

Organizadores:  
Hugo Marcelo Silva Pinheiro  
Patricio Moreira de Araújo Filho

1º  
Volume

# ENGENHARIA

produção científica e tecnológica



2021

  
Pascal  
Editora

**HUGO MARCELO SILVA PINHEIRO**  
**PATRÍCIO MOREIRA DE ARAÚJO FILHO**  
**(Organizadores)**

**ENGENHARIA**  
**produção científica**  
**e tecnológica**

**VOLUME 1**

**EDITORA PASCAL**  
**2021**

**2021 - Copyright© da Editora Pascal**

**Editor Chefe:** Prof. Dr. Patrício Moreira de Araújo Filho

**Edição e Diagramação:** Eduardo Mendonça Pinheiro

**Edição de Arte:** Marcos Clyver dos Santos Oliveira

**Bibliotecária:** Rayssa Cristhália Viana da Silva – CRB-13/904

**Revisão:** Patrício Moreira de Araújo Filho

### **Conselho Editorial**

Prof. Dr. Will Ribamar Mendes Almeida

Prof. Dr. Saulo José Figueredo Mendes

Prof. Dr. Glauber Túlio Fonseca Coelho

Prof. Dr. Raimundo Luna Neres

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Rosany Maria Cunha Aranha

Prof. Dr. Ernane Rosa Martins

Prof. MSc. Paulo Américo Lira de Freitas

Prof. MSc. Carlos César Correia Aranha Junior

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

#### **P654engv1**

Coletânea Engenharia: produção científica e tecnológica. / Hugo Marcelo Silva Pinheiro e Patrício Moreira de Araújo Filho, (Orgs.). — São Luís: Editora Pascal, 2021.

133 f.; il. – (Engenharia: produção científica e tecnológica; v. 1)

Formato: PDF

Modo de acesso: World Wide Web

ISBN: 978-65-86707-35-9

D.O.I.: 10.29327/527711

1. Engenharia. 2. Tecnologias. 3. Produção científica e tecnológica. I. Pinheiro, Hugo Marcelo Silva. II. Araújo Filho, Patrício Moreira de.

CDU: 62:088

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

**2021**

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

contato@editorapascal.com.br

## APRESENTAÇÃO

A obra “Engenharia, produção científica e tecnológica” é uma série especialmente preparada para conter as produções científicas de graduandos de Engenharia da Universidade CEUMA. No primeiro volume, concentramos estudos na área temática de Engenharia Mecânica, relacionando os temas aprovados em bancas de TCC, critério este que marcou a harmonização e organização dos capítulos ao longo desta obra. Nos estudos, análises e aplicações apresentados, respeitando sua particularidade, o leitor poderá absorver novos conhecimentos que o proporcione uma abertura teórica /prática auxiliando no bom desempenho de atividades acadêmicas ou no pátio de operações nas empresas.

Os quatro primeiros capítulos abordam análises em diferentes aspectos, passando por tópicos de Aerodinâmica até o comportamento de Fluidos de corte. Nos quatro últimos capítulos, busca-se a aplicação, avaliação e implicação de sólidos elásticos, zonas termicamente afetadas, manutenção e robótica. Cabe ressaltar que os pesquisadores fazem uso de diferentes ferramentas e procedimentos de estudo, buscando uma reflexão nova para a temática ali desenvolvida, expandindo o conhecimento na área.

Assim, ao oportunizar este canal de disseminação do conhecimento, a Editora Pascal agradece aos autores e organizadores, reafirmando a importância da publicação de seus Trabalhos de fim de Curso com o fito de promover suas métricas de visibilidade acadêmica e científica, tais como “RG Score”, “Índice h”, etc., para a formação do currículo.

Boa leitura!

Os Organizadores.

# SUMÁRIO

## **CAPÍTULO 1..... 8**

### **ANÁLISE AERODINÂMICA DE PERFIS ALARES COM AUXÍLIO DA FLUIDO-DINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)**

Hugo Marcelo Silva Pinheiro  
Patrício Moreira de Araújo Filho

## **CAPÍTULO 2..... 21**

### **ASPECTOS DO MODELO DE MAXWELL PARA A MECÂNICA DOS SÓLIDOS ELÁSTICOS**

Renan Tavares Pinheiro Sampaio  
Luis Jorge Mesquita de Jesus

## **CAPÍTULO 3..... 37**

### **ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO EM JUNTAS PARAFUSADAS DE UMA ESTRUTURA DE AÇO NA ZONA MARÍTIMA**

Antonio Lisboa Pereira Nascimento  
Ramaiany Carneiro Mesquita

## **CAPÍTULO 4..... 50**

### **AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A CORROSÃO NA ZONA TERMICAMENTE AFETADA EM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO**

Thalia Cristina Gomes Oliveira  
Ramaiany Carneiro Mesquita

## **CAPÍTULO 5..... 65**

### **ANÁLISE DA ZONA SOLDADA DE UM AÇO SAE 1020 COM ELETRODO REVESTIDO E7018**

Francisco De Assis Martiniano Ferreira Resende  
Ramaiany Carneiro Mesquita

## **CAPÍTULO 6..... 83**

### **ELEMENTOS CRÍTICOS DE MANUTENÇÃO QUE INFLUENCIAM NA REDUÇÃO DA VAZÃO AO LONGO DO TEMPO EM BOMBAS**

Marcus Vinícius Lisboa Sousa  
Diego Rosa dos Santos

**CAPÍTULO 7 ..... 98**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE FLUIDO DE CORTE VEGETAL EM TORNEAMENTO DE AÇO ABNT 1045**

Rafael Nunes Ferreira

Patrício Moreira de Araújo Filho

**CAPÍTULO 8..... 116**

**FIBRA DE CARBONO E COMPÓSITOS POLIMÉRICOS APLICADOS À ROBÓTICA**

Raffaela de Castro da Silva

Hugo Marcelo Silva Pinheiro

**AUTORES ..... 128**

**ORGANIZADORES ..... 132**



# CAPÍTULO 1

## **ANÁLISE AERODINÂMICA DE PERFIS ALARES COM AUXÍLIO DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)**

AERODYNAMIC ANALYSIS OF ALAR PROFILES WITH COMPUTATIONAL  
FLUID DYNAMICS (CFD) AID

**Hugo Marcelo Silva Pinheiro**  
**Patrício Moreira de Araújo Filho**



## Resumo

A presente pesquisa foi desenvolvida com intuito de assimilar os fenômenos que compõe a aerodinâmica de perfis alares através de uma breve abordagem dos fundamentos físicos que constituem o voo, dessa forma, por meio de uma análise comparativa com auxílio de um software, realizar simulações em perfis com geometria simétrica, semi-simétrica e de fundo plano respectivamente, buscando compreender o comportamento destes. No estudo, utilizando a fluidodinâmica computacional (CFD) através do XFLR5, foi possível simular o comportamento dos perfis com ângulo de ataque variando de 0 a 10 graus, o número de Reynolds em uma faixa de 300.000 a 500.000 e a velocidade do perfil de MACH 0,5 (171,5 m/s). Ao término do estudo, foi possível concluir que em números de Reynolds mais baixos e uma turbulência média no escoamento, o perfil de fundo plano apresenta uma eficiência melhor em comparação aos demais devido as condições favoráveis à sua geometria.

**Palavras-chave:** Aerodinâmica; NACA 0012; GOE 387; CLARK Y; XFLR5; Baixo número de Reynolds, XFLR5.

## Abstract

The present research was developed with the intention of assimilating the phenomena that make up the aerodynamics of wing profiles through a brief approach of the physical fundamentals that constitute the flight, thus, through a comparative analysis with the aid of a software, perform simulations in profiles with symmetric, semi-symmetrical and flat-bottom geometry respectively, seeking to understand their behavior. In the study, using computational fluid dynamics (CFD) through XFLR5, it was possible to simulate the behavior of profiles with angle of attack ranging from 0 to 10 degrees, the Reynolds number in a range of 300,000 to 500,000 and the speed of the MACH profile 0.5 (171.5 m / s). At the end of the study, it was possible to conclude that in lower Reynolds numbers and an average flow turbulence, the flat bottom profile presents a better efficiency compared to the others due to the favorable conditions for its geometry.

**Keywords:** Aerodynamics; NACA 0012; GOE 387; CLARK Y; XFLR5; Low number of Reynolds, XFLR5.



# 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho propõe uma avaliação crítica dos resultados das respectivas performances de cada perfil alar em uma situação determinada de acordo com as geometrias dos mesmos, abordando primeiramente conceitos da mecânica dos fluidos e aerodinâmica, além das partes que compõem um perfil alar, que se faz necessário para a compreensão e entendimento dos resultados obtidos, com a absorção desses conceitos da aerodinâmica básica foi possível analisar a dinâmica e desempenho de diferentes perfis, utilizando fluidodinâmica computacional para realização das simulações.

O grande salto no estudo da aerodinâmica surgiu quando houve a necessidade da diminuição do atrito do ar para os meios de transporte, permitindo alcançar maiores velocidades. (ANDERSON, 2001)

Segundo Almeida Jr (2016) o estudo do escoamento de um fluido sobre a superfície de um perfil aerodinâmico possui ampla aplicação na indústria, pois maximizar a eficiência de aerofólio resulta em uma maior eficiência na aeronave, tornando-a mais eficaz e lucrativa, esse ganho é possível através do entendimento das grandezas aerodinâmicas que influenciam neste aspecto, portanto se faz necessário investigar e compreender os parâmetros que influenciam na sustentação e arrasto e também o perfil de pressão.

Com o desenvolvimento nos métodos matemáticos numéricos no século XX, houve um salto significativo nas análises da engenharia, já que permitiu a solução numérica de complicadas equações governantes, que até então não possuíam soluções analíticas, esse avanço originou o amplo campo da Engenharia Assistida por Computador (CAE - Computer Assisted Engineering) e de campos mais específicos como a Mecânica dos Fluidos Computacional (CFD - Computer Fluid Dynamics) que permitiu a análise de problemas com visões até aquele momento impraticáveis. (MOREIRA, 2020)

De acordo com Versteeg (2007) a dinâmica dos fluidos ou CFD (Computational Fluid Dynamics) é um método de análise de sistema que envolve fluxo de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados por meio de simulações computacionais. Através desta é possível simular por meio de softwares especiais, o comportamento de substâncias fluidas nos mais diversos ambientes, possibilitando estudar a termodinâmica, aerodinâmica, hidrodinâmica, gases e outros podendo ser utilizado desde a fase inicial de projeto, determinando a viabilidade, até o produto final, quer seja a aeronave ou qualquer outro veículo.

Cada perfil simulado possui suas características próprias e situações as quais eles são indicados devido seu desempenho diretamente ligado à sua geometria. Neste trabalho foram usados os três perfis mais utilizados em aeronaves diversas,



sendo eles: o simétrico, semi-simétrico e o de fundo plano e ao final avaliado a performance de cada utilizando um método comparativo.

## 2. DESENVOLVIMENTO

### 2.1 O Ar

Em razão de uma aeronave operar no ar se faz necessário compreender as propriedades que afetam o desempenho da mesma.

O ar é um fluido em condições atmosféricas padrões, composto por uma mistura de gases constituído principalmente por oxigênio e nitrogênio. O escoamento, ou seja, o movimento desse ar sob uma superfície gera sustentação, que é a força que possibilita que máquinas pesadas de voar, assim o avião é projetado para que o fluxo de ar escoe de maneira a produzir forças aerodinâmicas.

Essas forças aerodinâmicas são forças resultantes do movimento de um fluido sobre a superfície de um corpo, isto é, um fluxo. Já a força aerostática é a força que o fluido aplica sobre a superfície do corpo com influência apenas de forças gravitacionais, ou seja, não há fluxo.

### 2.2 Aerodinâmica

De acordo com Rodriguez (2011) a aerodinâmica é o estudo dos movimentos de fluidos gasosos em relação as suas propriedades e características, e as forças exercidas em corpos sólidos em contato com esses fluidos.

De acordo com Eberhardt (2006) a força aerodinâmica pode ser decomposta em duas componentes: a sustentação e o arrasto.

Sendo a sustentação a força resultante da viscosidade e diferencial de pressão do fluido exerce na parte superior e inferior da asa e o arrasto é a resistência ao movimento que esse fluido impõe no corpo. E além dessas outras forças que atuam no avião são força peso e força de tração, como demonstrado na figura 1. Podemos definir as mesmas como:

- a. Sustentação (S): força aerodinâmica perpendicular à direção do voo.
- b. Arrasto (R): força de atrito, paralela à direção do voo.
- c. Peso (P): força da gravidade ( $P = m.g$ ) que empurra para o centro da Terra.

d. Tração (T): força produzida pelo motor.

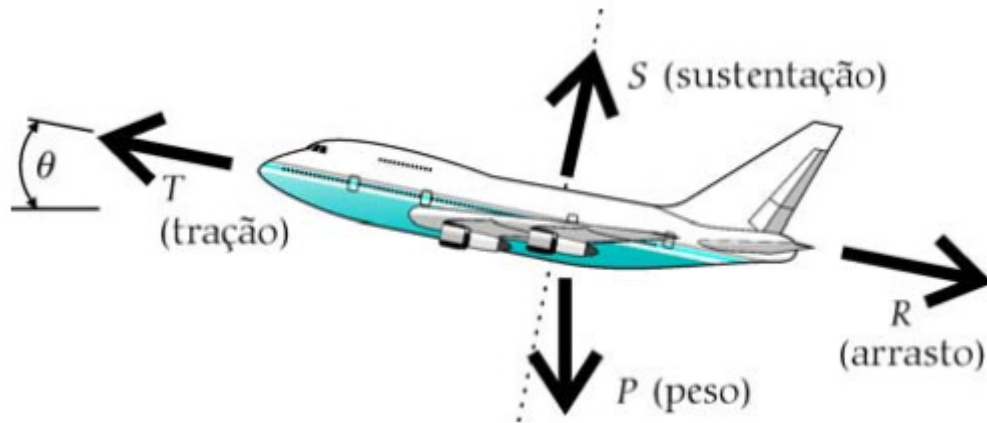


Figura 1 – Forças Aerodinâmicas.  
Fonte: EBERHARDT, 2006 p. 36.

A sustentação aerodinâmica caracteriza o maior atributo de uma aeronave em comparação a outros veículos e estabelece a capacidade de um avião se manter voando, sendo basicamente a força que supera o peso da aeronave, garantindo o voo. (RODRIGUEZ, 2011)

Alguns fundamentos físicos podem ser aplicados para se entender como a força de sustentação é criada, dentre eles, existem dois principais que podemos citar, são eles:

- a. Princípio de Bernoulli
- b. Terceira Lei de Newton

Onde o princípio de Bernoulli se aplica na desigualdade de pressão devido ao gradiente de velocidade no fluxo de ar na parte superior da asa se o ângulo for positivo, assim a pressão estática do ar na parte superior é menor que na parte inferior, criando a força de empuxo, como exposto na figura 2.

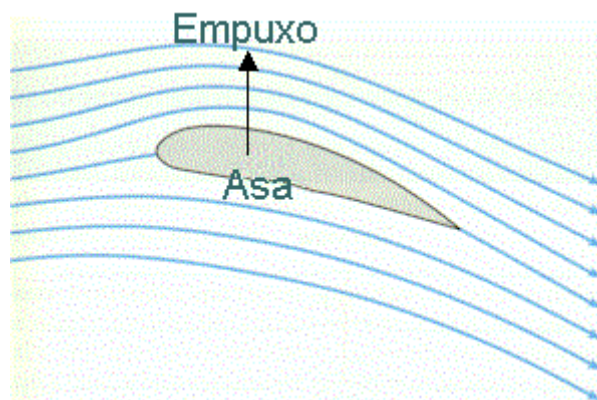


Figura 2 – Força de empuxo em uma asa.  
Fonte: if.ufrj.br (2020)

Esse empuxo é explicado pelo teorema de Arquimedes, que diz que todo corpo imerso em um fluido de forma parcial ou total, está sujeito a uma força vertical

para cima, igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo.

Rodriguez (2011, p. 25) afirma que “Se a velocidade de uma partícula de um fluido aumenta enquanto ela escoar ao longo de uma linha de corrente, a pressão dinâmica do fluido deve aumentar e vice-versa”. Então quanto maior a pressão dinâmica do fluido, menor a pressão estática que ele irá exercer sobre um corpo.

A terceira lei de Newton de acordo com Nussenzveig (2002, p. 76), conforme citado por Oliveira (2011, p. 7), “A toda ação corresponde uma reação, igual e contrária, ou seja, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas em sentidos opostos”.

Isso explica duas forças geradas durante um voo que são a força peso que é oposta a força sustentação e a força de arrasto que é oposta a força de tração. Dessa forma para um avião voar e se manter no ar, a força de sustentação gerada pelas asas tem que ser maior que a força peso do avião, assim como a força de tração gerada pelos motores tem que ser maior que a força de arrasto.

## 2.3 Perfis Aerodinâmicos

Um perfil aerodinâmico é um objeto que tem a finalidade de desempenhar uma função aerodinâmica a partir de um escoamento de um fluido sobre sua superfície. (RODRIGEZ, 2011)

Para Freitas et al. (2015, p. 3), perfil alar é um componente aerodinâmico que é obtido através de corte efetuado num plano paralelo ao plano de movimento desse componente podendo ser asas, estabilizadores, caudas, pás de turbinas, rotores, entre outros objetos que desempenham uma função aerodinâmica.

Existem diversos tipos de asa e suas características dependem das condições de voo desejadas, podendo ser construídas em diferentes formatos e tamanhos. O desempenho a aeronave está diretamente ligado com o formato das suas asas, determinando características como balanceamento, estabilidade e sustentação. Estruturalmente os componentes principais de uma asa são as longarinas, nervuras e reforçadores. As longarinas são responsáveis por receber os esforços aerodinâmicos e são os principais componentes estruturais de uma asa. As nervuras são responsáveis por transmitir os esforços para a longarina e dão o formato aerodinâmico a asa, já os reforçadores são compostos por treliças, vigas e revestimentos que dão resistência e flexibilidade, como podemos observar na figura 3.

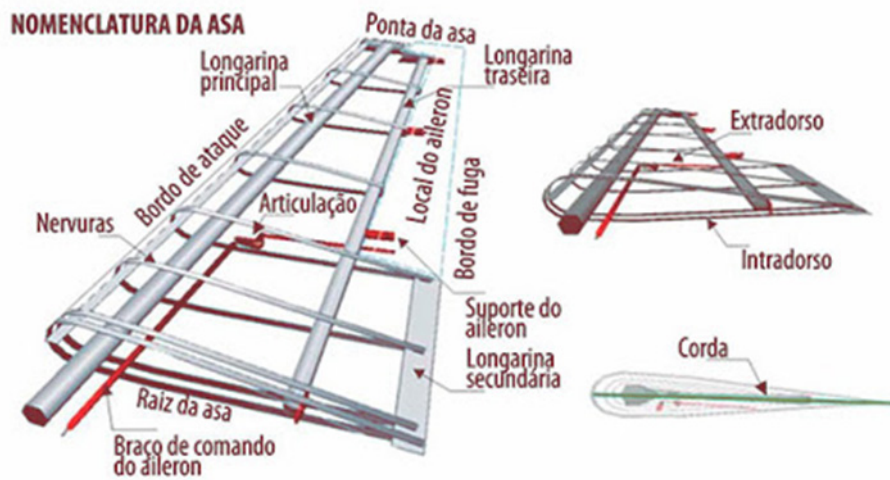


Figura 3 – Estrutura da asa.  
Fonte: researchgate.net (2020)

O ângulo de ataque é o ângulo formado pela linha de corda do perfil e a direção do escoamento do ar relativo. Esse ângulo representa a capacidade de sustentação do perfil. O aumento desse ângulo gera aumento da força de sustentação até um ponto que essa sustentação é reduzida dramaticamente gerando o fenômeno chamado de estol, que é a perda repentina de sustentação. O cálculo do coeficiente de sustentação e do coeficiente de arrasto, respectivamente é dado por:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} ; C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (2.1)$$

Outro coeficiente muito importante a ser considerado é o coeficiente de momento de inclinação do perfil. Esse coeficiente é a representação da força de giro ou rotação sobre um eixo imaginário que se estende de ponta a ponta da asa de uma aeronave, sendo que essa força atua quando se executa os movimentos de cabragem (levantar o nariz da aeronave) e o de picagem (abaixar o nariz da aeronave), essa força pode ser representada por:

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho V^2 \bar{c}} \quad (2.2)$$

O ângulo de incidência é o ângulo formado entre a linha de corda do perfil e o eixo horizontal de referência. Ele é responsável por atribuir maior eficiência aerodinâmica para o perfil.

De acordo com Vicente (2015), alguns fatores que influenciam na sustentação do avião em relação à asa são:

- Quanto maior curvatura e comprimento da asa, maior a sustentação.

- Uma asa comprida e estreita tem melhor sustentação que uma asa curta e larga.
- Pontas de asas menores criam menos vórtices, conseqüentemente diminui arrasto.
- Quanto maior o alongamento, ou seja, a razão entre a envergadura e a corda média maior a eficiência.

### 3. METODOLOGIA

O presente trabalho baseia-se em um estudo através de simulação computacional, onde com auxílio de um software foi analisado o comportamento dos perfis em relação aos parâmetros aplicados. No início deste foi fundamentado um desenvolvimento teórico sobre o tema para a compreensão dos fenômenos que atuam sobre o perfil.

O software utilizado para as simulações em CFD é o XFLR5<sup>1</sup> que é uma ferramenta com linguagem C/C++, para análises de aerofólios, asas e aviões operando em baixo número de Reynolds. Os softwares CFD utilizam códigos estruturados por algoritmos numéricos para resolver as equações de fluxo, o programa utiliza interface simples e amigável ao usuário para inserir os parâmetros selecionados para simulação.

No decorrer da simulação XFLR5 executa três processos principais como mostrado na figura 4 abaixo.

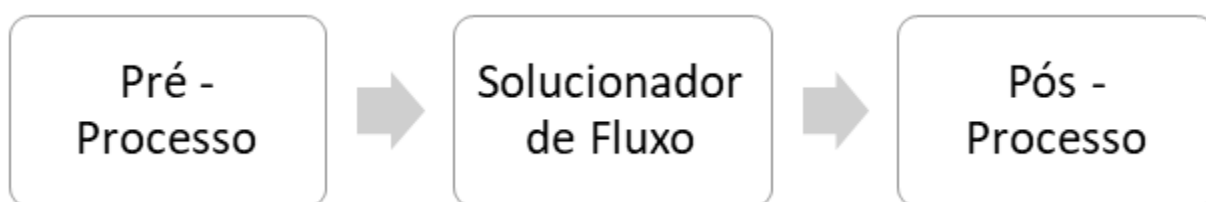


Figura 4 – Fluxograma de processos.  
Fonte: produzida pelo autor.

No pré-processo é inserido a geometria que será analisada, gerando a malha, definição do controle de fluxo e as condições de contorno do código, já o solucionador de fluxo é usado para resolver as equações que governam o fluxo, de acordo com as condições pré-determinadas e no pós-processo é onde o processamento dos dados obtidos e apresentação do resultado em formato gráfico e de fácil leitura. (ASHGRIZ; MOSTAGHIMI, 2002)

A escolha dos perfis e obtenção dos dados do mesmo foi através do site-fer-

<sup>1</sup> Disponível em: <<https://sourceforge.net/projects/xflr5/>>. Acesso em: 5 de mar. de 2020.

ramenta *Airfoiltools*<sup>2</sup>, que possui um banco de dados de mais de 1600 tipos de aerofólios, onde pode-se encontrar as características do aerofólio bem como suas especificações.

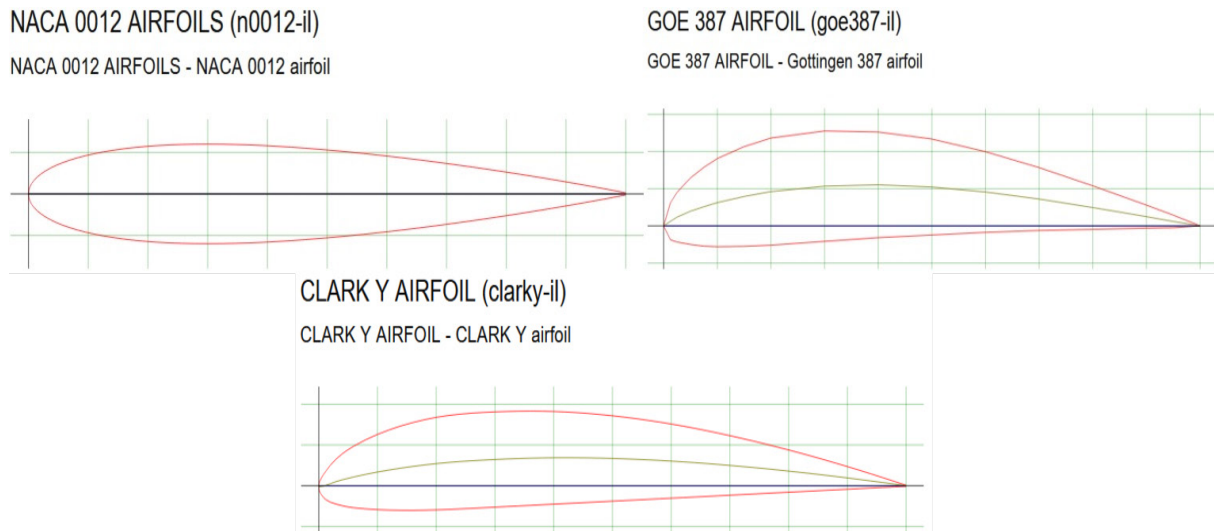


Figura 5 – Perfis aerodinâmicos.  
Fonte: [airfoiltools.com](http://airfoiltools.com) (2020).

Os perfis mostrados acima (Figura 5) são classificados como: perfil simétrico, perfil semi-simétrico e perfil de fundo plano respectivamente.

Os parâmetros inseridos no software para a simulação foram:

- Número de Reynolds:
  - Mínimo:  $3 \times 10^5$ .
  - Máximo:  $5 \times 10^5$ .
  - Incremento:  $1 \times 10^4$ .
- Velocidade em MACH: 0,5 (171,5 m/s).
- Ncrit: 9 (média turbulência).
- Ângulo de Ataque ( $\alpha$ ):
  - Mínimo:  $0^\circ$
  - Máximo:  $10^\circ$
  - Incremento:  $0,5^\circ$ .
- Número máximo de interações: 100.

<sup>2</sup> Disponível em: <<http://airfoiltools.com/>>. Acesso em: 5 de mar. de 2020.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas simulações no XRFL5 os números de Reynolds utilizados, a velocidade do perfil e as variações de ângulos de ataque aplicados nos perfis produziu um comportamento único em decorrência de sua tipologia e seus atributos levando cada perfil a apresentar suas respectivas performances em consequência de suas características particulares.

Ao realizar as simulações com o perfil NACA 0012 obtivemos gráficos com curvas bastantes suaves o que representa a estabilidade do perfil à medida que o ângulo de ataque é acrescido, esse desempenho está dentro do esperado, pois sua geometria simétrica faz com que a medida que o perfil se desloca pelo ar, o fluxo do fluido sobre o intradorso e o extradorso sejam iguais, assim o perfil corta o ar de maneira uniforme, essa característica faz com que esse perfil possa alterar seu ângulo de ataque de maneira constante e abrupta sendo o motivo pelo qual esse perfil é indicado para acrobacias de precisão. Em concordância com os resultados de sustentação obtidos por Plech (2016) quando analisamos o gráfico de eficiência do perfil, o mesmo alcança sua eficiência máxima em ângulos de ataques baixos, ou seja, mesmo com a mudança de ângulo constante o perfil ainda mantém a estabilidade e permanece com uma eficiência elevada, vale ressaltar também que os ângulos em que o coeficiente de momento obteve os melhores resultados coincidem com os ângulos para a melhor eficiência aerodinâmica do NACA 0012, logo esse intervalo de ângulos seria o ideal para voo desse perfil.

As simulações no perfil GOE 387 retornaram gráficos com várias distorções, porém também esperado pois como explica Ismail (2009) o escoamento do ar em um perfil semi-simétrico causa aceleração na parte superior e desaceleração da parte inferior do perfil assim causando uma diferença de pressão e consequentemente sustentação, como a simulação aumenta constantemente e com intervalos curtos de tempo essa diferença da pressão e sustentação varia frequentemente. Com esse aumento contínuo do ângulo Ismail (2009) enfatiza que se o ângulo de ataque é grande, o escoamento se separa da superfície do perfil e não adere novamente, com isso nessa região a pressão aumenta na superfície superior do perfil acarretando o fenômeno de estol ou queda de sustentação, isso explica as oscilações do gráfico do perfil GOE 387. Em velocidades baixas esses fenômenos são ainda mais presentes, porém em velocidades mais altas o perfil apresenta uma excelente relação sustentação-arrasto, por essa razão são os mais utilizados principalmente em aviões comerciais, visto que necessitam de uma melhor relação entre sustentação e arrasto e não realizam mudanças de ângulos repentinas.

O GOE 387 apresentou coeficientes de sustentação maiores que o NACA 0012 e consequentemente um coeficiente de sustentação maior, entretanto apresentou um coeficiente de momento superior, assim precisando de uma estrutura que suporte mais força que o perfil anterior. Além disso, houve uma diferença entre

os melhores ângulos para eficiência aerodinâmica e os melhores ângulos para o melhor coeficiente de momento havendo necessidade de fazer um balanceamento para equilibrar ambos os coeficientes durante o voo, diferente do NACA.

O perfil CLARK Y foi o que apresentou melhor desempenho em comparação com os demais, segundo Johnson (2005) e Whomsley (2018) esse tipo de perfil é muito usado em aeromodelos de voo suave e aeronaves pequenas devido ao excelente desempenho em baixas velocidades e sua fácil construção. Após a simulação o perfil demonstrou coeficientes de sustentação e eficiência aerodinâmicas maiores até que o GOE 387, porém vale lembrar que nos Reynolds aplicados e a velocidade de 171,5 m/s é esperado que um perfil de fundo plano apresente melhor performance em comparação ao semi-simétrico, pois esse tipo de perfil apresenta a melhor performance em velocidades altas entre MACH 0,7 (240,1 m/s) e MACH 0,8 (274,4 m/s), já o de fundo plano à medida que é aumentado o número de Reynolds e a velocidade do perfil o desempenho do perfil descrese gradualmente.

A Tabela 1, Tabela 2 e a Tabela 3 demonstram os melhores resultados obtidos por cada perfil em Reynolds igual a 300.000, 400.000 e 500.000 respectivamente.

Tabela 1 – Melhores resultados de eficiência aerodinâmica e momento dos perfis em .

Perfil		
NACA 0012	49,375	-0,010
GOE 387	47,323	-0,009
CLARK Y	76,376	-0,026

Fonte: produzida pelo autor.

Tabela 2 – Melhores resultados de eficiência aerodinâmica e momento dos perfis em

Perfil		
NACA 0012	53,618	-0,007
GOE 387	54,557	-0,015
CLARK Y	83,885	-0,028

Fonte: produzida pelo autor.

Tabela 3 – Melhores resultados de eficiência aerodinâmica e momento dos perfis em

Perfil		
NACA 0012	56,807	-0,003
GOE 387	62,145	-0,027
CLARK Y	89,122	-0,029

Fonte: produzida pelo autor.



Assim para os parâmetros utilizados de Reynolds igual a , e e a velocidade do perfil igual a MACH 0,5 (171,5 m/s) além do ângulo de ataque que varia de 0 a 10 graus, o perfil que demonstrou melhor performance baseando-se nos parâmetros mais importantes dos perfis que são os coeficientes de eficiência aerodinâmica e o coeficiente de momento foi o CLARK Y, devido a sua geometria e suas características de voo favorável aos parâmetros aplicados o perfil apresentou um desempenho superior aos demais em todas as situações simuladas no quesito eficiência aerodinâmica, demonstrando superioridade desse tipo de perfil em velocidades mais baixas em comparação ao simétrico e ao semi-simétrico.

## 5. CONCLUSÃO

No decorrer do presente estudo foi possível analisar com auxílio de um software o desempenho de perfis alares determinando assim suas respectivas performances e definindo qual apresentou melhores feedbacks para essa condição.

Após a simulação, verificou-se que o perfil de fundo plano CLARK Y demonstrou melhor performance obtendo coeficientes melhores que o perfil semi-simétrico GOE 387 e o simétrico NACA 0012 como pode ser observado nas Tabelas 1, 2 e 3 devido a velocidade MACH aplicada e os números de Reynolds, o perfil de fundo plano apresenta melhores coeficientes em comparação aos demais devido a este ser indicado para voos de baixa velocidade e ao contrário do perfil GOE 387 à medida que é aumentado o número de Reynolds e a velocidade do perfil o desempenho do perfil desce gradualmente.

## Referências

- ALMEIDA, et al. Estudo Numérico De Perfil Aerodinâmico. In: XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 37., 2016. Brasília. **Anais do CILAMCE 2016**. Brasília: Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia, 2016. P. 1-10.
- ANDERSON, John D. Jr. **Fundamentos de Engenharia Aeronáutica**. 7ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2015.
- ANDERSON, John. **Fundamentals of Aerodynamics**. 3. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2001.
- ASHGRIZ, Nasser; MOSTAGHIMI, Javad. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. In: SALEH, Jamal Mohammed. Fluid Flow Handbook. Manhattan: McGraw Hill, 2002.
- EBERHARDT, Scott; ANDERSON, David. **Física na Escola**. Vol. 7 nº2, 2006.p. 36-42.
- FREITAS, et al. Aerodinâmica básica. In: SEMINÁRIO AEROESPACIAL, 2., 2015. Lisboa. **Anais[...]**. Lisboa: Técnico Lisboa, 2015. p.1-18.
- ISMAIL , Kamal A. K. Aerodinâmica de perfis finos e não finos. In: ISMAIL, Kamal (org.). **Aerodinâmica básica 2ª edição**. Campinas: Cisgraf Artes Gráficas Ltda, 2009. p. 161-261.
- JOHNSON, Paul K. **"About Airfoils for Flying Model Aircraft"**. Airfieldmodels, 2005. Disponível em: <ht-



[tps://www.airfieldmodels.com/information\\_source/math\\_and\\_science\\_of\\_model\\_aircraft/rc\\_aircraft\\_design/plotting\\_airfoils/about\\_airfoils.htm](https://www.airfieldmodels.com/information_source/math_and_science_of_model_aircraft/rc_aircraft_design/plotting_airfoils/about_airfoils.htm)>. Acesso em: 5 de mar. de 2020.

MOREIRA, C. T. G. **Programa Introdutório à Fluidodinâmica Computacional com a Solução Numérica do Escoamento de Couette**. 2020. 99f. Dissertação (Mestrado em Matemática) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020.

OLIVEIRA NETO, N. M.; TELES, T. N.; J. F. P. Huiza. **Sustentação Aerodinâmica Bernoulli x Newton**. 2011. 18 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Licenciatura em Matemática (Enfoque Informática)) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, 2011.

PLECH, F. C.; TOFANELI, L. A.; OLIVEIRA, T. D. Desempenho De Perfis Aerodinâmicos Para Aerogeradores. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2016, Fortaleza. **Anais[...]**. Salvador: Senai Cimatec, 2016. p. 6.

RODRIGUES, Luiz Eduardo Miranda. J. **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica – Aplicações ao Projeto SAE-AeroDesign Volume Único 1**. ed rev. – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2011.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. 2th ed. Glasgow: Person, 2007.

VICENTE, Antônio. **“Noções de aerodinâmica e teoria do voo”**. Asasdeferro-Suplemento, 2015. Disponível em: < <http://asasdeferro-suplementos.blogspot.com/2015/09/nocoos-de-aerodinamica-de-voo.html>>. Acesso em: 3 de mar. de 2020.

WHOMSLEY, James. **“Which Airfoil Should I Use?”**. Flitetest, 2018. Disponível em: <<https://www.flitetest.com/articles/what-airfoil-should-i-use>>. Acesso em: 5 de mar. de 2020.



# CAPÍTULO 2

## **ASPECTOS DO MODELO DE MAXWELL PARA A MECÂNICA DOS SÓLIDOS ELÁSTICOS**

ASPECTS OF THE MAXWELL MODEL FOR THE MECHANICS OF ELASTIC  
SOLIDS

**Renan Tavares Pinheiro Sampaio**

**Luis Jorge Mesquita de Jesus**

## Resumo

O equilíbrio de sólidos elásticos é uma área das engenharias que estuda o comportamento de materiais quando sujeitos a determinados tipos de esforços mecânicos. Em 1865 foi publicado o artigo "On the Equilibrium of Elastic Solids" no The Scientific Papers of James Clerk Maxwell. Onde, Maxwell expôs suas contribuições para a mecânica dos sólidos elásticos e defendeu suas ideias através de 14 casos práticos, analisando os resultados com o uso de luz polarizada. Timoshenko, com base nas teorias de Maxwell, criou um acervo de material científico voltado principalmente para o meio acadêmico, justificado pela sua atuação como professor universitário. O objetivo desta pesquisa é investigar as contribuições de J. C. Maxwell sobre o equilíbrio de sólidos elásticos e as interpretações publicadas, acerca deste estudo, por Timoshenko em 1953. Alguns autores defendem que Timoshenko falhou em vários aspectos sobre as ideias de Maxwell, e que um entendimento adequado sobre essas teorias só é possível estudando os arquivos originais de Maxwell. A pesquisa revelou que Timoshenko foi um grande contribuidor no meio acadêmico, porém, ocultou a grandeza das ideias de Maxwell em suas publicações.

