

A teoria envolvida nestes três processos está baseada na teoria de potencial misto e nos processos que envolvem a reação de eletrodeposição, como o fenômeno de transferência de elétrons e a difusão dos íons até a superfície do eletrodo. Há necessidade em compreender estes fenômenos tanto do lado da solução quanto da parte da região interfacial no sólido, para que se possa obter eletrodepósitos com as características desejadas. Por razões ligadas com a evolução histórica dos modelos teóricos, a região interfacial na solução é conhecida como a região da dupla camada elétrica. Nesta região, o valor do potencial eletrostático difere do potencial dos íons no interior da solução. A espessura desta camada é da ordem de nanômetros, e é nela que ocorrem as reações de transferência de carga, responsáveis pela formação dos depósitos metálicos.

3.1 FATORES QUE AFETAM O PROCESSO DE ELETRODEPOSIÇÃO

Após a elaboração de um banho de eletrodeposição conveniente, a próxima etapa a ser investigada é o efeito de todas as variáveis que influenciam na composição dos eletrodepósitos. Estas variáveis são de dois tipos: i) variáveis de composição, tais como a natureza dos complexos, aditivos, pH, concentração e razão molar entre os íons metálicos e ii) variáveis de operação, como densidade de corrente, temperatura e agitação. Estas variáveis exercem influência direta sobre o caráter do depósito e estão relacionadas entre si de tal forma que se uma delas for alterada, haverá alteração nas outras (HALIM et al., 2012).

A preparação da superfície dos substratos sobre os quais se deseja efetuar a eletrodeposição é extremamente importante para a obtenção de coberturas aderentes, compactas e homogêneas. Inicialmente é fundamental para o êxito da eletrodeposição que a peça esteja perfeitamente limpa. Muitos pesquisadores acrescentam aditivos orgânicos na solução para o controle das propriedades morfológicas e mecânicas dos

depósitos. Estes parâmetros agem direta ou indiretamente no processo de eletrodeposição, tendo influência nas propriedades morfológicas e estruturais dos depósitos. Com base no exposto acima, pode-se concluir que estudar o processo de eletrodeposição de uma determinada liga envolve, além de um conhecimento de diversas áreas, um critério para escolha do material que irá compor esta liga.

4 ALGUNS TIPOS DE LIGAS

Nos últimos anos várias ligas obtidas por eletrodeposição vêm sendo estudadas para serem aplicadas como revestimentos e assim diminuir os problemas causados pela corrosão. A seguir algumas dessas ligas serão apresentadas.

4.1 LIGAS DE CROMO

O cromo (Cr) possui um alto ponto de fusão de 2.136 K, alta resistência mecânica e é quimicamente estável sob várias condições. Devido ao alto ponto de fusão seu processo de obtenção à temperatura ambiente torna-se difícil, e desta forma, as ligas de cromo são produzidas geralmente por um processo pirometalúrgico (processo sob a condição de alta temperatura e vácuo em uma câmara fechada). (OHGAI; TANAKA; FUJIMARU, 2012).

Uma solução viável para obtenção dos revestimentos de cromo à temperatura ambiente e pressão atmosférica se dá através do processo convencional de eletrodeposição. Onde filmes metálicos de Cr podem ser sintetizados por eletrodeposição a partir de uma solução aquosa contendo íons de cromo hexavalente (Cr⁶⁺) ou íons de cromo trivalente (Cr³⁺) (OHGAI; TANAKA; FUJIMARU, 2012). Considerações ambientais têm sido responsáveis pelo maior interesse na eletrodeposição de cromo trivalente que é um processo menos tóxico. Então, nas últimas décadas, muitas tentativas foram feitas para produzir ligas de cromo depositadas a partir de eletrólitos trivalentes de cromo como novos materiais para aplicação, a fim de substituir o processo de galvanoplastia de cromo hexavalente. Como exemplo, podemos citar as ligas Fe-Cr, Cr-Ni, Fe-Cr-Ni, Cr-P e Cr-C (LI et al., 2008).

O grande interesse na obtenção dos revestimentos de cromo se deve a sua alta

resistência à corrosão devido a sua propriedade de passivação em alguns ambientes corrosivos, como ácidos sulfúrico e nítrico, soluções alcalinas e outros. Nestes ambientes o filme fino que se forma na superfície do cromo impede a dissolução do metal. No entanto, a desvantagem significativa dos revestimentos de cromo é a sua instabilidade na presença de íons cloreto. Isso pode ser superado através do desenvolvimento de ligas com pequenas quantidades de fósforo, molibdênio, tungstênio e nióbio (KUZNETSOV et al., 2015).

As ligas de Co-Cr chamam a atenção dos pesquisadores devido à boas propriedades mecânicas e alta resistência à corrosão. Em particular, as ligas Co-Cr-W e Co-Cr-Mo contendo uma pequena quantidade de carbono, as chamadas ligas “Stellite”, tendo uso extensivo tanto na indústria quanto em aplicações biomédicas. Isto é devido às suas boas propriedades mecânicas, resistência à corrosão e biocompatibilidade. A inibição do processo de corrosão está relacionado à formação de um filme constituído por óxido e hidróxido de cromo na superfície da liga sob exposição a meios corrosivos (KUZNETSOV et al., 2018).

Outro grupo de revestimentos de cromo que vem ganhando destaque são os revestimentos amorfos obtidos por eletrodeposição, pois estes têm maior capacidade de passivar espontaneamente e maior resistência à corrosão em comparação aos revestimentos cristalinos. Dentre os revestimentos de cromo amorfos os de Fe-Ni-Cr são os mais conhecidos, estes revestimentos são amplamente utilizados para aplicações aeronáuticas devido à suas propriedades desejáveis de resistência mecânica, resistência à corrosão e efeitos magnéticos (TAVOOSI; BARAHIMI, 2017).

4.2 LIGAS DE COBRE

O cobre é um metal mole, maleável, dúctil, tenaz com alta condutividade elétrica, alta condutividade térmica, boa resistência mecânica, boa trabalhabilidade e boa resistência à corrosão (SILVA, 2006). Por esses motivos, o cobre tem sido cada vez mais utilizado em escala industrial e, principalmente na indústria de eletroeletrônicos. O cobre, como elemento principal, com a adição de outros elementos, apresenta-se como liga para fins específicos (SPIEGELBERG, 1990). Devido à crescente

necessidade de ligas com características especiais, novos desenvolvimentos foram obtidos visando o mercado cativo da indústria microeletrônica e de telecomunicações.

A eletrodeposição de cobre e suas ligas a partir de soluções alcalinas cianetadas é amplamente empregada na indústria para obtenção de camadas de cobre de alta qualidade sobre substratos ferrosos e não ferrosos. O interesse por novos processos de eletrodeposição de cobre isento de íon cianeto tem mostrado um aumento nas pesquisas desde 1980, devido à implantação de novas normas ambientais e imposições de novas condições de segurança, até os dias atuais.

Ligas de Cu-Zn têm sido amplamente aplicadas devido à sua elevada resistência mecânica, boa plasticidade e excelente resistência à corrosão (ALMEIDA, DE et al., 2011). Por exemplo, as ligas de Cu-Zn têm sido amplamente utilizadas como material elétrico em dispositivos microeletrônicos, conectores automotriz, máquinas elétricas e instrumentos eletrônicos, etc. Os materiais utilizados no contato elétrico são geralmente constituídos de ligas de cobre-zinco interessantes por sua excelente condutividade elétrica e um baixo custo.

Os revestimentos eletrodepositados de Cu-Zn são amplamente utilizados para fins decorativos, bem como para promover a sua boa aderência à borracha, que é empregue na indústria de pneus (VREESE, DE et al., 2013). A eletrodeposição comercial de ligas de Cu-Zn em banhos de cianeto produz depósitos de alta qualidade, mas os problemas ambientais surgem na utilização e eliminação de cianeto. Assim, uma extensa pesquisa tem sido feita para encontrar eletrólitos alternativos satisfatórios (SENNA; DÍAZ; SATHLER, 2005; CARLOS; ALMEIDA, DE, 2004; KARAHAN; ÖZDEMIR 2014).

As ligas de Cu-Ni são amplamente utilizadas na mineração e obras metalúrgicas, na indústria química devido à sua elevada resistência à corrosão, propriedades mecânica e catalítica (WANG et al., 2014; GORANOVA; AVDEEV; RASHKOV, 2014). Além disso, as ligas de Cu-Ni têm recebido muita atenção por suas propriedades magnéticas e termofísicas e também são usadas para fins decorativos (BASKARAN et al., 2006). São aplicadas em válvulas, ferragens, condensadores e trocadores de calor, pela sua boa usinabilidade, excelentes

propriedades térmicas e elétricas e são particularmente resistentes à biocontaminação (EL-CHIEKH et al., 2005).

Nos últimos anos, o interesse pela eletrodeposição da liga Cu-Ni em diferentes composições de banho eletrolítico (variando de Cu-05Ni até Cu-64Ni) tem aumentado, por suas atribuições mecânicas, tais como força de tração, maleabilidade, ductilidade e propriedades magnéticas únicas (Ni é ferromagnético e Cu é diamagnético). A liga Cu-Ni, principalmente as que contêm cerca de 30% a 40% de Cu, são resistentes à corrosão em meio ácido, meio básico e especialmente em soluções contendo cloreto (água do mar). Esta liga tem sido utilizada na construção de embarcações marítimas e em trocadores de calor que usem a água do mar para refrigeração. Outro aspecto que tem motivado o estudo da eletrodeposição de Cu-Ni é sua aplicação na forma de pó em tintas, utilizando banhos amoniacaais, também empregadas contra a agressividade da atmosfera marinha (WANG et al., 2014).

4.3 LIGAS DE TUNGSTÊNIO

O tungstênio possui um considerável interesse para ser eletrodepositado em forma de ligas, pois este metal apresenta propriedades bastante interessantes como: o mais alto ponto de fusão (3.410 °C), o que torna impossível depositá-lo termicamente sobre a superfície de qualquer outro metal, uma vez que este último muda de fase; o mais baixo coeficiente de dilatação linear térmica ($4,3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$); uma condutividade térmica muito alta (0,487 cal/cm²°C) e é um dos metais mais densos (19,3 g/cm³). Tem propriedades mecânicas fora do comum, pois conserva sua dureza mesmo em altas temperaturas, tem a mais alta resistência à tração (410 kg/mm²) e é muito resistente à corrosão (SANTANA; PRASAD; DE SANTANA, 2003).

Além disso, o tungstênio não é atacado por nenhum ácido mineral simples na temperatura ambiente. Devido a esta insólita combinação de propriedades, este metal tem inúmeras aplicações na indústria e na engenharia, não obstante o seu elevado preço e a sua relativa raridade. Por exemplo, suas boas propriedades mecânicas em elevadas temperaturas o tornam útil para ser usado em filamento de lâmpadas incandescentes, bocais de motores de foguetes e em aços para ferramentas. O seu baixo coeficiente de expansão térmica permite a sua inserção no

vidro "Pyrex" (SANTANA; PRASAD; DE SANTANA, 2003).