**Palavras-chave:** Sólidos elásticos; Fotoelasticidade; Luz Polarizada; Interpretação; Contribuição.

## Abstract

The balance of elastic solids is an area of engineering that studies the behavior of materials when subjected to certain types of mechanical stress. In 1865 the article "On the Equilibrium of Elastic Solids" was published in The Scientific Papers of James Clerk Maxwell. Where, Maxwell exposed his contributions to the mechanics of elastic solids and defended his ideas through 14 practical cases, analyzing the results with the use of polarized light. Timoshenko, based on Maxwell's theories, created a collection of scientific material aimed mainly at the academic environment, justified by his performance as a university professor. The aim of this research is to investigate the contributions of JC Maxwell on the balance of elastic solids and the published interpretations of this study by Timoshenko in 1953. Some authors argue that Timoshenko failed in several respects to Maxwell's ideas, and that an understanding information about these theories is only possible by studying Maxwell's original files. The research revealed that Timoshenko was a major contributor to academia, but concealed the greatness of Maxwell's ideas in his publications.

**Keywords:** Elastic solids; Photoelasticity; Polarized Light; Interpretation. Contribution.



## 1. INTRODUÇÃO

O equilíbrio de sólidos elásticos é uma área das engenharias que estuda o comportamento de materiais, como o aço e o vidro, por exemplo, quando sujeitos a determinados tipos de esforços, seja de compressão, tração, torção ou qualquer outro relacionamento a fenômenos mecânicos. Estes estudos deram um grande salto no meio científico no início do século XIX, quando Sir David Brewster, em 1816, detectou pela primeira vez a distribuição de tensões em uma placa de vidro temperado quando atravessada por um feixe de luz polarizada.

James Clerk Maxwell foi um grande propulsor dessa evolução, contribuindo fortemente com dedução de equações e determinação de coeficientes de elasticidade. Em 1865, foi publicado o artigo "On the Equilibrium of Elastic Solids" no *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*. Onde, Maxwell expôs suas contribuições para a mecânica dos sólidos elásticos e defendeu suas ideias através de 14 casos práticos, simulando a aplicação de materiais fotoelásticos em diferentes situações de esforço mecânico e observando seu comportamento com o uso de luz polarizada.

Os estudos de Maxwell formaram opiniões em meio aos críticos e os levaram a publicar suas interpretações acerca do assunto em vários meios acadêmicos e científicos. Algumas dessas publicações são questionadas se representam, com autenticidade, a grandeza das ideias de J.C. Maxwell e se oferecem algum prejuízo a comunidade científica relacionada a divergência dos fatos.

O engenheiro Stephen P. Timoshenko [1878-1972] foi um dos sucessores do estudo da teoria da elasticidade, que, com base nas teorias de Maxwell, criou um acervo de material científico voltado principalmente para o setor acadêmico, justificado pela sua atuação como professor na universidade de Michigan e Stanford. Muitos desses materiais são usados até hoje. Estes fatos o levaram a ser considerado hoje como o pai da engenharia mecânica moderna.

Portanto, esta pesquisa tem por objetivo investigar as contribuições de J. C. Maxwell sobre o equilíbrio de sólidos elásticos e as interpretações publicadas, acerca deste estudo, por S. P. Timoshenko em 1953. Por meio de verificação na literatura direcionada à busca por autores que observaram contradições acerca do assunto em questão, e que oferecem avanços sobre as teorias de Maxwell.

## 2. REVISÃO TEÓRICA

### 2.1 Sólidos Elásticos e Fluidos

Os elementos presentes na natureza estão dispostos das mais variadas formas físicas, sendo elas da perfeita fluidez a total solidez. Não obstante, alguns elementos são compostos por características combinadas, apresentando um estado intermediário destas propriedades, mas não podem existir em cada corpo na mesma proporção (MAXWELL, 1965, p. 31).

Para fins de aplicação, torna-se necessário a determinação de coeficientes que define a constituição dos corpos relativos à distância de suas respectivas moléculas. Vários estudiosos como Leibnitz, Bernoulli, Euler, Varignon, Young, La Hire e Lagrange, estimaram, através de investigação prática, coeficientes relacionados ao equilíbrio de sólidos elásticos quando sujeitos a determinado tipo de esforço. Segundo Chyanbin (2010, p. 3), as forças aplicadas aos sólidos causam deformações, resultando em uma alteração relativa da posição dos pontos em um corpo contínuo. A mudança na posição relativa dos pontos pode ser classificada de acordo com a natureza da deformação.

Todos os materiais sólidos podem ser deformados quando projetado para cargas de utilização. Até certas cargas limitantes, um sólido recupera suas dimensões originais quando a carga é removida. A recuperação das dimensões originais de um corpo deformado quando a carga é removida é conhecida como comportamento elástico (GEORGE; DIETER, 1961, p. 6).

Os métodos mais utilizados para determinação dos coeficientes de elasticidade foram feitos com aplicação de tensões sobre corpos de prova, de forma que essas tensões, além de alterar a distância entre duas moléculas, alteram a temperatura do sólido e esse fenômeno não deve ser desconsiderado.

A teoria de Stokes (1819, p. 311), define que - Seja  $-A\delta$  as pressões correspondentes a uma dilatação linear uniforme  $\delta$  quando o sólido estiver em equilíbrio, supõe que ele se torne  $-mA\delta$ , em consequência do calor desenvolvido quando o sólido está em um estado de vibração rápida.

Além dos coeficientes de deformação linear que caracteriza a elasticidade sob a variação nas dimensões lineares de um corpo, a elasticidade cúbica que caracteriza a elasticidade sob a variação no volume de um corpo, retratados por Rusanov e Krotov (1979), também é um coeficiente de resistência que define a chamada elasticidade.





## 2.2 Sólidos Transparentes

O desenvolvimento de ligas formadoras de vidro levou a avanços interessantes na ciência dos metais líquidos. Por exemplo, a tensão elástica Hookiana que um vidro metálico possa suportar tensão ou flexão é pelo menos o dobro dos materiais cristalinos comercialmente úteis comuns. Em aplicações do tipo "mola", ao ceder, os vidros metálicos tendem a formar faixas de cisalhamento localizadas. A localização do cisalhamento está associada à ausência de mecanismos de alisamento (endurecimento), possíveis mecanismos de amolecimento por deformação e amolecimento térmico durante o aquecimento adiabático do material (JOHNSON, 1999).

Ligas amorfas apresentam boas propriedades mecânicas estáticas e dinâmicas, viabilizando seu uso como materiais estruturais. A transparência óptica embora pareça ser restritivo, é uma característica essencial dos sólidos utilizados em engenharia, como aplicações em sistemas de blindagem transparente descrito por Straßburger (2009), apresentando grande aplicabilidade nos setores de transportes, comerciais, residenciais, equipamentos de aplicação da lei, além de sistemas de arquitetura requisitos em certos edifícios (PATEL et al. 2000).

## 2.3 Linhas Isocromáticas

A evolução no tempo das linhas isocromáticas para o campo de tensão em materiais isotrópicos, sujeito a tensão uniaxial, fora essencial para a engenharia das estruturas. Ao observar um material sob tensão e em seguida o descarregar, as ondas de descarga emanam em todo o corpo em forma de linhas. Essas linhas, é claro, correspondem aos padrões marginais da fotoelasticidade. A primeira vantagem de tais representações está em sua contribuição para visualizar como o padrão de tensão se desenvolve, como as frentes de onda se espalham e onde estão as concentrações de estresse. A segunda vantagem está na conexão entre linhas isocromáticas e padrões de franja de fotoelasticidade (BARCLAY; TAIT; MOODIE, 1987).

Dentro dos limites de um corpo, o estado de estresse é definido de maneira única e os esforços e tensões são contínuos. Em um mesmo ponto de um mesmo corpo com as mesmas condições de contorno, pode haver apenas um estado de estresse. A exigência de que o padrão isocromático ser de valor único é análogo ao exigido que a superfície topológica não tenha declives verticais (falésias) dentro do campo. Da propriedade da singularidade, segue-se que linhas isocromáticas de ordens diferentes não se cruzam. Por causa da continuidade, as linhas isocromáticas são semelhantes para contornos topológicos que terminam nos limites do padrão ou formam curvas fechadas (DURELLI; SHUKLA, 1983).

Quando uma carga é aplicada, as tensões são transmitidas ao material fotoelástico transparente, que então se torna duplamente refrativo. Essa mudança,



ou birrefringência, é diretamente proporcional à intensidade do estresse. Se uma superfície refletora for fornecida na estrutura, a birrefringência pode ser observada usando luz polarizada em um polariscópio de reflexão. Quando examinados no campo de luz polarizada do instrumento, são observados padrões de franjas pretas e coloridas que revelam a geografia completa das deformações mecânicas na estrutura e podem ser interpretadas em termos de tensão principal. Quando um raio de luz entra em um material duplamente refrativo na incidência normal, o material sob tensão divide o raio em dois componentes polarizados no plano. Quando os raios estão  $180^\circ$  fora de fase, aparecem linhas coloridas ou pretas, conhecidas como linhas isocromáticas. Quando a luz monocromática é usada, essas linhas são pretas. Quando a luz branca é usada, os padrões aparecem colorido (HAHN; FOU-SER, 1962).

## 2.4 Luz Polarizada

A luz polarizada é difundida em nosso mundo, e devemos entendê-la, medi-la e usá-la em nosso favor. O desenvolvimento histórico da ciência da luz polarizada está entrelaçado com a história da óptica e nossa compreensão física fundamental do mundo natural. Como em muitas outras descobertas básicas, nunca saberemos quem ou por quem a luz polarizada foi observada ou usada pela primeira vez (GOLDSTEIN, 2017, p. 17).

Para transformar a luz natural em luz polarizada, são utilizadas lentes ou placas denominadas filtros polarizadores ou polaroides e retardadores de onda. Esses filtros tem a característica de absorver as componentes da luz que não vibram na mesma direção de seu eixo de polarização. Os retardadores de ondas são utilizados para introduzir um atraso na vibração da onda (SCHIAVON, 2010).

Os conceitos de luz polarizada são aplicados em várias áreas da engenharia, uma das mais importantes é o método óptico da fotoelasticidade, empregado em análise experimental de estruturas sujeitas a solicitações complexas. O método baseia-se numa propriedade característica de certos materiais transparentes, cujo comportamento óptico se altera em função do estado de tensão ou de deformação a que estão sujeitos. A fotoelasticidade é o método ideal quando se pretende obter informações sobre a distribuição das tensões em regiões extensas e uma estrutura ou componente mecânico. A descoberta do efeito fotoelástico é atribuída a Sir David Brewster, que em 1816 a detectou pela primeira vez ao observar uma placa de vidro temperado atravessada por um feixe de luz polarizada (GOMES; VAZ, 2004).

A análise fotoelástica, como é normalmente entendida, preocupa-se essencialmente com a determinação experimental da diferença e direções de duas tensões principais cujas linhas de contorno são chamadas "linhas isocromáticas" e "linhas isoclínicas" respectivamente, em elasticidade bidimensional, normalmente determinadas por observação com luz polarizada (NISIDA; SAITO, 1964).



Um número de materiais amorfos transparentes que são opticamente isotrópicos tornam-se opticamente anisotrópicos quando sob tensão e exibem características semelhantes aos cristais, como a propriedade de dupla refração. Ao descarregar, o efeito desaparece. Este efeito observado por Sir David Brewster é conhecido como refração dupla temporária. Quando esses materiais são carregados e observados em um campo de luz polarizado, a refração dupla temporária produz bandas de interferência conhecidas como isocromáticas, ou franjas de tensão, cada uma das quais representa o local dos pontos da mesma tensão máxima de cisalhamento no plano normal do modelo ao feixe de luz incidente. A ordem da franja, ou número, é proporcional à tensão máxima de cisalhamento. Assim, se observarmos um ponto em um modelo transparente em um campo de luz polarizado enquanto ele é carregado, observaremos (com luz monocromática) a mudança de cor de escuro para brilhante para escuro, representando um ciclo óptico completo. A faixa escura inicial seria a ordem de franja zero em um polariscópio definido para a extinção da luz, a segunda ordem de franja uma, depois duas, três etc. Essas bandas formam padrões semelhantes ao contorno em todo o modelo. Bandas estreitas espaçadas indicam regiões com altos gradientes de estresse. Bandas amplas e amplamente separadas indicam regiões com baixos gradientes de estresse (SMITH, 1981). Esses efeitos são mostrados na figura 1.

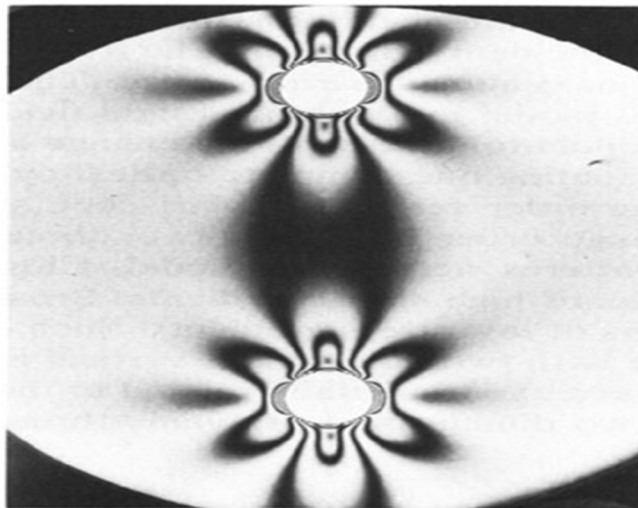


Figura 1 - Placa com dois orifícios sob tensão uniaxial vertical  
Fonte: Smith, 1981.

Quando dizemos que um meio elástico é isotrópico, queremos dizer que certas relações se mantêm entre as constantes elásticas (de modo que duas são suficientes para fornecer a afirmação da Lei de Hooke); é claro, então, que um meio que é elasticamente isotrópico sob estresse zero pode deixar de ser elasticamente isotrópico quando o estresse é aplicado (MURNAGHAN, 1944).

O método da análise óptica de tensões foi aplicado por Maxwell (1965, p. 66), no caso em que, duas superfícies cilíndricas feitas de geleia de classe única de isinglass, cujos eixos são perpendiculares ao plano de uma placa elástica indefinida, foram igualmente torcidos na mesma direção. O resultado desta operação pode ser declarado geometricamente.

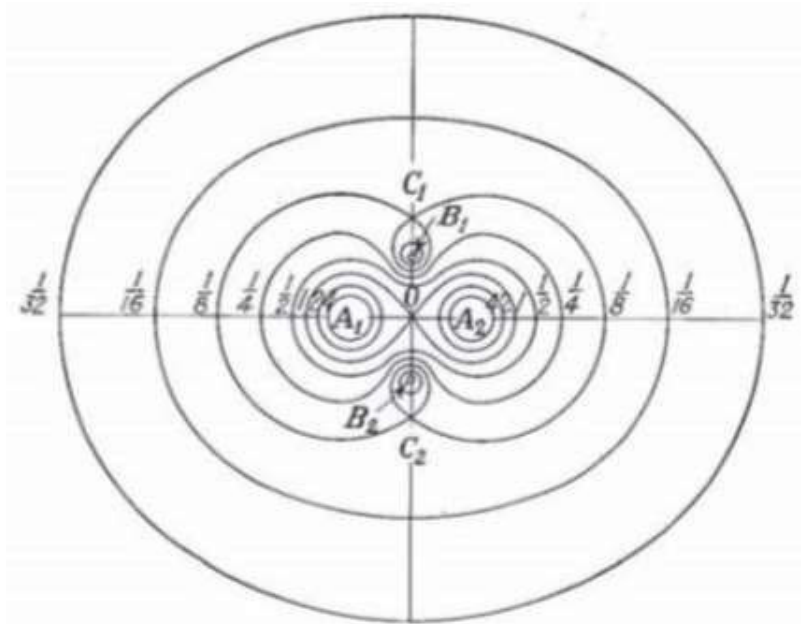


Figura 2 - Linhas isocromáticas  
 Fonte: Timoshenko, 1953, p. 271.

A diferença do retardo dos raios de luz polarizados opostos passando perpendicularmente a qualquer ponto do plano varia diretamente como o produto de suas distâncias de  $B_1B_1$  e  $B_2B_2$  e inversamente como o quadrado do produto de suas distâncias de  $A_1A_1$  e  $A_2A_2$ . O retardo é infinito nos pontos  $A_1A_1$  e  $A_2A_2$ ; desaparece em  $B_1B_1$  e  $B_2B_2$ ; e se o retardo for tomado como unidade, as curvas isocromáticas 2 e 4 cercam  $A_1A_1$  e  $A_2A_2$ ; aquele em que o retardo é a unidade tem duas voltas e passa por 0; as curvas  $\frac{11}{22}$  e  $\frac{11}{44}$  são contínuas e têm pontos de flexão contrária; a curva  $\frac{11}{88}$  tem múltiplos pontos em  $C_1C_1$  e  $C_2C_2$ , onde  $A_1C_1A_1C_1 = A_1A_2A_1A_2$ , e dois loops em torno de  $B_1B_1$  e  $B_2B_2$ , as outras curvas, para as quais  $I = \frac{1}{16}, \frac{1}{32}, \frac{1}{16}, \frac{1}{32}$ , etc., consistem em cada um dos dois ovais em torno de  $B_1B_1$  e  $B_2B_2$ , e uma porção externa em torno de todas as curvas anteriores (MAXWELL, 1965, p. 66-67).

Em um caso posterior Maxwell passa a descrever o método de determinar as pressões em um caso geral, aplicando-o ao caso de um triângulo de vidro de placa não recozido.

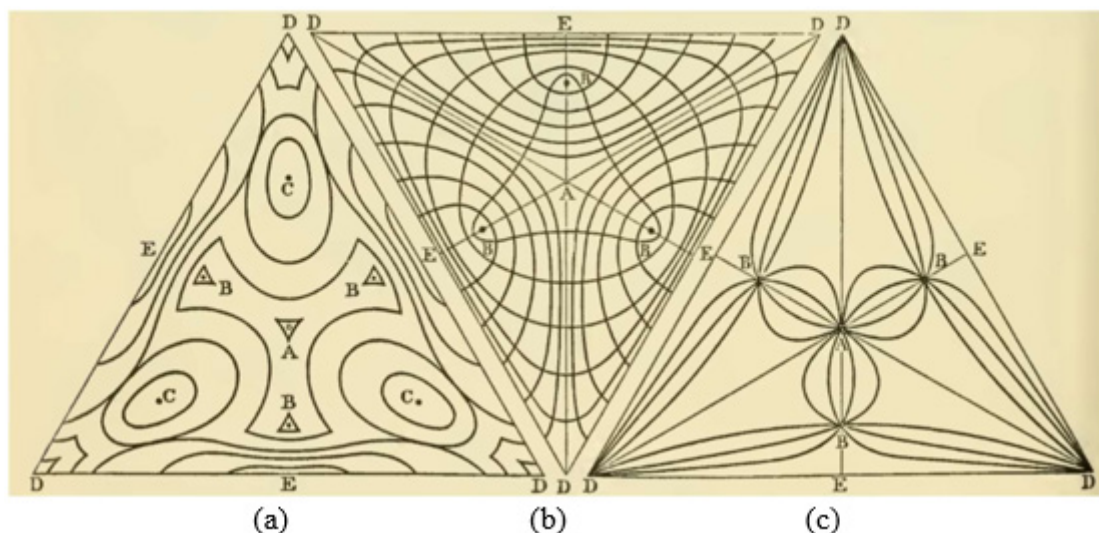


Figura 3 - triângulo de vidro de placa não recozido  
 Fonte: Adaptado de Maxwell, 1965, p. 68.

As linhas de igual intensidade da ação na luz são vistas sem interrupção, usando luz polarizada circularmente. Eles estão representados na Fig. 2a, onde *A*, *BBB*, *DDD* são os pontos neutros ou pontos de não ação na luz e *CCC*, *EEE* são os pontos em que essa ação é maior; e a intensidade da ação em qualquer outro ponto é determinada por sua posição em relação as curvas isocromáticas (MAXWELL, 1965, p. 68).

A direção dos eixos principais de pressão em qualquer ponto é encontrada transmitindo luz polarizada do plano e analisando-a no plano perpendicular ao da polarização. A luz é então restaurada em todas as partes do triângulo, exceto nos pontos em que um dos eixos principais é paralelo ao plano de polarização. É vista uma faixa escura formada por todos esses pontos, que muda de posição quando o triângulo é girado em seu próprio plano. Fig. 2c representa essas curvas para cada décimo quinto grau de inclinação. A partir destas é possível encontrar as curvas de direção de compressão e dilatação, como representado pela fig. 2b. As curvas cuja direção corresponde à da compressão é côncava em direção ao centro do triângulo e cruza em ângulos retos as curvas de dilatação (MAXWELL, 1965, p. 69).

### 3. METODOLOGIA

A presente pesquisa é de cunho qualitativo, tendo como ponto inicial a tradução do texto original de Maxwell, intitulado: "On the Equilibrium of Elastic Solids", e do texto de nº 58. James Clerk Maxwell (1831-1879), do livro de Stephen P. Timoshenko, intitulado: History of Strength of Materials, Publicado em 1953. Conforme demonstrado na tabela 1.

Tabela 1 – Metodologia

<b>ETAPA</b>	<b>ATIVIDADE</b>	<b>RESULTADO</b>
<b>Inicial</b>	Tradução na íntegra: - On the Equilibrium of Elastic Solids; e - Texto de nº 58. James Clerk Maxwell (1831-1879).	- Primeiras conclusões acerca das ideias de Maxwell; e - Composição dos tópicos para embasamento teórico.
<b>Busca por acervo científico</b>	Tradução parcial (quando necessário): resumo e introdução.	Priorização das principais bases teóricas.
<b>Classificação do acervo científico</b>	Critério de inclusão: Língua estrangeira (preferencial).	90% da bibliografia na língua inglesa.
<b>Tradução</b>	Tradução integral, ou por capítulo, da bibliografia selecionada.	Composição de forma lógica e coerente da fundamentação teórica desta pesquisa.
<b>Resultados</b>	Análise e discussão embasada por revisão na literatura.	Pesquisa conclusiva, de acordo com os objetivos.

Fonte: O autor (2020)

Com base nos critérios de seleção das publicações, foi montado uma estrutura lógica para composição do referencial teórico da pesquisa, fundamentados pelos assuntos abordados por Maxwell em seu artigo. Diante das conclusões, foi feita uma busca por pesquisadores que tinha relação direta com o artigo de Maxwell e suas contribuições no campo dos sólidos elásticos, e com as interpretações de Timoshenko acerca do publicado no artigo "On the Equilibrium of Elastic Solids" de Maxwell.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Maxwell inicia o artigo "On the Equilibrium of Elastic Solids" com algumas críticas direcionadas à matemáticos e seus métodos para a determinação da constituição dos corpos e suas leis de ação molecular. Ele afirma que as experiências de Oersted provaram estar em desacordo com as teorias matemáticas de Navier, Poisson, Lamé e Clapeyron. Essas teorias foram fundadas com base na afirmação de que os corpos sólidos são compostos de moléculas distintas, e são mantidas a uma certa distância umas das outras pelos princípios opostos de atração e calor. Desta forma, as equações de elasticidade deduzidas dessa premissa contêm apenas um coeficiente, que varia de acordo com a natureza da substância. Maxwell defende que a insuficiência de um só coeficiente pode ser comprovada pela existência de corpos de diferentes graus de solidez.

Os estudos de Maxwell o fez concluir que não havia relatos algum de experimentos sobre a relação entre o poder de refração duplamente comunicado ao vidro e outros sólidos elásticos por compressão e a pressão que o produz. Sobre este



princípio ele aponta cálculos dos fenômenos observados pela luz polarizada nos casos em que o sólido é delimitado por planos paralelos.

As equações são deduzidas com base na teoria de Stokes e aplicadas em casos práticos, considerando um limite de aplicação de tensões em que o sólido não deve ultrapassar o limite da perfeita elasticidade.

Tendo encontrado as equações gerais do equilíbrio dos sólidos elásticos, Maxwell trabalha na aplicação em alguns exemplos de cálculo da rigidez de figuras sólidas que proporcionam a determinação dos coeficientes de elasticidade linear, elasticidade cúbica e um coeficiente em particular que expressa a relação da desigualdade de pressões em um sólido com a força duplamente refratária produzida. Os exemplos se dividem em casos que juntos somam 14 aplicações.

O professor Iain A. MacLeod (2015), publicou na Fundação James Clerk Maxwell, sobre algumas das contribuições de Maxwell, nas entrelinhas ele destaca pontos que julga mais importante do "The Equilibrium of Elastic Solids", enfatizando que o autor procedeu à aplicar suas equações a um número de casos para comprovação de seus métodos. MacLeod destaca e comenta os casos 1, 5 e 12, por considerar os de maior interesse dos engenheiros estruturais da atualidade:

Caso 1 - a rigidez de um cilindro oco (fixo em uma extremidade) e torcido na outra extremidade por um par, Maxwell obtém uma expressão para o grau de rotação de um cilindro sem torção. Como Maxwell não se referiu a outras fontes, sua expressão pode ser a primeira a ser publicada.

Caso 5 - a rigidez de uma viga retangular sob flexão. Maxwell derivou uma expressão que concorda com Navier.

Caso 12 - a rigidez de uma viga, levando em consideração a deformação por flexão e cisalhamento. Ele não faz referência a outras fontes para o componente de deformação por cisalhamento e, portanto, isso pode ser original.

Stephen P. Timoshenko (1953), publicou a resenha - James Clerk Maxwell (1831- 1879), onde ele apresenta uma breve biografia sobre Maxwell, narrando seu ingresso na Universidade de Edimburgo, a continuação de seus experimentos com luz polarizada e os interesses por mecânica e física desenvolvidos neste período. Timoshenko destaca o artigo "On the Equilibrium of Elastic Solids" de Maxwell, onde ele expõe suas análises e críticas sobre os 14 casos práticos realizados pelo autor. Diante dessas interpretações e publicações sobre as contribuições de Maxwell, Timoshenko se torna referência e impulsiona a publicação de diversas obras na área da mecânica estrutural.

Com base nestas contribuições, Rombakh (2019) cita trechos de publicações de Timoshenko e relaciona com as teorias da elasticidade de Maxwell. Rombakh afirma:

“Concordamos com a avaliação de Timoshenko, que ele deu ao trabalho de Maxwell, mas apenas onde ele escreve que ninguém antes de Maxwell amarrava a teoria da elasticidade proposta com experimentos com tantos detalhes. Timoshenko está profundamente enganado em todos os outros aspectos (ROMBAKH, 2019)”.

As declarações de Rombakh (2019) estão diretamente relacionadas com o fato de os trabalhos de Timoshenko formarem a base de livros didáticos e outros trabalhos científicos sobre a mecânica da força. Considera ainda que os autores de artigos que mencionam Maxwell não se referiram ao seu trabalho, mas à revisão de Timoshenko, complicando o aparato matemático, afastando-se do sentido físico. A mudança das leis da física por equações matemáticas levou ao fato de que elas introduziam parâmetros adimensionais adicionais que não são substantiados experimentalmente.

Isso não apenas obscurece a possibilidade de resolver essas equações, como em muitas vezes as torna sem sentido. Mudanças em parâmetros devido a interpretações podem causar prejuízos de décadas no estudo dos fenômenos estruturais.

De acordo com Rombakh (2019), Maxwell usou os coeficientes cúbicos e lineares de plasticidade. Ele citou não apenas as equações que estabelecem um vínculo entre elas, mas propôs métodos experimentais para sua determinação e demonstrou esses métodos usando exemplos específicos. S.P. Timoshenko não faz isso. Negligenciar as conclusões de Maxwell levou ao fato de que a equação baseada em hipóteses que não são confirmadas experimentalmente, não permite prever o desenvolvimento de processos que levam à destruição.

Uma avaliação adequada das ideias de Maxwell é possível estudando minuciosamente uma carta que ele envia a William Thomson em 18 de dezembro de 1856. A carta não foi amplamente publicada, levando ao fato de que uma ideia brilhante permanece oculta e a mecânica da força e da fratura atrasada por décadas.

A seguir, destaco trechos da carta de Maxwell que julgo pertinente a discussão em questão.

Direcionando-se a Thomson, Maxwell afirma:

[...]

“(I. B) No meu artigo sobre elasticidade, produzo exemplos (não fenômenos novos) para mostrar que, nesses casos, a pressão não poderia existir como os efeitos que estavam na mesma direção sobre todo o corpo e não podia ser equilibrada. Ao mesmo tempo, afirmo que o guta-percha, quando aquecido a um certo ponto, volta à sua forma original.” [...]

“Se você examinar qualquer seção plana de um pedaço de vidro não recozido, descobrirá que onde  $p$  é o perp de estresse para  $dS$ . Essa é toda a pressão = toda a tensão na seção”.

“Você não deve me fazer participante dos experimentos de Sir D.B. Brewster.





Os fenômenos são todos devidos a ele (exceto gutta serena dos quais eu não conheço a história óptica) e eles datam de 1815 e assim por diante.

(I.C) A redução à refração dupla é Fresnel's.

Aquela do calor à ação mecânica - Herschel. Prova de que esta ação não é estresse - Maxwell.

Prova de que isso ocorre com dados numéricos para vários tipos de vidro - Wertheim."

[...]

"A resiliência da rigidez  $R_2$  (que é o inverso da plasticidade) é o trabalho necessário para ser gasto em pura distorção, a fim de produzir uma mudança permanente de forma no elemento. Tenho fortes razões para acreditar que quando atinge um certo limite =  $R_2$  então o elemento começará a ceder. Se o corpo estiver duro, a desfiguração continuará até que esta função  $U_2$  (que realmente representa o trabalho que o elemento faria na recuperação de sua forma) diminuiu para  $R$  por uma alteração da dimensão permanente.

Agora  $abc$  sejam as pequenas alterações permanentes devido ao fato de  $U_2 > R_2$  por um instante. Sempre que  $U_2 = R_2$  o elemento tem o máximo de trabalho possível para suportar. Qualquer outro trabalho realizado no elemento será consumido em alterações permanentes.

Portanto, se  $U_2 = R_2$  e, no instante seguinte, você aumenta  $U$ ,  $dU$  deve ser perdido de alguma maneira".

Rombakh cita Timoshenko na íntegra, para que seja clara a diferença do escrito por Maxwell com o interpretado por Timoshenko:

"Maxwell sugeriu que o uso da expressão para energia de deformação na determinação dos valores críticos de tensões combinadas. Ele mostrou que a energia de deformação total por unidade de volume pode ser resolvida em duas partes: (1) a energia de tensão ou compressão uniforme e (2) a tensão da energia da distorção. Considerando agora a energia de deformação da distorção, Maxwell faz a afirmação: "Eu tenho fortes razões para acreditar que quando [a energia de deformação da destruição] atingir certos limites, o elemento começará a ceder". Mais adiante, Timoshenko afirma: "É a primeira vez que escrevo sobre esse assunto. Eu nunca vi nenhuma investigação da pergunta: 'Dada a tensão mecânica em três direções no elemento, quando ele cederá?'" Vimos que Maxwell já tinha a teoria da produção, que agora chamamos de teoria da energia de distorção máxima. Mas ele nunca mais voltou a essa questão e suas ideias só se tornaram conhecidas após a publicação das cartas de Maxwell. Os engenheiros levaram um tempo considerável antes de finalmente desenvolverem a teoria idêntica à de Maxwell (ROMBAKH, 2019)".

A citação acima indica que Timoshenko distorceu completamente a ideia de Maxwell.

Rombakh ainda lista alguns pontos críticos ignorados por Timoshenko. Como segue:

1. A primeira parte da letra (C) escrita por Maxwell, a fim de mostrar a diferença entre o significado físico de tensão e estresse. Ele indica claramente



que “ação não é estresse”. Timoshenko ignora completamente esta parte da carta (tabela 2).

- Maxwell oferece uma equação, usando o qual é possível calcular a energia potencial da distorção, mas Timoshenko não as mostra ao leitor, dando a impressão de que: “Levou aos engenheiros um tempo considerável antes de finalmente desenvolverem a teoria idêntica à de Maxwell”.

Tabela 2 – Comparação de interpretações entre Maxwell e Timoshenko

	<b>Interpretação de Maxwell</b>	<b>Interpretação de Timoshenko</b>
<b>Coefficientes</b>	Determinados a partir de utilização de equações de vínculo e métodos experimentais	Baseados em hipóteses que não são confirmadas experimentalmente
<b>Tensão e estresse</b>	Ação não é estresse	Ignora completamente
<b>Energia de distorção</b>	- $U_1U_1$ sendo o trabalho realizado em condensação ... isso deve aumentar rapidamente à medida que o corpo é condensado; - $U_2U_2$ referente a distorção.	- Energia de tensão ou compressão uniforme (1); - Energia de deformação da distorção (2).
<b>Energia total de distorção</b>	$U = U_1 + U_2$	$U = (1) + (2)$
<b>Equações de distorção</b>	$U = A(\alpha^2 + \beta^2\gamma^2) + B(\beta\gamma + \gamma\alpha + \alpha\beta)$	$U = \frac{1+V}{3E} \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]$
<b>Crítérios de destruição</b>	$(\alpha^2 + \beta^2\gamma^2) - (\beta\gamma + \gamma\alpha + \alpha\beta) < R_2$	$\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] < u_2$
<b>Razão de Poisson</b>	Não contém estresse ou módulo ou razão de Poisson.	Contém coeficiente de Poisson.
<b>Módulo de Young</b>	Não contém.	Utiliza módulo de Young.

Fonte: O autor (2020)

Maxwell nunca usou o termo “energia tensa”, como escreve Timoshenko. As equações propostas por Maxwell são fundamentalmente diferentes das equações propostas antes e depois dele, porque não contém estresse ou módulo ou razão de Poisson (tabela 2).

Maxwell entendeu que a dimensão dos coeficientes de proporcionalidade coincide com a dimensão da densidade superficial de energia, mas não segue o caminho que Griffith fez em 64 anos.



Timoshenko afirma que: "... Maxwell já tinha a teoria da que chamamos agora de teoria da energia de distorção máxima". Mas a Tabela 2 refuta totalmente essa conclusão.

É impossível entender e apreciar a brilhante contribuição de Maxwell, deixando apenas as posições da mecânica clássica.

## 5. CONCLUSÃO

O engenheiro Timoshenko foi um grande contribuidor no desenvolvimento dos conceitos modernos usados hoje, principalmente, na teoria dos sólidos elásticos. Produziu acervos de materiais didáticos que são pilares da educação em todo o mundo, moldando assim os currículos de diversos profissionais da atualidade. No entanto, a partir dos resultados alcançados, o presente trabalho aponta ainda que Timoshenko ocultou a grandeza das ideias de Maxwell e impulsionou publicações científicas no meio acadêmico e profissional que nem ao menos citavam Maxwell.

A teoria da elasticidade de Maxwell foi proposta com experimentos com tantos detalhes, que a literatura carece de trabalhos que conseguiram expressá-la com a mesma proporção. A introdução de parâmetros substanciados experimentalmente a torna fundamentalmente única em vários aspectos, como nas equações de vínculo usadas para determinação dos coeficientes e a demonstração de suas aplicações através de exemplos específicos. Portanto, a teoria de Maxwell é uma proposta promissora que pode ser melhor explorada para abordar problemas de engenharia envolvendo mecânica dos sólidos. Como sugestão para trabalhos futuros, destaco as contribuições de Maxwell na determinação de diagramas de forças, intitulado 'On Reciprocal Figures and Diagrams of Forces', também estudados por Timoshenko, representando grande relevância no campo das engenharias.

## Referências

- BARCLAY, D. W., TAIT, R. J., MOODIE, T. B. **Isochromatic Lines and Dynamic Punching of a Stressed Elastic Plate**. Quarterly of Applied Mathematics. v. 44, n. 4, P. 757-772, Canada- 1987.
- CHYANBIN HWU. **Anisotropic Elastic Plates**. Springer. New York, Dordrecht, Heidelberg, London. 2010.
- DURELLI, A. J., SHUKLA, A. **Identification of isochromatic fringes**. Experimental Mechanics, v. 23 n. 1, p. 111-119. (1983). doi:10.1007/bf02328689
- GEORGE E; DIETER, JE. **Mechanical Metallurgy**. MCGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1961.
- GOMES, J. F. S.; VAZ, M. A. P. **Análise experimental de tensões**. Faculdade de Engenharia, Universidade do porto, 2004.
- GOLDSTEIN, D.H. **Polarized Light**. Ed. 3º. CRC Press, New York, 2017.
- HAHN, K. F., & FOUUSER, D. F. **Methods for determining stress distribution in adherends and adhesives**.