Diante do exposto o interesse no desenvolvimento das ligas de tungstênio obtidas por eletrodeposição vem crescendo nos últimos anos. Os revestimentos de tungstênio possuem propriedades excelentes como: alta estabilidade térmica, elevada dureza, resistência à corrosão e ao desgaste (TSYNTSARU et al., 2012), tornando-os ótimos substitutos do cromo duro (revestimento que apresenta o cromo hexavalente em seus banhos eletrolíticos, e esse por sua vez é tóxico e tem restrições ambientais) (BROOMAN, 2004; CAPEL; SHIPWAY; HARRIS, 2003; OLIVEIRA et al., 2015).

A eletrodeposição direta do tungstênio a partir de soluções de tungstato é impedida pela formação de uma camada de óxido sobre o cátodo e neste caso toda a corrente utilizada no processo é consumida para evolução do hidrogênio (LASSNER; SCHUBERT, 1999). Desta forma, o tungstênio não pode ser eletrodepositado sozinho e sua redução só acontece na presença de um metal indutor, este fenômeno é conhecido como "Co-deposição induzida" e foi relatado por Brenner (BRENNER, 1963). A partir deste conhecimento alguns pesquisadores desenvolveram banhos eletrolíticos contendo outros metais e verificaram que a eletrodeposição do tungstênio apresentou sucesso na presença dos metais do grupo do ferro como Fe, Ni, Co e etc.

O interesse em ligas binárias e ternárias ricas em tungstênio eletrodepositadas com metais do grupo de ferro tem aumentado nos últimos anos devido à sua combinação única de propriedades tribológicas, magnéticas, elétricas e de eletro-erosão (CHEN et al., 2016; ĆIROVIĆ et al., 2016; MUN et al., 2010; TSYNTSARU et al., 2009). Suas aplicações são bem documentadas e exemplos podem ser encontrados em proteção contra corrosão, eletrônica para camadas de barreira e catálise. A introdução de um terceiro elemento em ligas binárias de tungstênio, em alguns casos, pode melhorar as propriedades de corrosão, por exemplo, a liga Ni-W-Co teve melhor resistência à corrosão do que as ligas amorfas Co-W similares a eletrodos. Além disso, eletrocatalisadores eficientes e de baixo custo são importantes para eletrodos de células de combustível e ligas de tungstênio podem ser uma alternativa possível à platina e às ligas caras que contêm metais do grupo da

platina usados atualmente (CESIULIS; XIE; PODLAHA-MURPHY, 2009).

Algumas ligas binárias de tungstênio (Ni-W e Fe-W) podem apresentar fissuras causadas por tensões internas quando o conteúdo de tungstênio é demasiadamente alto ou quando a densidade de corrente é alta. Muitos pesquisadores acreditam que a liga ternária Ni-Fe-W pode exibir as propriedades chave desses depósitos binários, eliminando as propriedades indesejáveis (defeitos e tensões internas, por exemplo). Principalmente se a liga ternária possuir estrutura amorfa, pois esse tipo de estrutura apresenta homogeneidade e falta de sítios eletroquimicamente ativos que geram revestimentos com baixa taxa de corrosão (COSTA et al., 2018).

4.4 LIGAS DE ZINCO

O zinco é um metal pouco nobre que vem sendo utilizado há mais de 170 anos como revestimento de sacrifício. A eletrodeposição de zinco é um dos processos de aplicação deste tipo de revestimento sobre superfícies de aço-carbono mais utilizados industrialmente, isto se deve principalmente ao baixo custo do processo. As propriedades das camadas de zinco obtidas são dependentes das características dos parâmetros do processo de eletrodeposição.

Os revestimentos obtidos por galvanização e os eletrodepósitos de ligas de zinco, entre outros, são de grande interesse para as indústrias, principalmente automobilísticas, onde se necessitam de camadas superficiais com alta resistência à corrosão, podendo permitir a aderência de tintas para o acabamento final (PUSHPAVANAM, 1991; SWATHIRAJAM, 1986).

Em anos recentes, algumas ligas de zinco depositadas sobre aço por eletrodeposição, especificamente Zn-Ni, Zn-Co e Zn-Mn, foram propostas como revestimentos protetores contra a corrosão. Estas ligas são termodinamicamente mais estáveis e, portanto, mais duradouras que revestimentos de zinco de mesma espessura.

Os eletrodepósitos de ligas Zn-Ni têm atraído grande interesse para aplicação em substituição a revestimentos de cádmio por apresentarem excelente resistência à corrosão, ductibilidade, baixa fragilização pelo hidrogênio e alta estabilidade química. As ligas com 10% a 15% de níquel

apresentam resistência à corrosão superior àquelas com teores de níquel mais baixos. A composição do depósito é dependente do teor de Ni^{2+} no eletrólito (GNANAMUTHU et al., 2012; GAVRILA et al., 2000; HAMMAMI; DHOUIBI; TRIKI, 2009). Em relação ao zinco convencional, as ligas Zn-Ni apresentam dureza significativamente maior e melhor resistência à corrosão, principalmente depois de tratamento térmico, o que confere propriedades adequadas para utilização em componentes de motores dos automóveis (CONDE; ARENAS; DE DAMBORENEA, 2011).

A eletrodeposição de ligas Zn-Co é de grande interesse uma vez que estas ligas apresentam resistência à corrosão superior à do zinco puro (BAJAT et al., 2010). Revestimentos com baixos teores de cobalto são menos nobres que o aço e, portanto, apresentam proteção sacrificial a substratos de aço. Os que possuem alto teor de Co são mais nobres que o aço e proporcionam proteção por efeito barreira. Comparado com o zinco puro, as camadas de ligas zinco-cobalto possuem outras propriedades protetoras como dureza, ductibilidade, tensão interna, soldabilidade e habilidade para receber revestimento de tintas.

O efeito de proteção das ligas Zn-Mn é dependente do teor de Mn na liga. A elevada resistência à corrosão das ligas Zn-Mn tem sido atribuída ao efeito duplo de proteção observado, primeiramente devido à dissolução do manganês protegendo o zinco e, em segundo lugar, por assegurar a formação de um produto de corrosão de baixa solubilidade. Para ligas Zn-Mn contendo 11% de Mn em meio de sulfato de sódio, tem sido proposto que a corrosão da liga leva à formação de sulfato básico de zinco como produto de corrosão. Revestimentos de Zn-Mn compactos e com diferentes morfologias podem ser obtidos a baixas densidades de corrente. Corrente pulsada pode também ser usada na eletrodeposição deste tipo de revestimento e os resultados mostram que, para uma mesma faixa de densidade de corrente média, todos os métodos levaram à formação de camadas com teores de Mn maiores ou similares aos obtidos por corrente direta, porém as eficiências de corrente foram menores (MULLER; SARRET; ANDREU, 2002, 2003).

4.5 LIGAS DE COBALTO

As ligas de cobalto são conhecidas na literatura por sua aplicação em diversas tecnologias (CHU; LIANG; HAO, 2014; WEI et al., 2017; YAPONTSEVA; DIKUSAR; KYBLANOVSKII, 2014), as quais estão diretamente associadas aos outros possíveis elementos que se ligam ao cobalto formando a liga.

Ligas de Co-W, por exemplo, recaem em duas conhecidas aplicações largamente discutidas: elas podem ser desenvolvidas para fins de revestimento ou até mesmo como alternativa na produção de energias limpas, em células combustíveis (BERA; SEENIVASAN; RAJAM, 2013; SHENG et al., 2018). Além de possuírem elevada atividade eletrocatalítica (SHENG et al., 2018), devido às propriedades excelentes do tungstênio, as ligas de Co-W possuem elevadas dureza, resistências elétrica, térmica, alta resistência contra choques mecânicos, assim como elevada resistência à corrosão (BERA; SEENIVASAN; RAJAM, 2013).

Outras ligas de cobalto, como Co-Fe, possuem diferentes aplicações, principalmente em sistemas microeletrônicos e microeletromecânicos na produção de sensores e atuadores (ZHANG; IVEY, 2018). O que grande parte das ligas de cobalto possuem, no processo de obtenção por eletrodeposição, é fato de óxidos serem formados na superfície do cátodo, o que faz com que o cobalto, geralmente menos nobre, seja preferencialmente reduzido. Como consequência, o pH em torno do cátodo torna-se mais elevado, fazendo com que a taxa de produção de hidrogênio seja também elevada, o que comprova, em muitos casos, a baixa eficiência de deposição (KIELING, 1997).

REFERÊNCIAS

- [1] ABDEL HAMID, Z.; HASSAN, H. B. Influence of electrodeposition parameters on the characteristics of NiMoP film. *Surface and Coatings Technology* v. 212, p. 37–45 , 2012.
- [2] ALLAHYARZADEH, M. H.; ROOZBEHANI, B.; ASHRAFI, A. Electrodeposition of high Mo content amorphous/nanocrystalline Ni-Mo alloys using 1-ethyl-3-methyl-imidazolium chloride ionic liquid as an additive. *Electrochimica Acta* v. 56, n. 27, p. 10210–10216 , 2011a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2011.09.011>> .978-1-56677-986-9.

4.6 LIGAS DE MOLIBDÊNIO

As ligas de molibdênio e níquel vêm sendo estudadas nos últimos anos como uma alternativa para os banhos de cromo. O uso do molibdênio se deve às suas propriedades e com isso suas aplicações. O molibdênio pode ser usado em aplicações metalúrgicas, tais como aço inoxidável e ligas de ferro fundido. A adição de molibdênio, no caso das ligas de aço, melhora as características comerciais da liga, aumentando a força e a resistência térmica, bem como a redução do potencial de corrosão do material (ALLAHYARZADEH; ROOZBEHANI; ASHRAFI, 2011a).

Atualmente, há um grande interesse por revestimentos de molibdênio, devido às suas boas propriedades mecânicas, elétricas e ótima resistência à corrosão. Como este metal não pode ser eletrodepositado em seu estado puro é realizada uma codeposição do tipo induzida. Este processo foi apresentado por Brenner, onde o mesmo explica que quando um metal não pode ser eletrodepositado a partir de uma solução aquosa na sua forma pura, ele pode ser codepositado com algum dos metais do 8º grupo como o Ni e o Fe, formando assim uma liga (BELTOWSKA-LEHMAN; INDYKA, 2012).

Devido à alta resistência à corrosão, ao desgaste e ao baixo sobrepotencial de evolução do hidrogênio da liga Ni-Mo, foram dedicadas muitas investigações para deposição de tal liga. Estudos mostraram que esta liga apresenta brilho, homogeneidade, aderência e caráter metálico, além de uma ótima eficiência catódica, chegando a aproximadamente 92% (ABDEL HAMID; HASSAN, 2012; ALLAHYARZADEH; ROOZBEHANI; ASHRAFI, 2011b; BELTOWSKA-LEHMAN et al., 2012).

- [3] ALLAHYARZADEH, M. H.; ROOZBEHANI, B.; ASHRAFI, A. Electrodeposition of high Mo content amorphous/nanocrystalline Ni-Mo alloys using 1-ethyl-3-methyl-imidazolium chloride ionic liquid as an additive. *Electrochimica Acta* v. 56, n. 27, p. 10210–10216 , 2011b.978-1-56677-986-9.

- [4] ALMEIDA, M. R. H. DE; BARBANO, E. P.; CARVALHO, M. F. DE; CARLOS, I. A.; SIQUEIRA, J. L. P.; BARBOSA, L. L. Electrodeposition of copper-zinc from an alkaline bath based on EDTA. *Surface and Coatings Technology*, v. 206, n. 1, p. 95–102, 2011.

- [5] AZEVEDO, C. A. C.; WORMSBECKER, L. E.; ADAIME, L. M.; MILEK, J. L.; SCHEER, S. Corrosão em estruturas metálicas. Disponível em: <<http://www.cesec.ufpr.br/metálica/patologias/corrosao/corrosao.htm>> Acesso em: 19 jan. 2015.
- [6] BAJAT, J. B.; STANKOVIC, S.; JOKIC, B. M.; STEVANOVIC, S. I. Corrosion stability of Zn-Co alloys deposited from baths with high and low Co content – The influence of deposition current density. *Surface and Coatings Technology*. 204 (16-17) (2010) 2745-2753
- [7] BASKARAN, I.; SANKARA NARAYANAN, T. S. N.; STEPHEN, A. Pulsed electrodeposition of nanocrystalline Cu-Ni alloy films and evaluation of their characteristic properties. *Materials Letters*, v. 60, p. 1990–1995, 2006.
- [8] BELTOWSKA-LEHMAN, E. et al. Electrodeposition and characterisation of nanocrystalline Ni-Mo coatings. *Surface and Coatings Technology* v. 211, p. 67–71, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.10.011>>.
- [9] BELTOWSKA-LEHMAN, E.; INDYKA, P. Kinetics of Ni-Mo electrodeposition from Ni-rich citrate baths. *Thin Solid Films* v. 520, n. 6, p. 2046–2051, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2011.10.024>>.
- [10] BERA, Parthasarathi; SEENIVASAN, H; RAJAM, K S. Studies on surface structure, morphology and composition of Co-W coatings electrodeposited with direct and pulse current using gluconate bath. *Surface Review and Letters* v. 20, n. 01, p. 1350006, 2013.
- [11] BOSHKOV, N; PETROV, K; RAICHEVSKI, G. Corrosion behavior and protective ability of multilayer galvanic coatings of Zn and Zn-Mn alloys in sulfate containing médium. *Surface and Coatings Technology*. 200 (20-21) (2006) 5995-6001.
- [12] BRENNER, A. *Electrodeposition of Alloys: Principles and Practice*. First Edit ed. New York: Academic Press Inc., 1963. v. I
- [13] BROOMAN, E. W. Wear behavior of environmentally acceptable alternatives to chromium coatings: Cobalt-based and other coatings. *Metal Finishing*, v. 102, n. 10, p. 42–54, 2004.
- [14] CAPEL, H.; SHIPWAY, P. H.; HARRIS, S. J. Sliding wear behaviour of electrodeposited cobalt-tungsten and cobalt-tungsten-iron alloys. *Wear*, v. 255, n. 7–12, p. 917–923, 2003.
- [15] CARLOS, I. A.; ALMEIDA, M. R. H. DE. Study of the influence of the polyalcohol sorbitol on the electrodeposition of copper-zinc films from a non-cyanide bath. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, v. 562, p. 153–159, 2004.
- [16] CESIULIS, H.; XIE, X.; PODLAHA-MURPHY, E. Electrodeposition of Co-W alloys with P and Ni. *Medziagotyra*, v. 15, n. 2, p. 115–122, 2009.
- [17] CHEN, H. et al. Wear and Corrosion Properties of Crystalline Ni-W Alloy Coatings Prepared by Electrodeposition. *Materials Science Forum*, v. 849, p. 671–676, 2016.
- [18] CHU, Qingwei; LIANG, Jun; HAO, Jingcheng. Electrodeposition of zinc-cobalt alloys from choline chloride-urea ionic liquid. *Electrochimica Acta* v. 115, p. 499–503, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2013.10.204>>.0013-4686.
- [19] ČIROVIĆ, N. et al. Synthesis, structure and properties of nickel-iron-tungsten alloy electrodeposits: Part II: Effect of microstructure on hardness, electrical and magnetic properties. *Science of Sintering*, v. 48, n. 1, p. 1–16, 2016.
- [20] CONDE, A.; ARENAS, M. A.; DE DAMBORENEA, J. Electrodeposition of Zn-Ni coatings as Cd replacement for corrosion protection of high strength steel, *Corrosion Science*. 53 (4) (2011) 1489-1497
- [21] COSTA, J. D. et al. Effect of electrochemical bath composition on the preparation of Ni-W-Fe-P amorphous alloy. *International Journal of Electrochemical Science*, v. 13, n. 3, p. 2969–2985, 2018.
- [22] EL-CHIEKH, F.; EL-HATY, M. T.; MINOURA, H.; MONTASER, A. A. Electrodeposition and characterization of Cu-Ni-Zn and Cu-Ni-Cd alloys. *Electrochimica Acta*, v. 50, p. 2857– 2864, 2005.
- [23] GAMBURG, Y. D.; ZANGARI, G. *Theory and Practice of Metal Electrodeposition*, 2011. (Boston, New York, Heidelberg: Springer)
- [24] GAVRILA, M.; MILLET, J. P.; MAZILLE, H.; MARCHANDISE, D.; CUNTZ, J. M. Corrosion behaviour of zinc-nickel coatings electrodeposited on steel. *Surface and Coatings Technology*. 123 (2-3) (2000) 164-172.
- [25] GNANAMUTHU, R. M.; MOHAN, S.; SARAVANAN, G.; LEE, C. W. Comparative study on structure, corrosion and hardness of Zn– Ni alloy deposition on AISI 347 steel aircraft material. *Journal of Alloys and Compounds*. 513 (2012) 449-454.
- [26] GORANOVA, D.; AVDEEV, G.; RASHKOV, R. Electrodeposition and characterization of Ni-Cu alloys. *Surface and Coatings Technology*, v. 240, p. 204–210, 2014.
- [27] GENTIL, Vicente. *Corrosão*. 5. ed. Rio de janeiro: LTC, 2007.
- [28] HALIM J; ABDEL-KARIM R; EL-RAGHY S; NABIL M; WAHEED A. Electrodeposition and characterization of nanocrystalline Ni-Mo catalysts for hydrogen production. *Journal of Nanomaterials*, 2012.
- [29] HAMMAMI, O.; DHOUIBI, L.; TRIKI, E. Influence of Zn–Ni alloy electrodeposition

techniques on the coating corrosion behaviour in chloride solution. *Surface and Coatings Technology*, 202 (19) (2009) 2863-2870.

[30] HAMID ZA; HASSAN HB. Influence of electrodeposition parameters on the characteristics of NiMoP film. *Surface and Coatings Technology*, 212:37-45, 2012.

[31] KARAHAN, I. H.; ÖZDEMİR, R. Effect of Cu concentration on the formation of Cu_{1-x}Zn_x shape memory alloy thin films. *Applied Surface Science*, v. 318, p. 100–104, 2014.

[32] KIELING, Virginia Costa. Parameters influencing the electrodeposition of Ni-Fe alloys. *Surface and Coatings Technology* v. 96, n. 2–3, p. 135–139, 1997.

[33] KUZNETSOV, V. V. et al. Corrosion resistance of Cr–C–W alloys produced by electrodeposition. *Journal of Solid State Electrochemistry*, v. 19, n. 9, p. 2545–2553, 2015.

[34] KUZNETSOV, V. V. et al. Corrosion resistance of Co–Cr–W coatings obtained by electrodeposition. *Journal of Solid State Electrochemistry*, v. 22, n. 7, p. 2267–2276, 2018.

[35] LANDOLT, D. Electrochemical and materials science aspects of alloy deposition. *Electrochimica Acta*. 39: 1075, 1994.

[36] LASSNER, E.; SCHUBERT, W.-D. Tungsten Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds. first edit ed. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999.

[37] LI, B. et al. Electrodeposition and characterization of Fe-Cr-P amorphous alloys from trivalent chromium sulfate electrolyte. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 453, n. 1–2, p. 93–101, 2008.

[38] MOURA, E. S. Desenvolvimento de ligas de Ni-Fe-Mo, resistentes à corrosão para o revestimento de equipamentos ligados ao transporte e obtenção do petróleo. Monografia (Graduação). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005.

[39] MULLER, C; SARRET, M; ANDREU, T. Electrodeposition of Zn-Mn alloys at low current densities. *Journal Electrochemistry Society*. 149 (2002) C600-C609.

[40] MULLER, C; SARRET, M; ANDREU, T. ZnMn alloys obtained using pulse reverse and superimposed current modulations. *Electrochimica Acta*. 48 (17) (2003) 2397-2404.

[41] MUN, S.-J. et al. Mechanical and Structural Characteristics of Electrodeposited Ni-Fe-W Alloy after Heat-Treatment. *Journal of The Electrochemical Society*, v. 157, n. 3, p. D177–D180, 2010.

[42] NOCE, R. DELLA; BENEDETTI, A. V.; MAGNANI, M.; PASSAMANI, E. C.; KUMAR, H.; CORNEJO, D. R.; OSPINA, C. A. Structural,

morphological and magnetic characterization of electrodeposited Co-Fe-W alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 611, p. 243–248, 2014.

[43] OHGAI, T.; TANAKA, Y.; FUJIMARU, T. Soft magnetic properties of Ni-Cr and Co-Cr alloy thin films electrodeposited from aqueous solutions containing trivalent chromium ions and glycine. *Journal of Applied Electrochemistry*, v. 42, n. 10, p. 893–899, 2012.

[44] OLIVEIRA, A. L. M. et al. Studies on electrodeposition and characterization of the Ni–W–Fe alloys coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 619, p. 697–703, 2015.

[45] PUSHPAVANAM, M.; NATARAJAN, K.; BALAKRISHNAN, K.; SHARMA, L.R. Corrosion behavior of electrodeposited zinc-nickel alloys. *J. Appl. Electrochem.*, v. 21, p. 642 – 645, 1991.

[46] SANTANA, R. A. C.; PRASAD, S.; DE SANTANA, F. S. M. Revestimento eletrolítico com uma liga amorfa de Ni-W-B, resistente à corrosão e ao desgaste. *Ecletica Quimica*, v. 28, n. 1, p. 69–76, 2003.

[47] SENNA, L. F. DE; DÍAZ, S. L.; SATHLER, L. Hardness analysis and morphological characterization of copper-zinc alloys produced in pyrophosphate-based electrolytes. *Materials Research*, v. 8, n. 3, p. 275–279, 2005.

[48] SHENG, Minqi et al. Co-W/CeO₂ composite coatings for highly active electrocatalysis of hydrogen evolution reaction. *Journal of Alloys and Compounds* v. 743, p. 682–690, 2018.

[49] SPIEGELBERG, W. D., "Elastic resilience and related properties in electronic connector alloys selection", Conference: ASM INTERNATIONAL'S 3RD ELECTRONIC MATERIALS & PROCESSING CONGRESS, San Francisco, California, 20-23 Aug. 1990, p 215-223.

[50] SWATHIRAJAN, S. Potentiodynamic and galvanostatic stripping methods for characterization of alloy electrodeposition process and product. *Journal of the Electrochemical Society*. 133, 4, 671-80, 1986.

[51] TAVOOSI, M.; BARAHIMI, A. Corrosion behavior of amorphous–nanocrystalline Fe–Ni–Cr electrodeposited coatings. *Surfaces and Interfaces*, v. 8, p. 103–111, 2017.