- Journal of Applied Polymer Science, v. 6 ed. 20, p. 145–149. (1962). doi:10.1002/app.1962.070062005
- JOHNSON, W. L. **Bulk Glass-Forming Metallic Alloys**: Science and Technology. MRS Bulletin, v. 24, n. 10, p. 42–56. (1999). doi:10.1557/s0883769400053252
- MAXWELL, J. C. **On the Equilibrium of Elastic Solids**. The Scientific Papers of James Clerk Maxwell. V. 1. New York: Dover Publications, 1965.
- MACLEOD, I. A. **Maxwell's Articles on Structural Mechanic**. Newsletter: of the James Clark Maxwell Foundation, n. 6, 2015. ISSN 2058-7511.
- MURNAGHAN, F. D. **The Compressibility of Media under Extreme Pressures**. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 30, n. 9, p. 244-247, 1944. doi:10.1073/pnas.30.9.244.
- NISIDA, M., SAITO, H. **A New Interferometric Method of Two-Dimensional Stress Analysis**. Experimental Mechanics, v. 4, n. 12, p. 366-376. (1964). doi:10.1007/bf02322795
- PATEL, P. J., GILDE, G. A., DEHMER, P. G., & MCCAULEY, J. W. **Transparent ceramics for armor and EM window applications**, Proc. SPIE v. 4102, Inorganic Optical Materials II, (2000). doi:10.1117/12.405270
- ROMBAKH, VLADIMIR. **TWO INTERPRETATIONS OF MAXWELL'S SOLID MECHANICS**. Catastrophe Prevention Research Laboratory, Edmonds, WA USA, (2019).
- RUSANOV, A. I., KROTOV, V.V. **Gibbs Elasticity of Liquid Films, Threads, and Foams**. Progress in Surface and Membrane Science, v. 13. Department of Chemistry Leningrad State University Leningrad, USSR, 1979.
- SCHIAVON, J. A. **Aplicação da técnica da fotoelasticidade na análise de fundações por estacas helicoidais**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.
- SMITH C.W. **Use of photoelasticity in fracture mechanics**. In: Sih G.C. (eds) Experimental evaluation of stress concentration and intensity factors. Mechanics of Fracture, vol 7. Springer, Dordrecht (1981).
- STOKES, G. G. **of the Equilibrium and Motion of Elastic Solid**. Transactions of the Cambridge Philosophical Society. V. 8. Printed at the University Press ,1819.
- STRÄßBURGER, E. **Ballistic testing of transparent armour ceramics**. Journal of the European Ceramic Society, v. 29 ed. 2, p. 267–273. (2009). doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2008.03.049
- TIMOSHENKO, S. P. **History of Strength of Materials**. Nova York: McGraw- Hill, 1953.



# CAPÍTULO 3

## **ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO EM JUNTAS PARAFUSADAS DE UMA ESTRUTURA DE AÇO NA ZONA MARÍTIMA**

ANALYSIS OF SCREW JOINT DEGRADATION OF A STEEL STRUCTURE  
IN THE MARITIME ZONE

**Antonio Lisboa Pereira Nascimento**  
**Ramaiany Carneiro Mesquita**

## Resumo

É crescente a preocupação em estudar os efeitos que os ambientes costeiros/ fluviais têm na degradação das estruturas metálicas. Pois é uma temática bastante discutida em todo o mundo devido ao alto custo na manutenção desses tipos de estruturas, tendo como causa principal a alta degradação constante a que estão sujeitas. Neste intuito, esse trabalho tem como objetivo analisar a influência do ambiente marítimo no processo de degradação em juntas parafusadas de uma estrutura de aço situada na zona marítima. O estudo foi idealizado a partir de uma revisão bibliográfica acerca da degradação em juntas parafusadas de uma estrutura de aço presente na zona marítima localizada sobre a ponte do rio Bacanga na cidade de São Luís no Maranhão. Foram realizadas algumas visitas ao local em estudo e coleta de informações e registros fotográficos. Assim, foi possível proceder abordando a evolução gradativa e necessária dos aços com o passar do tempo, conforme a necessidade das mais variadas estruturas. Com isso, foi constatado um alto índice de degradação proveniente do local em que a estrutura se encontra, condições climáticas de exposição e problemas oriundos da corrosão atmosférica constante, agentes físicos e biológicos. Com o estudo acerca do assunto, concluiu-se que embora parafusos estruturais ASTM A325 venham a sofrer pela degradação provocada pela corrosão galvânica e atmosférica, ainda sim devem ser empregados em estruturas de grande responsabilidade.

**Palavras-chave:** Degradação. Corrosão. Zona marítima.

## Abstract

There is a growing concern to study the effects of coastal / fluvial environments that suffer degradation of metallic structures. It is a topic widely discussed worldwide, due to the high cost of maintaining these types of structures, having as main cause the constant high degradation to which they are subjected. In this case, this work aims to analyze the influence of the maritime environment on the degradation process in bolted joints of a steel structure located in the maritime zone. The study was conceived based on a bibliographic review on the degradation in bolted joints of a steel structure present in the maritime zone located over the bridge of the Bacanga river in the city of São Luís in Maranhão. Some visits were made to the study site and collection of information and photographic records. Thus, it was possible to follow the process of gradual evolution and demand that objects begin to pass time, according to the need for the most variable variables. With that, it was found a high rate of local degradation in which the structure is, climatic conditions of exposure and problems arising from constant atmospheric corrosion, chemical and biological agents. With the study on the subject, it was concluded that the screws applied ASTM A325 suffer damage caused by the degradation caused by galvanic and atmospheric corrosion, but they must still be used in great responsibilities.

**KeyWords:** Degradation. Corrosion. Maritime zone.



## 1. INTRODUÇÃO

Estruturas que utilizam o aço como principal matéria prima de construção, quando exposta a condições especiais, como em regiões próximas ao litoral principalmente, passa por um processo acelerado de deterioração dos materiais e de seus componentes principais de ligação, provocando intensa degradação localizada, podendo vir a ocasionar acidentes e conseqüentemente perdas incalculáveis de grandes dimensões tanto no âmbito econômico e ambiental, quanto no social.

A partir de uma revisão bibliográfica acerca do tema, constatou-se que é crescente a preocupação em estudar os efeitos que os ambientes costeiros/fluviais têm na degradação das estruturas metálicas e além do mais, é bastante discutida em todo o mundo devido ao alto custo na manutenção desses tipos de estruturas, tendo como causa principal a alta degradação constante a que estão sujeitas. Boa parte por vez se encontra em um estado crítico de conservação, sem receber a atenção necessária, não atendendo aos requisitos de segurança necessários, onde a qualquer momento pode vir a acontecer um colapso estrutural colocando a vida em risco de quem esteja presente no local.

Portanto, o principal objetivo deste trabalho foi analisar a influência que o ambiente marítimo tem no processo de degradação em juntas parafusadas das estruturas de aço situadas na zona marítima, a partir da análise de juntas parafusadas de ligação de uma tubulação, localizada sobre a ponte do rio Bacanga na cidade de São Luís no Maranhão.

Foi possível executar o projeto e concluir o trabalho através do estudo das principais características dos parafusos estruturais de aço ASTM A325 atualmente mais utilizados nas construções, identificando os processos e respectivas causas de sua degradação, evidenciando a importância que se deve tomar com estruturas metálicas presentes nas proximidades da costa marítima em relação ao seu estado gradativo de deterioração e fazendo uma análise da estrutura com uma vasta recolha de registros fotográficos.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 O aço como material indispensável na construção moderna

As estruturas, equipamentos e instalações metálicas foram com o passar do tempo sendo construídas e desenvolvidas de acordo com as necessidades da humanidade. Por sua vez as técnicas de fabricação do aço por ser mais vantajoso para se produzir do ponto de vista econômico e ambiental foram sendo aprimoradas e o tornando-se um dos principais elementos construtivos da sociedade mo-

derna (FVB, 2015).

Uma das grandes vantagens em se utilizar o aço em relação a outros materiais, é o fato de ser um material não natural, isto é, sujeito a todo um processo para a sua fabricação. Portanto, é um material homogêneo, fabricado segundo as normas pré-definidas que permitem um conhecimento eficaz das suas propriedades e características, assim possibilitando um menor risco de má fabricação ou execução (CRUZ e ALVALREZ, 2000).

Os tipos das mais variadas estruturas e materiais utilizados para diversos fins industriais e construtivos se tornaram ao longo do tempo mais sofisticados e resistentes, porém nenhum material ou estrutura até o momento pode ser considerado, de alguma forma, indestrutível, pois tendem a voltar à sua condição física original, que geralmente é de baixa energia e forma estável (BRUECKNER et al., 2014).

## 2.2 O uso de parafusos estruturais ASTM A325

Os parafusos ASTM A325 são fixadores de aço de alta resistência, empregados em ligações parafusadas estruturais e indicados em montagens de maior responsabilidade. Na sua fabricação passam por tratamentos térmicos, que os deixam altamente resistentes tornando-os diferentes dos parafusos comuns. São bastantes empregados em projetos que exigem grande resistência de cargas, como construções de prédios, construções metálicas, pontes, caminhos de rolamento, coberturas como pórticos e arcos, plataformas e maquinários pesado (HARD, 2018).

No campo da construção de estruturas em aço, por vezes se cria situações em que diferentes ligas metálicas são unidas e estão presentes em um mesmo sistema. É observável por exemplo nas ligações onde parafusos estruturais galvanizados a fogo, e em aço ASTM A325 denominado aço patinável, na qual são empregados nas uniões de componentes de estruturas em aço carbono comum, ou mesmo aço patinável. No entanto, a liga mais nobre do par galvânico tem sua velocidade de corrosão reduzida. Todavia, este tipo de corrosão pode promover danos superficiais à aparência da liga menos nobre ou, em casos extremos, uma perda de massa drástica, levando à uma redução contínua consideravelmente acelerada da vida útil do componente (PANNONI, 2004), como ilustrado na figura (1).







Figura 1 – Corrosão de componentes metálicos em juntas parafusadas  
Fonte: Eletrobras, 2012.

Os aços patináveis são sabidamente “mais nobres” do que os aços estruturais comuns. Isto ocorre devido à sua composição química diferenciada, contendo fundamentalmente, Cu, P, Cr, Ni e Si como elementos de liga, totalizando no máximo 3% da liga. Durante sua exposição à atmosfera, forma-se uma camada de óxidos densa, aderente e protetora na qual é desenvolvida sob a camada de ferrugem que é formada durante o processo sobre a superfície metálica atuando como retardante da sua corrosão. Portanto, o risco da corrosão galvânica depende de vários fatores cruciais. Além do aço utilizado, as características do ambiente em que estão expostos e os detalhes dos projetos [PANNONI, 2014?].

### 2.3 Caracterização do ambiente marítimo e sua influência na degradação do aço

O ambiente marítimo é considerado o ambiente que abrange as áreas influenciadas pelas proximidades ao oceano, incluindo as zonas costeiras/litorâneas. A zona costeira atinge por vezes aproximadamente cerca de 10 km da linha da costa. Todavia, existem uma série de características com múltiplos agentes altamente agressivos às estruturas metálicas construídas. Tais agentes, quer de origem física, química ou biológica, e a sua interligação fazem deste tipo de ambiente uma ameaça para as estruturas de aço. Portanto, as áreas litorâneas são consideradas um dos locais mais hostis e agressivos para os componentes metálicos construtivos (SERRA, 2012).

De acordo com Brueckner et al. (2014), os materiais e métodos até então empregados na engenharia da construção civil ou mecânica podem ser muito resistentes a intempéries a danos, todavia ainda podem mostrar sinais de fraqueza

e deterioração sob certas condições de exposição. Embora todos sejam capazes de fornecer uma certa resistência às condições ambientais, eles compartilham uma propriedade comum em que sua vida útil não é indefinida.

Algumas das principais causas da deterioração dos materiais nas estruturas metálicas da atualidade é o surgimento de manifestações patológicas, geralmente em reforços de aço estruturais de edifícios e em outros itens metálicos incorporados principalmente em regiões marítimas ou próximo a margem costeira. Tais manifestações podem ocorrer com maior frequência na forma de corrosão, ferrugem e oxidação causando tensões de tração muita das vezes levando a rachaduras ou delaminação do exterior (BRUECKNER et al., 2014).

Além disso, ambientes agressivos com alta porosidade, alta capacidade, deficiência na espessura da capa, são fatores predominantes à corrosão de reforços de aço (PERDRIX, 1992).

A problemática da corrosão nas regiões costeiras é particularmente relevante, tendo em vista a grande importância que possui para a humanidade. Pois cerca da metade da população mundial vive em regiões costeiras e os países em pleno processo desenvolvimento e industrialização tende a concentrar as suas plantas de produção nas proximidades do mar. A maior taxa de corrosão do aço nas atmosferas marinhas está associada a causas como: a natureza higroscópica de  $\text{Cl}^-$ , espécies (cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ), cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), cloreto de magnésio ( $\text{MgCl}_2$ ), que promove o processo de corrosão eletroquímica, favorecendo a formação de eletrólitos a umidade relativamente baixa e a solubilidade dos produtos de corrosão. Assim, no caso do ferro, que não forma cloretos básicos estáveis, a ação dos cloretos é mais pronunciada do que com outros metais (zinco, cobre, etc.) cujos sais básicos são apenas ligeiramente solúveis (ALCÁNTARA et al., 2017).

A corrosão atmosférica dos metais é um processo eletroquímico que ocorrem quando um meio aquoso se forma no metal. O eletrólito formado pode ser uma camada de umidade extremamente fina formado de apenas algumas monocamadas quando o metal se encontra úmido. Os principais promotores de corrosão metálica na atmosfera são precipitações aquosa na forma de chuva, neblina e a condensação da umidade. Ocorre devido a mudanças de temperatura, condensação capilar quando as superfícies são cobertas com produtos corrosivos, ou mesmo, depósito de partículas sólidas e condensação química a partir das propriedades higroscópicas de certas substâncias poluentes depositadas em sua superfície (COLE et al, 2004).

Os sais solúveis na superfície, resultantes da deposição de aerossóis atmosféricos e poluentes gasosos na forma de contaminantes contribuem amplamente para a umidade da superfície (SCHINDELHOLZ et al, 2014).

A atmosfera marinha é caracterizada pela presença de aerossol marinho. Cloretos de sódio são abundantes onde a fonte fundamental de mineralizadas é cons-



tituído por partículas finas de água salgada suspensas no ar na forma líquida ou sólida que são transportadas ao longo de massas de ar. Os sais marinhos são principalmente de NaCl, sendo que quantidades bastantes apreciáveis de íons de potássio, magnésio e cálcio são encontradas nas chuvas (COLE et al., 2013).

O ar oceânico é rico em aerossóis marinhos resultante da evaporação de gotas de água do mar que são transportadas mecanicamente pelo vento. O vento forte é a força responsável pela salinidade presente nas atmosferas marinhas, pois agita e transporta partículas de água do mar que se solidificam até mesmo por centenas de quilômetros. A turbulência provocada pelo vento introduz bolhas de ar na água que posteriormente explodem e lançam partículas de sal marinho na atmosfera e então acontece o fenômeno de transporte (ALCÂNTARA et al., 2015).

De acordo com Alcântara et al. (2015) a variação na salinidade atmosférica com a distância da costa marítima tem uma relação diretamente proporcional, como mostra o gráfico da figura 2. Sendo que a salinidade atmosférica está expressa no eixo Y em  $\text{mg Cl}^- / \text{m}^2 \cdot \text{d}$  e no eixo X a distância da costa em metros (m).

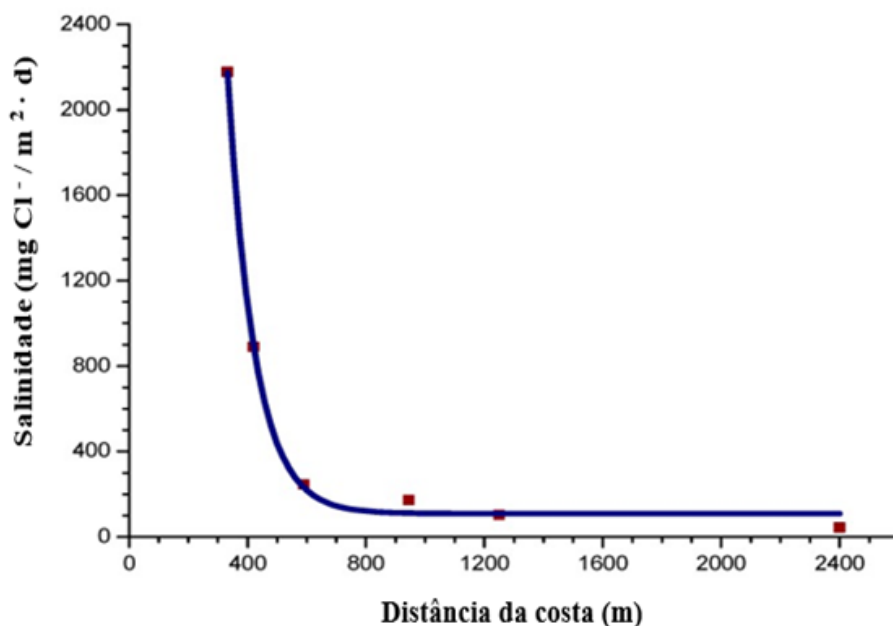


Figura 2 - Variação na salinidade atmosférica com a distância da costa.

Fonte: Morcillo M., Chico B., Mariaca L., Otero E. Salinity in marine atmospheric corrosion: Its dependence on the wind regime existing in the site, 2000.

As partículas de aerossol são arrastadas por ventos marinhos que se sedimentam após em certo tempo depois de percorrer uma certa distância. A distância percorrida pelos aerossóis marinhos depende da latitude, robustez da costa, ondulação da superfície terrestre e a diferença de temperatura diurna da terra e do mar, que varia de acordo com a estação do ano. A distância de arrasto pode aumentar consideravelmente devido uma redução no tamanho e na massa de partículas de aerossol devido a secagem das gotículas. No entanto, foi constatado por um estudo de longo prazo pela Academia nacional de Ciências da Rússia que a entrada de cloretos depende da velocidade média do vento total (marítimo + continental) e o produto da velocidade do vento por sua duração. Assim, através de estudos seria possível estimar valores de salinidade nas funções entre corrosão e fatores

ambientais em um local específico a partir de dados meteorológicos dispensando a necessidade de realizar testes de corrosão natural. Portanto, a corrida dos ventos marinhos é o parâmetro que tem maior influência na salinidade atmosférica (ALCÂNTARA et al., 2017; STREKALOV et al., 1994).

### **3. METODOLOGIA**

A primeira fase do trabalho consistiu em uma vasta recolha de informações sobre o estado da arte seguida de uma revisão bibliográfica acerca da degradação de estruturas de aço nas proximidades da costa marítima. Com o auxílio de todas as informações necessárias reunidas, foi possível proceder abordando a evolução gradativa e necessária dos aços com o passar do tempo, conforme a necessidade das mais variadas estruturas, equipamentos, instalações metálicas e materiais para diversos fins. Numa segunda fase, foram realizadas algumas visitas ao local em estudo. A primeira visita, além do contato inicial com o local, pretendeu-se uma idealização da metodologia a ser adotada para análise. Com percepções e registros acerca da situação do caso em estudo e com o recurso bibliográfico, foi possível iniciar a abordagem acerca da temática a partir do estudo teórico e prático e então chegar a uma conclusão final.

### **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

O estudo foi composto por uma abordagem dos fatores mais relevantes que contribuem para o desenvolvimento da intensa degradação de componentes metálicos estruturais presentes nas proximidades do mar. Para um melhor entendimento sobre o assunto, foi adotado uma estrutura específica onde foi constatado um alto índice de degradação proveniente do local em que se encontra e a condições climáticas de exposição da mesma.

A estrutura em estudo está localizada sobre o rio Bacanga na cidade de São Luís no Maranhão que mesmo sendo uma ilha tem privilegiada posição geográfica na costa marítima maranhense. No decorrer da estrutura tubular, encontra-se parafusos de ligação no qual os mesmos estão sofrendo uma drástica e acelerada degradação contínua devido ao estado gradativo de exposição em que se encontram, conforme mostra a figura 3.





Figura 3 – Corrosão estrutural na costa marítima.

Fonte: O próprio. Estrutura tubular em um estado avançado de degradação 2020.

É visivelmente notável que a estrutura cilíndrica assim como também seus componentes estruturais de ligação se encontram extremamente danificados. Isso se justifica devido a fatores como localização geográfica, mudanças climáticas, a natureza higroscópica de Cl, espécies (cloreto de sódio (NaCl), cloreto de cálcio (CaCl<sub>2</sub>), cloreto de magnésio (MgCl<sub>2</sub>), que promove o processo de corrosão eletroquímica, favorecendo a formação de eletrólitos a umidade relativamente baixa e a solubilidade dos produtos de corrosão e até mesmo a falta de manutenção da mesma. Agentes físicos, biológicos e químicos também possuem grande influência no estado gradativo das estruturas em aço. Pois de acordo com Serra (2012), existem uma série de características com múltiplos agentes altamente agressivos às estruturas metálicas construídas. Tais agentes, quer de origem física, química ou biológica, e a sua interligação fazem deste tipo de ambiente uma ameaça para as estruturas de aço. Portanto, as áreas litorâneas são consideradas um dos locais mais hostis e agressivos para os componentes metálicos construtivos.

Na figura 4 será possível ter uma visão mais detalhada dos parafusos de ligação onde em um mesmo sistema, devido a mudanças de temperatura, condensação capilar quando as superfícies são cobertas com produtos corrosivos, ou mesmo, depósito de partículas sólidas e condensação química a partir das propriedades higroscópicas de certas substâncias poluentes depositadas em sua superfície a corrosão implacável é evidente e visível.



Figura 4 - Parafusos de aço em estado avançado de degradação  
Fonte: O próprio, 2020.

A partir da figura 4, por meio de uma simples análise macroscópica dos componentes de ligação presentes, é possível afirmar que existem duas ligas metálicas diferentes presentes no mesmo sistema. O parafuso é a liga menos nobre do par galvânico, pois sua velocidade de corrosão aumentou promovendo danos superficiais a sua aparência e conseqüentemente a sua resistência. Todavia, a corrosão atmosférica dos metais é um processo eletroquímico que ocorre quando um meio aquoso se forma no metal. O eletrólito formado pode ser uma camada de umidade extremamente fina formado de apenas algumas monocamadas quando o metal se encontra úmido. Os parafusos da estrutura como um todo se encontram em meio a umidade e expostos ao meio ambiente. As condições do mesmo sem nenhuma manutenção adequada ou mesmo na ausência de uma camada de proteção adequada como por exemplo de tinta de proteção deixam os mesmos extremamente vulneráveis a degradação intensa. Nesse caso, os principais promotores de corrosão metálica na atmosfera da estrutura são precipitações aquosas na forma de chuva, neblina e a condensação da umidade.

Em alguns casos ocorre uma perda de massa drástica do material, levando à uma redução contínua consideravelmente acelerada da vida útil do componente como mostra na figura 5.



Figura 5 – Redução drástica da massa da seção transversal do elemento de ligação  
Fonte: O próprio, 2020.

A atmosfera marinha é caracterizada pela presença de aerossol marinho. O ar oceânico é rico em aerossóis marinhos resultante da evaporação de gotas de água do mar que são transportadas mecanicamente pelo vento até ser depositados sobre a estrutura metálica. Assim, no caso do ferro, a ação de cloretos presentes nos aerossóis marinhos é mais pronunciada do que com outros metais como o zinco e o cobre que cujos sais básicos são apenas rapidamente solúveis (ALCÁNTARA et al., 2017).

A umidade relativa de um ambiente tem um efeito profundo na taxa de corrosão do aço. Assim, o contato do aço com materiais de potencial elétrico diferente, a falta ou ausência de manutenção favorece para a degradação dos componentes metálicos. Nesse sentido, podemos afirmar que a corrosão metálica se desenvolveu no parafuso, por ser a liga menos nobre, no caso o ânodo que foi preferencialmente mais corroído. Já a liga mais nobre, no caso da tubulação, o cátodo, foi protegida e sua taxa de corrosão foi bem menor. Entretanto, é notável que a corrosão sobre o parafuso foi acelerada em comparação com a outra liga. Para retardar esse processo de corrosão e degradação, além da manutenção adequada, é indicado utilizar parafusos estruturais de alta qualidade como os parafusos de aço galvanizados.

Os parafusos de aço ASTM A325 são sabidamente mais nobres do que os aços estruturais comuns e, isso ocorre devido a sua composição química especial diferenciada. Mesmo podendo a princípio desenvolver corrosão galvânica, quando conectados à aços estruturais comuns, ainda sim devem ser aplicados. Pois garantem a integridade da ligação ao longo dos anos.

## 5. CONCLUSÃO

É importante que o estudo dos mecanismos de degradação seja mais recorrente e que se tenham uma atenção maior com as estruturas metálicas presentes na zona litorânea. Se faz necessário a adoção de estratégias de prevenção da corrosão ao invés de se atuar somente quando os sinais começam a ser evidentes. A manutenção aos componentes e estruturas de aço, assim como também inspeções visuais e fiscalização, são medidas de prevenção necessárias e indispensáveis principalmente em ambientes hostis altamente agressivos como é o caso daqueles presentes na zona marítima. Só assim, é possível aumentar a vida útil das estruturas metálicas presentes nas zonas costeiras e ter um controle mais rigoroso sobre o desenvolvimento da corrosão atmosférica nos aços. Os elementos de ligação e incorporados muitas vezes são os que mais sofrem com tudo isso, pois na sua maioria por questões financeiras, são empregados parafusos com materiais de baixa qualidade, metais menos nobres nas estruturas e acabam que sendo mais afetados pela degradação intensa causada pela corrosão atmosférica e demais poluentes incorporados. Tendo em vista não somente o custo, mas também a qualidade e o tempo de vida útil, a aplicação de parafusos em juntas parafusadas do tipo 3 ASTM A325, por possuir alta qualidade e apresentar maior resistência a tração e corrosão, mesmo que venham a formar o par galvânico ainda sim é a melhor alternativa para o seu emprego em projetos de grande responsabilidade. Além de possuir grande resistência a forças contrárias, garante a integridade da ligação parafusada ao longo dos anos, possibilitando maior segurança e menor custo de manutenção.

## Referências

ALCÁNTARA, J., B. CHICO, I. DÍAZ, D. DE LA FUENTE, M. MORCILLO. **Airborne chloride deposit and its effect on marine atmospheric corrosion of mild steel.** ScienceDirect, V. 97, P. 74-88, august 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X15001754?via%3Dihub%3E>>. Acesso em: 04 de abril de 2020.

ALCÁNTARA, JENIFER ET AL., **“Marine Atmospheric Corrosion of Carbon Steel: A Review.”** Materials (Basel, Switzerland) vol. 10,4 406. 13 Apr. 2017, doi:10.3390/ma10040406. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5506973/>>. Acesso em: 28 de março de 2020.

BRUECKNER, RENE & LAMBERT, PAUL. **Conservation of defence heritage structures using corrosion protection techniques.** WIT Transactions on the Built Environment. V. 143, P. 271-282. (2014). Doi:10.2495/DSHF140231. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/271450919\\_Conservation\\_of\\_defence\\_heritage\\_structures\\_using\\_corrosion\\_protection\\_techniques](https://www.researchgate.net/publication/271450919_Conservation_of_defence_heritage_structures_using_corrosion_protection_techniques)>. Acesso em: 10 de março de 2020.

COLE I.S, GANTHER WD, SINCLAIR JD, LAU D.A., **A study of the wetting of metal surfaces in order to understand the processes controlling atmospheric corrosion.** J. Electrochem. Soc. 2004; 151 : B627-B635. doi: 10.1149 / 1.1809596. Disponível em: <[https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?journal=J.+Electrochem.+Soc.&title=A+study+of+the+wetting+of+metal+surfaces+in+order+to+understand+the+process+controlling+atmospheric+corrosion&author=I.S.+Cole&author=W.D.+Ganther&author=-J.D.+Sinclair&author=D.+Lau&author=D.A.+Paterson&volume=151&publication\\_year=2004&pages=B-627-B635&doi=10.1149/1.1809596&](https://scholar.google.com/scholar_lookup?journal=J.+Electrochem.+Soc.&title=A+study+of+the+wetting+of+metal+surfaces+in+order+to+understand+the+process+controlling+atmospheric+corrosion&author=I.S.+Cole&author=W.D.+Ganther&author=-J.D.+Sinclair&author=D.+Lau&author=D.A.+Paterson&volume=151&publication_year=2004&pages=B-627-B635&doi=10.1149/1.1809596&)>. Acesso em: 02 de abril de 2020.





COLE, I.S., LAU, D.A., **Holistic model for atmospheric corrosion Part 6 – From wet aerosol to salt deposit**. Paterson, P. 209-218, Published online: 29 Nov 2013. Disponível em: <[https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?journal=Corros.+Eng.+Sci.+Technol.&title=Holistic+model+for+atmospheric+corrosion+part+6%E2%80%94From+wet+aerosol+to+salt+deposit&author=I.S.+Cole&author=D.+Lau&author=D.A.+Paterson&volume=39&publication\\_year=2004&pages=209-218&doi=10.1179/147842204X2880](https://scholar.google.com/scholar_lookup?journal=Corros.+Eng.+Sci.+Technol.&title=Holistic+model+for+atmospheric+corrosion+part+6%E2%80%94From+wet+aerosol+to+salt+deposit&author=I.S.+Cole&author=D.+Lau&author=D.A.+Paterson&volume=39&publication_year=2004&pages=209-218&doi=10.1179/147842204X2880)>. Acesso em 04 de abril de 2020.

CRUZ, P. E ALVAREZ, R. **“Patologias de Estruturas Metálicas”**. REPAR 2000, “Encontro nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas”, LNEC., 14-17, junho, Lisboa, p. 227-236.

FORSCHUNGSVERBUND BERLIN E.V. (FVB). **“Mathematics as tough as steel.”** ScienceDaily, 2015. Disponível em: <[www.sciencedaily.com/releases/2015/08/150819084146.htm](http://www.sciencedaily.com/releases/2015/08/150819084146.htm)>. Acesso em: 10 de março de 2020.

HARD. **“Fixação parafusada de estruturas metálicas com função estrutural”**. Grupo Hard, 2018. Disponível em: <[https://hard.com.br/wp-content/uploads/2014/03/AF\\_Pag\\_Linha\\_ASTM\\_A325\\_v5\\_ago2018\\_web.pdf](https://hard.com.br/wp-content/uploads/2014/03/AF_Pag_Linha_ASTM_A325_v5_ago2018_web.pdf)>. Acesso em: 25 de março de 2020.

PANNONI F. **Parafusos estruturais de aço ASTM A325 tipo 3 na construção em aço**. Artigo técnico Gerdau aços Brasil, 2014. Disponível em: <[http://www.abcem.org.br/lib/php/\\_download.php?now=0&arq=produtos/399\\_rcm\\_parafusos\\_ed111.pdf](http://www.abcem.org.br/lib/php/_download.php?now=0&arq=produtos/399_rcm_parafusos_ed111.pdf)>. Acesso em: 27 de março de 2020.

PANNONI F. **Principles of protection of steel structures in a state of corrosion and fire**, v. 2, 3rd ed. São Paulo: Gerdau, (2004). Disponível em: <[https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=+Principles+of+protection+of+steel+structures+in+a+state+of+corrosion+and+fire&author=Pannoni+F.&publication\\_year=2004&volume=2](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=+Principles+of+protection+of+steel+structures+in+a+state+of+corrosion+and+fire&author=Pannoni+F.&publication_year=2004&volume=2)>. Acesso em: 22 de março de 2020.

PERDRIX, C. **Manual de Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras**. Editora Pini, 140 p. (1992). Disponível em: <<https://digital.csic.es/handle/10261/88852>>. Acesso em: 22 de março de 2020.

SCHINDELHOLZ, E., RISTEEN, B.E. AND KELLY, R.G. **Effect of Relative Humidity on Corrosion of Steel under Sea Salt Aerosol Proxies: I. NaCl**. Journal of The Electrochemical Society, Volume 161, Number 10, 2014. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.0221410jes/meta>>. Acesso em: 02 de abril de 2020.

SERRA. **“Análise de patologias em estruturas construídas em ambiente marítimo”**. Dissertação, Porto, 2012. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/65592/1/000153997.pdf>>. Acesso em: 25 de março de 2020.

STREKALOV, P V, AND PANCHENKO, YU M. **The role of marine aerosols in atmospheric corrosion of metals; Vklad morskikh aehrzolej v atmosfernuyu korroziyu metallov**. Russian Federation: N. p. 296-307, 1994. Web. Disponível em: <<https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/71523>>. Acesso em: 13 de abril de 2020.



# CAPÍTULO 4

## **AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A CORROSÃO NA ZONA TERMICAMENTE AFETADA EM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO**

EVALUATION OF RESISTANCE TO CORROSION IN THE THERMALLY  
AFFECTED AREA IN AUSTENITIC STAINLESS STEEL

**Thalia Cristina Gomes Oliveira**  
**Ramaiany Carneiro Mesquita**

## Resumo

Os aços inoxidáveis são largamente utilizados em indústrias onde o fator principal é a resistência à corrosão. Em muitas de suas aplicações se faz necessário operações de soldagem onde afeta significativamente as suas propriedades e a resistência à corrosão. Nesse intuito, este trabalho tem por objetivo avaliar a suscetibilidade à corrosão em regiões termicamente afetadas de um aço AISI 304 que foi submetido ao processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) através da análise microestrutural. Os resultados da caracterização microestrutural ao longo da junta soldada variaram em função dos ciclos térmicos do processo, já no metal de base não houve alterações microestruturais por estar distante à zona de fusão. Na zona termicamente afetada (ZTA) obteve-se uma significativa quantidade de ferrita e um aparente crescimento de grão com precipitações, mas livre de sensibilidade. Esse fato ocorreu devido a influência do processo de soldagem, pois este é o resultado dos ciclos térmicos ocasionados na região onde foi realizada a solda. A temperatura de soldagem quando não controlada, pode interferir na solidificação do material, tornando algumas regiões mais fragilizadas que outras.

**Palavras-chave:** Aço inoxidável; Soldagem; Corrosão.

## Abstract

Stainless steels are widely used in industries where the main factor is resistance to corrosion. In many of their applications, the welding operation is necessary, where it significantly affects the properties and resistance to corrosion. In this case, this study aims to evaluate the susceptibility to corrosion in regions thermally affected by AISI 304 steel that was subjected to the TIG welding process, through microstructural analysis. The results of the microstructural characterization along the welded joint varied in the functions of the thermal cycles of the process, already in the base metal, but not occurred microstructural changes due to being far from the melting zone. In the thermally affected zone (ZTA), it can cause a significant amount of ferrite and a grain growth with precipitation, more free of sensitization. This fact occurred due to the influence of the welding process, as this is the result of the occasional thermal cycles in the region where the welding was carried out. The welding temperature, when not controlled, can interfere with the solidification of the material, making some regions more fragile than others.

**KeyWords:** Stainless steel; Welding; Corrosion



## 1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis austeníticos (AIA) estão inclusos na família dos aços inoxidáveis como fase e são utilizados em larga escala na indústria metalúrgica, química, alimentícia etc. Embora esses aços possuam uma excelente combinação de propriedades física, química e mecânica, e seja resistente a corrosão em geral, em muitas de suas aplicações eles estão sujeitos à corrosão intergranular e à corrosão sob tensão em meio de ácido politiônico, originadas na precipitação de carbonetos, ricos em cromo, nos contornos de grão. Essa precipitação reduz a concentração de cromo, para teores inferiores aquele requerido para que ocorra a passivação do aço, nas regiões adjacentes aos contornos, tornando-as susceptíveis a corrosão, ou seja, sensibilizadas.

A sensibilização de AIA pode ocorrer, por exemplo, durante um resfriamento lento, após exposição do material à solubilização, ou após um processo de soldagem, geralmente no intervalo de temperatura de 450 a 850°C. Em situações operacionais, a sensibilização pode acontecer em virtude de falhas operacionais, mesmo que por curtos períodos de tempo, expondo o material a temperaturas elevadas, na faixa de sensibilização, acima daquelas projetadas para a sua utilização. Aços sensibilizados podem causar falhas prematuras nos equipamentos e/ou componentes durante o seu uso.

Entre os AIA o AISI 304 é o mais utilizado, pois oferece uma maior resistência a corrosão, melhor soldabilidade, ductibilidade e versatilidade ao ser usado em temperaturas altas ou baixas, oferecendo de acordo com sua temperatura propriedades específicas para o seu uso. Esse tipo de aço possui algumas restrições quando submetidos ao processo de soldagem, eles ficam susceptíveis a corrosão em temperaturas elevadas. Logo é de grande importância o controle dos parâmetros, para monitoramento da sensibilização no processo de soldagem. Neste intuito o presente trabalho tem como objetivo investigar a suscetibilidade à corrosão em regiões termicamente afetada de um aço AISI 304 soldado pelo processo de soldagem TIG através da análise microestrutural.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Aços Inoxidáveis

O desenvolvimento de aços resistentes a oxidação proporcionou à indústria diversas aplicações. As suas qualidades microestruturais são de grande importância para o desenvolvimento de inovações tecnológicas de materiais, tornando-o essencial para a qualidade do produto. Originalmente construídos para onde o quesito é resistência a corrosão, os mesmos podem ser encontrados em talheres,



equipamentos hospitalares, tanques de armazenamento de produtos químicos, tubulações, construções arquitetônicas e revestimentos devido as suas demais características além da proteção a corrosão.

Os aços com alta resistência a corrosão são denominados aços inoxidáveis, estes possuem teores acima de 12% em peso de cromo, principal elemento que concede a essa classe de aços a característica de alta resistência a corrosão (CALLISTER, 2012). Quando comparado aos aços carbonos, possui uma ótima resistência a corrosão. O cromo (Cr) é distribuído por todo o aço em uma forma homogênea, na presença do oxigênio forma-se uma fina camada de óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) rapidamente em toda a superfície do aço, também conhecida como película passiva, o que garante ao material proteção contra agentes corrosivos do ambiente. A composição, estrutura, ponto de volatilização, permeabilidade, ponto de fusão, e aderência ao metal de base dessa película passiva, irão definir uma máxima ou mínima capacidade de resistência a corrosão (MANFRINATO, 2006 e CHIAVERINE, 1986). Esta película totalmente aderente e de espessura finíssima tem seus níveis de resistência a corrosão dependendo da adição de cromo, quanto mais se adiciona cromo a liga mais a resistência é aumentada, igualmente quando o aço sofre deformações mecânicas, ao entrar em contato com o oxigênio imediatamente combina-se com o cromo formando novamente a camada protetora do material (OLIVEIRA, 2013).

Os aços inoxidáveis podem conter, além do cromo, outros elementos tais como níquel, molibdênio, alumínio, cobre, o que varia de acordo com as especificações do produto e sua aplicação, quais características que se deseja obter, como: estrutura, com baixa rugosidade superficial, ponto de fusão, aderência ao metal-base de solda, maior ou menor capacidade de resistência à corrosão em diversas condições de uso. Aços inoxidáveis podem chegar até 30% de Cr em sua composição juntamente com outros elementos ligantes (CHIAVERINE, 1986).

Os aços inoxidáveis são classificados quanto a sua microestrutura em: martensíticos, ferríticos e austeníticos. Esta classificação é feita de acordo com os elementos de ligas adicionados, microestruturas, microconstituintes, tratamentos térmicos e mecânicos realizados para a obtenção da liga (MIRIM, 2011).

Os aços inoxidáveis martensíticos são as ligas que contém entre 12% a 18% de cromo com uma estrutura Tetragonal de corpo central com uma adição entre 0,1% a 0,5% de Carbono, o que permite ser endurecido por tratamento térmico. Contendo em sua estrutura uma concentração de carbono que proporciona a mudança de ferrita em austenita em elevadas temperaturas. Após passar pelo tratamento térmico de têmpera, apresentarão uma estrutura martensítica e serão resistentes à corrosão, possuindo uma pequena ductibilidade e alta dureza. São utilizadas em mancais, molas, cutelaria, antifricção, instrumentos cirúrgicos e etc (PINTO, 2006, CARBÓ, 2008 e CHIAVERINE, 1986).

As ligas de Ferro-Carbono são ligas ferríticas em qualquer temperatura até



encontrar o ponto de fusão, sua estrutura cristalina cúbica de corpo centrado é a mesma do ferro puro em temperatura ambiente, são ligas que contém entre 11% a 17% do seu principal ligante, o cromo, porém o teor de carbono é baixo, desse modo, diferentemente dos martensíticos, não são endurecíveis por têmpera. Os ferríticos são os aços inoxidáveis de mais baixo custo e também de baixa proteção a corrosão de comparado às outras classes. Os aços inoxidáveis ferríticos possuem uma quantidade de cromo elevada quando comparado aos martensíticos, isso lhe concede uma boa resistência a corrosão, porém compromete outras propriedades como a resistência ao impacto. Eles são utilizados em componentes arquitetônicos, equipamentos de restaurante e cozinha, equipamentos para a indústria química e peças de forno (CARBÓ, 2008 E CHIAVERINE, 1986)

A maior classe de aços inoxidáveis são os austeníticos, essa liga contém entre os principais elementos ligantes o Cromo e Níquel e baixo carbono, assim como os ferríticos, não são endurecidos por têmpera e tem um arranjo atômico cúbico de face centrada. São aços de excelentes propriedades, como: excelente ductilidade, conformabilidade, tenacidade, trabalho em temperaturas criogênicas (AZEVEDO, et al. 2009). Os aços inoxidáveis austeníticos à temperatura ambiente apresentam um pequeno limite de escoamento, uma elevada ductibilidade e autolimites de resistência. A sua utilização encontra-se nos utensílios domésticos, componentes para a indústria química, peças estruturais, alimentícia, naval, e componentes com temperaturas elevada como peças de estufas e fornos (MIRIM, 2011).

### **2.1.1. Aços Inoxidáveis Austeníticos AISI 304**

Dentre os aços inoxidáveis austeníticos o AISI 304 é o mais conhecido, por possuir uma excelente resistência a corrosão, perfeita soldabilidade e uma ótima maleabilidade. A sua utilização pode ser a temperaturas ambiente, altas e baixas. Obtendo uma boa tenacidade quando submetido a baixas temperaturas, e em altas uma baixa fluência. Por obter tais qualidades, o aço inoxidável pode ser utilizado em diversos setores, sendo ele residencial, alimentício, industrial entre outros. Um dos problemas enfrentados pelo aço inoxidável AISI 304 é o da ação corrosiva, que também outros aços dessa categoria são submetidos a isso. Os aços inoxidáveis AISI 304 são os mais produzidos e possui mais utilidade pelas indústrias, sendo ele cerca de 60% em todas as classes dos aços inoxidáveis. Ele possui uma alta ductibilidade, boa resistência e para casos de estampagem extra profunda, um aumento no teor de níquel permite melhorar ainda mais essa ductibilidade. Esse tipo de aço é muito empregado nas industriais alimentícias, atingindo 50% de utilidade devida seu baixo custo e sua alta resistência a corrosão, evitando assim a contaminação dos produtos no interior dos equipamentos (TELLES, 2003). A sua composição pode ser definida como uma liga de teores máximo 0,08% de carbono, 18% de cromo, 8% de níquel e alguns elementos residuais (DIAS, 2009). A sua utilização possui uma grande notabilidade, devido a sua vasta aplicação. Possui flexibilidade ao uso doméstico em forma de utensílios, utilizado em estruturas, refinarias de pe-



tróleo, tubos de vapor, e também muito usado no ramo odontológico e de próteses (PÓVOA, 2017).

### 2.1.2. Corrosão Integranular

A corrosão intergranular é um problema dos aços inoxidáveis, especialmente durante a soldagem. Como diz Callister, 2012: “Como o nome sugere, a corrosão intergranular ocorre preferencialmente ao longo dos contornos de grão para algumas ligas e em ambientes específicos.” Essa corrosão acontece por conta dos carbonetos de cromo, que são uniões do cromo com os carbonos livres, que ficam livres por consequência do fenômeno de sensitização, cita Zanetic e Alonso-Falleiros: este fenômeno “[...] ocorre quando os aços cromo-níquel, em geral são submetidos a temperaturas entre 450° C e 850°C, por um tempo suficiente, como consequência de tratamentos térmicos ou soldagem [...]”.

Durante esse tempo de exposição, tanto o cromo quanto o carbono formam zonas precipitadas, o que deixa algumas áreas pobres em cromo em uma zona próxima do contorno de grão, desse modo as ligas podem perder algumas propriedades mecânicas e tornarem-se suscetíveis ao ataque intergranular, e conseqüentemente, a corrosão (Figura 1). A precipitação crescente de carbonetos de cromo, reduz o teor de cromo nas regiões próximas aos contornos de grãos, como consequência tem-se grandes áreas catódicas abundantes em cromo (região central dos grãos) e mínimas áreas anódicas pobre em cromo (área adjacentes aos contornos), figura 2. Essa quebra da passividade nas áreas anódicas causa uma pilha ativa-passiva com deteriorização preferencial nas regiões anódicas, tornando-as vulneráveis à corrosão intergranular. O material poderá manifestar perdas nas propriedades mecânicas, podendo sofrer fraturas quando submetidas a esforços mecânicos, ocorrendo a corrosão sob tensão (PANOSSIAN,1993).

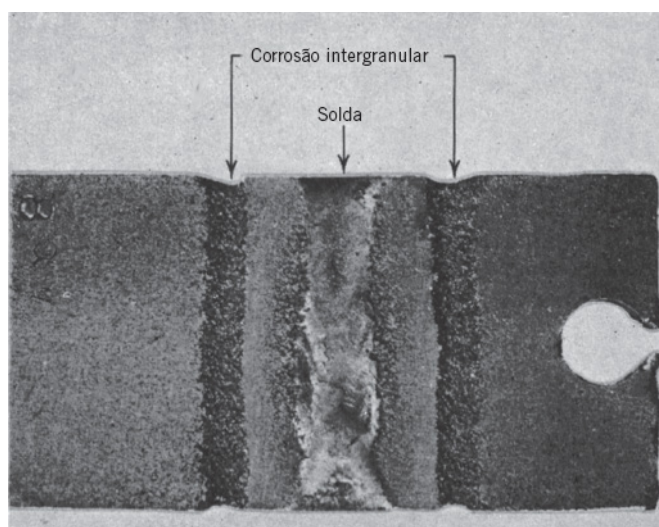


Figura 1 – Corrosão em torno do cordão de solda em um aço inoxidável.  
Fonte: CALLISTER, 2012

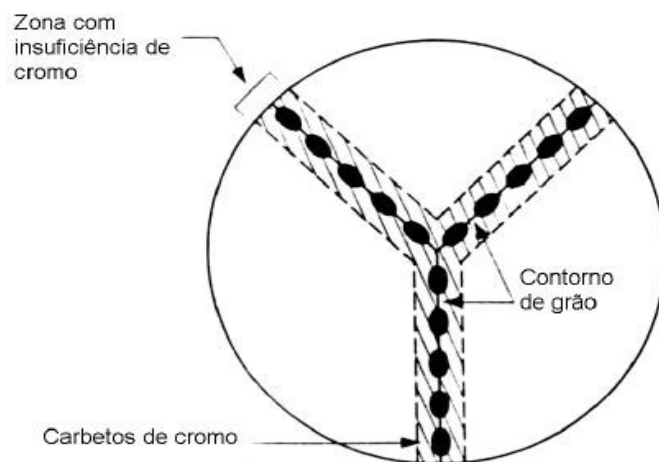


Figura 2-Representação esquemática da precipitação de carbonetos de cromo  
 Fonte: PANOSSIAN, 1993.

## 2.2. Soldagem TIG

O processo TIG (Tungsten Inert Gas) é um processo de soldagem que utiliza como fonte de calor um arco elétrico gerado entre o eletrodo de tungstênio e o metal-base (WEISS, 2010). Este processo é muito utilizado para aços inoxidáveis e ligas não ferrosas, materiais de espessuras reduzidas, materiais conformados a frio ou laminados. O arco, eletrodo e poça de fusão são envolvidos por um gás inerte, podendo este ser, argônio ou hélio, que tem a função de deslocar o ar, evitando assim defeitos de contaminação na solda pelo oxigênio ou nitrogênio da atmosfera (BITTENCOURT, 1985). O processo caracteriza-se por ter um arco elétrico pequeno, o processo aplica-se para todos os tipos de juntas e chapas, principalmente de pequenas espessuras.

Atualmente, é um processo utilizado para soldagem de ligas de alumínio, aços inoxidáveis de modo geral, titânio e outros materiais. O processo efetua uma soldagem de alta qualidade e limpa, pois durante o processo não é gerada escória no cordão de solda, então não há necessidade de limpeza e outros processos ao fim do processo de soldagem TIG (WEISS, 2010). Surge como desvantagem a utilização do mesmo para chapas com grandes espessuras, pois possui baixa produtividade, não é recomendado para locais abertos, pois pode acontecer contaminação durante o processo, sendo ideal a utilização do mesmo em locais fechados e com baixa ventilação (SANTOS, 2015).

Os consumíveis usados durante o processo são: a vareta (metal de adição), o gás de proteção, geralmente argônio, e o eletrodo de tungstênio não consumível. Para o soldador é necessário a utilização de proteção para os olhos, máscara e proteção para a pele (WEISS, 2010).

Como mostrado na Figura 3, os equipamentos básicos do processo são: A fonte de energia, que fornece a corrente necessária para o processo, podendo a mesma ser contínua ou alternada. A unidade de alta frequência, que permite o controle do



pré e pós-vazão do gás de proteção. A tocha (com ou sem refrigeração), que tem como função fixar o eletrodo e conduzir a corrente elétrica até a poça de fusão. O cilindro de proteção e o eletrodo de tungstênio (WEISS, 2010).

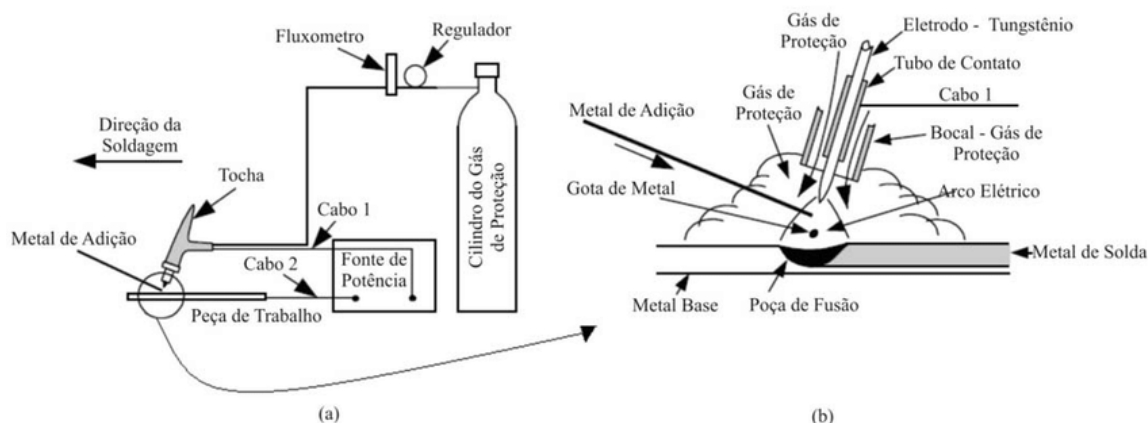


Figura 3 – Processo de soldagem TIG  
Fonte: Lermen, 2011.

### 2.3. Diagrama transformação, tempo e temperatura (TTT) dos aços inoxidáveis.

Os diagramas TTT são constituídos de curvas que apresentam o início e o final de mudanças microestruturais dos aços. Isso ocorre devido a permanência do material a temperaturas altas o suficiente para que a homogeneização ocorra de forma integral na sua microestrutura e seguinte resfriamento rápido em determinado meio a uma certa temperatura por um espaço de tempo (FERREIRA, 2009.) A velocidade de resfriamento muda as condições de estabilidade do diagrama Fe-C, por consequência a formação dos constituintes normais decorrentes da transformação da austenita. A modificação da austenita acontecerá a temperaturas pequenas, com o aumento da velocidade de resfriamento (CHIAVERINE, 2008).

A figura 4 mostra as curvas TTT para o aço inoxidável austenítico com diferentes concentrações de carbono. É possível notar, que entre 540° e 900°C, a precipitação se modifica conforme o tempo e a porcentagem em peso do carbono. E essa precipitação dos carbonetos dos carbonetos de cromo, ocorre de maneira mais lenta com a redução de carbono (RESENDE,2016).

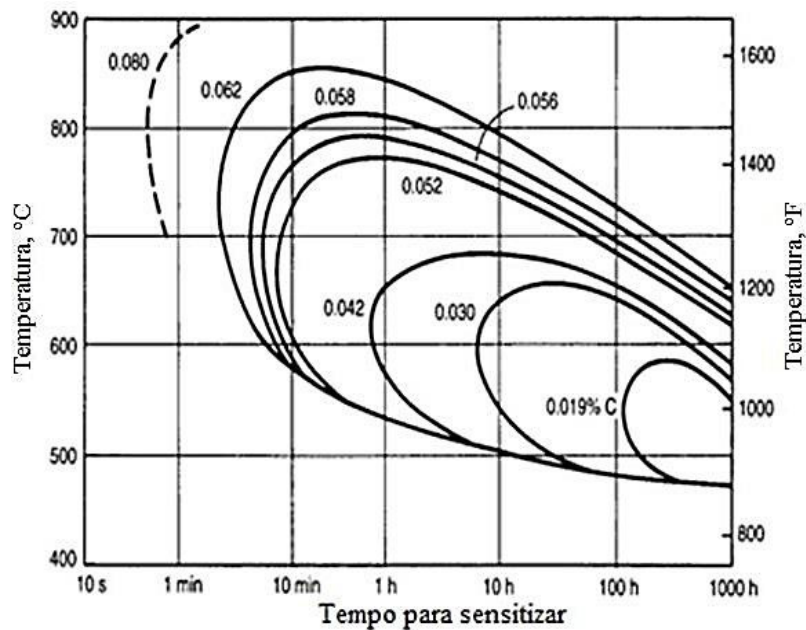


Figura 4-Diagrama TTT para o aço inoxidável austenítico AISI 304 com diferentes composições de carbono  
 Fonte: ASM INTERNATIONAL

## 3. MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Material

Neste trabalho foi estudado o aço inoxidável austenítico AISI 304 que possuem teor de carbono menor que 0,20% em massa e níquel e cromo como elementos de ligas. Na forma como recebido se encontrava em formato de chapa.

### 3.2. Métodos

#### 3.2.1. Soldagem

Após o procedimento de corte, as amostras foram soldadas através do método de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*). Esse tipo de soldagem TIG é considerado o mais eficiente para esse tipo de aço, e nesse processo de soldagem, utilizou-se uma vareta que é conhecida como soldagem autógena, pois não consome o metal de adição. A mesma, ocorre a arco com eletrodo de tungstênio com 2% de tório (EWTH2) para dar mais firmeza ao material, e proteção gasosa, na qual deve ser realizada por meio de um gás inerte. Utilizou-se o gás argônio com 20% de hélio, com vazão de 15 L/min, durante 10 segundos, corrente DC (polaridade direta) de 100 A. O metal de solda empregado foi AWSER 308 L com 2,5 mm de espessura. Além disso, o procedimento foi feito sem purga, tendo assim o lado superior e inferior soldados, havendo precipitação de carbono em ambos, na qual poderia ser removida através de polimento ou solução ácida, figura 5.

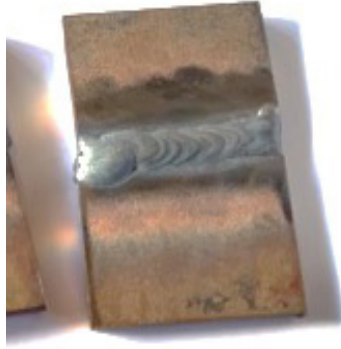


Figura 5- Amostra do aço soldado  
Fonte: autor,2019.

### 3.2.2. Metalografia

Após o processo de soldagem as amostras do material passaram pelo processo de corte e foram embutidas a frio, figura 6. Posteriormente as amostras foram lixadas em uma máquina lixadeira/politriz, com as sequencias de lixas 100, 320, 400, 600 e 1200 meshes e polidas com alumina líquida.



Figura 6- Amostra embutida  
Fonte: autor, 2019.

### 3.2.3. Avaliação Microestrutural

Nesta etapa as amostras soldadas foram submetidas a Microscopia Óptica (MO) com o objetivo de avaliar as alterações microestruturais provocadas pelo processo de soldagem TIG na região termicamente afetada. Para revelar a microestrutura adequadamente, realizou-se um ataque eletrolítico na superfície com a aplicação de ácido oxálico através do processo de imersão por um período de 30 a 45 segundos com uma corrente de 1A. Para obtenção das microestruturas resultantes, foi utilizado um sistema de análise de imagens constituído de uma câmera digital OLYMPUS PM C35DX, adaptada a um microscópio óptico OLYMPUS BX51 TRF, e de

um programa de imagens "Image-Pro Plus versão 4.5 for Windows".

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o ataque eletrolítico com solução aquosa de ácido oxálico as microestruturas foram analisadas. A figura 7 revela a microestrutura do aço na forma como recebida. Nota-se uma microestrutura do tipo austenítica tendo maclas de recozimento e grãos poligonais, característico de uma estrutura cúbica de face centrada encontrada nos aços inoxidáveis austeníticos (PADILHA,1994).

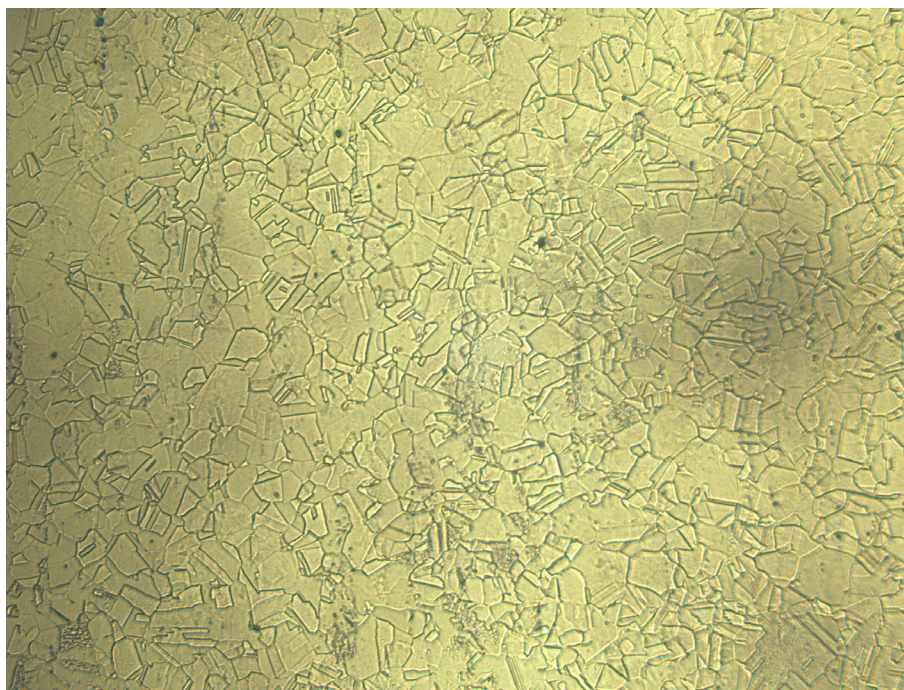


Figura 7- Microestrutura da amostra como recebida  
Fonte: autor, 2019.

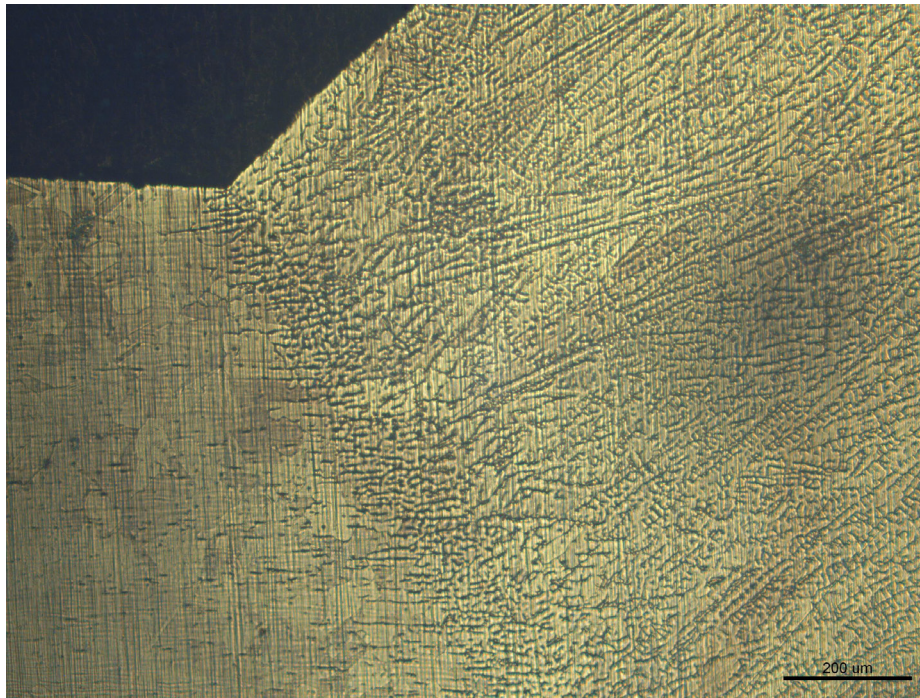


Figura 8- Microestrutura na região da ZTA  
Fonte: autor, 2019.

A microestrutura do material estudado, foi analisada através da Microscopia Óptica (MO) para a avaliação microestrutural após ser submetido ao processo de soldagem. As micrografias observadas foram na zona termicamente afetada (ZTA), zona fundida (ZF) e metal de base (MB) como mostrado nas imagens 8 e 9.

A figura 8 confere a microestrutura após a soldagem, mostrando as regiões da zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e metal de base (MB). Nota-se que nas regiões próximas a ZTA não existe somente a austenita em sua microestrutura, existe também ferrita delta na matriz austenítica. De acordo com Silva et al., 2017, essa repressão da transformação da ferrita em austenita é consequência da diminuição de energia que foi empregue para soldar os aços inoxidáveis (FONSECA; SILVA; BRANDT, 2017).

Os aços austeníticos como citado seção 2 do trabalho, possuem uma ótima soldabilidade, porém isso não isenta de acontecer a precipitação nos contornos de grãos nas regiões vizinhas a ZTA.

É notável que no decorrer do desenvolvimento da soldagem, ocorre a fusão do metal de base em virtude da alta temperatura utilizada no arco para a fusão do metal de solda para que ocorra a soldagem, dessa maneira durante esse superaquecimento do metal de base e no processo de resfriamento, ocorrem modificações na microestrutura e outras propriedades do material (REVISTA DE SOLDAGEM E INSPEÇÃO, 2020). Os resultados da caracterização microestrutural ao longo da junta soldada variaram em função dos ciclos térmicos do processo de soldagem, já no metal de base não houveram alterações microestruturais por estar distante à zona de fusão. Na (ZTA) obteve-se uma significativa quantidade de ferrita e um aparente crescimento de grão com precipitações, mas livre de sensitização. A Fi-

gura 9, revela a microestrutura próxima a região da ZTA, onde segundo a norma ASTM A 262, prática A, a microestrutura foi classificada como "Dual", que significa que apresenta precipitados nos contornos de grão, mas nenhum completamente envolto, ou seja, existe uma susceptibilidade a ocorrer sensitização, o que pode levar a uma corrosão intergranular (WEST CONSHOCKEN, 2008).

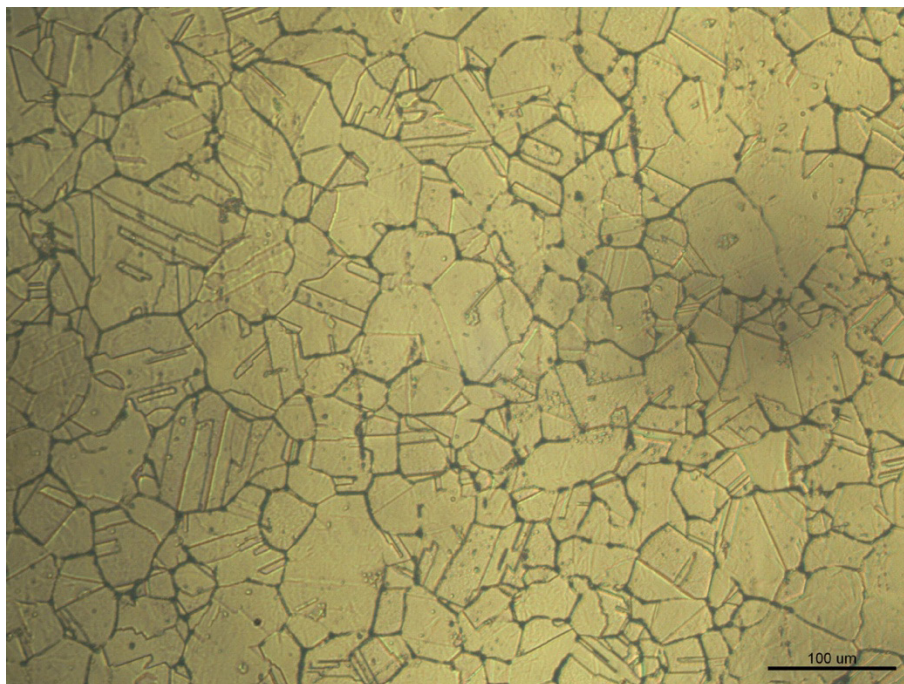


Figura 9- Microestrutura do metal de base próximo a região da ZTA, com aumento de 20X  
Fonte: O autor, 2019.

Nota-se que os precipitados tendem a ocorrer nas regiões onde se ocorre maior nível de energia, maclas e contornos de grãos e ocorrerá um aumento que será diretamente proporcional ao tempo de permanência entre as temperaturas 500°C a 800°C (CAZOTTI,2007).

## 5. CONCLUSÃO

Observou-se que ocorreu crescimento de grãos sendo possível notar que em alguns locais da microestrutura uns grãos foram maiores que os outros. E que a energia utilizada para soldar, que é a quantidade de calor por unidade de comprimento introduzida ao metal de base, influencia diretamente no grau de sensitização que o material irá ser exposto. Após o material ter passado pelo processo de soldagem, através da análise, verificou-se uma identificação preferencial de precipitação na região de contorno de grão.

Através das amostras utilizadas, verificou-se que não houve nenhum grão totalmente contornado, deixando-as desprendidas de corrosão intergranular dentro dessa variação de temperatura.

## Referências

- AMERICA SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practices for detecting susceptibility to Intergranular attack in austenitic stainless steels.** (ASTM A262-02a). ASTM International: West Conshohocken; 2008.
- AZEVEDO, Alessandra Gois Luciano de; FERRARESI, ValtairAntonio; FARIAS, Jesualdo Pereira. **Soldagem de um aço inoxidável ferrítico com o processo A-TIG.** Soldagem & Inspeção, v. 14, n. 1, p. 2-9, 2009.
- BITTENCOURT, Marcelo SQ et al. **Evaluation of the TIG welding mechanical behavior in AISI 316 tubes for fuel rods.** 1985.
- CALLISTER JR, William D.; RETHWISCH, David G. **Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach.** John Wiley& Sons, 2012.
- CARBÓ, Héctor Mario. **Aços Inoxidáveis: Aplicações e Especificações.**São Paulo, 2008.
- CAZOTTI, DIAS GEÉLISSON MORELLO. Precipitação de carbonetos. In: CAZOTTI, DIAS GEÉLISSON MORELLO. **AVALIAÇÃO QUALITATIVA DA SENSITIZAÇÃO POR SOLDAGEM TIG DE UM AÇO AISI 304.** 2007. Trabalho de conclusão de curso (graduação em engenharia mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA, Vitória-ES, 2007. f. 17. Disponível em: [http://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2007-1\\_geelisson\\_morello\\_e\\_rogelio\\_dias.pdf](http://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2007-1_geelisson_morello_e_rogelio_dias.pdf). Acesso em: 24 maio 2020.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica.** McGraw Hill, 1986.
- DIAS, Alexandre de Oliveira. **Análise da Influência dos Parâmetros de Pulsação na Soldagem do Aço Inoxidável AISI 304 Através do Arame Tubular AWS E316LT1-4.** Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica. Minas Gerais, 2009.
- FERNANDES, João Carlos. **Desenvolvimento de um dispositivo tipo carga constante para avaliação da susceptibilidade à corrosão sob tensão de aço inoxidável austenítico.** 2010.
- FONSECA CS, SILVA IPP, BRANT GSC. **Influência do Aporte Térmico sobre a Microestrutura em Juntas Soldadas de Aço Inoxidável AISI 304.** Engevista. 30 de janeiro de 2017;19(1):1. . Estrutura de referência de artigo: Autor(es). Título do artigo. Título do periódico. Ano; volume(número): página inicial e final do artigo.
- MANFRINATO, Marcos Dorigão. **Influência da Nitretação a Plasma no Comportamento em Fadiga dos Aços Inoxidáveis Austeníticos AISI 304 e 316.** Interunidades Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, 2006. 134 p.
- MIRIM, Denílson de Camargo. **Investigação da Tensão Residual na Soldagem Laser Entre o Aço Carbono AISI 1010 e o Aço Inoxidável AISI 304.** Autarquia Associada à Universidade de São Paulo. São Paulo,2011.
- OLIVEIRA, Leonardo Albergaria. **Influência do Metal de Adição na susceptibilidade à corrosão sob tensão de juntas soldadas dissimilares de Aço Inoxidável Austenítico 316 E Aço Inoxidável Duplex 2304.** 2013.
- PADILHA, A.F.; Guedes, L.C. **Aços inoxidáveis austeníticos, microestrutura e propriedades.** São Paulo: Hemus Editora Limitada; 1994.
- PANOSSIAN, Z. **Corrosão e Proteção contra Corrosão em Equipamentos e Estruturas Metálicas.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1993.
- PINTO, Daniel Fraga. **Comportamento em Corrosão Sob Tensão de um Aço Inoxidável Ferrítico AISI 444 Soldado com Aço Inoxidável Austenítico AISI 316LS, em Meios Contendo Cloretos.** Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais, 2006.
- RESENDE, Washington Carvalho Tricote. **Estudo da Resistência à Corrosão por Pites dos Aços Inoxidáveis Austeníticos AISI 301 e AISI 304 Submetidos ao Processo de Soldagem Tig.** Universidade



Federal de Juiz de Fora. Minas Gerais, 2016.

CORROSÃO INTERGRANULAR EM JUNTAS SOLDADAS - PARTE III. **Revista Soldagem & Inspeção**, Ano 6. Nº 5. Disponível em: <<http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/EME733/Semin%C3%A1rios%20Inox/Corrosao%20intergranular%20em%20juntas%20soldadas%20PARTE%20III.pdf>>. Acesso em: 12 maio 2020.

SANTOS, Carlos Eduardo Figueiredo. **Processos de soldagem: conceitos, equipamentos e normas de segurança**. São Paulo: Erica, 2015.

WEISS, Almiro. **Soldagem**. Curitiba: Livro Técnico, 2010.

ZANETIC, Silvio Tado; ALONSO-FALLEIROS, Neusa. DETERMINAÇÃO DO GRAU DE SENSITIZAÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS PELO MÉTODO DL-EPR. **Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo**, n. 10, p. 107-114, 2001.





# CAPÍTULO 5

## **ANÁLISE DA ZONA SOLDADA DE UM AÇO SAE 1020 COM ELETRODO REVESTIDO E7018**

ANALYSIS OF THE WELDED ZONE OF A SAE 1020 STEEL WITH  
COATED ELECTRODE E7018

**Francisco De Assis Martiniano Ferreira Resende  
Ramaiany Carneiro Mesquita**

## Resumo

Este projeto embasou-se na análise e caracterização de uma junta soldada de aço SAE 1020, obtida pela soldagem a arco elétrico (SMAW) com consumível E7018. Devido às limitações o presente projeto teve como referências de literaturas para resultados e discursões dois artigos experimentais, sendo possível observar as três regiões de uma junta de solda, as características microestruturais, propriedades mecânicas, descontinuidades, efeitos de tratamento térmico de recozimento subcrítico e outros, a fim de avaliar e identificar defeitos e discordâncias na junta soldada. De acordo com as análises dos resultados e discussões, observou-se que o eletrodo E7018 apresenta um trabalho eficaz, gerando poucos respingos e com boa penetração; o tratamento térmico de recozimento subcrítico traz resultados positivos em relação a redução de tensões residuais, diminuindo a dureza da junta de solda sem que ocorra a mudança de fase do material e faz com que o material fique mais sensível a corrosão.

**Palavras-chave:** SMAW. Eletrodo E7018. Aço SAE 1020. Recozimento. Corrosão.

## Abstract

This project was based on the analysis and characterization of a SAE 1020 steel welded joint, obtained by electric arc welding (SMAW) with E7018 consumable. Due to the limitations of this project, two experimental articles were used as references in the literature for results and discourses. It is possible to observe the three regions of a weld joint, the microstructural characteristics, mechanical properties, discontinuities, effects of subcritical annealing heat treatment and others, in order to assess and identify defects and discrepancies in the welded joint. According to the analysis of the results and discussions, it was observed that the E7018 electrode presents an efficient work, generating few spills and with good penetration; the heat treatment of subcritical annealing brings positive results in relation to the reduction of residual stresses, reducing the hardness of the weld joint without the material changing phase and making the material more sensitive to corrosion.