[52] TSYNTSARU, N. et al. Iron-tungsten alloys electrodeposited under direct current from citrate-ammonia plating baths. *Surface and Coatings Technology*, v. 203, n. 20–21, p. 3136–3141, 2009.

[53] TSYNTSARU, N. et al. Modern trends in tungsten alloys electrodeposition with iron group metals. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, v. 48, n. 6, p. 491–520, 2012.

[54] TOMACHUK Santos, C. R. Codepósitos de ZnCo - Estudo do processo de sua eletrodeposição

por corrente pulsada. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, 1998.

[55] VREESE, P. DE; SKOCZYLAS, A.; MATTHIJS, E.; FRANSAER, J.; BINNEMANS, K. Electrodeposition of copper-zinc alloys from an ionic liquid-like choline acetate electrolyte. *Electrochimica Acta*, v. 108, p. 788–794, 2013.

[56] WANG, S.; GUO, X.; YANG, H.; DAI, J.; ZHU, R.; GONG, J.; PENG, L.; DING, W. Electrodeposition mechanism and characterization of Ni-Cu alloy coatings from a eutectic-based ionic liquid. *Applied Surface Science*, v. 288, p. 530–536, 2014.

[57] WEI, Yongsheng et al. Synthesis of bifunctional non-noble monolithic catalyst Co-W-P/carbon cloth for sodium borohydride hydrolysis and reduction of 4-nitrophenol. *International Journal of Hydrogen Energy* v. 42, n. 41, p. 25860–25868, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.148>>. 60-3199.

[58] WHITE, R. E.; BOCKRIS, J. O'M.; CONWAY, B. E. *Modern Aspects of Electrochemistry*, New York, Plenum Press, 1995.

[59] YAPONTSEVA, Yu. S.; DIKUSAR, A. I.; KYBLANOVSKII, V. S. Study of the composition, corrosion, and catalytic properties of Co-W alloys electrodeposited from a citrate pyrophosphate electrolyte. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry* v. 50, n. 4, p. 330–336, 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.3103/S1068375514040139>>. 1068375514040.

[60] ZHANG, Yuhui; IVEY, Douglas G. Electrodeposition of nanocrystalline CoFe soft magnetic thin films from citrate-stabilized baths. *Materials Chemistry and Physics* v. 204, p. 171–178, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.10.043>>. 1362-4962 (Electronic)r0305-1048 (Linking).

[61] ZOLDAN, V. C. Eletrodeposição de Fe em Si monocristalino. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

Capítulo 11

ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA EM MATERIAIS PROCESSADOS ATRAVÉS DE MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO (FDM)

Ramon Sales de Araújo Batista

Carlos José de Araújo

Resumo: Dado o panorama atual das indústrias em todo o mundo e o imperativo pela sobrevivência econômica, a necessidade pela otimização dos processos de fabricação e obtenção de mais agilidade na criação de novos produtos tem crescido bastante. A Prototipagem Rápida (PR) surgiu com a intenção de auxiliar nesse quadro de necessidade pelo avanço na área de projeto e fabricação, através da produção de protótipos, moldes, ou até peças. Dentre as tecnologias de PR tem-se a técnica de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM) que se baseia na construção de um modelo tridimensional por deposição de camada por camada. O método de FDM se utiliza de uma máquina específica, popularmente conhecida como “impressora 3D”, que possui alguns parâmetros de processamento para realizar a manufatura. Esses parâmetros podem vir a ser considerados críticos quando alterados de forma indevida, assim podendo causar avarias à peça final, danos ao equipamento de trabalho e custos desnecessários com matéria-prima. A partir dessa constatação, surge a evidente necessidade de analisar esses parâmetros e suas variações durante o processo de fabricação. Nesse contexto, este trabalho teve por objetivo propor um projeto de caracterização mecânica em materiais processados por FDM, através do estudo dos parâmetros críticos de Largura da Parede, Espessura da Camada Construtiva e a Porcentagem de Preenchimento, para um equipamento MakerBot Replicator 2x, se utilizando das técnicas de planejamento e análise de experimentos. Assim, por meio da pesquisa experimental foi possível determinar as condições de processo em que se obtêm aumento da tensão máxima de tração suportada, encontrando o valor de 34,80 Mpa (experimental) e em comparação com o mesmo observou-se o valor de 34,30 Mpa (predito). Constatando assim que os modelos estatísticos apresentados foram adequados para a análise de resistência mecânica à tração.

Palavras-chave: FDM, Impressão 3D, Planejamento Experimental, Otimização, Resistência Mecânica.

1 INTRODUÇÃO

O grande desenvolvimento tecnológico vivenciado pelo mercado atual exigiu das empresas um maior empenho para inserir novos produtos nas suas linhas de produção em menos tempo e mantendo o nível de flexibilidade e inovação elevados. Segundo Mello et al (2010), as indústrias podem valer-se de artifícios para a otimização do tempo de desenvolvimento de produtos, e uma dessas táticas é o uso da prototipagem rápida (PR). De acordo com Oliveira et al (2009), é possível conceituar a prototipagem rápida como um processo que simboliza a união de tecnologias de construção física de peças a partir de um modelo original digital em CAD.

Atualmente, para Dizon et al (2018), a PR também muito nomeada como Manufatura Aditiva (MA) está sendo seriamente considerada como produtora de materiais para várias aplicações, a saber, construção, vestuário, odontologia, medicina, eletrônica, automotivo, robôs, militares, oceanografia, aeroespacial e outros.

A aplicação de manufatura aditiva ou impressão 3D na medicina, por exemplo, pode fornecer muitos benefícios, incluindo: a personalização de produtos médicos, equipamentos, custo-efetividade, aumento de produtividade, a democratização do design e fabricação, e a colaboração aprimorada. No entanto, deve ser advertido que, apesar dos recentes avanços médicos significativos e empolgantes envolvendo impressão 3D, desafios científicos e regulamentares notáveis permanecem (VENTOLA, 2014).

Dentro do contexto de manufatura aditiva, um dos processos de prototipagem rápida bastante conhecido é o de modelagem por fusão e deposição (FDM). De acordo com Bakar et al (2010), cada modelo FDM disponível comercialmente tem diferentes tipos de parâmetros de processo para aplicações diferentes. Em conformidade com Anitha et al (2001), uma vez que este processo de FDM pode ser usado para uma variedade de aplicações e o custo do protótipo pode ser geralmente elevado, existe uma necessidade de aperfeiçoar os parâmetros do processo, tanto do ponto de vista econômico quanto tecnológico.

Ao desenvolver um projeto de Engenharia, é de grande importância que o engenheiro tenha conhecimento de propriedades mecânicas fundamentais dos materiais que serão empregados na execução do projeto

(AZEVEDO et al, 2016). Lopes (2011) destaca que os ensaios mecânicos permitem a determinação de propriedades mecânicas que se referem ao comportamento do material quando submetido à ação de esforços, e que são expressas em função de tensões e/ou deformações.

Nesse cenário, o objetivo deste trabalho foi, através da variação de três parâmetros do processo, avaliar a resposta mecânica de corpos de prova produzidas por FDM utilizando polímero ABS e uma impressora 3D MakerBot Replicator 2x.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de se possibilitar a elaboração de um procedimento de ensaios mecânicos do tipo tração, em corpos produzidos através de manufatura aditiva, por meio do processo de FDM, e utilizando como matéria prima o ABS (Acrlonitrilo Butadieno Estireno), a princípio o estudo fundamentou-se em uma consistente revisão da literatura científica pertinente ao assunto, também se realizando o estudo das normas regulamentadoras.

Segundo Schaeffer (2017) um experimento é um procedimento no qual alterações propositalmente são feitas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, de modo que se possa avaliar as possíveis alterações sofridas pela variável resposta. Portanto, para modelar o presente trabalho foi feito uso das técnicas de planejamento e análise de experimentos, ou mais precisamente um DOE – Design of Experiments.

2.1 PLANEJAMENTO FATORIAL

Este estudo buscou analisar a relação entre a variação de determinados parâmetros críticos do processo de FDM e a resposta de algumas propriedades físicas e mecânicas do protótipo construído. Dentre as diversas variáveis que tem relação com a manufatura de corpos e peças através de FDM, foram selecionadas as seguintes: largura da parede (número de cascas), espessura da camada construtiva (precisão do equipamento) e porcentagem de preenchimento. E em um segundo passo foi delimitado os níveis de variação desses fatores, baseando-se na capacidade da impressora 3D, como pode ser visto na Tabela 1

Tabela 1. Seleção dos parâmetros de processo a serem estudados e seus respectivos níveis de variação.

Fatores	Níveis dos fatores		
	Mín	Central	Máx
Largura da Parede (núm. de cascas)	2	6	10
Espessura da Camada Construtiva (mm) (Precisão)	0.3	0.2	0.1
Porcentagem de Preenchimento (%)	10	55	100

Ainda trabalhando com base nas técnicas de planejamento e análise de experimentos, foi gerada uma matriz de delineamento referente

ao planejamento fatorial, utilizando o software STATISTICA 7.0. Na Tabela (2) apresenta-se a matriz do planejamento adotado.

Tabela 2. Matriz de delineamento do planejamento fatorial.

Ensaio	Aleatoriedade	Largura da Parede	Precisão	Preenchimento
1	4	2	0.3	10%
2	1	10	0.3	10%
3	6	2	0.1	10%
4	9	10	0.1	10%
5	7	2	0.3	100%
6	3	10	0.3	100%
7	5	2	0.1	100%
8	12	10	0.1	100%
9	2	6	0.2	55%
10	11	6	0.2	55%
11	10	6	0.2	55%
12	8	6	0.2	55%

A partir da geração da matriz de delineamento do planejamento fatorial, foi possível identificar que seriam necessários doze ensaios diferentes, para que assim fosse possível abarcar de forma confiável a combinação dos parâmetros e seus respectivos níveis, que tinham sido estabelecidos no início do estudo. Esses ensaios obedeceram a uma ordem de aleatoriedade, necessária para evitar a propagação ou influência de possíveis efeitos de outros parâmetros não controláveis.

2.2 MANUFATURA ADITIVA POR FDM

Tendo sido definida a matriz do planejamento fatorial, foi iniciada a construção dos corpos de prova através do processo de FDM.

2.2.1 CORPOS DE PROVA

Ahn et al. (2002) afirmam que a norma padrão para ensaios de tração de materiais poliméricos é a ASTM D638 (Método Padrão de Teste para Propriedades de Tração de Plásticos). Com base nesta norma, foi criado e desenhado um modelo em ambiente CAD, utilizando o código comercial Autodesk Inventor Professional 2016. Na sequência, esse modelo foi exportado para o formato STL, que é o formato comumente aceito nos programas que gerenciam as máquinas de impressão 3D.

2.2.2 IMPRESSORA 3D E MATERIAL DE IMPRESSÃO

A máquina de impressão 3D utilizada para a fabricação dos corpos de prova foi uma MakerBot Replicator 2 Desktop 3D Printer. O material escolhido para o projeto foi o

copolímero ABS, original da MakerBot. A Figura 1 permite visualizar a máquina de impressão e o material utilizado na construção.

Figura 1. Impressora 3D e Material utilizado na Impressão. (a) Impressora MakerBot Replicator 2 Desktop 3D Printer. (b) Rolo de filamento ABS original MakerBot.