**Keywords:** SMAW. Electrode E7018. SAE 1020 steel. Annealing. Corrosion.



## 1. INTRODUÇÃO

Classificado como um aço de baixo carbono por ter uma concentração de 0,20% de carbono, o aço SAE 1020 é formado pelos seguintes elementos de ligas: carbono, fósforo, manganês e enxofre. Em consequência dos baixos teores de elementos de liga, este aço apresenta as seguintes propriedades, alta ductilidade e baixa temperabilidade, que oferecem as características de uma elevada soldabilidade e forjabilidade.

Com base na sua vasta área de aplicações e seu baixo custo, o aço SAE 1020 é empregado a uma alta gama de fabricações de peças, onde em sua grande maioria é aplicado o processo de soldagem na sua construção e manutenções. A pluralidade das peças que são fabricadas com esse material é submetida a grandes esforços dependendo da sua aplicação, em casos como eixos, parafusos, engrenagens, entre outros.

Nos dias atuais, a indústria de fabricação e montagem de componentes metálicos encontra-se com uma vasta área de aplicações para o aço SAE 1020, como: soldagem de vários elementos metálicos, tubos, parafusos, perfis, etc. Entretanto, um dos processos mais utilizados para revisão e reparos é a soldagem, com ênfase na qualidade, durabilidade e eficiência, que são os pontos principais analisados neste processo.

No processo de soldagem por eletrodo revestido a uma diversidade de aplicações por ter versatilidade satisfatória e um baixo custo. É aplicado em grande escala na manutenção de tubulações industriais e construções mecânicas como naval, ferroviária, automotiva e outras. Por ser aplicado em várias áreas, a parâmetros de soldagem que devem ser obedecidos, para evitar danos materiais e financeiros. A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) determina os requisitos básicos que devem ser cumpridos em um projeto.

O processo de soldagem é o mais utilizado na união de peças metálicas, devido sua alta gama de aplicações e custo. No entanto o processo de soldagem afeta o material alterando sua microestrutura e propriedades. Estas alterações ocorrem devido o aquecimento localizado elevado, provocando formações de regiões diferentes do metal de base, conhecida como zona termicamente afetada (ZTA). As principais alterações microestruturais do material são, crescimento dos grãos gerando tensões residuais e variação na composição de fases do material, proporcionando mudanças nas propriedades do material, aumentando a dureza e diminuindo a resistência a corrosão, podendo levar a falha durante seu uso.

No entanto, neste trabalho é realizado uma revisão bibliográfica com análises de resultados de caracterização de uma junta soldada de um aço SAE 1020 proveniente do processo de soldagem *Shielded Metal Arc Welding* – SMAW com



eletrodo E7018.

## 2. REVISÃO TEÓRICA

### 2.1. AÇO SAE 1020

O aço SAE 1020 é um aço hipoeutetóide com baixo teor de carbono, entre 0 e 0,77%, a Tabela 1 apresenta sua composição química. O manganês reduz a fragilidade proveniente do fósforo e enxofre proporcionando o endurecimento adequado, logo, à medida que se avança em direção ao teor de 0,77% de carbono, sua resistência e dureza aumentam e a ductilidade diminui (CHIAVERINI, 1986, p.66-72).

Tabela 1 – Composição do aço SAE 1020 em porcentagem.

C (%)	Mn (%)	P Máx. (%)	S Máx. (%)
0,18 – 0,23	0,30 – 0,60	0,030	0,050

Fonte: GERDAU, 2003, p.33.

De acordo com Callister e Rethwisch (2014, p.472-473), aços com baixo teor de carbono não respondem a tratamento térmico para formar martensita, o aumento da resistência é obtido por meio do trabalho a frio. Em virtude deste fator, a resistência e a dureza são relativamente baixas, proporcionando uma ductilidade e tenacidade eficaz, com boa usinabilidade, soldabilidade.

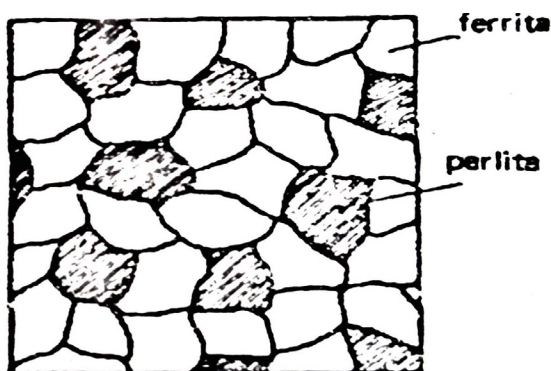


Figura 1 – Representação esquemática da estrutura de um aço hipoeutetóide  
Fonte: CHIAVERINI, 1986, p.71.

O aço hipoeutetóide, apresenta teores de carbono entre as faixas de 0,008% C e 0,77% C, logo a temperatura ambiente apresenta uma estrutura composta de ferrita e perlita, como mostra esquematicamente a Figura 1. Em conformidade com o resfriamento no diagrama de fases, determina-se a microestrutura para uma liga ferro carbono com composição hipoeutetóide. Neste processo a cuidados relevantes, pois de acordo com o modo de resfriamento, a temperatura ambiente também terá influência na transformação de fase (CHIAVERINI, 1986, p.66-69).

De acordo com o diagrama de fases (Figura 2) próximo a 875°C, ponto c, a microestrutura se constituirá inteiramente de grãos de fase  $\gamma$  (austenita).

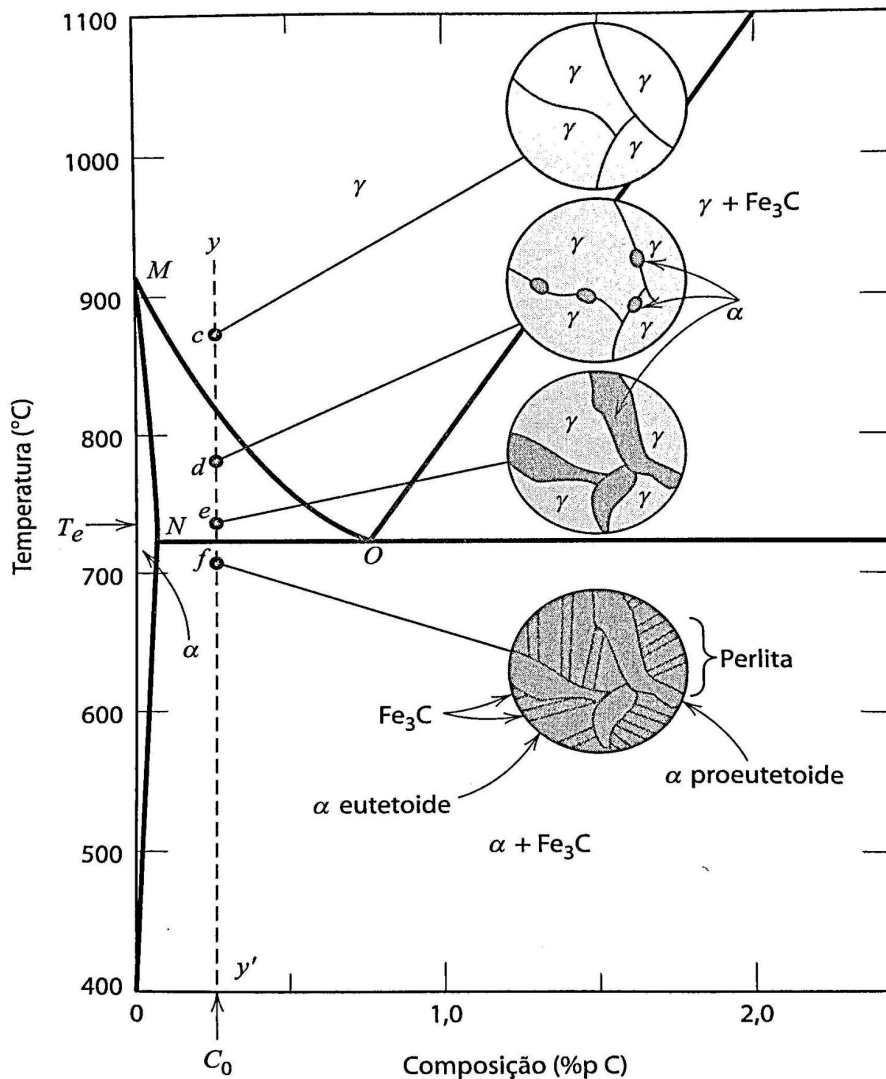


Figura 2 – Representação da microestrutura de uma composição hipoeutetóide de acordo com o resfriamento no diagrama de fases  
 Fonte: CALLISTER e RETHWISCH, 2014, p.349.

A Figura 2, mostra que a partir do ponto *d*, próximo de 775°C, onde se encontra na região das fases  $\alpha + \gamma$ , essas duas fases estarão coexistindo. No resfriamento de uma liga pela região das fases  $\alpha + \gamma$ , a composição de fases ferrita mudará com a temperatura ao longo da fronteira entre as fases  $\alpha - (\alpha + \gamma)$ , curva *MN*, tornando-se rica em carbono. Em contrapartida, a austenita terá uma mudança mais violenta, avançando ao longo da fronteira  $(\alpha + \gamma) - \gamma$ , curva *MO*, à medida que a temperatura reduz. Conforme o resfriamento do ponto *d* ao ponto *e*, imediatamente acima do eutetóide, mas ainda na região de  $\alpha + \gamma$ , será produzido uma proporção maior da fase  $\alpha$ , com partículas  $\alpha$  ainda maiores. Neste ponto, as composições das fases  $\alpha$  e  $\gamma$  são definidas com a construção de uma linha de amarração na temperatura *Te*, com a fase  $\alpha$  contendo 0,022%p C, e a fase  $\gamma$  terá a composição eutetóide com 0,76%p C. Reduzindo a temperatura bruscamente abaixo da eutetóide, até o ponto *f*, toda a fase  $\gamma$  que se encontrava na temperatura *Te* (e que mostrava uma composição eutetóide) se transformará em perlita (CALLISTER e RETHWISCH, 2014, p.348-349).

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço SAE 1020.

<b>Tipo SAE e condição</b>	<b>Resist. à tração kgf/mm<sup>2</sup></b>	<b>Along. em 2" %</b>	<b>Resist. ao Choque kgf.m</b>
1020, laminado	42 – 49,0	35 – 40	8,3 – 11,0

Fonte: CHIAVERINI, 1986, p.121.

As propriedades do aço SAE 1020 estão disponíveis na Tabela 2. A adição de elementos de liga na composição química da matéria prima favorece na alteração de suas propriedades, visando os seguintes objetivos: aumentar a usinabilidade, temperabilidade e capacidade de corte, conferir dureza a quente, resistência ao desgaste, corrosão e oxidação (ao calor), e modifica as características elétricas e magnéticas. Os efeitos da temperatura de aquecimento e o modo de esfriamento irá determinar a estrutura final do produto, de modo que a temperatura ambiente também afetará as propriedades segundo as condições de esfriamento (CHIAVERINI, 1986, p.118-119).

O aço SAE 1020 apresenta uma gama de aplicações devido ao baixo custo e características excepcionais, como elevada soldabilidade, forjabilidade, usinabilidade e relação adequada de resistência/peso. Exemplo de aplicações são: aços estruturais, eixo árvore, componentes de carrocerias de automóveis, latas estanhadas, etc (CALLISTER E RETHWICH, 2014, p.472).

## 2.2. Processo de Soldagem

O processo de soldagem é a união entre duas peças metálicas, utilizando uma fonte de calor de acordo com as especificações de um determinado projeto, a solda é o resultado desse processo. A soldagem é usada para fabricação de produtos e estruturas metálicas, aviões, veículos ferroviários, reatores nucleares, pontes, prédios, trocadores de calor, etc (Wainer, Brandi e Mello, 1992, p.2).

### 2.2.1. Classificação dos processos de soldagem e posição do material de solda em relação ao metal de base

No processo de soldagem existem dois modelos de classificação, que são: pelo tipo de fonte de energia ou pela natureza da união.



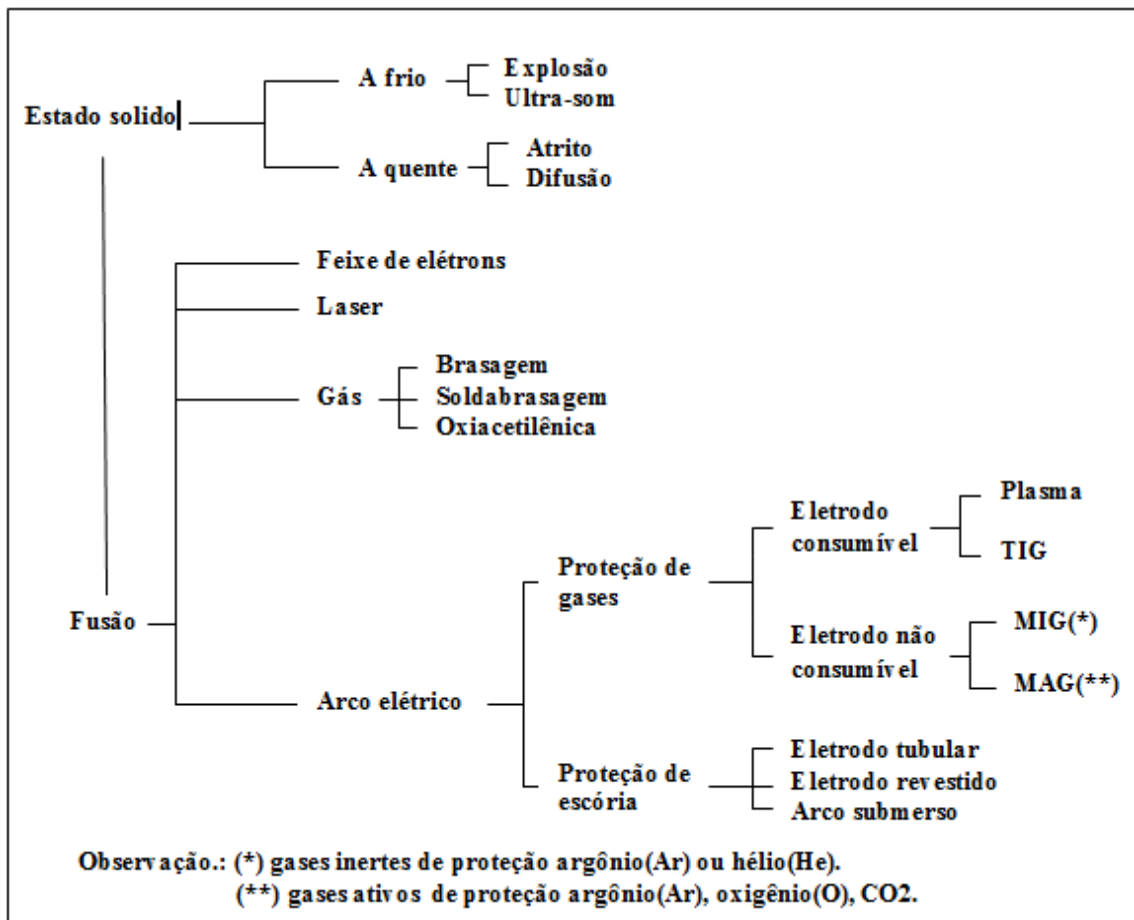


Figura 3 – classificação dos processos de soldagem  
 Fonte: WAINER, BRANDI E MELLO, 1992, p.3.

A AWS (*American Welding Society*) classifica mais de 50 tipos de soldagem, a Figura 3 mostra a classificação de acordo com a união no estado sólido ou por fusão. Na classificação por fonte de energia existem quatro tipos: fonte mecânica, o calor é gerado por atrito ou por ondas de choque, ou por deformação plasma do material; fonte química, o calor é gerado por reações químicas exotérmicas como, a queima de um combustível (chama) ou a reação de oxidação; fonte elétrica, o calor é gerado ou pela passagem de corrente elétrica ou com a formação de um arco elétrico; fonte radiante, o calor é gerado por radiação eletromagnética (laser) ou por um feixes de elétrons acelerados através de um potencial (WAINER, BRANDI E MELLO, 1992, p.6-7).

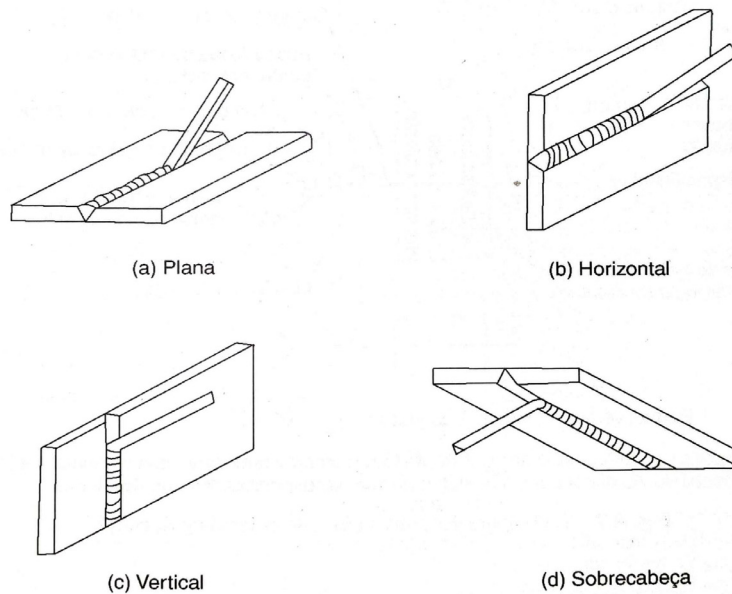


Figura 4 – Tipos de solda em relação a posição da peça  
 Fonte: PFEIL e PFEIL, 2017, p.95.

No processo de soldagem por eletrodo revestido as posições do eletrodo para realização do cordão de solda são de grande importância, sendo quatro tipos de posições, e estas posições serão indicadas de acordo com o revestimento do eletrodo. A Figura 4 mostra os modelos de posições, a posição (a) plana é a que produz os melhores resultados, sendo preferencialmente a mais utilizada em trabalhos de oficinas. As posições (b) horizontal e (c) vertical, são usadas corriqueiramente em trabalhos de oficina e de campo. A posição (d) sobre cabeça é mais trabalhosa, devido seus resultados não serem satisfatórios, sendo sua aplicação limitada a casos especiais. Este tipo de soldagem é passível de defeitos, com ocorrência de inclusão de escória, pela sua menor densidade em relação ao metal de base (PFEIL e PFEIL, 2017, p.94-95).

A Figura 5 mostra os tipos de entalhes com penetração total da solda.

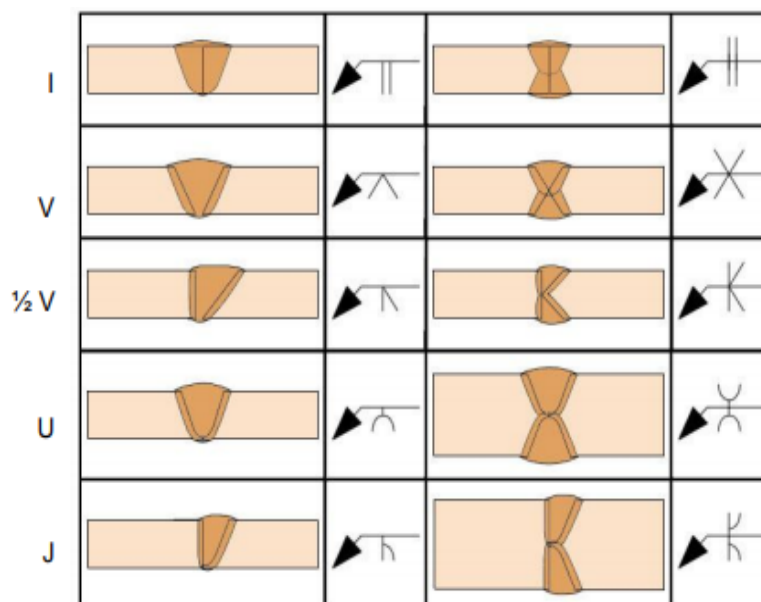


Figura 5 – Tipos de entalhas ou chanfros  
 Fonte: SOLDAGEM DOS MATERIAIS, p.33.



Para que uma solda tenha uma união uniforme e sem falhas deve-se seguir os seguintes parâmetros: a forma correta do entalhe (solda de chanfro), homogeneidade do metal depositado e perfeição entre o metal depositado e o metal base (PINHEIRO, 2005, p.101).

### 2.2.2. Efeitos do processo de soldagem

Nas ligas de aço, quando aplicado calor ou deformação plástica localizada pode-se modificar as propriedades do material. As modificações podem ser negativas e dependem das reações que ocorreram durante a solidificação, resfriamento e microestrutura final do material. Devido a elevada taxa de altas temperaturas localizadas, boa parte dos processos de soldagem provocam alterações na zona soldada, com probabilidade de resultados negativos. Portanto, a escolha do material a ser soldado, do metal de adição e do processo de soldagem, são pontos muito importantes para evitar resultados indesejáveis. Em decorrência da quantidade de calor elevada da deposição do metal de adição, sempre estará presente um fenômeno chamado zona termicamente afetada (ZTA). A zona termicamente afetada é a região da solda que não se fundiu durante o processo de soldagem, no entanto o calor induzido pela soldagem provoca mudanças microestruturais. Após a solidificação e durante o resfriamento, a zona fundida (ZF) ou metal de solda (MT) ainda poderá sofrer mudanças na sua microestrutura com o crescimento dos grãos, inclusão de átomos de outros elementos e mudança de fase (LEMOS, 2013, p.19-21).

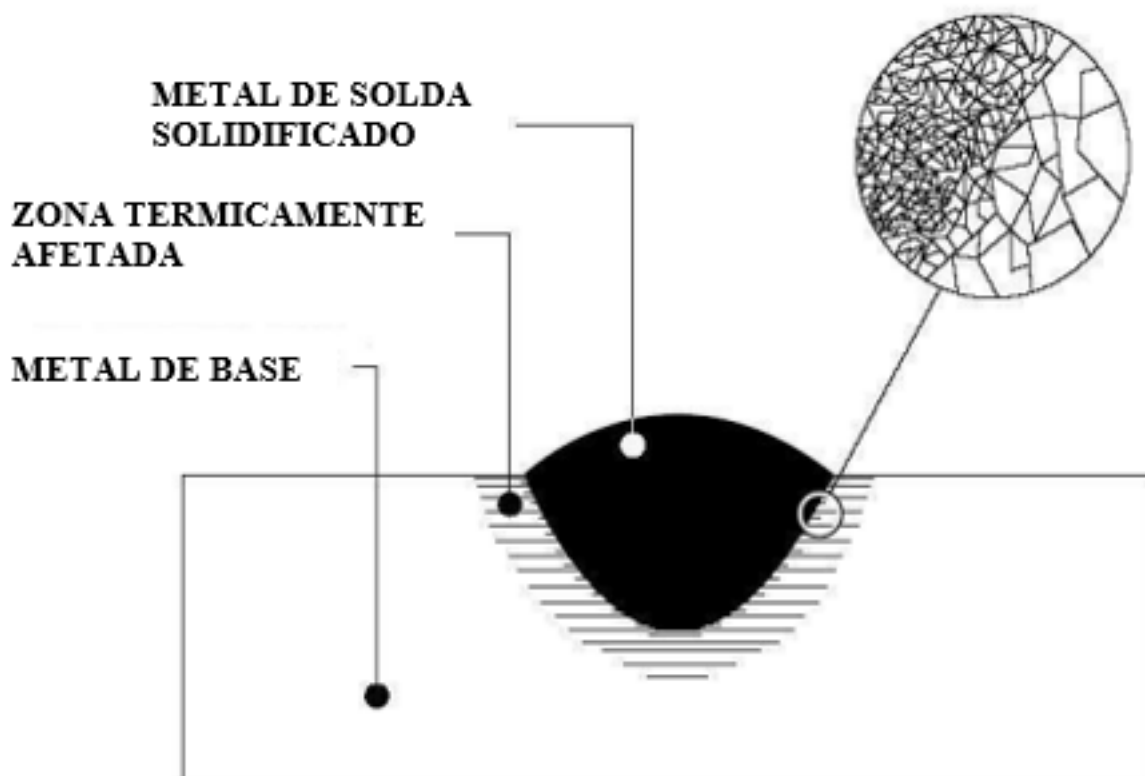


Figura 6 – Zona termicamente afetada (ZTA) e metal de solda (MS)  
Fonte: ESAB, 2005.

A Figura 6 revela a região da estrutura granular da (ZTA). O fenômeno estrutural granular da (ZTA) é mais fraco que o metal de base e mais fraco que a (ZS) que tem estrutura bruta de fusão. Em ocorrência do resfriamento rápido da (ZTA) em determinados aços, forma-se uma estrutura cristalina frágil e dura conhecida como martensita. Os poros ou sítios naturais da (ZTA) fazem a captura dos átomos de hidrogênio, no entanto as moléculas do hidrogênio são maiores que a estrutura cristalina do metal e podem ficar impedidas de migrarem livremente. À medida que os poros vão acumulando moléculas de hidrogênio, estas podem desenvolver elevadas pressões internas. Os aços carbono e aços com baixa resistência possui uma porcentagem de deformação plástica capaz de suportar as tensões internas resultantes das pressões dos átomos de hidrogênio de forma a não causar trincas, diferente dos aços de alta dureza e alta resistência que não apresentam um percentual de deformação plástica, no entanto o acúmulo de átomos de hidrogênio pode provocar trincas na ZTA (PFEIL e PFEIL, 2017, p.92-93).

### **2.2.3. Inspeção e controle**

Em produtos de grande sensibilidade a defeitos, a solda deverá sempre ser realizada em condições controladas. A American Welding Society AWS D1.1 é uma norma americana que contém os parâmetros específicos para execução de uma solda estrutural, incluindo técnicas, da habilidade do soldador (soldador qualificado) e procedimentos de inspeção, técnicas essas adotadas também pela norma brasileira NBR 8800. Em estruturas comuns o inspetor treinado faz a inspeção visual, verificando as dimensões de solda por auxílio de gabaritos especiais e observando se não há ocorrências de defeitos, como trincas ou penetração inadequada do metal de solda. Já nas indústrias de perfis soldados e em estruturas que exigem grande responsabilidade, é aplicado os ensaios não destrutivos, como líquido penetrante, raio-x e ultrassom (PFEIL e PFEIL, 2017, p.93).

## **2.3. Soldagem pelo Processo com Eletrodo Revestido**

O processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (Shielded Metal Arc Welding – SMAW), é amplamente aplicado nos vários processos de soldagem. A soldagem é iniciada com o calor do arco elétrico mantido entre a ponta de um eletrodo metálico revestido e a peça que irá ser trabalhada (ESAB, 2005, p.5).



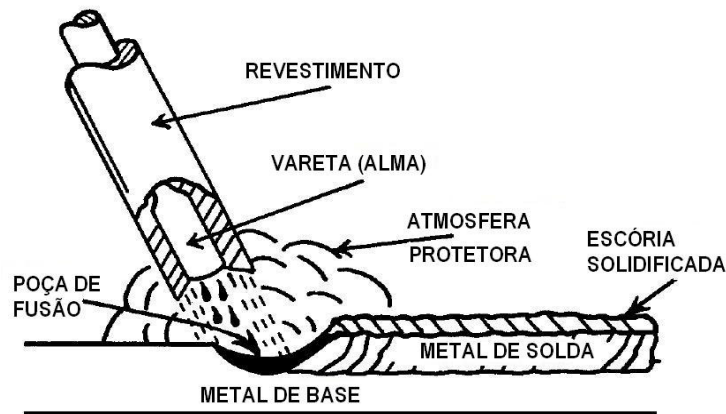


Figura 7 – Processo de soldagem com eletrodo revestido  
 Fonte: FREITAS, CARVALHO e GUEDES, p.2.

O aporte térmico gerado pelo arco elétrico funde o metal de base, a alma do eletrodo e o revestimento. As gotas do metal fundido são transferidas através do arco elétrico direto para a poça de fusão, são protegidas dos gases atmosféricos pelos gases de proteção durante a redução do revestimento, de modo que a escória líquida (resultado da redução do revestimento) flua para a superfície da poça de fusão protegendo o metal de solda (MS) dos gases atmosféricos durante a solidificação, conforme mostra a Figura 7 (PFEIL e PFEIL, 2017, p.90).

### 2.3.1. Eletrodos

De acordo com Pfeil e Pfeil (2017, p.92), os eletrodos com revestimentos, aplicados no processo de soldagem por arco elétrico, são varetas de aços de baixa liga ou aços carbono qualificados pela ASTM, por expressões como, EXXXY, onde:

E – Eletrodo

XX – Indica a resistência a ruptura x 1000 psi

X – Referência numérica da posição de soldagem (1 – todas as posições, 2 – posição horizontal e plana, 3 – plana, 4 – plana, sobre cabeça, horizontal e vertical)

Y – Referência numérica que indica o tipo de corrente e revestimento.

Os tipos de eletrodos mais utilizados nas indústrias e oficinas são:

E60 = 60 psi = 415 Mpa

E70 = 70 psi = 485 Mpa.

O revestimento do eletrodo tem a função de proteção do metal de solda, estabiliza e direciona o arco elétrico, promove adições de elementos de liga ao metal

de solda, age como agente fluxante, caracteriza a posição de soldagem, controla a integridade do metal de solda, incorpora propriedades mecânicas específicas ao metal de solda e isola a alma de aço (Wainer, Brandi e Mello, 1992, p.39-41).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foi realizado experimento e revisões bibliográficas de caracterizações e análises de juntas soldadas do aço SAE 1020, obtidas pela soldagem arco elétrico com eletrodo revestido (*Shielded Metal Arc Welding* - SMAW). Para o estudo foi utilizado três experimentos específicos, com os experimentos 1 e 2 (revisões de literatura) reproduzidos em laboratórios com padrões controlados e o experimento 3 (autoria própria) ao ar livre, com o foco no experimento 2 apenas na junta soldada com eletrodo E7018.

#### 3.1. Estudo Experimental 1

No experimento 1, DIAS (2018) utiliza para o processo de soldagem do aço SAE 1020, o consumível E7018 de composição química em massa (0,070 C; 1,230 Mn; 0,700 Si; 0,020 P; 0,005 S; 0,060 Ni; 0,009 Mo; 0,010 V; 0,050 Cr), sendo depositado um cordão de solda sobre o centro de uma chapa processada por laminação a quente com espessura de 15 mm, com junção em "V" utilizando os parâmetros de soldagem com corrente de 120A e uma tensão de 32V.

Após a obtenção da junta soldada, DIAS (2018) preparou as amostras, separando-as em três grupos, com o grupo 1 permanecendo como recebido e aplicando tratamento térmico de recozimento subcrítico com forno mufla nos grupos 2 e 3. O grupo 2 foi submetido a uma temperatura de 600°C e o grupo 3 a uma temperatura de 700°C. Os padrões utilizados para o grupo 2 e 3 foram com a taxa de aquecimento de 10°C por minuto, com duas horas de homogeneização e sendo resfriado ao ar livre, repetindo os mesmos tratamentos sob as mesmas condições para as amostras de impacto, três amostras para cada condição.

Depois dos processos de tratamento térmico realizou-se a caracterização microestrutural. Foi utilizado no preparo da superfície lixas d'água seguindo os padrões de granulação adequados, e aplicando alumina de 1 $\mu$ m para o polimento, depois foi aplicado Nital 2% para revelar a microestrutura das amostras. O autor DIAS (2018) contou com a ajuda de um microscópio óptico para capturar as imagens da microestrutura das três regiões (zona fundida ZF, zona termicamente afetada ZTA e metal de base MB), antes e após o ataque químico. Após a caracterização microestrutural as propriedades mecânicas das regiões ZF, ZTA e MB das mesmas três amostras foram avaliadas por meio de uma sequência de 12 medidas de microdureza Vickers, e energia absorvida no ensaio de impacto na ZTA. As en-



dentações foram impressas no centro da junta soldada no eixo simétrico da junta com um espaçamento de 1mm, com um ajuste na sétima medida de cada amostra para obter a microdureza da ZTA, (Figura 8), com carga de 1000gf durante 10s, de acordo com a norma ASTM E384 – 16.

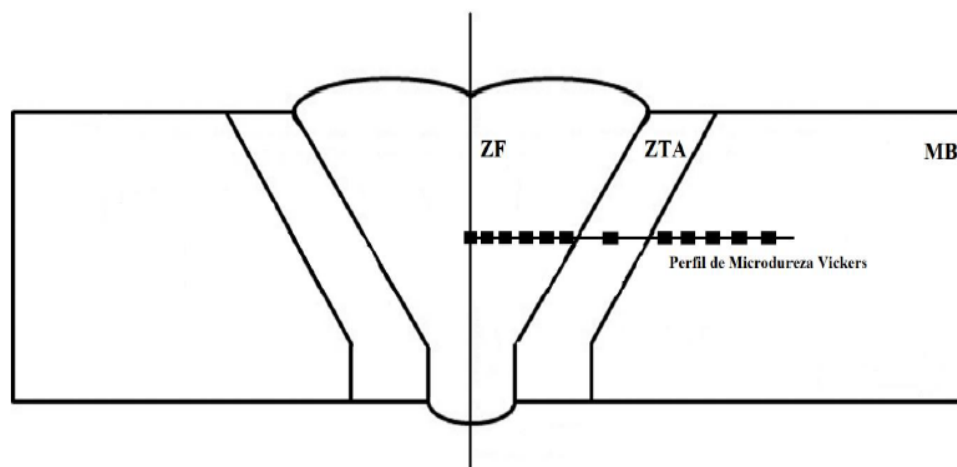


Figura 8 – Posicionamento das indentações  
Fonte: DIAS, p.31.

As dimensões dos corpos de prova para o ensaio de impacto Charpy foram definidas de acordo com a norma NBR 6157, com o entalhe localizado a 2mm da linha de fusão a fim de medir os valores de energia absorvida na ZTA, (Figura 9).

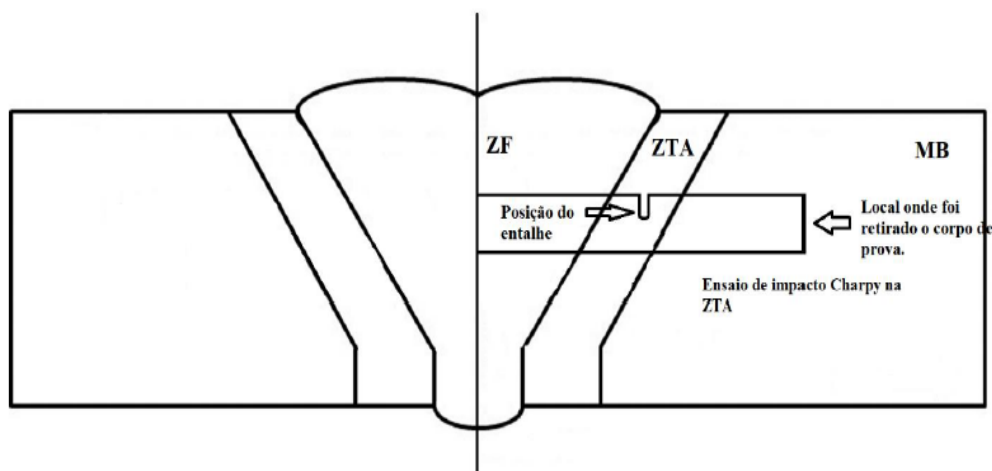


Figura 9 – Localização da retirada do corpo de prova para o ensaio de impacto Charpy  
Fonte: DIAS, p.31.

E como último método Dias (2018) executa o ensaio de imersão com um corpo de prova para cada condição de tratamento térmico, incluindo a amostra que ficou como recebida. Foi preparada a superfície de cada amostra de acordo com os princípios do método de polimento realizado no ensaio de caracterização microestrutural, para remoção de imperfeições. A área superficial foi determinada com o auxílio de um paquímetro e imagens microestruturais antes do ensaio de imersão. Com o auxílio de uma balança de precisão foram determinadas as massas de cada amostra. A solução utilizada para o ensaio foi NaCl 3,5% preparado com o auxílio de um agitador magnético, com o tempo de imersão de 72h em temperatura ambiente. Cessado o tempo de imersão, as amostras foram limpas em água corrente, detergente e álcool etílico, secadas a quente e pesadas com a mesma balança de

precisão para determinar a perda de massa, com todo o processo ocorrendo de acordo com a norma ASTM G31.

### 3.2. Estudo Experimental 2

No experimento 2, Gurvitz (2016) estuda a influência do eletrodo E7018, E6013 e E6010 nas tensões residuais e na qualidade superficial de uma junta soldada, utilizando uma chapa de aço ASTM A36 de 4,8mm de espessura e dimensões iniciais de 400 x 1000mm. O aço aplicado neste estudo experimental possui características e requisitos muito próximos do aço SAE 1020.

Gurvitz (2016) utiliza dois métodos de corte para obter os corpos de prova, que são, pelo processo de conformação mecânica a frio (guilhotina), obtendo 8 chapas de 200 x 250mm e aplicando o processo de usinagem com serra de fita nas amostras, resultando em 16 peças de 200 x 125mm, com o uso de fluido refrigerante neste processo a fim de minimizar o aquecimento, pois este fator influencia nas características do metal. No total foram empregadas 12 amostras para a obtenção de 6 juntas soldadas, com 2 para cada eletrodo. As tensões residuais superficiais foram medidas ao longo do cordão de solda, empregando a técnica de tensometria por difração de raio-X pelo método  $\text{sen}2\psi$ , utilizando radiação  $\text{CrK}\alpha$ , com comprimento de onda  $\lambda_{\text{CrK}\alpha} = 2,2809\text{\AA}$  difratando o plano cristalográfico da ferrita. Os corpos de prova foram medidos no topo e raiz, nas direções transversal e longitudinal ao cordão de solda em três regiões distintas: ZF, ZTA e MB, passando por inspeção visual para verificar quaisquer defeitos ao longo da junta soldada.

Foram selecionadas uma amostra soldada de cada eletrodo, para macrografia com análise das extensões das regiões da ZF e da ZTA. Para o preparo superficial Gurvitz (2016) aplica os mesmos processos que Dias (2018), lixando as amostras com lixas d'água, variando com granulação até 1200, e realizando ataque químico com Nital 2% e finalizando com análise em microscópio óptico com a intenção de verificar a extensão da ZTA.

### 3.3. Estudo Experimental 3

Este experimento é de autoria própria, e foi produzido para mostrar a analogia macrográfica das juntas soldadas de cada experimento.

Os materiais utilizados foram uma barra chata de aço SAE 1020 (Figura 10) com 4,5mm de espessura e o eletrodo E7018, com parâmetros de soldagem de corrente de 150A e uma tensão de 45V, com chanfro em "V", com passe de soldagem dos dois lados da barra chata.





Figura 10 – Junta soldada do aço SAE 1020  
Fonte: Aatoria Própria.

O preparo superficial foi realizado com lixas d'água conforme os experimentos 1 e 2, com uma diferença no ataque químico, pois devido as limitações foi utilizado solução de bateria (rica em ácido sulfúrico) para revelar a diferença entre a ZF e o MB, (Figura 11). Depois realizou-se uma inspeção visual com o intuito de verificar quaisquer defeitos ou discontinuidades na superfície da junta soldada.

Figura 11 – Caracterização macrográfica da junta soldada.



Fonte: Aatoria Própria.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ambos os experimentos 1, 2 e 3 realizaram o mesmo preparo superficial (com exceção do experimento 3 que mudou apenas o líquido do ataque químico), mas apenas os experimentos 1 e 2 conseguiram identificar as 3 regiões ao longo da junta soldada, ZF, ZTA e MB, pois no experimento 3 não foi realizado o ensaio de micrografia com microscópio óptico, sendo possível observar apenas a diferença entre a ZF e o MB.

### 4.1. Qualidade Superficial das Juntas Soldadas

Os parâmetros de soldagem foram aplicados de acordo com as normas e especificações do eletrodo nos experimentos 1, 2 e 3. Comparando a junta de solda de DIAS (2018), de GURVITZ (2016) e do experimento 3 (Figura-10), observou-se uma semelhança nas juntas soldadas com eletrodo E7018, com poucos respingos.

Nos experimentos 2 e 3 ocorreram defeitos bem semelhantes. De acordo com Gurvitz (2016), a presença de mordeduras na junta de solda está relacionada com o aporte térmico mal dimensionado em relação a corrente e velocidade, (verdadeiro), pois, a velocidade de avanço do cordão de solda pode provocar mordeduras e falta de penetração. O segundo passe de solda realizado no experimento 3 foi devido os chanfros das barras chatas estarem quase juntos durante a soldagem,

provocando a falta de penetração, e como podemos observar, a dois pontos na junta de solda da Figura 11, com localização no centro da junta e na parte inferior a direita, provocados pela inclusão de impurezas, devido a limpeza inadequada da escória ou de qualquer outro tipo de impurezas.

## 4.2. Caracterização dos Materiais

De acordo com Dias (2018) e Gurvitz (2016), fica evidente que os materiais após passarem por um processo de soldagem sem tratamento térmico, tem uma alta taxa de tensões residuais na ZTA, que faz com que o material tenha uma maior ductilidade na região. Os dois autores também provaram que, conforme a literatura, a ZTA possui uma região de grãos mais grosseira e frágil devido a este local que ainda está no estado sólido, ser submetido a um aumento da temperatura durante a soldagem, portanto, na amostra 1 sem tratamento térmico do experimento 1 e nas amostras do experimento 2, possuem uma taxa de tensões residuais que pode ser prejudicial.

Para redução de tensões residuais Dias (2018) faz o uso do processo de tratamento térmico de recozimento subcrítico. Pode-se notar na amostra com tratamento térmico de 600°C e na amostra com tratamento térmico de 700°C, a presença de ferrita e perlita, característica do aço SAE 1020. Quando comparados as amostras, a que permaneceu como recebida e a amostra com tratamento de 600°C, a uma diminuição no tamanho dos grãos conforme se direciona ao MB, diferenciando-se da amostra com tratamento de 700°C cujo o tamanho dos grãos permanecem constante quando direcionado ao MB. Em relação ao ataque químico, a amostra de 700°C teve um resultado negativo na resistência a corrosão quando comparados com a amostra de 600°C e a amostra sem tratamento, este fator ocorre devido o interior do grão apresentar comportamento catódico e o contorno de grão com comportamento anódico, provocando um aumento na corrosão eletroquímica, diminuindo a resistência a corrosão nos valores mais elevados de temperatura.

No ensaio de microdureza Dias (2018) nota uma diferença da ZF para o MB, isso deve-se ao fato do eletrodo possuir maiores quantidades de carbono em sua composição e uma maior quantidade de ferro em seu revestimento o que implica na mudança de fase da ZF durante o resfriamento, deixando-a com uma dureza mais elevada.





## 5. CONCLUSÃO

Conforme a realização das análises, dos dados obtidos e a abordagem das discussões, conclui-se que a diminuição das tensões residuais está relacionado com o estágio de recuperação a temperaturas mais baixas no tratamento térmico de recozimento, é nesta fase onde ocorre o rearranjo das discordâncias para se obter uma configuração mais estável, mas, as amostras com tratamento térmico tendem a ser mais afetadas pela corrosão, com a amostra tratada a 700°C sendo mais afetada que a amostra tratada a 600°C. A zona fundida (ZF) sempre terá a sua dureza superior à do metal de base (MB), devido ao eletrodo E7018 possuir maior porcentagem de carbono em sua composição química, maiores quantidades de pó de ferro em seu revestimento e outros elementos de liga, tendo influência na estrutura de ferrita e perlita da ZF. O eletrodo E7018 apresentou dificuldade na abertura do arco elétrico, a aparência do cordão de solda foi de boa qualidade e gerou poucos respingos. Este tipo de eletrodo pode ser indicado para trabalhos que requer uma alta qualidade e confiabilidade, pois apresenta uma boa penetração. Os parâmetros de soldagem informados pelo fabricante devem ser seguidos da forma correta e a habilidade do soldador é um fator muito importante quando se quer obter um resultado ideal.

## Referências

- CALLISTER, Willian D, Jr; RETHWISCH, David G. **FUNDAMENTOS DA CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS: uma abordagem integrada**. Rio de Janeiro: LTC., 2014. 805 p.
- CHIAVERINE, Vicente. **TECNOLOGIA MECÂNICA**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill., 1986. 388 p.
- DIAS, Felipe Rodrigues. **CARACTERIZAÇÃO DA JUNTA SOLDADA DE AÇO SAE 1020 COM TRATAMENTO TÉRMICO PÓS SOLDAGEM**. 2018. 48 f. Dissertação – Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2018.
- ESAB. **APOSTILA DE ELETRODOS REVESTIDOS**. Disponível em: <[https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1\\_apostilaelektodosrevestidos\\_ok.pdf](https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaelektodosrevestidos_ok.pdf)> Acesso em: 27 de fev. 2020.
- FREITAS, Rodrigo Costa de; CARVALHO, Roberson Thiago Mendonça de; GUEDES, Ana Emília Díniz Silva. **ANÁLISE METALGRÁFICA DE UM PERFIL SOLDADO POR ELETRODO REVESTIDO**. Disponível em: <[https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo\\_-\\_analise\\_metalografica\\_0.pdf](https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo_-_analise_metalografica_0.pdf)> Acesso em: 03 de mar. 2020.
- GERDAU. **MANUAL DO AÇO**. Disponível em: <[https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo\\_acos\\_gerdau.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/catalogo_acos_gerdau.pdf)> Acesso em: 26 de fev. 2020.
- GURVITZ, Arthur Queiroz Koatz de. **INFLUÊNCIA DO TIPO DE ELETRODO NAS TENSÕES RESIDUAIS E NA QUALIDADE SUPERFICIAL DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇO A36**. 2016. 61 f. Dissertação – Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2016.
- INFOSOLDA. **FISSURAÇÃO PELO HIDROGÊNIO “ TRINCAS A FRIO”**. Disponível em: <<http://ftp.de-mec.ufpr.br/disciplinas/EME733/Arquivos%20da%20disciplina/Trinca%20a%20frio.pdf>> Acesso em: 27 de fev. 2020.



LINCOLN LN 78®. **AWS E7018 • AWS A5.1 / A5.1M: 2012 E7018 / E4918 • ASME SFA - A5.1: E7018 • FBTS: E7018. AWS E7018 • AWS A5.1 / A5.1M: 2012 E7018 / E4918 • ASME SFA - A5.1: E7018 • FBTS: E7018. 2016.** Disponível em: <[http://www.lincolnelectric.com.br/upload/Lincoln LN 78\\_Digital.pdf](http://www.lincolnelectric.com.br/upload/Lincoln_LN_78_Digital.pdf)>. Acesso em: 27 nov. 2017.

LEMOS, Rhayssa Melos. **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TRÊS DIFERENTES TIPOS DE MATERIAIS SUBMETIDOS ÀS MESMAS CONDIÇÕES DE SOLDAGEM PELO PROCESSO A ARCO SUBMERSO.** 2013. 64 f. Dissertação – Curso de Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica, Minas Gerais, 2013.

PINHEIRO, Antonio Carlos da Fonseca Bragança. **ESTRUTURA METÁLICAS:** cálculos, detalhes, exercícios e projetos. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2005. 302 p.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michèle. **ESTRUTURAS DE AÇO:** Dimensionamento Prático de Acordo com a NBR 8800:2008. Rio de Janeiro: LTC., 2017. 357 p.

SOLDAGEM DOS MATERIAIS. **TERMINOLOGIA E SIMBOLOGIA DE SOLDAGEM.** Disponível em: <<https://cursos.unisanta.br/mecanica/ciclo10/CAPIT5.pdf>> Acesso em: 27 de fev. 2020.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **SOLDAGEM:** processos e metalurgia. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1992. 494 p.



# CAPÍTULO 6

## **ELEMENTOS CRÍTICOS DE MANUTENÇÃO QUE INFLUENCIAM NA REDUÇÃO DA VAZÃO AO LONGO DO TEMPO EM BOMBAS**

CRITICAL MAINTENANCE ELEMENTS THAT INFLUENCE IN REDUCING  
THE FLOW OVER TIME IN PUMPS

**Marcus Vinícius Lisboa Sousa**

**Diego Rosa dos Santos**

## Resumo

Aplicar técnicas de manutenção preventiva em bombas centrífugas vem da necessidade de assegurar maior disponibilidade e vida útil das bombas, garantindo uma maior economia de tempo, custo e produção. Este trabalho foi feito a partir de revisão bibliográfica, disponíveis na literatura, sobre a questão de manutenção em bombas. O estudo tem por objetivo evidenciar a importância da manutenção preventiva empregada em bombas centrífugas, identificar os elementos críticos que influenciam na insuficiência da vazão, aplicar conceitos de manutenção e propor melhorias para as bombas centrífugas, possibilitando que funcionem normalmente, com total disponibilidade e atender adequadamente a demanda solicitada para ser utilizada. Todavia, o trabalho contribui de forma positiva para destacar a importância da manutenção aplicada em bombas centrífugas.

**Palavras-chave:** Manutenção preventiva; Bombas centrífugas; Disponibilidade; Vazão.

## Abstract

Applying preventive maintenance techniques to centrifugal pumps comes from the need to ensure greater availability and service life of the pumps, ensuring greater savings in time, cost and production. This work was based on a bibliographic review, available in the literature, on the issue of pump maintenance. The study aims to highlight the importance of preventive maintenance used in centrifugal pumps, identify the critical elements that influence the insufficiency of the flow, apply maintenance concepts and propose improvements for the centrifugal pumps, allowing them to function normally, with full availability and adequately attend the demand requested to be used. However, the work contributes positively to highlight the importance of maintenance applied to centrifugal pumps.

**KeyWords:** Preventive maintenance; Centrifugal pumps; Availability; Flow.



## 1. INTRODUÇÃO

A partir da segunda metade do século XVIII em plena revolução industrial acontecendo no mundo, sendo então conhecida como o pontapé inicial para o avanço tecnológico na época, surge então equipamentos e máquinas de produção causando um grande impacto no mundo. Vinculado a isto, tem-se a necessidade de manter máquinas e equipamentos operando constantemente devido a implementação do processo de formação do capitalismo. Todavia, somente em 1940 é que surge então as preliminares formas de manutenção, até então sendo limitada somente ao conserto após a avaria garantindo uma baixa disponibilidade das máquinas, com isso, surge então a manutenção industrial.

As bombas centrífugas são utilizadas amplamente nos dias de hoje, visto que, com a crescente demanda da população e dando ênfase à mobilidade, rapidez e eficiência, torna-se imprescindível sua utilização para o transporte de fluídos. Nos dias atuais, com o crescente avanço tecnológico e com a grande faixa de demanda pelos clientes, a procura de qualidade do produto, segurança e desenvolvimento sustentável, passou a ser uma meta indispensável para todas as empresas.

Deste modo, dentro do cenário de evolução tecnológica, as bombas necessariamente precisam passar por inspeções e serem submetidas a manutenções para que consigam manter condições de pleno funcionamento garantindo sua produção normal. Independentemente do tipo toda manutenção tem por finalidade preservar o funcionamento adequado da máquina. Sendo assim, é necessário a existência de um plano de manutenção para qualquer equipamento fabricado, devendo aplicar técnicas de manutenção que melhor se adequam a cada equipamento particularmente.

Porém, mesmo com todos os tipos de manutenções existentes e técnicas de manutenção, muitas pessoas insistem em aplicar as mesmas técnicas de manutenções existentes em 1940. Além de não ser recomendável economicamente, a dependência de manutenção corretiva não planejada pode tornar-se um grande malefício para a vida útil das máquinas deixando sua integridade vulnerável.

Diante de um mercado altamente competitivo onde todos prezam cada vez mais pela qualidade do produto evitando perdas de produção com paradas não programadas de máquinas, é importante adotar técnicas de manutenção preventiva. O objetivo da pesquisa é adaptar técnicas de manutenção preventiva em uma bomba centrífuga com o intuito de garantir um melhor funcionamento, evitar queda de vazão e extensão da vida útil.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Bombas

Bombas são máquinas de fluxo geradoras, isto é, máquinas capazes de receber energia potencial de uma fonte motora e transformar em energia cinética e energia de pressão, cuja função é fornecer energia ao fluido, a fim de recalçá-lo, através da conversão de energia mecânica de seu rotor proveniente de um motor a combustão ou de um motor elétrico. Existem vários tipos de bomba, o processo pelo qual é feita a transformação do trabalho em energia hidráulica e o método para cede-la ao líquido permite classificar as bombas (MACINTYRE, 1987, p. 38).

Porém, as bombas centrífugas vem sendo utilizadas amplamente em diversos ambientes industriais, domésticos, agrícolas, entre outros. Isso pois essas máquinas possibilitam o transporte de vários tipos de fluidos de forma eficaz e muitas vezes satisfatoriamente econômica (PAES, 2018).

É importante saber que a locomoção do fluido depende também da eficiência da vazão volumétrica especificada pelo fabricante da bomba. Vazão volumétrica é definida como sendo a quantidade em volume do fluido que escoar através de uma seção tubular em um dado intervalo de tempo, desse modo, para o funcionamento adequado da bomba é necessário que a vazão apresentada seja a mesma especificada pelo fabricante (SCHNEIDER, 2007). Segundo Gouvea (2008), "a vazão da bomba depende de suas características construtivas e das características do sistema onde ela está operando."

A pesquisa de Linhares (2011) demonstra que desenvolvimento de novos materiais e técnicas utilizados pela engenharia são continuamente testados. A aceitação e a vida útil de um novo material em grande escala comercial dependerão de diversos fatores como: custo de produção, durabilidade, demanda na utilização, adequação as condições de uso, entre outros.

É o caso dos componentes de bombas centrífugas, especificamente, os rotores.

#### 2.1.1 Bombas centrífugas

De acordo com Júnior (2016) bombas centrífugas são bombas de deslocamento não positivo usadas para transferir fluidos cuja movimentação ocorre pela ação das forças que se desenvolvem na massa do mesmo, conseqüentemente a energia transferida ao fluido ocorre devido a rotação do eixo onde é disposto um rotor dotado de pás, o qual recebe o fluido pelo seu centro e expulsa pela extremi-



dade devido ação da força centrífuga.

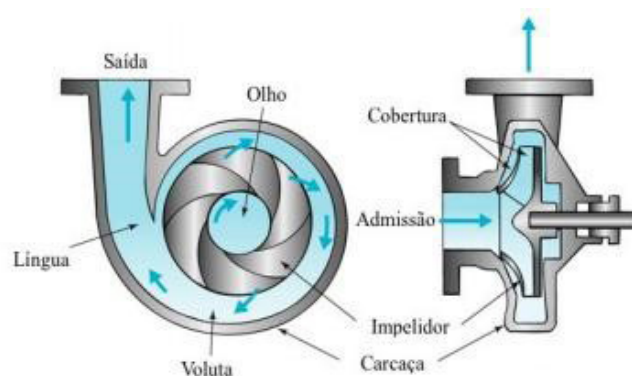


Figura 1 – Disposição típica do corpo de uma bomba centrífuga.  
Fonte: Potter & Wiggert (2010)

De acordo com a figura 1, conforme o rotor gira o fluído é sugado à uma baixa pressão, transformando energia de velocidade em energia de pressão através do rotor, logo em seguida escoar radialmente pela descarga a uma alta pressão.

Para Gouvea (2008), “a geometria do rotor caracteriza o tipo da bomba centrífuga e influencia a forma como a energia é transferida ao fluido e sua direção na saída do rotor”. Além do rotor existe outro órgão importante nas bombas sendo responsável por fazer a transformação da energia cinética com que o fluído sai do rotor em energia de pressão, chamado de difusor. Sendo assim, ao atingir a boca de saída da bomba, o fluído é capaz de escoar em velocidade razoável, controlando e equilibrando a pressão que se opõe ao seu escoamento (SOUZA, 2011).

### 2.1.1.1 Componentes da bomba

Segundo a literatura de Munson (2004). Na sua forma mais simples, a bomba é constituída por um rotor responsável por impulsionar o fluido que gira no interior de uma carcaça, a carcaça é tudo o que envolve o rotor e armazena o fluido direcionando para o recalque, já o eixo atravessa a carcaça e é responsável por transmitir a força motriz necessária para fornecer movimento rotativo ao impelidor.

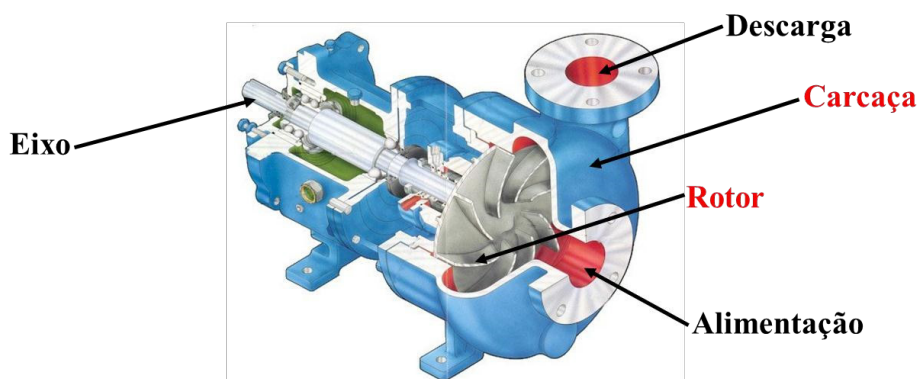


Figura 2– Vista em corte de uma bomba centrífuga  
Fonte: Armário da Engenharia Química (2014)

Através da ilustração representada na figura 2, é possível perceber que o princípio de funcionamento das bombas centrífugas parte para a geração de duas zonas de pressão: uma de baixa pressão na sucção e outra de elevada pressão na descarga. Na partida é preciso que a carcaça da bomba e tubulação de sucção estejam totalmente preenchidas com o fluido a ser bombeado. O enchimento da carcaça da bomba e a tubulação de sucção é chamado de escorva (COELHO, 2006).

Uma bomba centrífuga de único estágio é quando dispõe de um só rotor. Dependendo da situação e da instalação da bomba pode ser necessário utilizar uma bomba de múltiplos estágios, isso ocorre quando se deseja ter uma combinação de pressão total e capacidade que não se enquadra numa bomba de um único. Nesta situação, a descarga de uma bomba de um estágio é injetada na admissão de uma bomba de um segundo estágio, onde se preserva a pressão do primeiro. O líquido ao adentrar o segundo impelidor terá um aumento de energia sob forma de aumento de pressão e assim sucessivamente (MIRANDA, 2005).

## 2.2 O Fenômeno da Cavitação

A durabilidade, o desempenho e a confiabilidade de toda máquina dependem de diversos fatores. Sendo assim, como em qualquer máquina nas bombas não é diferente. É necessário então saber que alguns problemas podem surgir devido a operação inadequada, falta de manutenção, entre outros, comprometendo a vida útil das máquinas. A irregularidade mais comum quanto a isso é, portanto, a formação de bolhas no interior da carcaça causando o fenômeno chamado cavitação que afeta principalmente o rotor das bombas (LINHARES, 2011).

De acordo com Macintyre (1987), a cavitação ocorre inevitavelmente devido a rarefação no fluido, ou seja, pressões reduzidas a valores inferiores a pressão de vaporização, devido a ebulição da água no interior dos condutos por natureza própria do escoamento ou pelo movimento impresso das peças móveis ao líquido.

Formam-se bolhas de vapor muita das vezes erosivas capaz de comprometer a integridade e vida útil da bomba, isso acontece quando a pressão absoluta cai até atingir a pressão de vapor do fluido dando início a um processo de vaporização do mesmo formando pequenas bolsas que são conduzidas pelo fluxo do fluido até atingir regiões de elevada pressão onde acontece o seu colapso, com a condensação do vapor e o retorno ao estado líquido (SANTOS, 2007).

Miranda (2005) diz que "a implosão causa uma onda de choque local transitória e muito alta no líquido. Se a implosão ocorrer perto de uma superfície e ocorrer repetidamente, a pressão do choque irá eventualmente originar a erosão do material dessa superfície."

Além de provocar corrosão, desgaste, remoção de material, danificação nos





rotores e dos tubos de aspiração na entrada da bomba, a cavitação também pode apresentar outras anomalias como: queda de rendimento, ruídos, trepidação e vibração.



Figura 3 – Demonstração do impacto causado pela cavitação.  
Fonte: MMtec Inspeções Industriais (2016)

Como mostra a ilustração da Figura 3, as marcas de desgaste causadas pela cavitação ocorrem localmente e consistem em picagens profundas com bordos afiados, muitas vezes podem chegar ao ponto de ocorrer furos em parte das pás do rotor como mostra a imagem.

Geralmente, a cavitação nas bombas ocorre por consequência de altura inadequada da sucção, por velocidade de escoamento excessiva ou por escorvamento incorreto, ou seja, particularmente por problemas geométricos, hidráulicos e operacionais.

O fenômeno de cavitação segundo Menezes (2016) “pode ser evitado através do controle de uma grandeza definida como NPSH do inglês Net Positive Suction Head, em português seria Valor Positivo da Carga de Pressão”. Assim o fabricante através de ensaios fornece o NPSH requerido (Valor positivo da carga de pressão), definindo quanta energia o fluido deve ter na entrada da bomba para enfrentar alguns problemas no caminho. Analisando essas considerações, o NPSH disponível do sistema que é calculado através da pressão atmosférica local, pressão de vapor d’água, perda por atrito na sucção e altura da sucção, deve ser menor que o NPSH requerido para não haver cavitação. De acordo com a seguinte fórmula tem-se:

$$NPSHd = H_o - H_v - Pcs \pm AS \quad (1)$$

Onde:

**NPSHd:** NPSHd disponível

**H<sub>o</sub>:** pressão atmosférica local

**H<sub>v</sub>:** pressão de vapor d’água

**PCs:** perda por atrito na sucção

**AS:** altura de sucção

Para garantir um desempenho considerável da bomba deve-se garantir a situação proposta a seguir:

$$NPSH_d > NPSH_r + 0,36 \quad (2)$$

Para aumentar a eficiência do sistema, a pressão necessária no interior da bomba em relação ao nível de sucção requer valores cada vez menores. A partir daí pode-se definir cavitação como um fenômeno que ocorre quando o NPSH disponível é insuficiente quando comparado ao NPSH requerido (COELHO, 2006).

## 2.3 Plano de Manutenção

Solucionar e resolver problemas são atividades que resumem a importância da engenharia, sendo fundamental para a sua realização. Fornece ferramentas, técnicas e métodos eficientes são dispositivos essenciais quando se está à frente de problemas técnicos indesejados que podem ser até mesmo previstos com antecedência quando dispõe de uma boa gerência e planejamento na manutenção de equipamentos e máquinas (BAZZO; PEREIRA, 2009).

É importante que o profissional tenha contato direto com o objeto de análise, e que esteja buscando conhecimento capaz de detectar os problemas e propor sempre as melhores alternativas de melhorias, devendo assim ter uma visão do cenário geral de determinada situação (DOLABELA, 2008).

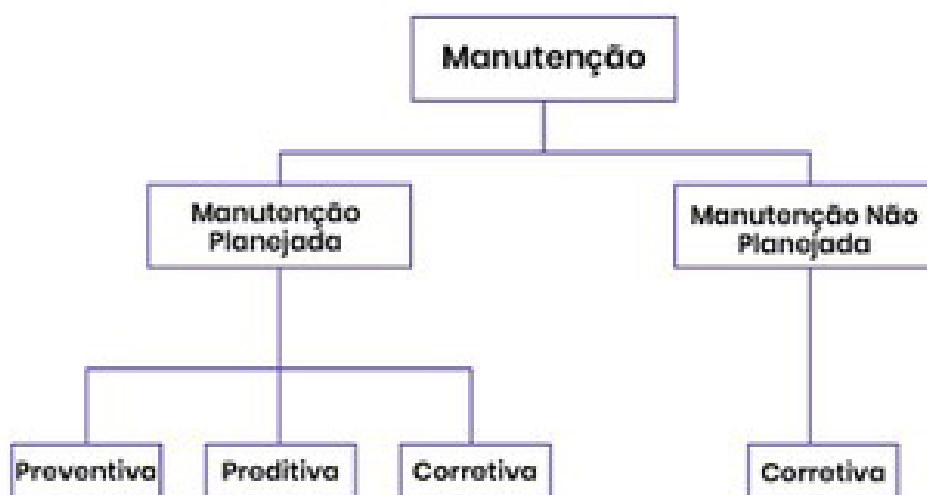


Figura 4 – Principais tipos de manutenção  
Fonte: Rodrigues (2018)

De acordo com a Figura 4, a manutenção tem diferentes enfoques sendo subdividida da seguinte maneira: corretiva, preventiva e preditiva. A escolha ideal da manutenção varia por equipamento e situação presencialmente abordada, mas todas tem por finalidade manter todos os equipamentos em seu devido estado de funcionamento para atender as demandas que lhes são impostas (RODRIGUES,

2018).

Segundo Martins (2015), a manutenção corretiva é a forma mais primária da manutenção, sendo definida como a manutenção não programada após a falha do equipamento, sem que haja tempo para a preparação dos serviços. Apesar de constituir a forma mais cara de manutenção no ponto de vista geral, esse tipo de manutenção ainda é muito utilizado atualmente.

Por outro lado, a manutenção preventiva de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) de 1994 é definida como: "Manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item". Em outras palavras, é a manutenção destinada a evitar que as falhas ocorram quando os equipamentos ainda estão funcionando nas mínimas condições.

Em contrapartida, a manutenção preditiva tem como característica o acompanhamento do equipamento por parâmetros de monitoramento que eventualmente possam prognosticar a ocorrência de falhas. O objetivo principal dessa manutenção é prevenir falhas e permitir a operação contínua do equipamento pelo maior tempo possível, determinando o tempo correto para a intervenção (VIANNA, 2002).

Entretanto, como a maioria dos equipamentos e dispositivos mecânicos, bombas centrífugas são máquinas dotadas de componentes móveis em seu interior, componentes no qual necessitam de um certo cuidado desde a instalação até o manuseio da bomba para garantir uma vida útil mais estendida. Desse modo, o presente trabalho tem por finalidade a elaboração de um plano de manutenção preventiva para bombas centrífugas através de análises quantitativas e qualitativas.

### **3. METODOLOGIA**

Foi baseada de acordo com o estudo feito por PAES (2018) no qual o equipamento analisado foi uma bomba centrífuga horizontal, onde começou através da avaliação de parâmetros qualitativos, primeiramente foi feito uma breve inspeção inicial seguida de pesquisas de materiais didáticos e manuais visando o conhecimento teórico necessário para realização do projeto.



Figura 5 – Bomba centrífuga  
Fonte: PAES (2018)

O objeto de estudo foi uma bomba do tipo centrífuga horizontal da fabricante KSB localizada no laboratório de hidráulica do curso de engenharia sanitária, esse tipo de bomba tem diversas utilizações inclusive para irrigação de vegetações. O conjunto da descrição conta com uma bomba marca KSB, modelo MEGANORM trifásica. Definida como horizontal normalizada, vedação por gaxetas, bipartida radialmente, monoestágio, fabricada em 2007. O conjunto consta também com um motor da marca Siemens, modelo 1LA7075-2EA90, potência 1CV a 3500rpm, trifásico, rotor tipo gaiola de esquilo.

Tabela 1 – Dados técnicos da bomba

<b>MEGANORM</b>	
Rotação máxima	1750 rpm
Pressão de serviço	até 16 bar
Vazão máxima	1160 m <sup>3</sup> /h
Vazão mínima	2 m <sup>3</sup> /h
Altura manométrica	até 162 m
Temperatura de Serviço	-30°C a +140°C
Tipo do rotor	Radial fechado com palhetas curvadas
Rolamento	Rolamentos cilíndricos
Lubrificação	Lubrificação com óleo
Sentido de Rotação	Horário, visto do lado do acionamento
Tipo de Instalação	Base metálica
Potência máxima do acionador	90 kW
Posição de instalação	Horizontal
Elevação mínima	2 m

Fonte: Adaptado de KSB (2007)

Para uma segunda inspeção de sua eficiência foi averiguado se havia trincas superficiais na carcaça da bomba e do motor, vazamentos nas tubulações e por fim verificado se havia desalinhamento entre os eixos do motor e da bomba. Através

disso foi possível notar que o acoplamento se encontrava sem seu protetor no qual possibilita riscos de acidentes estando em desacordo com as Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde do Trabalho, em especial a NR-12 – Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos.

Conseqüentemente, foi feito a desmontagem em conjunto com a especificação dos componentes e uma análise das partes dos equipamentos para a identificação de possíveis falhas. Por último, sendo feito a montagem e a elaboração de um plano de manutenção preventiva com os dados acolhidos.

#### **4. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA INSUFICIÊNCIA DA VAZÃO**

O intuito de listar os componentes e ter ciência dos fatores que prejudicam a vazão da bomba é evitar que isso possa ocorrer futuramente ou diminuir a frequência com que as falhas possam ocorrer, distinguir e listar os principais fatores que contribuem para a perda da vazão ao longo do tempo de vida útil de uma bomba centrífuga e posteriormente elaborar um plano de manutenção preventiva, visto que, no atual cenário em que vivemos muitas pessoas ainda não olham a manutenção preventiva como uma redução de custos e lucro e continuam entrelaçadas com a ultrapassada manutenção corretiva sem a elaboração de um planejamento para manutenção.

Entretanto, é necessário propor através de uma análise sucinta a elaboração de um plano de manutenção preventiva visando uma melhor avaliação dos elementos de manutenção garantindo que o equipamento opere e funcione em condições normais de uso durante toda sua vida útil. Através disso, será possível reduzir gradativamente os custos com manutenção corretiva não planejada e garantir maior disponibilidade e confiabilidade da bomba. As causas e fatores mais comum que influenciam para a perda da vazão ao longo do tempo podem estar em diversos componentes da bomba, a causa mais comum está ligada ao rotor da bomba quando se tem fornecimento de energia insuficiente para elevar a pressão do fluido causando a cavitação tendo por consequência a diminuição do rendimento e vibrações excessivas. Outra causa está no desgaste por recirculação, nesse caso a falha pode ser devido à instalação inadequada da bomba ou a bomba pode ser inadequada para o sistema. Uma outra possibilidade está relacionada ao corpo espiral da bomba, visto que, a corrosão e erosão podem gerar baixo rendimento e vazamentos na bomba (LINHARES, 2011).

É importante frisar que o plano de manutenção preventiva abordado no trabalho assim como os resultados obtidos foram desenvolvidos com base na pesquisa feita por Farias (2015) e um estudo semelhante feito por Paes (2018), no qual foi possível observar que a principal fonte responsável pela insuficiência na vazão foi a falta de manutenção na bomba, percebendo que muitos componentes da bomba



apresentavam sinais de desgaste e oxidação.

Visto que não teve nenhum sinal ou registros de manutenções anteriores, partiu-se para o ponto de criar um plano de manutenção adaptado do manual da fabricante. O manual adotado foi da fabricante KSB, onde o fabricante sugere uma série de inspeções a serem realizadas periodicamente dividido em verificações semanais, mensais, semestrais e anuais, para a realização efetiva da manutenção preventiva. Essas sugestões foram organizadas na tabela 2.

Tabela 2 – Sugestão de supervisão para manutenção preventiva

Pontos de Supervisão	Tipos de Supervisão			
	Semanal	Mensal	Semestral	Anual
Ponto operação da bomba	■			
Pressão de Sucção	■			
Vibrações e ruídos anormais	■			
Nível de óleo	■			
Vazamento das gaxetas	■			
Temperatura dos mancais		■		
Intervalo de troca de óleo		■		
Parafusos de fixação da bomba, e da base			■	
Alinhamento do conjunto bomba-acionador			■	
Lubrificação do acoplamento			■	
Substituir engaxetamento se necessário			■	
Verificar selo mecânico, se suas faces não estão desgastadas			■	
Desmontar a bomba para manutenção, inspecionar estado dos mancais, rotores e acoplamento				■

Fonte: Adaptado de KSB (2007)

Segundo Farias (2015), atendendo a essas indicações prescritas na tabela 2 é possível evitar a falha e a queda de desempenho da bomba, garantindo total disponibilidade para atender a demanda exigida do equipamento.

O mancal de rolamentos, de forma exclusiva só pode alcançar um desempenho satisfatório quando está corretamente lubrificado, a lubrificação correta desses componentes permite evitar o atrito direto entre os corpos rolantes e protege a superfície contra a corrosão, assim como, proporciona o resfriamento evitando vibrações e superaquecimento (SKF, 2019). Por isso é muito importante a escolha adequada dos lubrificantes e o método ideal para sua aplicação para a substituição do óleo contido no mancal de rolamentos, o fabricante recomenda os tipos mostrados na tabela 3.



Tabela 3 - Tipos de óleos recomendados

Fabricante	Até 3000 rpm	Acima de 3000 rpm
<b>Atlantic</b>	Eureka - 68	Eureka - 46
<b>Castrol</b>	HYS PIN AWS 68	HYS PIN AWS 46
<b>Esso</b>	Óleo p/ turbina 68	Óleo p/ turbina 46
<b>Mobil Oil</b>	DTE-26	DTE-24
<b>Ipiranga</b>	Iptur AW-68	Iptur AW-46
<b>Petrobrás</b>	Marbrax TR-68	Marbrax TR-46
<b>Shell</b>	Tellus- 68	Tellus- 46
<b>Texaco</b>	Regal R&O - 68	Regal R&O - 46
<b>Promax Bardhal</b>	MaxLub MA - 20	MaxLub MA - 15

Fonte: KSB Brasil (2007)

Considerando o fato de que o equipamento nunca foi submetido a nenhuma das manutenções preventivas previstas, foi levado em consideração que todos os prazos já se encontravam excedidos. Através disso, como medidas preventivas e baseando-se nas recomendações do fabricante, determinou-se uma manutenção mais adequada para a bomba em vigor. (PAES, 2018).