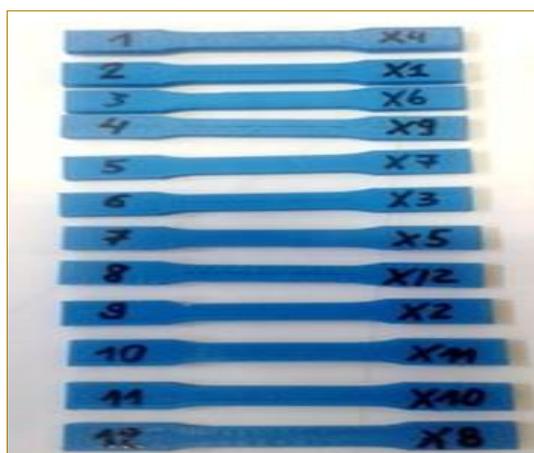


Fonte: Adaptado de MakerBot Replicator 2 – User Manual.

Foram então produzidos os doze corpos de prova definidos na Tab. (2), variando os parâmetros do processo para cada corpo. Esse procedimento foi repetido por mais duas vezes, para assim totalizar 36 corpos de prova. Essa repetição foi realizada para atribuir uma garantia estatística mínima ao

trabalho, já que possuindo três réplicas de cada configuração é possível extrair uma média mais representativa das respostas às quais se desejava avaliar. Na Figura 2 é possível visualizar uma das réplicas dos doze corpos de prova.

Figura 2. Doze corpos de prova identificados segundo o planejamento fatorial.



2.3 ETAPA DE OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES

Após realizar a impressão dos corpos de prova, os mesmos foram submetidos a

ensaios de tração para obtenção das curvas tensão x deformação que caracterizam o comportamento mecânico desses corpos. Os ensaios em questão foram baseados na norma ASTM D638 – 2ª. Para realizar os

ensaios de tração foi utilizada uma máquina universal de ensaios de materiais, servo-

hidráulica, modelo MTS 810, a mesma pode ser visualizada na Figura 3.

Figura 3. Máquina de ensaios de materiais servo-hidráulica modelo MTS 810.



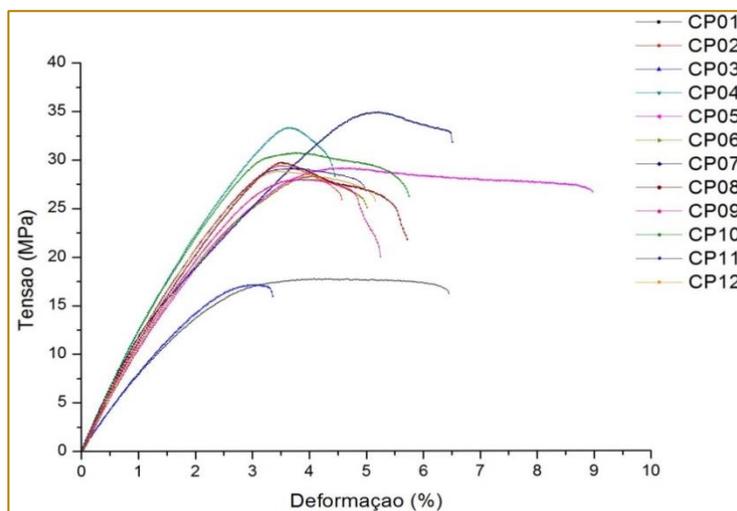
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Na Figura 4 são apresentados os resultados dos ensaios de tração, mostrando as curvas médias referentes às três réplicas de cada

configuração. Ou seja, para cada configuração foram realizados três ensaios e em seguida calculada a curva média. Assim, foram geradas doze curvas tensão x deformação para as doze respectivas configurações.

Figura 4. Curvas tensão x deformação para as doze configurações de corpos de prova.



Com base nesses ensaios foi possível obter os dados de Tensão Máxima e Deformação na Tensão Máxima para cada um dos doze corpos de prova. Posteriormente esses dados

foram usados como entradas nas análises estatísticas realizadas. A Tabela 3 permite visualizar um resumo dos dados obtidos nos ensaios.

Tabela 3. Matriz de dados resultantes dos Ensaio mecânicos de tração.

Propriedades Mecânicas	Dados Obtidos
	Corpos de Prova (Mín - Máx)
Tensão Máxima (MPa)	17.1 - 34.8
Deformação na Tensão Máx. (%)	3.1 - 5.35

Castelo Branco (2016) afirma em sua pesquisa que ao se analisar as taxas de deposição, percebe-se que quanto maior a área de preenchimento maior será a tensão máxima e a tensão de ruptura, consequentemente mais rígida será a peça, e ele destaca aquelas com taxa de deposição de 100% (peça maciça). No caso do presente trabalho, foi possível constatar que o ensaio que apresentou melhor índice de resposta (ensaio 7), foi também um dos ensaios que possuía taxa de deposição de 100%. Porém percebeu-se que nem todos os ensaios que possuíam taxa de preenchimento de 100% garantiram índices aproximados do máximo encontrado que foi 34,8 Mpa, como foi o caso, por exemplo, do ensaio 6 que só alcançou 28,3 Mpa. Isso reforça a importância da interação como os demais parâmetros do processo.

Os resultados que apresentaram os menores índices no geral foram os ensaios com a taxa de preenchimento de apenas 10% e com a largura da parede de apenas 2 cascas, foram eles os ensaios 1 e 3.

Hossain (2013) relata que a diminuição da largura de parede resulta em aumento da resistência à tração. Porém foi possível avaliar dentro do corrente estudo que essa afirmativa só se torna válida se associada a uma alta taxa de preenchimento, como podemos observar comparando os ensaios 1 e 3 (baixos níveis de largura da parede e preenchimento) com os ensaios 5 e 7 (baixos níveis de largura da parede porém altos níveis de preenchimento).

Segundo Bagsik (2011) ao estudar os efeitos da espessura da camada construtiva, a

orientação da impressão e o ângulo de raster torna-se possível indicar que o filamento mais grosso oferece melhores propriedades mecânicas se impresso nas direções x e z e filamento mais fino é ideal para impressões na direção y. Com isso, frente a essa análise e ao presente estudo, percebe-se que o parâmetro da espessura da camada construtiva necessita ser estudado em paralelo com a direção de impressão, para que assim se obtenha dados mais significativos de sua influência nas propriedades mecânicas das peças. Logo, sabendo que nesse trabalho a direção de impressão não foi considerada como parâmetro de entrada, percebe-se que não foi possível avaliar em termos comparativos o efeito da variação da espessura da camada construtiva. Podemos observar melhor comparando o ensaio 3 (menor índice de resposta) com o ensaio 7 (maior índice de resposta), pois ambos tiveram o mesmo nível de espessura da camada construtiva, constatando assim a pouca influência desse parâmetro frente aos demais considerados no estudo.

3.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS ESTATÍSTICOS

Tendo em mãos os dados referentes à variável de resposta, Tensão Máxima, que foi selecionada como aquela que seria analisada, foi possível gerar as tabelas do projeto de experimento (DOE). Na Tabela 4 são mostrados os valores utilizados no DOE para os três parâmetros críticos inicialmente apresentados, e na Tabela 5 são apresentados valores codificados e a resposta de Tensão Máxima (Y).

Tabela 4. Valores utilizados no DOE para os três parâmetros previamente definidos.

Variáveis	Código	-1	0	1
Largura da Parede	x1	2	6	10
Espessura (mm) (Precisão)	x2	0.3	0.2	0.1
Preenchimento (%)	x3	10	55	100

Tabela 5. Valores codificados e resposta de Tensão Máxima (Y).

Ensaio	x1	x2	x3	Y (Mpa)
1	-1	-1	-1	17.7
2	1	-1	-1	29.4
3	-1	1	-1	17.1
4	1	1	-1	33.3
5	-1	-1	1	29.1
6	1	-1	1	28.3
7	-1	1	1	34.8
8	1	1	1	29.7
9	0	0	0	27.9
10	0	0	0	30.7
11	0	0	0	29.1
12	0	0	0	28.8

A partir dos resultados obtidos foram calculados os coeficientes de regressão apresentados na Tabela 6. Observa-se que para a resposta Y, referente a Tensão Máxima, apenas a largura da parede (x1), a

porcentagem de preenchimento (x3) e a interação entre essas duas variáveis (x1-x3) foram estatisticamente significativas, ao nível de significância 5% ($p < 0.05$).

Tabela 6. Coeficientes de regressão para a resposta Y (MPa).

Fatores	Coeficiente de Regressão	Erro Padrão	t(5)	p-valor	Estimativas por intervalo (95%)	
					Limite Inferior	Limite Superior
MÉDIA	27.99167	0.598250	46.78927	0.000000	26.45382	29.529517
x1	2.75000	0.732703	3.75322	0.013250	0.86653	4.633474
x2	1.30000	0.732703	1.77425	0.136200	-0.58347	3.183474
x3	3.05000	0.732703	4.16267	0.008801	1.16653	4.933474
x1 - x2	0.02500	0.732703	0.03412	0.974102	-1.85847	1.908474
x1 - x3	-4.22500	0.732703	-5.76632	0.002204	-6.10847	-2.341526
x2 - x3	0.47500	0.732703	0.64828	0.545392	-1.40847	2.358474

A Equação 1 descreve a Tensão Máxima prevista pelo modelo em função das variáveis codificadas, no modelo reparametrizado que

contém apenas os termos estatisticamente significativos.

$$Y = 27.992 + 2.750 x_1 + 3.050 x_3 - 4.225 x_1 x_3 \quad (1)$$

A análise de variância (ANOVA) indicou uma porcentagem de variação explicada de 93,17%, revelando que o modelo representado pela Equação 1 é satisfatório para analisar a Tensão Máxima frente à

largura da parede e a porcentagem de preenchimento. Com base na Tabela 7 é possível observar a análise de variância dos dados calculados.

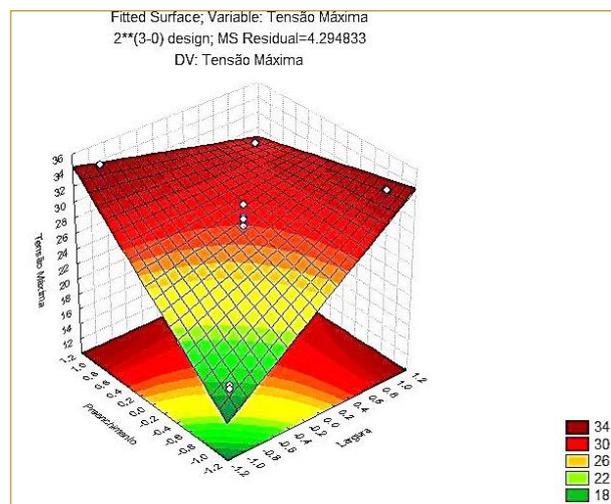
Tabela 7. ANOVA para resposta Y.

Fatores	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Quadrado Médio	F calc	p-valor
x1	60.5000	1	60.5000	14.08669	0.013250
x2	13.5200	1	13.5200	3.14797	0.136200
x3	74.4200	1	74.4200	17.32780	0.008801
x1 - x2	0.0050	1	0.0050	0.00116	0.974102
x1 - x3	142.8050	1	142.8050	33.25042	0.002204
x2 - x3	1.8050	1	1.8050	0.42027	0.545392
Erro Puro	21.4742	5	4.2948		
Total SQ	314.5292	11			

A Figura 5 permite observar mais algumas informações relevantes com relação à resposta Y, baseando-se no fato de que a

regressão foi considerável para a variável x1 e bem significativa para a variável x3 e a interação x1-x3.

Figura 5. Superfície de resposta para a Tensão Máxima (MPa) em função da Largura da Parede e da Porcentagem de Preenchimento.



3.3 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

A partir da análise da superfície de resposta foi possível determinar as condições de processo em que se obtêm aumento da

tensão máxima suportada, como pode ser visto na Tabela 8. E também foi possível observar o valor predito em comparação com o valor experimental, como está apresentado na Tabela 9.

Tabela 8. Condição ótima de processo.

Cond. Ótima	x1	x2	x3
Código	-1	1	1
Nível	2	0,1	100

Tabela 9. Resultados preditos e experimentais.

Variável de Resposta	Predito	Experimental
	Condição Ótima	
Tensão Máxima (MPa)	34.30	34.80

4 CONCLUSÕES

Após os experimentos realizados, e todas as análises estatísticas foi possível constatar que os modelos estatísticos apresentados foram adequados para a resposta de Tensão Máxima (Y), pois apresentaram termos estatisticamente significativos. Também foi possível comprovar através da metodologia de superfície de resposta, que dentre os três parâmetros críticos do processo, selecionados ao início do estudo, a

combinação de máximo percentual de preenchimento e mínima largura de parede (número de cascas) é a interação responsável por proporcionar maiores índices de resistência mecânica à tração nas peças impressas por FDM, e que o parâmetro da Espessura da Camada Construtiva não é estatisticamente significativo para a resposta da Tensão Máxima (Y).

REFERÊNCIAS

- [1] ANITHA, R.; ARUNACHALAM, S.; RADHAKRISHNAN, P., 2001. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.118, pp.385-388.
- [2] ANH, S. H.; MONTERO, M.; ODELL, D.; ROUNDY, S.; WRIGHT, P.K. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*. Vol 7, No. 4, pp. 248-257. 2002.
- [3] AZEVEDO, C. M. P. de; GODINHO, L. H.; SARAIVA, M. A. L.; ALVARENGA, S. D.; RIBEIRO, M. V. A. A. Ensaio Mecânico de Tensão-Deformação sob Tração: Um Estudo Integrado com a disciplina de cálculo. *Revista Perspectivas Online*. v. 6, n. 15, 2016. Disponível em: <http://www.seer.perspectivasonline.com.br/index.php/exatas_e_engenharia/article/view/1030>. Acesso em 25/10/2018.
- [4] BAGSIK, A., and V. SCHOPPNER, Mechanical properties of fused deposition modeling parts manufactured with Ultem*9085. In *Proceedings of the 69th Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (ANTEC '11)*, pp. 1294–1298, Boston, MA, May 2011.
- [5] BAKAR, N. S. A.; ALKAHARI, M. R.; BOEJANG, E., 2010. Analysis on fused deposition modelling performance. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, Vol.11 (12), pp.972-977.
- [6] CASTELO BRANCO, R. R. Elaboração de protocolo de ensaios mecânicos para avaliação da performance do material PLA através da manufatura aditiva por meio do processo FDM. 2016. 71f. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia em Saúde), Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, Campina Grande - PB.
- [7] DIZON, J. R. C.; ESPERA JR, A. H.; CHEN, A.; ADVINCULA, R. C.; Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Journal Additive Manufacturing*, Vol. 20, 2018, pp. 44 – 67.
- [8] HOSSAIN, M. S., J. RAMOS, D. ESPALIN, M. PEREZ and R. WICKER, Improving tensile mechanical properties of FDM-manufactured specimens via modifying build parameters, in *Solid Fabrication Symposium*, Austin, TX, 2013.
- [9] LOPES, Jorge Teófilo de Barros. Estrutura e propriedades dos materiais. Apostila. Disponível em: <http://jorgeteofilofiles.wordpress.com/2011/08/epm-apostila-capc3adtulo09-propriedades.pdf>. Acesso em 23/10/2018.
- [10] MELLO, C. H. P.; SILVA, C. E. S. da; COSTA, S. C. da. Comparação de três diferentes tecnologias de prototipagem rápida em relação a critérios de custo e tempo. In: *ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 26, 2006, Fortaleza. Anais do 26º Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2006.
- [11] OLIVEIRA, M. F.; MAIA, I. A.; NETO, P. I.; PEREIRA, F. D. A. S.; SILVA, J. V. L. Explorando os recursos das tecnologias de prototipagem rápida - SLS e FDM - em aplicações especiais. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS*, 10,

2009, Foz do Iguaçu. Anais do 10º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2009.

[12] SCHAEFFER, L.; Projeto de Experimentos (DOE) aplicado a processo de Forjamento a Quente. Revista Ferramental, Jun/2017. Disponível em:
<<https://www.revistaferramental.com.br/?cod=artigo/projeto-de-experimentos-doe-aplicado-a->

processo-de-forjamento-a-quente/# > Acesso em: 03/12/2018.

[13] USA. ASTM D638-02a - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.

[14] VENTOLA, C. L. Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses. Journal P&T Community, Vol. 39, No. 10, Out. 2014, pp. 704-711

Capítulo 12

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO GÁS/ÓLEO EMPREGADO EM UM VASO SEPARADOR

Tuana Maria de Medeiros Costa

Endyara de Moraes Cabral

Severino Rodrigues de Farias Neto

Resumo: Em um campo petrolífero é comum se observar uma produção simultânea de óleo, gás, água e contaminantes, dependendo das características da reserva petrolífera. O principal interesse econômico na cadeia produtiva de petróleo, é a produção de óleo e gás, isso torna de suma importância a existência de um processo para separar os componentes contidos no fluido extraído. A separação é feita por ação da gravidade em equipamentos denominados vasos separadores. Tal processo faz parte da etapa chamada processamento primário de petróleo. Aprofundar o estudo dos vasos separadores é extremamente necessário, pois o processamento primário de petróleo é fundamental na indústria petroquímica. Conhecer a dinâmica do equipamento torna possível fazer melhorias no processo, buscando as melhores condições de funcionamento para que haja um maior aproveitamento no processo de separação. No presente trabalho, foi utilizado o software ANSYS/CFX® para analisar os campos de fração volumétrica, pressão e velocidade superficial do óleo sob diferentes condições de entrada. Os resultados mostram o que acontece com a dinâmica do líquido ao longo do tempo apresentando os campos de pressão fração volumétrica, pressão e velocidade superficial do óleo. O conjunto de resultados obtidos representa a dinâmica do óleo em um vaso separador bifásico.

Palavras-chave: simulação numérica, separação, vaso separador

1 INTRODUÇÃO

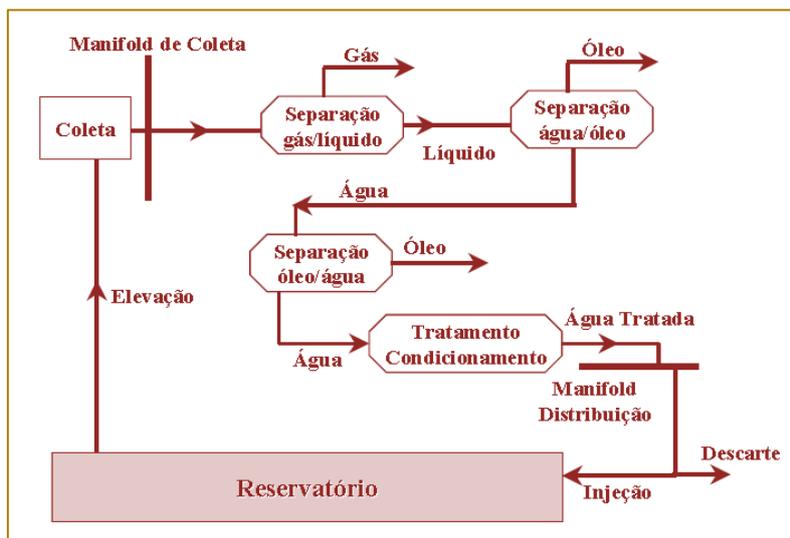
Ao longo da vida produtiva de um campo petrolífero é comum se observar uma produção simultânea de óleo, gás, água e contaminantes, dependendo das características da reserva petrolífera. A presença de água, em geral, é decorrente da própria água conata ou da água injetada na recuperação secundária da reserva de petróleo (Brasil et al., 2011; Zimmermann, 2014). O gás, por sua vez, costuma ser produzido misturado ao óleo (gás natural associado) ou isolado (gás natural não associado) dependendo de sua razão de solubilidade.

O principal interesse econômico nesta cadeia produtiva é produção de óleo e gás, sendo necessário dotar os campos marítimos e terrestres de facilidades de produção, com instalações destinadas a efetuar, sob condições controladas a separação do óleo, do gás e da água. Dessa forma, o processamento primário do petróleo, conforme Figura 1, abrange (BRASIL et al., 2011):

- Separação das fases oleosa, gasosa e aquosa, nos equipamentos conhecidos como
- separadores;
- Tratar a fase oleosa para redução da água emulsionada e dos sais dissolvidos;
- Tratar a fase gasosa para redução do teor de água, e se necessário de outros
- contaminantes;
- Tratar a fase aquosa para descarte e/ou reinjeção nos poços produtores.

A primeira etapa do processamento primário de petróleo e gás consiste na separação das fases água, óleo e gás. Essa separação é realizada com o auxílio de equipamentos denominados vasos separadores que, dependendo da quantidade relativa das fases presentes no fluido, podem ser bifásicos ou trifásicos, atuando em série ou paralelo, orientados vertical ou horizontalmente (SANT'ANNA, 2005). Nos separadores bifásicos ocorre a separação gás/líquido, enquanto que nos separadores trifásicos ocorre, também, a separação gás/óleo/água.

Figura 1: Esquemas simplificado do Processamento Primário de Fluidos (Kunert, 2007).



Os separadores horizontais são normalmente mais eficientes sob o ponto de vista da separação gás/líquido, pois oferecem uma área superficial de interface maior que permite uma maior decantação das gotículas de óleo presentes na fase gasosa, além de favorecer o desprendimento do gás da fase líquida separada (SILVA, 2013).

Por outro lado, possuem desvantagens em relação aos verticais quanto à remoção dos sólidos produzidos, os verticais apresentam uma geometria que permite a deposição localizada no fundo do vaso facilitando sua remoção. Outra desvantagem dos separadores horizontais é que eles apresentam uma menor capacidade de

absorver grandes variações de fluxo (Kunert, 2007).