Tabela 4 – Manutenção sugerida

Ação	Critério para manutenção
<b>Trocar o óleo do mancal</b>	Viscosidade errada e prazo excedido
<b>Reapertar os parafusos de fixação</b>	Prazo de verificação excedido
<b>Substituir jogo de juntas</b>	Abertura da bomba
<b>Substituir gaxetas</b>	Gaxetas ressecadas
<b>Trocar anéis de desgaste</b>	Muitas horas de operação

Fonte: Adaptado de PAES (2018)

Todos os dados e análises assim como as alterações, devem ser feitos com base na prescrição que consta no manual do fabricante. Sendo assim, tornando possível que o prazo de vida útil do equipamento possa ser estendido simultaneamente enquanto o equipamento continue em operação.

## 5. CONCLUSÃO

Através do trabalho realizado foi possível adquirir conhecimento do equipamento e dos seus componentes, além de evidenciar a importância do entendimento sobre manutenção e plano de manutenção na engenharia. Os danos que podem ocorrer nos equipamentos e a elaboração de um plano de manutenção preventiva

são de grande importância para a engenharia mecânica, sendo seu aprendizado um critério de profissionalismo.

Foi possível a examinação com a descoberta de falhas em componentes, propor soluções para as anormalidades fora do padrão esperado e conseqüentemente elaborar um plano de manutenção preventiva.

Em virtude de uma pesquisa na literatura e o engajamento no assunto abordado, foi possibilitado elaborar tabelas que definem aplicações adequadas da manutenção preventiva. Tendo por objetivo melhorar a disponibilidade do equipamento, do seu rendimento e organizar de modo suscetível para o processo de manutenção.

Como forma de uma análise mais profunda sobre o tema, cabe em pesquisas futuras aplicar outras ferramentas disponibilizadas atualmente que permitem um estudo mais amplo sobre falhas e controle de qualidade, por exemplo, a análise FMEA (Failure Mode and Effect Analysis). São diversos os parâmetros existentes que contribuem para evitar ou reduzir falhas e perda de rendimento.

Entretanto, acredita-se que foi possível através do trabalho chegar aos resultados esperados e passar de forma clara e direta a responsabilidade que tem a manutenção preventiva dentro da engenharia mecânica, já que, além de manter o equipamento em adequadas condições de uso possibilita também uma grande redução de custos com gastos que poderiam ser evitados e viabiliza interrupções de produção e serviço.

## Referências

ABNT (1994), Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 5462: **Confiabilidade e manutenibilidade**, Rio de Janeiro.

ARMÁRIO DA ENGENHARIA QUÍMICA (Maringá). **Bombas Hidráulicas**. Universidade Estadual de Maringá, 30 out. 2014. Disponível em: <http://armariodaeq.blogspot.com/2014/10/>. Acesso em: 12 fev. 2020.

BAZZO, Walter Antônio; PEREIRA, Luiz Teixeira do Vale. **Introdução à engenharia**: Conceitos, ferramentas e comportamentos. 2. ed. [S. l.]: EDUFSC, 2009. 270 p.

COELHO, W. R. **Análise do fenômeno da cavitação em bomba centrífuga**. 2006 234 p Dissertação (mestrado) Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006.

DOLABELA, Fernando. **Oficina do Empreendedor**: A metodologia do ensino que ajuda a transformar conhecimento em riqueza. 1. ed. [S. l.]: Sextante, 2008. 320 p.

GOUVEA, Marcos Martins Rezende. **Estudo de confiabilidade em bombas centrífugas**. 2008. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade São Francisco, [S. l.], 2008.

JÚNIOR, Andouglas Gonçalves da Silva. **Bombas Hidráulicas**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 28 set. 2016. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/andouglassilva/disciplinas/mecanica-dos-fluidos/aula-8-bombas>. Acesso em: 12 fev. 2020.

KSB. **Ksb Meganorm**. [S. l.], 2007. Disponível em: <https://shop.ksb.com/esales/ksb/b2b/startApp.do?s-tartpage=true&xsrfid=zEiRSiyBvC7suhnOYTHvAWZzbPzMz9vuhk&navPosActive=1>. Acesso em: 25 maio





2020.

**KSB BRASIL.** Meganorm. [S. l.], 2007. Disponível em: <https://shop.ksb.com/esales/ksb/b2b/start.do?xsrfid=I50KpMin7uMxvYxgjCLvvkuw8aMRQ8MIns&browsersname=mozilla%2F5.0%2520%2528windows%2520nt%25206.1%253B%25%2529%2520applewebkit%2F537.36%2520%2528khtml%252C%2520like%2520gecko%2529%2520chrome%2F83.0.4103.97%2520safari%2F537.36&browsermajor=5&browserminor=5>. Acesso em: 15 maio 2020.

LINHARES, Alexandre Dias. **Observação do fenômeno da cavitação e do desgaste de rotores de latão de bombas centrífugas em instalação experimental.** 2011. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2011.

MIRANDA, Antonio. **Sistemas de pressurização.** 4. ed. Lisboa: Grundfos, 2005. 219 p.

MARTINS, P. G.; Laugeni, F. P. (2015); **Administração da Produção.** 3. ed. São Paulo: Saraiva.

MACINTYRE, A. J. **Bombas e Instalações de Bombeamento.** 2 ed. LTC Editora: 1997.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da mecânica dos fluidos.** 4 ed. Editora: Edgard Blucher:2004.

POTTER, M. C., & WIGGERT, D. C. **Mecânica dos Fluidos.** 1ª ed. Editora: Cengage Learning: 2004

MMTEC INSPEÇÕES INDUSTRIAIS. **Cavitação.** [S. l.], 2016. Disponível em: <http://www.mmtec.com.br/cavitacao/>. Acesso em: 14 fev. 2020.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. Governo Federal. **Norma Regulamentadora Nº 12 - Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos.** [S. l.], 29 set. 2015. Disponível em: <http://trabalho.gov.br/seguranca-e-saude-notrabalho/normatizacao/normasregulamentadoras/norma-regulamentadora-n-12-seguranca-no-trabalho-em-maquinas-eequipamentos>. Acesso em: 21 maio 2020.

PAES, Cezzar Castro. **Plano de manutenção e análise de vibrações em uma bomba centrífuga normalizada do tipo mancal,** Universidade Federal do Pará, 2018.

RODRIGUES, Gabriel. **Manutenção preditiva, preventiva e corretiva: entenda a diferença entre elas.** [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.blog.auvo.com/post/manutencao-preditiva-preventiva-e-corretiva>. Acesso em: 14 fev. 2020.

SCHNEIDER, P. S. **Medição de Velocidade e Vazão de Fluidos.** Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

SOUZA, Z.; VIANA, A.N.C. **Bombas funcionando como turbinas.** Itajubá: Escola Federal de Engenharia, 198-. 19 p. (Publicação interna do Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas). 2011.

SANTOS, Sergio Lopes. **Bombas e Instalações Hidráulicas.** [S. l.]: Lcte, 2007. 253 p.

SKF. **Seleção de um óleo apropriado.** [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.skf.com/pt/products/super-precision-bearings/principles/bearing-selectionprocess/lubrication/suitable-oil>. Acesso em: 27 maio 2020.



# CAPÍTULO 7

## **ANÁLISE DE DESEMPENHO DE FLUIDO DE CORTE VEGETAL EM TORNEAMENTO DE AÇO ABNT 1045**

PERFORMANCE ANALYSIS OF VEGETABLE CUTTING FLUID IN ABNT  
1045 STEEL TURNING

**Rafael Nunes Ferreira**  
**Patrício Moreira de Araújo Filho**

## Resumo

O Fluido de Corte tem sido empregado na indústria mecânica com o objetivo de lubrificar e refrigerar a região de corte, além de diminuir o atrito da peça-ferramenta e aumentar a velocidade de corte, porém o efeito do uso de diferentes tipos de fluido e variações de velocidade de corte tem poucos estudos na literatura. Para acrescentar novos e esclarecedores conhecimentos, o presente trabalho traz a discussão comparativa da análise de desempenho em corpos de prova de aço ABNT 1045 torneados com e sem ação de fluido de corte. Para tanto foi coletado dados sobre desempenho de do fluido de corte vegetal a base de coco babaçu e um fluido comercial. Os dados obtidos por esse trabalho demonstram que a escolha e aplicação correta do fluido de corte proporciona benefícios diversos ao processo. Assim, fica evidenciado que entre os fluidos de corte avaliados neste trabalho o fluido de corte a base vegetal de babaçu apresenta melhor desenvoltura.

**Palavras-chave:** Fluido de corte, usinagem, cavaco.

## Abstract

The Cutting Fluid has been used in the mechanical industry in order to lubricate and cool the cutting region, in addition to reducing the friction of the tool part and increasing the cutting speed, however the effect of using different types of fluid and variations cutting speed has few studies in the literature. In order to add new and illuminating knowledge, the present work brings a comparative discussion of the performance analysis in ABNT 1045 steel specimens turned with and without cutting fluid action. For that, data were collected on the performance of vegetable cutting fluid based on babassu coconut and a commercial fluid. The data obtained from this work demonstrate that the correct choice and application of the cutting fluid provides different benefits to the process. Thus, it is evident that among the cutting fluids evaluated in this work, the babassu vegetable-based cutting fluid presents better resourcefulness.

**Keywords:** Cutting fluid, machining, chip.



## 1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo que tem como objetivo a remoção de material em forma de cavaco através da interferência entre a ferramenta e o material a ser usinado, dando a peça: forma, dimensão e acabamento. Existem vários fatores positivos nesse processo, tendo como principal a possibilidade de se obter melhores acabamentos superficiais e melhores tolerâncias dimensionais, conferindo a peça características impossíveis de se conseguir por meios de outros processos.

Entretanto, durante a fabricação de peças observou-se que ocorria um desgaste maior da ferramenta, devido à grande quantidade de calor gerado nos processos, diminuindo sua vida útil e gerando possíveis problemas de acabamento nas peças.

Atualmente com o uso da tecnologia e a necessidade de se trabalhar a maiores velocidades de corte e uma maior produção na indústria metal mecânica, o uso dos fluidos de corte se tornou indispensável, dando mais qualidade na usinagem. Quando aplicados da forma correta podem contribuir diminuindo o custo e aumentando a produtividade.

Diversos aspectos negativos oriundo do uso dos fluidos de corte podem ser evitados, em especial os problemas relacionados ao meio ambiente, pois a maioria dos fluidos possuem em sua composição, produtos químicos que prejudicam o ambiente e o ser humano, devido isso, experimentos foram realizados e novos meios de refrigeração e lubrificação surgiram, como, óleos graxos (de origem animal ou vegetal), óleos minerais (derivados de petróleo), combinação de óleos e aditivos, óleos emulsionáveis e os fluidos de corte, sendo necessário o estudo para a escolha do fluido mais eficiente para o processo desejável.

O presente trabalho tem como objetivo fazer uma análise de desempenho do fluido de corte desenvolvido pela Startup BioFluid<sup>1</sup> no processo de torneamento de aço ABNT 1045, comparando-o em relação a um óleo já comercializado, além da água e da usinagem a seco. Além da análise de desempenho foi realizada uma avaliação do consumo de energia durante a usinagem.

---

<sup>1</sup> “Startup cleantech de São Luis - MA que soluciona problemas de lubrificação e também refrigeração industrial, especificamente nas indústrias de transformação e usinagem, aumentando o desempenho desse processo, além de produzir um fluido de origem vegetal e biodegradável que se adequa às normas e legislações ambientais vigentes em nosso país, convertendo parte da receita em apoio socioeconômico com as comunidades extrativistas de coco babaçu.”



## 2. REVISÃO TEORICA

### 2.1 Fluidos de Corte em Processos de Usinagem

Com a grande quantidade de calor produzido nos processos de usinagem, proveniente da energia necessária para retirar cavaco, devido o atrito entre peça-ferramenta, se torna fundamental a utilização de um fluido de corte, podendo ser ele líquido ou gasoso, que aplicados na ferramenta e na região do material usinado, facilita a operação de corte. Seu uso ainda torna possível o trabalho em altas velocidades de corte, maiores avanços e maiores profundidades.

Segundo Ferraresi (1977), o pesquisador F. W. Taylor, 1894, foi o primeiro a constatar e medir os efeitos de fluidos de corte no processo de usinagem. Em seus trabalhos foi possível observar que o emprego do fluido de corte durante a usinagem reduz os efeitos indesejáveis da temperatura sobre o material usinado, sua constatação se deu por meio da utilização de água para resfriar a ferramenta, reduzindo os efeitos da alta temperatura. Vale dizer que tal feito possibilitou o aumento da velocidade de corte em 33% sem que a vida útil da ferramenta fosse prejudicada. Finalizando esse processo, Taylor utilizou uma mistura de água e sabão para impedir que a peça e a ferramenta viessem a enferrujar. Logo após, com a melhoria de materiais para ferramentas, possibilitando maiores velocidades de corte, novos fluidos de corte foram desenvolvidos.

A utilização de fluidos de corte melhora a eficiência dos processos de usinagem garantindo diversos benefícios em seu uso. As principais funções do fluido de corte são: lubrificação, refrigeração do conjunto peça/ferramenta, e retirada do cavaco da zona de corte. A lubrificação pelo fluido de corte reduz as forças envolvidas no processo evitando assim a geração de calor na zona de corte. A escolha e aplicação é de extrema importância, podendo trazer benefícios, como a redução de custos de fabricação aumentando a taxa de produção. (MACHADO et al., 2011)<sup>2</sup>

Como refrigerante, os fluidos atuam sobre a ferramenta evitando que ela atinja altas temperaturas e assim diminuindo a perda de características durante o corte, sobre a peça, age evitando deformações causadas pelo calor gerado.

Como lubrificante, facilita a retirada do cavaco sobre a ferramenta diminuindo o atrito com a peça, evita o surgimento de aresta postiça, além de reduzir o coeficiente de atrito na região entre a ferramenta e cavaco, diminuindo a sollicitação dinâmica da máquina.

Além de melhorias de caráter funcional os fluidos introduzem ainda melhorias de caráter econômico, podendo reduzir o consumo de energia de corte, a redução do custo da ferramenta e impedindo a corrosão da peça em usinagem.

---

<sup>2</sup> “As principais funções dos fluidos de corte são: lubrificação a baixas velocidades de corte; refrigeração a altas velocidades de corte; remoção dos cavacos da zona de corte; proteção da máquina-ferramenta e da peça contra a oxidação.”

Motta e Machado (1995) apud Barboza (2018), destacam outros papéis importantes exercidos por um fluido de corte, sendo eles:

- Melhoria no acabamento superficial: o acabamento superficial de peças usinadas se relaciona com a força utilizada na usinagem, o que depende da qualidade de lubrificação usada. Em baixas velocidades os fluidos são efetivos no processo de lubrificação, o que resulta em uma melhora no acabamento superficial.
- Evitar o aquecimento excessivo da peça: com o calor produzido durante o processo de corte podem ocorrer problemas de manuseio da peça ou uma expansão do componente fabricado o que, em algumas circunstâncias, pode levar a erros de tolerância dimensional. O fluido controla o aumento de temperatura, reduzindo os efeitos do superaquecimento da peça fabricada.
- Auxiliar na remoção do cavaco na região de corte: em determinadas operações o cavaco deve ser retirado da área de corte para não riscar ou comprometer o acabamento superficial da peça usinada ou ocasionar avarias na ferramenta. O fluido de corte auxilia na remoção.

Algumas propriedades são necessárias para que os fluidos possam desempenhar suas funções, como:

- Baixa viscosidade;
- Capacidade de envolver “molhar” para estabelecer um bom contato térmico;
- Alto calor específico e alta condutividade térmica;
- Resistir a pressões e temperaturas elevadas sem vaporizar;
- Boas propriedades antifricção e antissoldantes;
- Viscosidade adequada – a viscosidade deve ser suficientemente baixa para permitir uma fácil circulação do fluido e suficientemente alta de modo a permitir uma boa aderência do fluido às superfícies da ferramenta. (DINIZ, 1999)

Além das propriedades descritas por Diniz (1999), outras propriedades conferidas aos fluidos, são destacadas na Tabela 01:



Tabela 01- Propriedades dos fluidos

<b>PROPRIEDADES DOS FLUIDOS DE CORTE</b>	<b>AÇÃO ESPERADA</b>
Anticorrosiva	Proteger a peça, ferramenta e o conjunto máquina-ferramenta contra a corrosão.
Antioxidantes	Evitar a oxidação prematura do fluido devido a ação das elevadas temperaturas.
Antidesgaste	Reforçar as propriedades lubrificantes do óleo mineral
Antiespumante	Evitar a formação de espumas na região de corte
Extrema-pressão	Resistir às elevadas pressões de corte
Umectação	Molhar a superfície de corte, melhorando a refrigeração
Ausência de odores	Evitar odores fortes ou desagradáveis no meio ambiente
Ausência de precipitados	Garantir a livre circulação do fluido pelo sistema
Viscosidade, calor específico, condutividade térmica, vapor latente de vaporização	Remover o calor gerado durante a operação de corte, prolongar a vida útil da ferramenta
Lavabilidade	Remover cavacos e poeiras produzidos durante a operação de corte
Compatibilidade com o meio	Compatibilidade com a saúde humana e com o meio ambiente.
Detergentes	Reduzir a deposição de lodo, lamas e borras
Surfactantes	Garantir a uniformidade das emulsões
Adição de Biocidas	Inibir o desenvolvimento de microrganismos, como bactérias e fungos

Fonte: Runge e Duarte (1990) e adaptação própria.

O atual sucesso dos fluidos se dá por conta também dos avanços obtidos durante sua fabricação, onde novos aditivos são desenvolvidos, apresentando melhores propriedades refrigerantes e lubrificantes, além de oferecer menos riscos ao operador.

Silliman (1992) destaca que a industrialização gerou um aumento na demanda de fabricação de peças estimulando o aumento da velocidade de corte, exigindo o desenvolvimento de materiais para ferramentas de corte mais resistentes e como consequência, o aperfeiçoamento na produção dos fluidos de corte.

Ainda de acordo com Silliman (1992) é normal encontrar diferentes nomes

para um mesmo fluido de corte, o que acaba causando uma certa confusão, sendo necessário uma nomenclatura para facilitar a compreensão das diferentes características de cada tipo de fluido.

## 2.2 Classificação

Existem várias formas de se classificar os fluidos de corte apesar de uma não padronização estabelecida entre as empresas fabricantes. Ferraresi (1977) classifica e divide os fluidos em três grupos: sólidos, líquidos e gasosos. Diniz (1999), separa-os em: ar, tipos aquosos e óleos. Embora os fluidos sólidos e gasosos estejam descritos na literatura, são os fluidos de corte líquidos que representam a grande maioria nas aplicações na usinagem. Na Tabela 02, os fluidos foram classificados de acordo com suas composições e principais propriedades.

Tabela 02-Classificação dos fluidos de cortes

Classificação dos fluidos de corte	Sólido	Líquido			Gasoso
		Óleos Puros	Óleos emulsionáveis	Fluidos químicos	
Composições	Grafite e bissulfeto de molibidênio.	Óleo mineral e/ou óleo graxo (Agentes EP: cloro, enxofre e fósforo).	Óleos, água e emulsificadores (Agentes EP, antioxidantes e umectantes).	Água, sais orgânicos e inorgânicos, (Agentes EP, anticorrosivos, antioxidantes, biocidas e umectantes).	Ar, dióxido de carbono, nitrogênio e vapor.
Propriedades	Lubrificação	Lubrificação, Extrema-pressão, Anticorrosão.	Boa refrigeração, Boa oxidação, Baixa lubrificação, Boa anticorrosão, Extrema-pressão.	Excelente refrigeração, baixa lubrificação, boa anticorrosão e oxidação, fácil remoção, extrema-pressão.	Refrigeração.

Fonte: Ferraresi (1977) e Diniz (1999).

Machado (2011) agrupou os fluidos líquidos nas seguintes categorias: óleos, emulsões e soluções.

- Óleos integrais: são os óleos minerais puros ou com aditivos. Devido ao seu alto custo, hoje contribuem para a melhoria das propriedades lubrificantes dos fluidos minerais.
- Emulsões: são divididas em emulsionáveis e semissintéticos. Os emulsionáveis



veis não dissolvem em água, são compostos adicionados em água combinados com agentes emulsificantes que garantem a uniformidade da mistura. Para evitar os efeitos nocivos da água, são empregados aditivos anticorrosivos e biocidas para inibir o crescimento de bactérias e fungos. Os fluidos semissintéticos são formadores de emulsões e se caracterizam por apresentar entre 5% e 50% de óleo mineral ou vegetal.

- Soluções: compostos monofásicos de óleos que se dissolvem completamente na água. Não adição de agentes emulsificantes, pois os compostos reagem quimicamente formando fases únicas.

## 2.3 Fluidos de Corte a Base Vegetal

De acordo com Kopac (1998), a utilização dos fluidos de corte representa 16% do custo total de fabricação da peça. Devendo levar em consideração as possíveis vantagens que a aplicação dos fluidos de corte pode proporcionar ao decorrer do processo, dependendo também de outros fatores da operação, como condições de corte, do material da peça e da ferramenta.

Grande parte dos óleos lubrificantes utilizados nos processos de usinagem são de base mineral. Apesar de apresentarem boa capacidade de lubrificar e elevada estabilidade, estes produtos podem provocar diversos efeitos nocivos à saúde dos trabalhadores e ao meio ambiente. Diante disso, uma alternativa tem sido a volta da fabricação de fluidos a base vegetal (biodegradável).

A procura por produtos que cause menos efeitos negativos para os trabalhadores e meio ambiente tem sido intensificado nos últimos anos. Pesquisas indicam que os óleos vegetais provenientes de fontes renováveis possuem grande potencial para substituir os óleos de origem mineral (SOUZA et al., 2012).

Em busca de técnicas de produção menos agressivas ao meio ambiente e ao operador, o uso de óleos vegetais no processo de usinagem constitui uma alternativa. Eles apresentam bom contato para lubrificação, elevado índice de viscosidade, alto ponto de fulgor e baixa volatilidade (CAMPANELLA et al., 2010).

Dentro da natureza existe uma diversidade de matérias primas capazes de serem utilizadas na fabricação de óleos vegetais. Tais matérias primas somadas a novos métodos e tecnologias de processos de refino, possibilitam a eliminação de alguns problemas, como; a formação de resina, aumento da viscosidade e acidez.

No Brasil, a pesquisa para a fabricação de fluidos vegetais deve considerar a oportunidade devido à grande extensão territorial e sua área geográfica, clima tropical e subtropical, o que favorece o cultivo de uma diversidade de oleaginosas para a produção de óleos vegetais (GRUSZYNSKI, 2002).

Sheng (1997) destaca que apesar de serem mais caros que os óleos a base de petróleo, os óleos vegetais são mais adequados para o atendimento dos rígidos requisitos ambientais devido a sua biodegradabilidade.

Woods (2005) relatou que os óleos vegetais possuem varias vantagens, entre elas: a compatibilidade com a pele humana, a tendência de redução na formação de vapor, nevoa e fumaça, além de um ponto de fulgor mais, reduzindo os riscos de incêndio nas maquinas.

A única desvantagem na sua utilização em relação aos óleos minerais, é o preço inicial de sua aquisição, entretanto tal valor é compensado ao verificar-se os ganhos obtidos na vida das ferramentas e na redução do consumo do produto.

Kuroda (2006) cita algumas vantagens dos fluidos vegetais em relação aos minerais, sendo elas:

- A melhor adaptação com a pele humana do que os óleos minerais;
- Possuem em sua estrutura moléculas polares que tem como objetivo suportar grandes tensões através da formação de um filme lubrificante, isso facilita a usinagem e também melhora a vida das ferramentas. Já os óleos minerais por ser apolares, a sua capacidade lubrificante é menor. Isso favorece uma maior produtividade.
- Ambos os fluidos não podem ser queimados, apesar de que os óleos vegetais ao ser queimado poluem menos o ambiente, além de sua matéria-prima ser reutilizável. (KURODA, 2006)

A aplicação de óleos vegetais como fluidos de corte traz benefícios em vários sentidos, pois além das vantagens já citadas, seu uso revela resultados expressivos em termos de economia, produtividade e de usinabilidade de diversos materiais. Suas propriedades e características devem ser levadas em consideração na escolha do fluido de corte mais eficiente para a operação.

## 2.4 Seleção do Fluido de Corte

A escolha do fluido de corte ideal para a operação de usinagem é uma etapa difícil, pois no mercado há uma grande variedade de produtos disponíveis. Os custos na sua aquisição também precisam ser considerados, pois os benefícios devem superar o investimento.

A seleção e o correto uso do fluido de corte influem diretamente sobre a qualidade de acabamento das peças, a produtividade, o custo operacional, a saúde do trabalhador e o meio ambiente (RUNGE e DUARTE, 1990).

Pelo menos três aspectos importantes devem ser analisados antes de se de-



cidir por um determinado fluido de corte: o material da ferramenta, o material da peça, e a operação (MACHADO et al., 2009).

### 2.4.1 Material da ferramenta

Os processos de usinagem se baseiam no corte de uma peça utilizando uma ferramenta de corte. Este corte é possível pois a ferramenta possui uma dureza mais elevada do que a peça.

A definição de um material de ferramenta para determinada operação implicará no potencial taxa de remoção de material. Tal taxa indicará as temperaturas de corte e as tensões na ferramenta que provavelmente serão encontradas (MACHADO et al., 2009).

Segundo Ferraresi (1977) e Diniz (1999), os aços rápidos, o metal duro, a cerâmica e o diamante devem ter as seguintes propriedades:

- Dureza elevada a quente;
- Dureza elevada a frio;
- Tenacidade;
- Resistência à desgaste por atrito;
- Resistencia a compressão;
- Estabilidade química.

Outra propriedade é a resistência aos choques térmicos. As propriedades de dureza e resistência a desgaste estão relacionadas com a capacidade de imprimir altas velocidades aos processos de usinagem. O material ideal da ferramenta deveria ter a dureza do diamante, a tenacidade do aço-rápido e a inércia da alumina.

### 2.4.2 Material da peça

Conhecer o material da peça a ser usinada é fato decisivo para a escolha do fluido de corte. O aço tem usinabilidade variada devido as suas diferentes ligas. Algumas propriedades exercem grande influência na usinabilidade dos materiais como: a composição do material da peça, o quanto foi deformado a frio, as propriedades mecânicas entre outros.



Os tipos de materiais da peça podem ser: aço, ferro fundido, magnésio e suas ligas, alumínio e suas ligas, cobre e suas ligas, e níquel e suas ligas (FERRARESI, 1977).

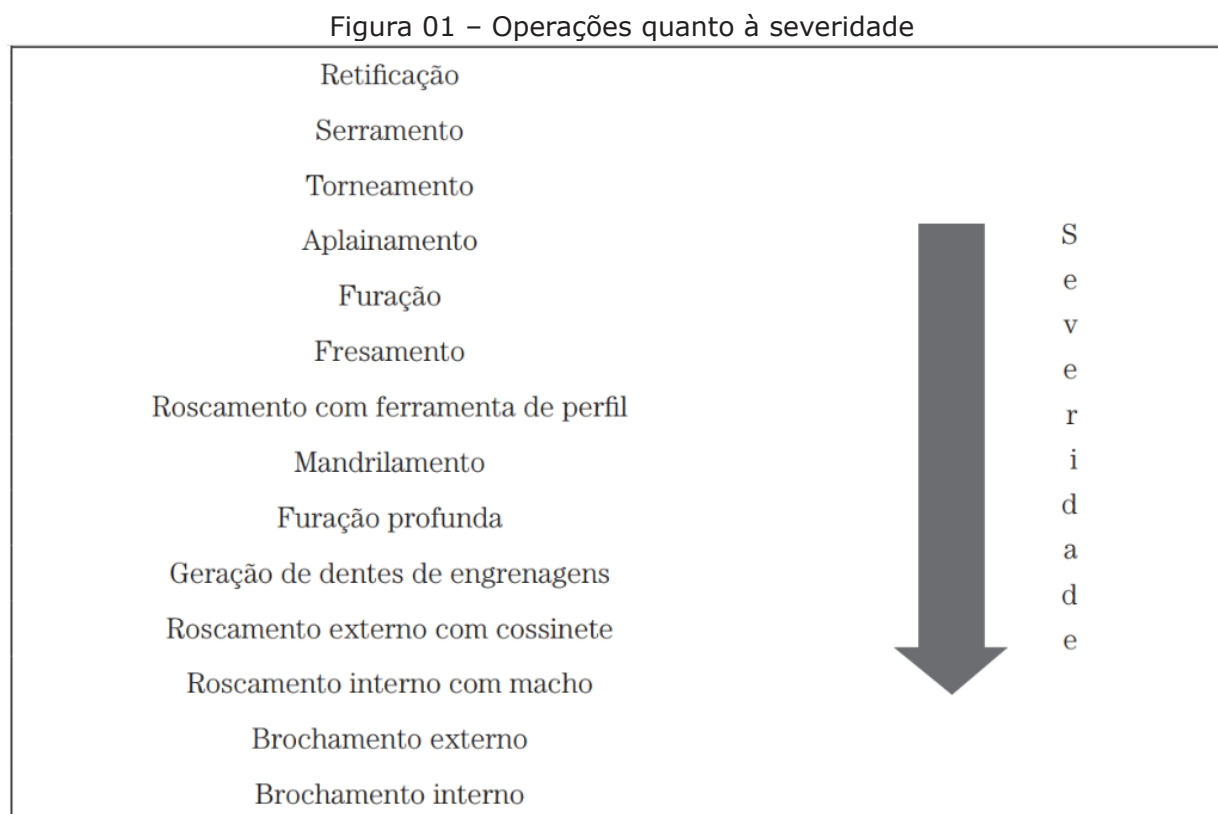
Com isso, todos os tipos de fluidos de corte podem ser utilizados, dependendo da severidade da operação e da resistência do material da peça.

### 2.4.3 Operações de usinagem

A usinagem é o processo que confere a uma peça, forma, dimensões, acabamento superficial através da retirada de material em forma de cavaco, que é uma porção de material da peça, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular. A retirada de material se dá pela interferência entre a ferramenta de usinagem e a peça. Os processos de usinagem têm grande aplicação na indústria e há diversos processos.

A utilização dos fluidos varia de acordo com a severidade das operações, cada operação tem seu objetivo e parâmetros definidos e distintos. Assim a seleção do fluido de corte pode variar desde a emulsão de baixa concentração (altamente refrigerantes) até os mais ativos tipos de óleo integral (geralmente lubrificantes).

A Figura 01 classifica as principais operações de usinagem quanto a sua severidade.



Fonte: Machado et al. (2009)

## Usinabilidade do aço ABNT 1045

Usinabilidade é o termo utilizado para apontar o desempenho de usinagem de um material, pode ser definido como a capacidade de um material ser cortado ou usinado por uma ferramenta, é um resultado do contato do metal com a operação de usinagem.

Alguns fatores determinam a usinabilidade do material, como a composição química, a microestrutura, dureza, propriedades mecânicas e rigidez da peça. Os processos mecânicos e condições de usinagem também influem, como o material e geometria da ferramenta, condições de trabalho, operação a ser utilizada e o fluido de corte.

De acordo com Gonzales e Cupini (1992) as propriedades de usinagem de um metal são aquelas que expressam seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo. Quatro critérios são utilizados para avaliar a usinabilidade de um material, sendo eles:

- Vida da ferramenta;
- Força de usinagem;
- Qualidade superficial da peça;
- Formação de cavacos.

Os aços são os materiais metálicos mais utilizado na indústria. O aço ABNT 1045 tem em sua composição 0,45% de carbono, sendo classificado como um aço de médio teor de carbono, tem boas propriedades mecânicas e tenacidade e é considerado um material de boa usinabilidade e soldabilidade. Sua aplicação compreende eixos, peças forjadas, engrenagens comuns, componentes estruturais de máquinas, virabrequim, etc. (CHIAVERINI, 1986)

A Tabela 03 apresenta as faixas de composição química do aço ABNT 1045:

Tabela 03 – Composição aço ABNT 1045

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Al	Ti
0,45	0,66	0,012	0,008	0,2	0,01	0,02	0,01	0,002

Fonte: Chiaverini (1986) e adaptação própria.

## 2.5 Torneamento

O torneamento é uma operação de usinagem que consiste em fixar o material a ser cortado em um mandril, onde o material é rotacionado enquanto uma ferramenta, fixada em um porta-ferramenta realiza um movimento uniforme de rotação em torno de um eixo fixo, retirando material em forma de cavaco. A determinação das condições ideais de torneamento para um determinado tipo de aço é fundamental para se obter uma fabricação de qualidade e economicamente viável (FERRARESI, 1986).

O processo é realizado com a combinação de dois movimentos: avanço da ferramenta e a rotação da peça, sendo possível reduzir o diâmetro ou diminuir o comprimento da peça, respectivamente. O avanço da ferramenta poder ser realizado tanto automaticamente quanto manualmente.

Há três processos típicos de torneamento que não ocorrem em outros processos de usinagem:

- O corte é normalmente contínuo;
- O corte pode ser caracterizado em coordenadas cilíndricas;
- Ocorre, ao mesmo tempo, movimentos da peça e ferramenta. (OYAFUSO e SILVA, 2018)

Existem dois fatores que influenciam o resultado final do processo: os parâmetros de corte a geometria da aresta de corte.

## 3. METODOLOGIA

Foram torneados corpos de prova de 2" x 1000 mm de aço ABNT 1045 em um torno da marca Romi modelo S -20A, uma ferramenta de metal duro - DCM-T070202-UTI20T da marca Mitsubishi Materials e um multímetro alicate MINIPA modelo ET - 3200A para monitorar a corrente elétrica. Durante a usinagem dos corpos de prova, foi utilizado um pirômetro MINIPA modelo MT-350, precisão de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , com campo de visão de 100 à 1.000mm, diâmetro do alvo de 2,5mm à uma distância fixa de 200mm afim de medir a temperatura da superfície de saída da ferramenta de corte.

O fluido de corte utilizado para análise comparativa, foi de origem vegetal, a base de coco babaçu, tendo em sua composição adições de detergentes, antiespu-



mantes, anticorrosivos, emulsificantes e biocidas. Tal fluido foi desenvolvido pela Startup BioFluid de São Luís -MA, com o intuito de produzir e comercializar um fluido de corte com propriedades superiores aos principais comercializados atualmente.



Figura 02 – Fluido de corte BF-01 BioFluid  
 Fonte: BioFluid e adaptação própria.

Para uma melhor análise foi utilizado um fluido de corte comercial, onde será identificado nesse trabalho como Fluido Comercial, água (H<sub>2</sub>O) além da usinagem a seco (Seco).

Os principais parâmetros do processo de usinagem foram apresentados na Tabela 04, onde foram utilizados para ambos os fluidos. Para o ensaio foi definido o método de lubrificação convencional.

Tabela 04 – Parâmetros de usinagem

<b>Velocidade de corte</b>	<b>Rotação</b>
30m/min	180 rpm
100m/min	710 rpm

Fonte – autoria própria.

Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM A370-12a, utilizada para testes de propriedades mecânicas dos materiais metálicos.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por ser o processo mais utilizado na indústria de fabricação, foi definido o torneamento para comparar a eficiência dos fluidos utilizados, pois o processo permite a aplicação do fluido sobre a superfície de saída de ferramenta, sendo analisados diferentes métodos de lubri-refrigeração.

Durante os testes foram medidos o consumo de energia e a temperatura na região de corte. Com os experimentos realizados com o multímetro é possível verificar no Gráfico 01 que a utilização do fluido de corte de babaçu, reduz a corrente elétrica por conta da redução da força de corte devido à diminuição do atrito gerado.

Para analisar a temperatura durante a usinagem foram executados 6 testes com o pirômetro, cada teste com uma velocidade, rpm e avanço fixados, com o fluido de babaçu e um concorrente utilizado nas mesmas condições.