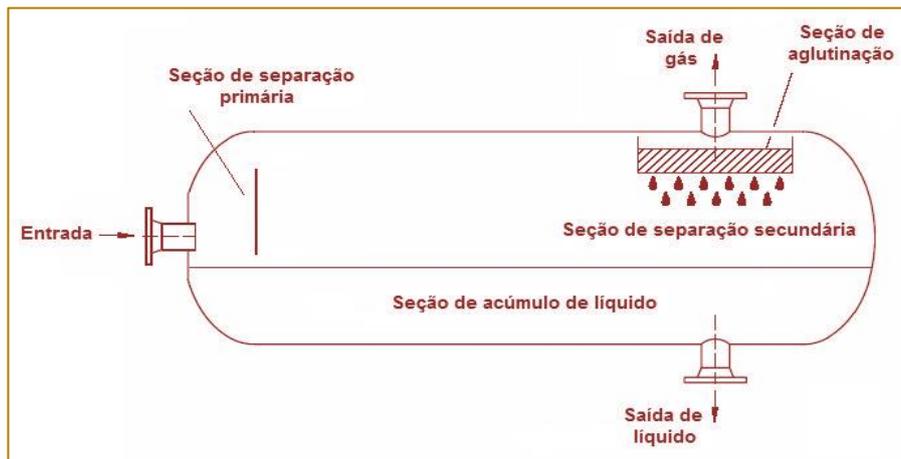
O presente trabalho tem como propósito avaliar a dinâmica do escoamento de uma mistura bifásica (gás/óleo) em um vaso separador horizontal durante o processo de separação, utilizando um modelo matemático para descrever o processo.

2 METODOLOGIA

2.1 DOMÍNIO FÍSICO DE ESTUDO

O domínio de estudo consiste de um vaso separador bifásico equipado com uma seção de entrada e duas seções de saída como mostra o esquema da Figura 2.

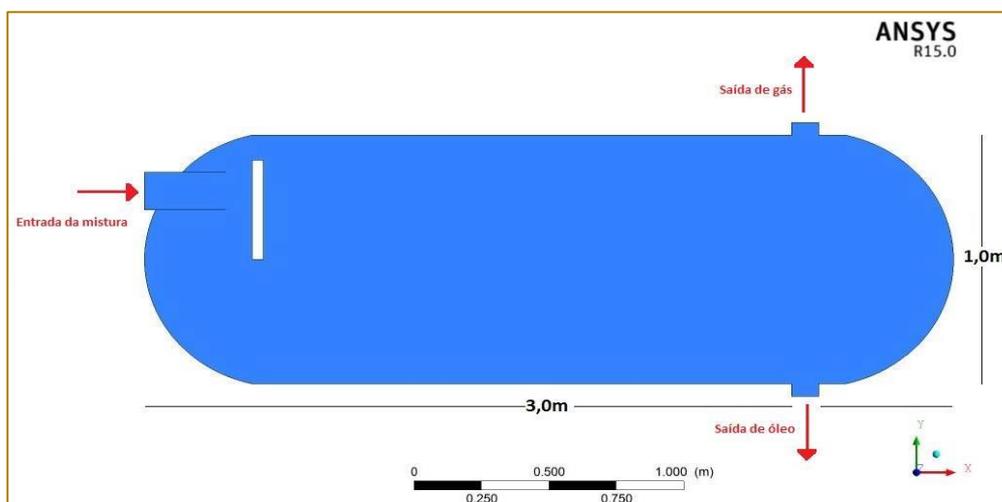
Figura 2: Esquema de um separador bifásico horizontal (Requena e Rodríguez, 2006).



A geometria adotada para o estudo numérico é formada por um domínio simplificado e bidimensional, como ilustrado a Figura 3. Os fluidos entram por uma tubulação situada na parte superior na extremidade esquerda do

vaso separador. As seções de saída estão localizadas no topo e na base do separador, uma para gás e outra para óleo, respectivamente.

Figura 3: Geometria criada para representar o domínio físico de estudo

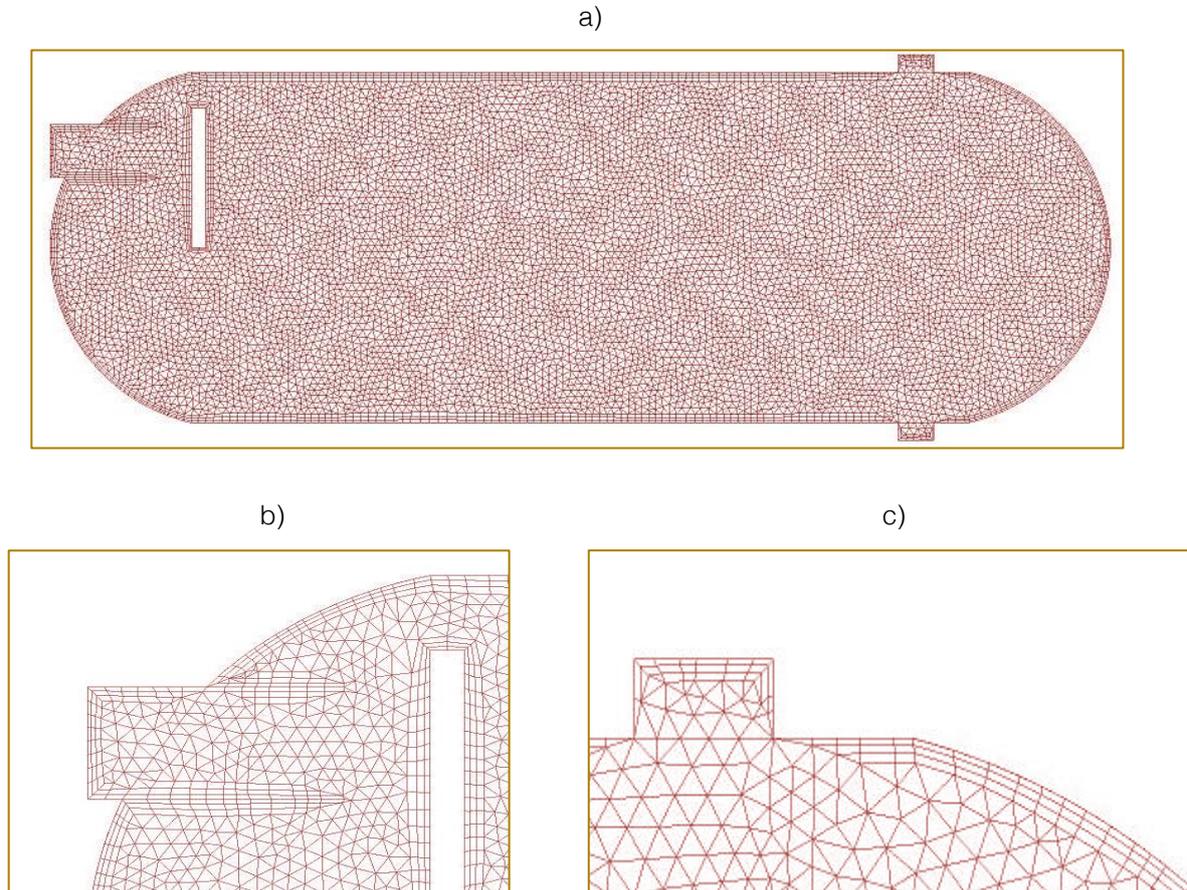


2.2 MALHA NUMÉRICA

A malha numérica que está representada na Figura 4, possui 87633 elementos tetraédricos

e foi cedida pelo professor Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto.

Figura 4 – Representação da malha: (a) visão geral, (b) região de entrada e (c) uma das regiões de saída.



2.3 MODELO MATEMÁTICO

A modelagem matemática definida para descrever a dinâmica dos fluidos no interior do vaso separador é baseada nas equações de conservação de massa, momento linear e as do modelo de turbulência $k-\epsilon$ (maiores informações podem ser obtidas no trabalho de Paiva, 2012), em conjunto com as condições iniciais e de contorno, adotando as seguintes considerações:

- O escoamento é isotérmico e os fluidos incompressíveis;
- Regime transiente;
- Não há transferência de quantidade de movimento devido à transferência de massa na interface gás/óleo;
- Não há reações químicas;

- O regime de escoamento é turbulento;
- O efeito da gravidade é levado em consideração;
- As superfícies foram consideradas sem rugosidade.

O modelo de superfície livre foi utilizado para prever o escoamento e assume que as fases presentes são contínuas e a força devido à tensão superficial é modelada como uma força concentrada na interface ao invés de uma força de superfície. O modelo de tensão superficial utilizado pelo CFX baseia-se no modelo da Força de Superfície Contínua de Brackbill et al. (1992).

Assim, com estas considerações as equações de conservação de massa e momento linear

reduzem-se a:

Equação de conservação de massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (f_{\alpha} \rho_{\alpha} \vec{U}_{\alpha}) = 0 \quad (1)$$

onde f_{α} , ρ_{α} e U_{α} são, respectivamente, a fração volumétrica, viscosidade e vetor velocidade da fase α .

Equação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial(\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot [f_{\alpha} (\rho_{\alpha} \vec{U}_{\alpha} \otimes \vec{U}_{\alpha})] = -f_{\alpha} \nabla p_{\alpha} + \nabla \cdot \left\{ f_{\alpha} \mu_{ef} \left[\nabla \vec{U}_{\alpha} + (\nabla \vec{U}_{\alpha})^T \right] \right\} + S_{M\alpha} + F_{\alpha\beta} \quad (2)$$

onde p é a pressão, μ_{ef} a viscosidade efetiva (viscosidade dinâmica mais a viscosidade turbulenta), o termo $S_{M\alpha}$ representa as forças

de momento devido às forças de corpo externas, tais como a força de empuxo e força rotacional. $F_{\alpha\beta}$ representa a força de tensão superficial dada pela Equação 3:

$$F_{\alpha\beta} = r_{\alpha\beta} \delta_{\alpha\beta} \quad (3)$$

onde $r_{\alpha\beta}$ e $\delta_{\alpha\beta}$ são dados pelas Equações 4 e 5:

$$r_{\alpha\beta} = -\sigma_{\alpha\beta} \kappa_{\alpha\beta} n_{\alpha\beta} + \nabla_s \sigma \quad (4)$$

$$\delta_{\alpha\beta} = |f_{\alpha\beta}| \quad (5)$$

onde σ é o coeficiente de tensão superficial, $n_{\alpha\beta}$ é o vetor normal à interface apontando do fluido primário ao secundário (calculado a partir do gradiente de uma fração

volumétrica), ∇_s é o operador gradiente na interface e κ é a curvatura da superfície definida pela Equação 6:

$$\kappa_{\alpha\beta} = \nabla \cdot n_{\alpha\beta} \quad (6)$$

A área de contato superficial por unidade de volume, $A_{\alpha\beta}$, para o modelo de superfície livre é definida pela Equação 7:

$$A_{\alpha\beta} = |\nabla f_{\alpha}| \quad (7)$$

onde f_{α} representa a fração volumétrica da fase α

Adotou-se o modelo de turbulência **k-ε**.

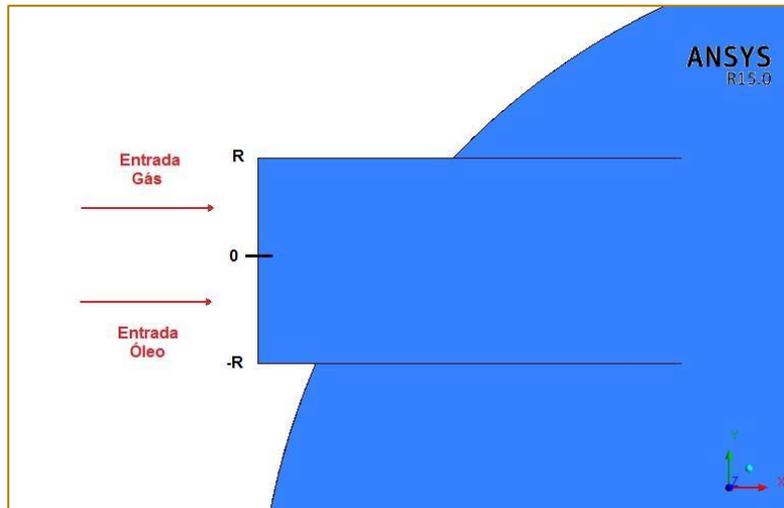
- Modelo de turbulência:

- Condições de contorno:

Para finalizar o modelo matemático foram definidas as seguintes condições de contorno sobre as fronteiras do domínio de estudo (Figura 2) para o escoamento dentro do vaso separador.

Para simular um regime de escoamento estratificado da mistura gás/óleo na região de entrada do vaso, a seção de entrada foi subdividida em duas partes, uma para entrada de gás e outra para a entrada de óleo, como ilustra a Figura 5.

Figura 5: Detalhe da região de entrada do vaso.



Inicialmente foi considerado que o vaso separador era preenchido com metade de óleo ($f_{\text{gás}} = 0$) e metade de gás ($f_{\text{óleo}} = 0$) e ambos estavam estagnados, ou seja, $u = v = 0 \text{ m.s}^{-1}$.

Foi adotado um valor uniforme e não nulo para as componentes de velocidade da mistura.

Na região $0 < r < R$ (entrada gás), as seguintes condições foram adotadas:

$$u = U_{\text{gás}} \text{ e } v = 0 \text{ m.s}^{-1} \quad \forall (x, y)$$

$$f_{\text{gás}} = 1,0 \text{ e } f_{\text{óleo}} = 0$$

Já na região $0 < r < -R$ (entrada óleo), foram adotadas as seguintes condições:

$$u = U_{\text{óleo}} \text{ e } v = 0 \text{ m.s}^{-1} \quad \forall (x, y)$$

$$f_{\text{gás}} = 0 \text{ e } f_{\text{óleo}} = 1,0$$

Nas paredes da tubulação, da placa defletora e do vaso, foi adotada a condição de não-deslizamento (No Slip Wall) para o óleo e para o gás ($u = v = 0 \text{ m.s}^{-1}$). Essa condição permite que os fluidos assumam a mesma velocidade da parede do tubo.

As seções de saída de gás e óleo foram definidas como Opening, com pressão relativa igual a 0 Pa e Opening Pressure, respectivamente.

Quadro 1 - Considerações adotadas para a resolução das equações governantes.

Características	Considerações
Escoamento	Bifásico (gás-óleo), bidimensional, incompressível e isotérmico
Modelo de transferência de interface	Modelo de superfície livre
Força gravitacional	Considerada
Critério de Convergência para a massa (RMS)	10-4 kg.s-1
Força interfacial	Tensão superficial

Propriedades físico-químicas dos fluidos:

As propriedades dos fluidos utilizados na simulação do escoamento estratificado da

mistura gás/óleo estão apresentadas na Tabela 1. O óleo usado como referência foi obtido do trabalho desenvolvido por Buriti (2013).

Tabela 1 - Propriedades físico-químicas dos fluidos usados nas simulações deste estudo.

Propriedades físicas	Gás	Óleo
Densidade (kg.m ⁻³)	1,185	925,5
Viscosidade dinâmica (Pa.s)	1.831E-05	0,1
Tensão superficial (N.m-1)	0,072	

As simulações foram realizadas em um computador Asus, processador Intel Core i5 1.7 GHz, 8GB RAM e HD de 1TB. Para a obtenção da simulação numérica foi utilizado o software ANSYS CFX® Release 15.0.

As condições de entrada para a simulação foram:

Tabela 2 - Dados e condições utilizado na simulação.

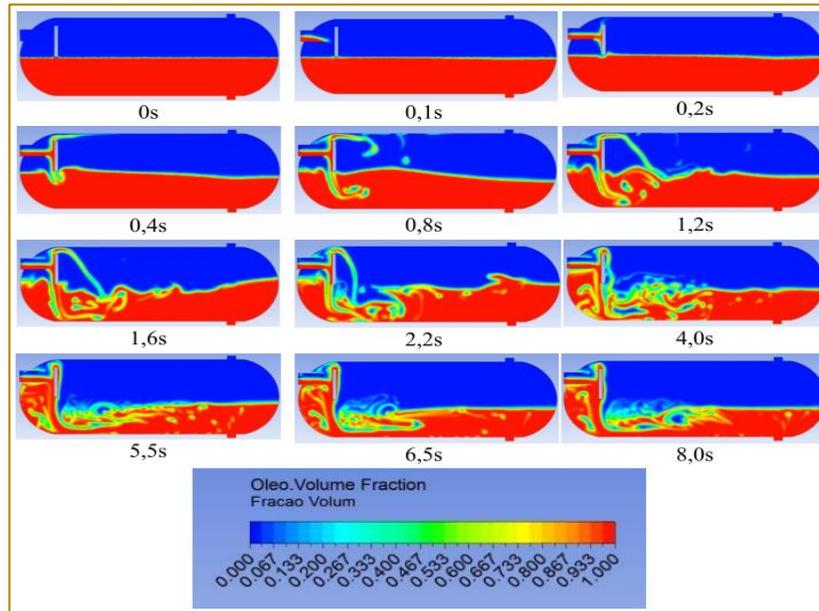
Velocidade Óleo (m.s ⁻¹)	Velocidade Gás (m.s ⁻¹)	Tempo Total (s)
2,5	0,5	8

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os campos de fração volumétrica de óleo para a simulação estão representados na Figura 6. Onde pode ser observado o comportamento das fases gás e óleo no

interior do vaso separador em diferentes instantes de tempo (0; 0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2,2; 4,0; 5,5; 6,5 e 8,0 s).

Figura 6: Campos de fração volumétrica de óleo no plano XY em diferentes instantes de tempo.



Nas Figuras 7 e 8, estão representados os campos de pressão e de velocidade superficial do óleo sobre um plano longitudinal. Observa-se de uma maneira geral que os campos de pressão e de

velocidade superficial variam com o tempo, em consequência das modificações causadas pela entrada da mistura no vaso. Porém, a partir do instante 5,5 s observa-se um comportamento constante.

Figura 7: Campos de pressão do óleo no plano XY em diferentes instantes de tempo.

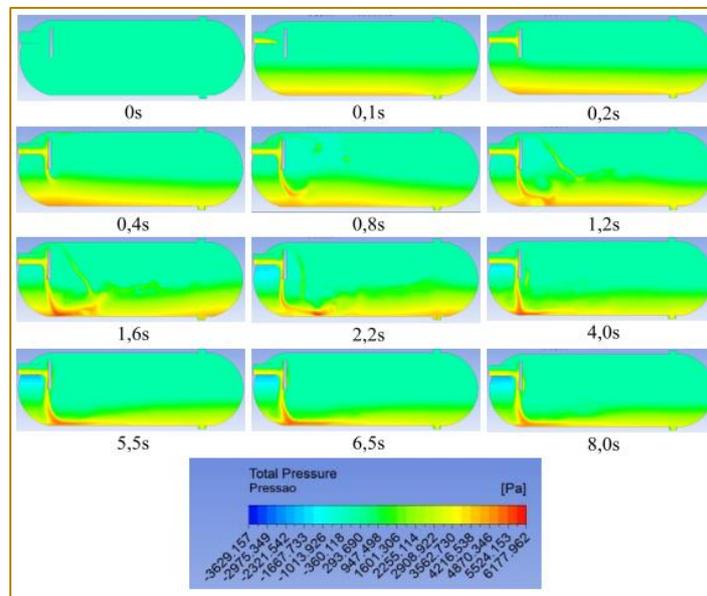
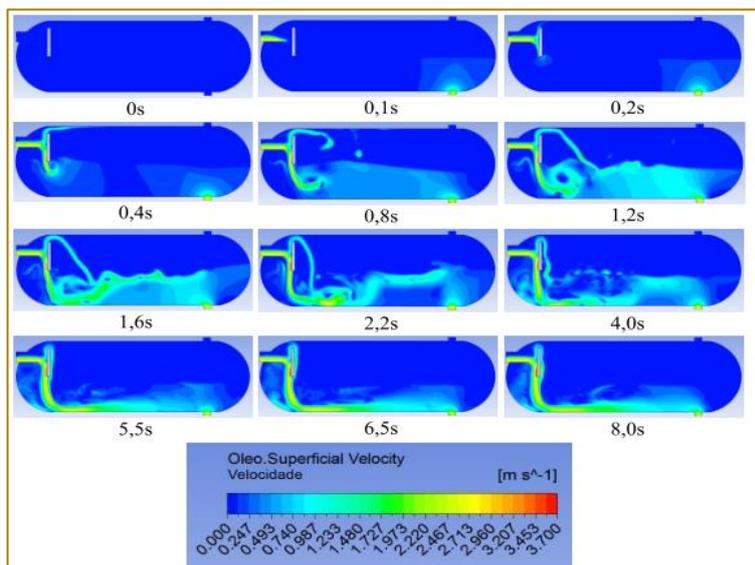


Figura 8: Campos de velocidade superficial do óleo no plano XY em diferentes instantes de tempo.



4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos e apresentados acerca do presente estudo, pode-se concluir que a modelagem matemática desenvolvida para o estudo do escoamento bifásico gás/óleo no interior do vaso separador foi capaz de representar os fenômenos físicos envolvidos neste

escoamento. Além disso, verificou-se como uma mistura gás/óleo, ao escoar em regime estratificado no tubo de entrada, comporta-se dinamicamente no interior do vaso separador ao longo de um determinado intervalo de tempo.

REFERÊNCIAS

- [1] Brackbill, J. U.; Kothe, D.B.; Zemach, C. "A Continuum Method for Modelling Surface Tension". *Journal of Computational Physics* 100:335-354, 1992.
- [2] Brasil, N.I.; Araújo, M.A.S.; Sousa, E.C.M. "Processamento Primário de Petróleo e Gás". Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- [3] Buriti, C. J. O. "Análise termofluidodinâmica de escoamento água-óleo em conexões na presença de vazamento: modelagem e simulação". Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. UFCG, 2013.
- [4] Kunert, R (E.). "Processamento Primário de Petróleo". Petrobrás, Rio de Janeiro, 2007.
- [5] Paiva, M.K.N. "Avaliação da estabilidade do escoamento anular (core-flow) numa tubulação horizontal na presença de vazamento". Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de graduação em Engenharia Química. UFCG, 2012.
- [6] Requena, G.; Rodríguez, M. "Diseño y Evaluación de Separadores Bifásicos y Trifásicos". Tese de Licenciatura. Engenharia de Petróleo. Universidad Central de Venezuela, UCV. Caracas, 2006.
- [7] Sant'anna, A.A. "Simulação de processamento de gás natural em plataforma off-shore." Monografia de TCC. Escola de Química. UFRJ, 2005.
- [8] Silva, A. M. "Análise do Equilíbrio Líquido-Vapor em Vasos Separadores de Petróleo de Campos Maduros". Monografia. Engenharia do Petróleo. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2013.
- [9] Zimmermann, M.S., "Modelagem e simulação do processo de separação gás/óleo empregando um separador ciclônico", Monografia de TCC, Curso de Graduação em Engenharia Química, UFCG, 2014.

Agência Brasileira do ISBN

ISBN 978-85-7042-048-0



9 788570 420480