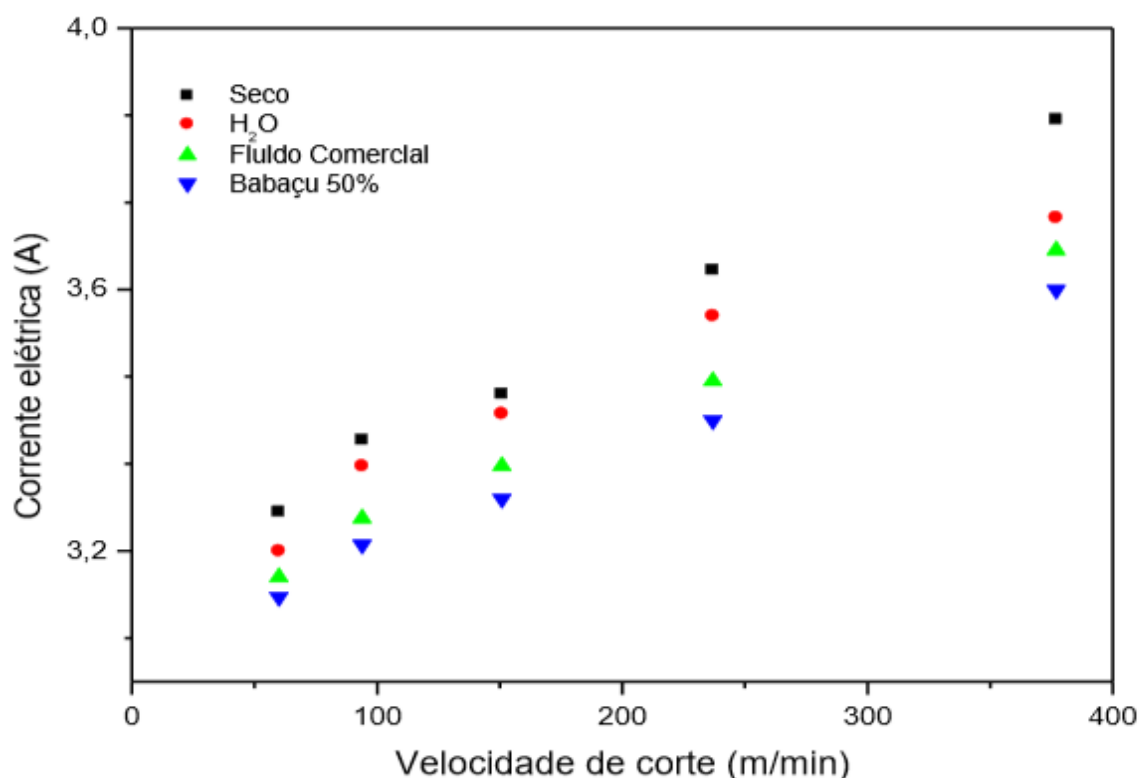


Gráfico 01 - Corrente Elétrica (A) x Velocidade de Corte (m/min)  
Fonte: BioFluid e adaptação própria.

Nos Gráficos 02 e 03, com velocidades de corte de 30m/min e 100m/min nota-se que a utilização dos fluidos de corte possibilitara a redução da temperatura de corte, entretanto o fluido de origem vegetal apresentou valores de temperatura considerado baixos em relação ao fluido comercial, mesmo em altas velocidades de corte.



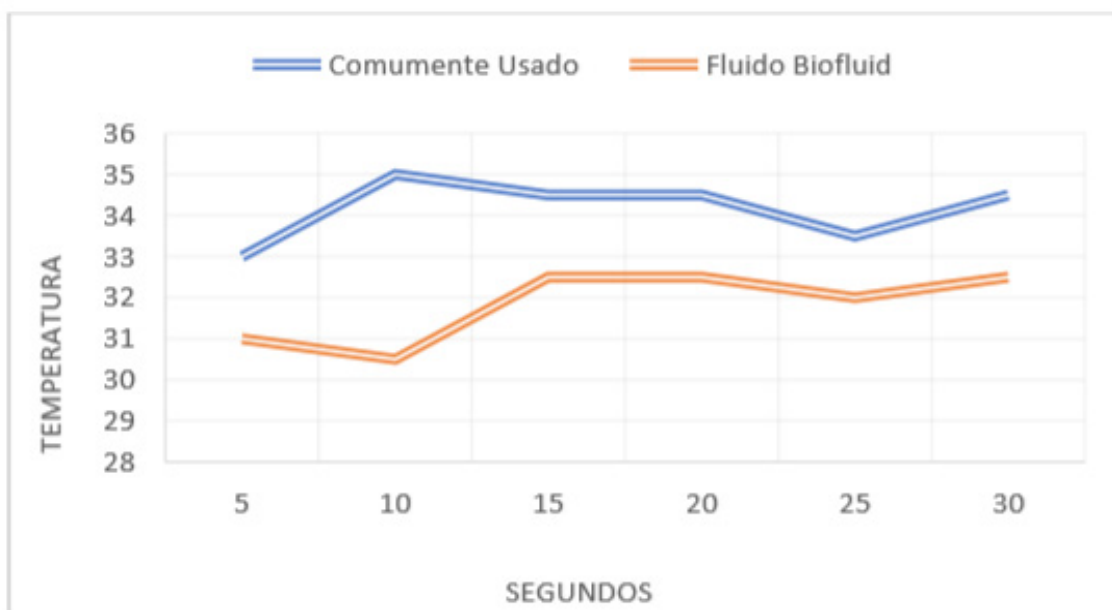


Gráfico 02- Temperatura de Corte (°C) x Tempo (s) para uma Velocidade de Corte de 30m/min em aço ABNT 1045  
 Fonte: BioFluid e adaptação própria.

A ação lubrificante do fluido de babaçu fez com os cavacos escoassem pelo plano de cisalhamento secundário, o que promoveu uma redução do calor gerado e conseqüentemente da temperatura de usinagem. Os gráficos mostram que a aplicação do fluido de corte de origem vegetal apresenta resultados satisfatório no torneamento do aço ABNT 1045 tanto com a redução da temperatura como na diminuição da corrente elétrica.

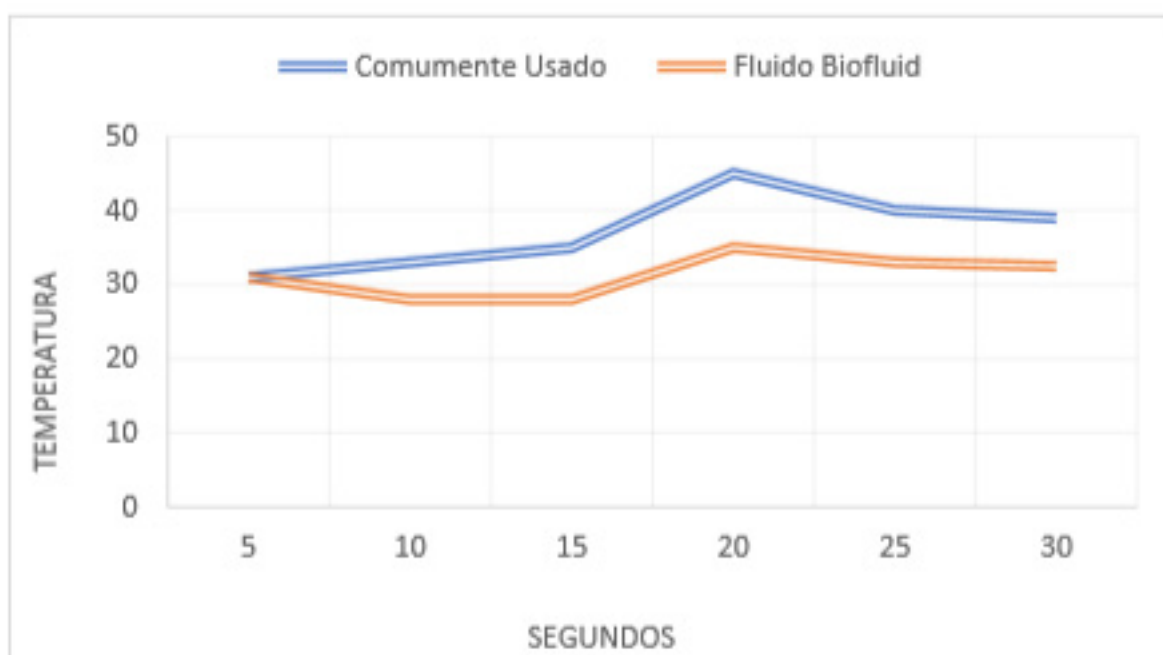


Gráfico 03- Temperatura de Corte (°C) x Tempo (s) para uma Velocidade de Corte de 100m/min em aço ABNT 1045  
 Fonte: BioFluid e adaptação própria.

Como verificado também nas Gráficos 02 e 03, o desempenho do fluido de babaçu, no quesito refrigeração, tende a aumentar com o aumento das velocidades de corte, sendo um dos diferenciais do produto.

## 5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos acima, pode-se concluir que o Fluido de Corte vegetal a base de coco babaçu apresentou vantagens em relação aos outros tipos de lubrificação, como:

- Redução de até 20% na temperatura durante o processo, em aço ABNT 1045.
- Aumento da produtividade por conta da possibilidade de aumento de velocidade de corte e avanços.
- Aumento da vida útil de ferramentas de corte de aço rápido/aço ferramenta pela diminuição da temperatura nos processos e redução do atrito entre as peças e as ferramentas.
- Diminuição do consumo de corrente em até 10%, reduzindo o gasto de energia por conta da redução da força de corte utilizada.

## Referências

CAMPANELLA, A.; RUSTOY, E.; BALDESSARI, A.; BALTANÁS, M.A. **Lubrificants from chemically modified vegetable oils**. Bioresource Technology. 2010.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica – Materiais de Construção Mecânica – Volume II**. 2. Ed. São Paulo-SP: MacGraw-Hill, 1986.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 3 ed. São Paulo: Artliber Editora, 1999.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1977.

GRUSZYNSKI, C. **Resíduo agroindustrial “Casca de Tungue” como componente de substrato para plantas**. 2002. 99 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

KOPAC, J. **Influence of cutting material and coating on tool quality and tool life**. Journal of Materials Processing Technology, n. 78, p. 95-103, 1988.

KURODA, M., 2006, **Aumentando a lucratividade com óleos vegetais**. O Mundo da Usinagem, 3ª. Edição, pp. 14-15.

MACHADO, Á. R. et al. Teoria da Usinagem dos Materiais. São Paulo: [s.n.], 2009

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R.T.; Da SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**.



2.ed. São Paulo-SP: Editora Edgard Blucher, 2011. 397p

OYAFUSO, M. Y; SILVA, R. H. **Acabamento superficial e análise econômica do torneamento de um aço 1050 com fluidos de corte**. 2018. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção)-Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2018.

RUNGE, P. R. F.; DUARTE, G. N. **Lubrificantes nas Industrias – Produção, Manutenção e Controle**. Triboconcept – Edições Técnicas, p. 71-171, 1990.

SHENG, P. S.; OBERWALLENEY, S. **Life – cycle planning of cutting fluids – a review**. Journal of Manufacturing Science and Engineering, v. 119, n. 4(b), p. 791-800. 1997

SILLIMAN, J. D. (Ed.). **Cutting and grinding fluids: selection and application**. Dearborn – Michigan, SME, Second Edition, 1992, p. 119-135, ISBN: 0-87263-423-X.

WOODS, S. **Going green – vegetable oil-based metalworking fluids can provide better performance and environmental results than mineral oil-based fluids**, Cutting Tool Engineering Magazine, Volume 57, nº2, February, pp. 47-53, 2005.

SOUZA, M. C. D.; SOUZA, J. F. D.; GOMES, J. D. O. **Estudo de viabilidade de reutilização de fluido lubrificante em processos das industrias metalmecânicas**. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM. São Luis - Maranhão, p. 8. 2012.



# CAPÍTULO 8

## **FIBRA DE CARBONO E COMPÓSITOS POLIMÉRICOS APLICADOS À ROBÓTICA**

CARBON FIBERS AND POLYMERIC COMPOSITES APPLIED TO  
ROBOTICS

**Raffaella de Castro da Silva**  
**Hugo Marcelo Silva Pinheiro**

## Resumo

O processo de carbonização de polímeros orgânicos (poliacrilonitrila, entre outros), resulta nas fibras de carbono ou de grafite que é uma matéria leve e forte, este filamento junto a compósitos poliméricos vai a ajudar na resistência e na tração do material que vão ajudar no reforço e reparos de estruturas, assim como sua eficiência em relação temperatura e pressão para as propriedades mecânicas. Essas características expandem o uso da fibra para as mais diversas áreas, como aplicações aeroespaciais, automotivas, militares e recreativas. O uso da fibra de carbono na robótica ainda é escasso, porém é um material de extrema utilidade, de forma a abrir possibilidades de construção de maquinários novos que antes não era possível e melhorar o desempenho de máquinas já existentes.

**Palavras-chave:** Robótica; Fibra de carbono; Compósitos poliméricos.

## Abstract

The carbonization process of organic polymers (polyacrylonitrile, among others) results in carbon or graphite fibers which is a light and strong material, this filament together with polymeric composites will help in the resistance and the traction of the material that will help in the reinforcement and repairs of structures, as well as their efficiency in relation to temperature and pressure for the mechanical properties. These features expand the use of fiber to the most diverse areas, such as aerospace, automotive, military and recreational applications. The use of carbon fiber in robotics is still scarce, but it is an extremely useful material, in order to open possibilities for the construction of new machinery that was previously not possible and to improve the performance of existing machines.

**Keywords:** Robotics; Carbon fiber; Polymer composites.



## 1. INTRODUÇÃO

A fibra de carbono é um material leve e forte, e é admirável por ser mais leve que o alumínio e mais forte do que o aço. Esta fibra é uma substância feita a partir de filamentos finos com átomos de carbono.

A exploração comercial da fibra de carbono iniciou – se no ano 1950, quando se utilizou primeiramente “rayon”, porém concluiu-se que este material produzia pouco carbono, estendendo assim o campo de pesquisa ao redor de materiais, chegando ao poliacrilonitrila, sendo atualmente utilizados como material essencial na obtenção dos filamentos, por ter a sua alta taxa de carbono.

Assim, o processo de Carbonização de polímeros orgânicos (poliacrilonitrila, entre outros) resulta nas fibras de carbono ou de grafite, formados por dezenas de milhares de ligamentos com espessura próxima de um quinto da de um fio de cabelo e possuem características excelentes, devido do seu arranjo microestrutural.

A aplicação da fibra de carbono na robótica ainda é uma tecnologia bastante inovadora, segundo GIL LEE (1993), materiais para aplicação robótica deve ter alta rigidez específica (rigidez/densidade) para dar precisão posicional e manobrabilidade rápida para o robô. Além disso o amortecimento desse tipo de material é um benefício porque pode dissipar a vibração estrutural induzida.

## 2. FIBRA DE CARBONO

De acordo com LEBRÃO (2008), “as fibras de carbono foram os primeiros reforços utilizados para aumentar a rigidez e resistência de materiais compósitos avançados leves comumente utilizados em aeronaves, equipamentos de recreação e aplicações industriais”.

A fibra de carbono é uma fibra sintética, composto filamentosos obtido a partir de vários tipos de materiais derivados da pirólise, que é a decomposição térmica de compostos carbônicos.

Segundo Lebrão citado por Lubin, (1969), Thomas Edison foi o primeiro a produzir intencionalmente filamentos de carbono pela pirólise do algodão para filamentos de lâmpadas incandescentes em 1878. Mais de 80 anos depois, o excelente desempenho de suas propriedades mecânicas foi demonstrado pelo crescimento de Whiskers de grafite com resistência à tração de 2,0 GPa e módulo de rigidez de 800 GPa.



Além disto, as fibras de carbono possuem uma percentagem de teor de carbono variando entre 93% e 95%, enquanto que os de grafite têm um teor maior que 99%, o que leva estas últimas a serem em torno de 20 vezes mais caras e terem módulo de elasticidade de até cerca de três vezes maior que as de carbono.

As fibras de carbono de grafite têm elevadas rigidez e resistência a todos os tipos de ataques químicos (por ser o carbono um material inerte), bom comportamento à fadiga, à variação térmica e reológica, e pequeno peso, o que as tornam ideais para uso na indústria aérea.

Recentes pesquisas, sobre fibra de carbono visam seu desenvolvimento de baixo custo, como o crescimento das cadeias de carbono em materiais, pela liberação de carbono a partir de gases (deposição), tais como monóxido de carbono, metano, ou benzeno sobre um metal catalisador.

## 2.1 Resistencia e Fabricação da Fibra de Carbono

As fibras de carbono sozinhas não são apropriadas para uso, porém, ao serem combinadas com materiais matrizes, estas resultam num material com propriedades mecânicas excelentes.

A resistência das fibras de carbono à presença ou contato direto com produtos químicos corrosivos, etc., e suas estruturas moleculares têm permitido seu uso em peças móveis para indústria automotiva.

Dependendo de sua composição, os componentes podem ser utilizados em condições adversas de temperatura e pressão. Após serem expostas ao ar, as fibras são submetidas a elevadas temperaturas, que atingem cerca de 1.300 °C, para as de carbono, e excedem de 1.900 °C até cerca de 3.000 °C, para as de grafite.

Geralmente, *rayon*, poliacrilonitrila (PAN) e *pitch* são as três principais matérias primas usadas na fabricação das fibras de carbono ou de grafite, sendo a poliacrilonitrila a mais comum. Os processos de pirólise e oxidação de fibras sintéticas resultam na poliacrilonitrila.

Uma vez que este polímero é produzido, ele é esticado de um modo que se torna paralelo ao eixo da fibra. Este polímero é então oxidado a uma temperatura de 200 ° C a 300 ° C para remover o hidrogênio e adicionar oxigênio à molécula. O polímero é purificado por carbonização, realizada por aquecimento a uma temperatura de 2500 °C, num ambiente rico em azoto. O resultado depende da qualidade da fibra e é um polímero com mais de 90% de carbono nele. O passo final na fabricação da fibra de carbono é chamado de dimensionamento. Aqui, as fibras são tecidas em folhas e é incorporada uma resina epoxi. O que se obtêm no final é a folha de fibra de carbono preta que você pode usar para fazer uma variedade



de coisas.

## 2.2 Fibras Ligadas aos Polimeros

De acordo com Carneiro e Teixeira (2008), "os materiais compósitos polímeros, ou plásticos reforçados com fibras, chamados de *fiber reinforced plastics* ou *fiber reinforced polymers* (FRP) na literatura internacional, são compostos, basicamente, por fibras de elevada resistência envolvidas numa matriz polimérica (resina)".

Há uma grande variedade de resinas e fibras que podem ser usadas na composição de um compósito. A escolha da resina mais adequada depende do tipo de ambiente o qual o compósito estará submetido. As fibras, por outro lado, devem ser selecionadas em função da resistência, rigidez e durabilidade requeridas. (CARNEIRO, LUIZ ANTONIO VIEIRA, et al., 2008).

"As propriedades dos materiais compósitos poliméricos dependem das propriedades dos seus materiais constituintes, resinas e fibras, e da interação entre elementos" (KAW, 1997; JUVANDES, 1999).

Na tabela 1, são apresentadas resistências à tração de diversos tipos de materiais compósitos utilizados para o reparo e reforço de estruturas e disponíveis no mercado, em função da massa específica das fibras. Verifica-se a grande influência das fibras nas propriedades do compósito. (ACI 440 2R, 2002).

Valores de algumas das propriedades de diferentes tipos de fibras disponíveis, apresentados em CEB (2001) e ACI 440 2R (2002), são mostrados na tabela 2.

Tabela 1 – Valores de resistência à tração de diferentes sistemas de reforço com 1mm de espessura (ACI 440.2R,2002).

Sistema de reforço	Massa Especifica das Fibras (g/m <sup>3</sup> )	Resistencia a tração $f_f$ (MPa)
Folhas de resina de fibra de carbono	200	500
	400	620
Folhas de Resina a Fibras de Carbono de Alta Resistencia	230	320
	300	700
	629	960
Folhas de Resina a Fibras de Carbono de Elevado Modulo de Elasticidade	300	600
Tecidos de Resina a Fibras de Carbono	300	180
Folhas de Resina de Vidro	900	720
	350	230
Tecidos a Resina a Fibras a Fibras de Vidro	300	120





Folhas de Resina a Fibras de Aramida	420	700
Lâminas de Resina Epóxi e Fibras de Carbono de Alta Resistência	2380	3300
Tubos de Resina Viniléster e Fibras de Vidro	1700	1580

Fonte: CARNEIRO (2008, p.57)

Tabela 2 – Propriedades das Fibras (CEB, 2001; ACi 440.2R, 2002).

Tipo de fibras		Resistencia a tração $f_f$ (NPa)	Módulo de elasticidade $E_f$ (GPa)	Deformação última $E_{fu}$ (% <sub>D</sub> )
CEB (2001)				
Carbono	Alta $f_f$	3500 a 4800	215 a 235	14,0 a 20,0
	Ultra Alta $f_f$	3500 a 6000	215 a 235	15,0 a 23,0
	Alto $E_f$	2500 a 3100	350 a 500	5,0 a 9,0
	Ultra- Alto $E_f$	2100 a 2400	500 a 700	2,0 a 4,0
Vidro	Tipo E	1900 a 3000	70	30,0 a 45,0
	Tipo S	3500 a 4800	85 a 90	45,0 a 55,0
Aramida	Baixo $E_f$	3500 a 4100	70 a 80	43,0 a 50,0
	Alto $E_f$	3500 a 4000	115 a 130	25,0 a 35,0
aci 440.2r (2002)				
Carbono	Alta $f_f$	3790 a 4820	220 a 240	14,0 (mínimo)
	Ultra Alta $f_f$	4820 a 6200	220 a 240	15,0 (mínimo)
	Alto $E_f$	1720 a 3100	340 a 520	5,0 (mínimo)
	Ultra- Alto $E_f$	1380 a 2400	520 a 690	20,0 (mínimo)
Vidro	Tipo E	1860 a 2680	69 a 72	45,0 (mínimo)
	Tipo S	3440 a 4140	89 a 90	54,0 (mínimo)
Aramida	Baixo $E_f$	3440 a 4140	69 a 83	25,0 (mínimo)
	Alto $E_f$	3440 a 4140	110 a 124	16,0 (mínimo)

Fonte: CARNEIRO (2008, p. 62)

A utilização de materiais compósitos aumenta cada vez mais, expandindo-se para novas áreas em que antes não se havia interesse e nem sequer possibilidade de aplicação. A alta rigidez e baixa densidade deste tipo de material é o que o torna atraente para utilização em novos designs que buscam otimizar projetos de máquinas novas. A grande restrição que existe hoje para a utilização em larga escala destes materiais é o elevado custo que agregam ao projeto quando comparados aos materiais convencionais

A fibra de carbono é um material relativamente novo, quando se estuda a aplicação na robótica. No entanto, já se tornou um material muito importante, possi-

bilitando a criação de vários tipos de robôs novos e aumentando a capacidade que antes não era possível.

### 3. USO DA FIBRA NA ROBÓTICA

A fibra de carbono é vendida em várias formas muito acessíveis: tubos redondos, tubos quadrados, folhas planas, barras retangulares e alguns outros. A tubulação é geralmente usada para suporte estrutural. As chapas planas são usadas para blindagem e cobertura de chassi. A forma que você usar dependerá de como você espera que a força seja aplicada, a quantidade de força e o seu método de fixação.

Existem vários exemplos de uso da fibra de carbono na robótica, principalmente na área de aeromodelos, carros de controle wireless, micro robôs e etc. Mas quando abordamos a área industrial, ainda se é bem pouco utilizada. A aplicação de materiais compósitos em robôs manipuladores industriais se resume a poucos exemplos dentro do âmbito da pesquisa e indústria, sendo os principais aqueles relacionados a projetos singulares que demandam uma combinação de propriedades não obtível com a utilização de materiais convencionais.

Por ser composta de finos filamentos de 5 a 10 micrometros de diâmetro e composta principalmente de carbono, a fibra de carbono tem uma relação resistência-peso muito alta, o que significa que, para outro material com o mesmo peso, é provável que seja muito mais forte. Mas a fibra de carbono é um material fibroso, o que significa que as fibras estão todas alinhadas em uma única direção, como mostrado na figura 1. Isso faz com que o uso de força incorreto no material afete sua estrutura, conseqüentemente sua resistência.

Como as fibras estão alinhadas, a fibra de carbono tem diferentes valores de resistência dependendo da direção em que a força é aplicada. Por exemplo, a corda é muito forte se você puxar, mas muito fraca se você empurrar. A fibra de carbono é muito forte tanto na compressão como na tensão, mas é muito mais fraca na flexão (força do lado) como podemos observar na figura 2. É como tentar quebrar um pedaço de pau - quebrá-lo no centro é muito mais fácil do que puxá-lo pelos lados. Portanto, ao usar fibra de carbono, certifique-se de que toda a força seja aplicada apenas longitudinalmente.



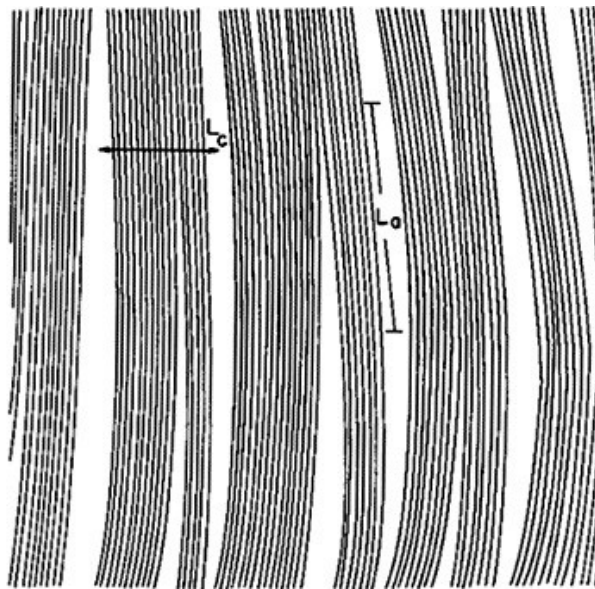


Figura 1 – Modelo de estrutura de fibras de carbono  
CARVALHO, 1999, p. 3.

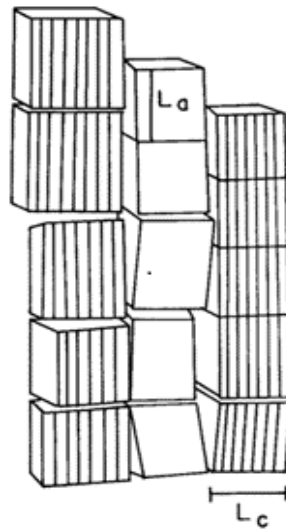


Figura 2 – Modelo de estrutura de fibras de carbono  
CARVALHO, 1999, p. 3.

A fibra de carbono é extremamente leve para a sua resistência - é por isso que agora é muito comum agora em aviões de RC e micro-robôs aéreos. Algumas naves robotizadas micro-ar não eram sequer possíveis antes da fibra de carbono, sendo um material que geralmente supera a maiorias dos outros materiais para aplicações microrrobóticas.

Por ser uma fibra sintética feita a partir de poliácrlonitrola, ela possui propriedades mecânicas semelhantes ao aço e possui dureza maior, conseqüentemente tendo maior resistência ao impacto. Como as fibras não tem utilidades sozinhas, cerca de 75% dos polímetros agregados são termofixos. O polímero é geralmente resina epóxi do tipo termofixa, isso faz com que esse composto também tenha uma ótima capacidade térmica.

Fibra de carbono tem outras propriedades úteis também. Como não é metálico, pode ser usado em aplicações onde o metal interferiria nos sensores. As máquinas médicas de ressonância magnética (MRI) usam campos magnéticos muito fortes, impedindo que coisas como robôs cirúrgicos sejam usadas dentro delas. Mas se você fizer o robô de algo não-magnético, como fibra de carbono, isso não será mais um problema.

## 4. APLICAÇÕES DA FIBRA DE CARBONO NA ROBÓTICA

### 4.1 Músculos Robóticos

Com objetivo de restauração do corpo humano, sua agilidade, força e até atrasar relógio biológico. Estudos deram início aos músculos robóticos e artificiais. Na Universidade de *Illinois*, nos EUA a Engenheira Mecânica Caterina Lamuta a partir de fibras de carbono, desenvolveu músculos misturados a polímero PDMS. Podendo erguer até 12.600 vezes objetos referentes ao seu peso.

Segundo Lamuta, Messelot e Tawfick (2018) os músculos conseguem suportar até 60 MPa de treinamentos com uma alta taxa de cargas externas, suportando golpes de tração superiores a 25% e um trabalho específico de até 758 J/kg (joules por quilograma). Isto é 18 vezes mais do que o trabalho específico que nossos músculos biológicos são capazes de produzir.

Financiados pela Instituição Britânica EPSRC (Conselho de Pesquisa em Ciências Físicas e Engenharia), 30 pesquisadores estão a frente do estudo dos músculos artificiais voltado a saúde e desempenho otimizado do ser humano. Segundo o site Olhar Digital (2020), os pesquisadores têm como objetivos, desenvolverem músculos robóticos e artificiais para implantes até 2050.



Figura 3 - O desenvolvimento de músculos artificiais pode ajudar na criação de novos tratamentos para a sarcopenia

Fonte: Página Olhar Digital, 2020

## 4.2 Tecelagem Robótica com Fibra de Carbono

O arquiteto Achim Menges, designou uma equipe para revolucionar a indústria têxtil através da fibra de carbono. Menges, têm feito estudos até o desenvolvimento de protótipos com a fibra exposta.

Os resultados dessa pesquisa estão sendo chamados de “A quarta revolução industrial” pelo arquiteto Oswaldo Filho (2016) em seu site.



Figura 4 - *The Elytra Filament Pavilion at the Victoria and Albert Museum*  
Fonte: artnet news, 2016.

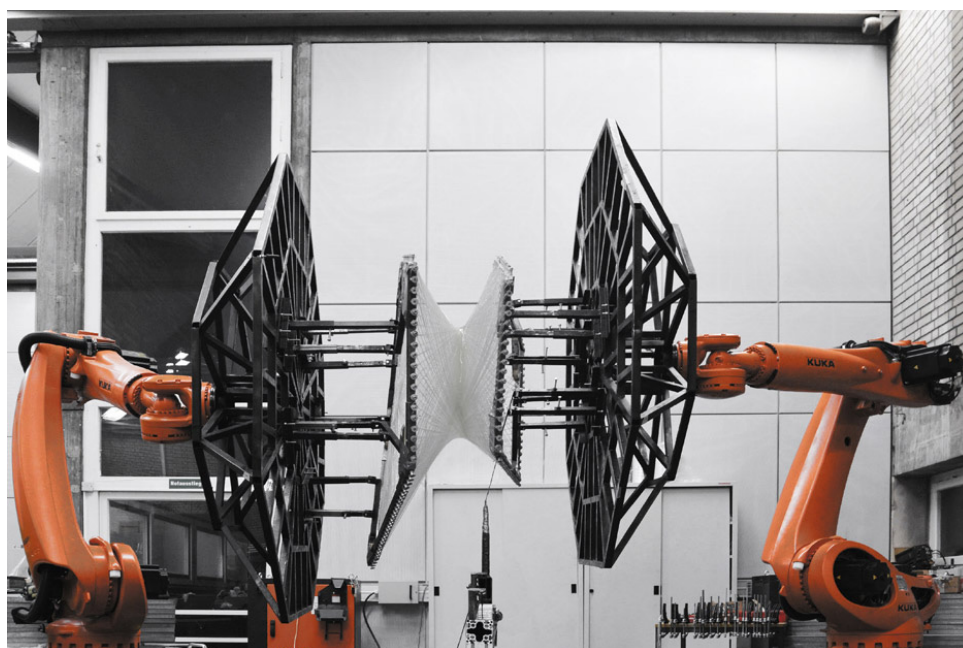


Figura 5 - Par de robôes KUKA construindo protótipo para o V & A pavilhão  
Fonte: Oswaldo Filho, 2016

O propósito é expor a fibra ao invés de precisar de um hospedeiro. O material

é tecelado como na figura [5], com esse método, Menges acredita que telhados, estádios, pontes podem ser construídos com essa construção fibrosa, com a ajuda da robótica, a fibra de carbono na construção, ganha um aliado e mostra seu verdadeiro potencial.

## 5. TRABALHANDO COM FIBRA DE CARBONO

Trabalhar com fibra de carbono é relativamente fácil. Pode-se basicamente trabalhar com isso do jeito que se trabalha com madeira. Mas, sendo um material fibroso, é preciso ter muito cuidado com a fragmentação. Existem várias ferramentas que você deve manter quando trabalha com fibra de carbono. Lembre-se, se escolher as ferramentas erradas, estará submetendo sua fibra de carbono a lascas.

As ferramentas para o corte da fibra de carbono devem ser afiadas e precisas, devido ser um material fibroso de estrutura alinhada, o uso de ferramentas avariadas pode gerar, cortes imprecisos, danificação da estrutura do material, levando a esfarelamento da fibra. As ferramentas para retaliação da fibra podem ser tesouras, serras de dentes finos, estiletes, alicates e etc. Desde que sempre estejam sempre afiados para não danificar o material.

Para perfuração, você pode usar brocas normais. Mas se você simplesmente perfurar para fora sem primeiro preparar a fibra de carbono, notará rapidamente a fragmentação e a quebra no ponto de perfuração. Certifique-se de que a broca seja realmente afiada (as novas brocas ou as pontas com ponta de diamante funcionam melhor), porque qualquer aspereza puxará as fibras em vez de cortá-las, causando danos. Certifique-se de perfurar lentamente. Após a perfuração, se houver rebarbas, use lixa de grão fino. Em seguida, cubra a área acabada com uma camada de supercola e deixe secar. A supercola manterá as fibras soltas juntas e evitará danos futuros.

Um cuidado a ser tomado no uso da fibra de carbono, é que ao trabalhar com ela, várias fagulhas da fibra fragmentada podem ferir a sua pele, ou se espalhar pelo ar e em alguns casos certas reações alérgicas. O uso de equipamento de segurança é imprescindível, para proteção dos olhos e pulmões. Outro fato, é que a luz UV pode alterar a estrutura da fibra com o tempo, quebrando a fibra com passar do tempo.

## 6. CONCLUSÃO

A fibra de carbono por ser um polímero com características de alta rigidez, alta resistência à tração, baixo índice de peso para força, alta resistência química, baixa expansão térmica e tolerância de temperatura ao calor excessivo, torna o



material muito popular em muitas indústrias, porém seu uso ainda é restrito devido ao seu preço. Como é um material de uso que varia desde a indústria automotiva, aeroespacial e robótica, até o uso medicinal, tende no futuro ser usado com maior frequência e abrangência no mercado. Sua relação resistência-peso, além da sua capacidade termina fazem com que seja um dos compósitos mais valiosos existente, com alta gama de aplicações, devido a isso

## Referências

BUSTAMANTE, P. C. **Estudo sobre a viabilidade de utilização de materiais compósitos em manipuladores robóticos industriais**. UFMG, 2012. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUOS-95RJ6V>> Acesso em: 24 de agosto de 2018

CARNEIRO, L. A. V. **Reforço de vigas e pilares de concreto com materiais compósitos de resina e fibras**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 2004.

CARVALHO, Rosangela M. de; KUBOTA, Lauro T.; ROHWEDDER, Jarbas J. Fibras de carbono: aplicações em eletroanalítica como material eletródico. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 22, n. 4, p. 591-599, July 1999. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40421999000400018&lng=en&nrm=i-so](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40421999000400018&lng=en&nrm=i-so)>. Acesso em: 09 Dez, 2020. <https://doi.org/10.1590/S0100-40421999000400018>.

DAI GIL LEE, KWANG SEOP JEONG, KI SOO KIM, YOON KEUN KWAK. Development of the anthropomorphic robot with carbon fiber epoxy composite materials. **Composite Structures**, Volume 25, Issues 1-4, 1993, Pages 313-324, ISSN 0263-8223. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/026382239390178S?via%3Dihub>> Acesso em: 09 de dezembro de 2020. [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(93\)90178-S](https://doi.org/10.1016/0263-8223(93)90178-S).

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Os incríveis músculos artificiais de fibra de carbono**. 07/05/2018. Online. Disponível em: <[www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=musculos-artificiais-fibra-carbono](http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=musculos-artificiais-fibra-carbono)> Acesso em: 07 de dezembro de 2020.

JUVANDES, L. F. P. **Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de "CFRP"**. Tese de D.Sc., Universidade do Porto, Portugal. 1999.

KAW, A. K. Mechanics of composite materials. **CRC Press LLC**, New York, USA, ISBN 0-8493-9656-5.1997

LEBRÃO, MCs; GUILHERME WOLF. **Fibra de Carbono**. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Paulo. 2008.

SOCIETY OF ROBOTS. **Materials – Carbon Fiber**. Disponível em: <[http://www.societyofrobots.com/materials\\_carbonfiber.shtml](http://www.societyofrobots.com/materials_carbonfiber.shtml)> Acesso em: 24 de agosto de 2018.

TEIXEIRA, A. M. A. J. **Ponte desmontável em material compósito de fibra de vidro**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 2007.

OLHAR DIGITAL. **Músculos robóticos estarão disponíveis para uso clínico até 2050**. 09/09/2020. Online. Disponível em: <<https://olhardigital.com.br/2020/09/09/noticias/musculos-roboticos-estarao-disponiveis-para-uso-clinico-ate-2050/>> Acesso em: 07 de dezembro de 2020

FILHO, O. B. C. **Fibra de carbono e robôs poderiam criar uma "quarta revolução industrial", diz especialista**. 04/05/2016. Disponível em: <<https://oswaldoborgescostafilho.wordpress.com/2016/05/04/fibra-de-carbono-e-robos-poderiam-criar-uma-quarta-revolucao-industrial-diz-especialista>> Acesso em: 08 de dezembro de 2020.

# AUTORES<sup>1</sup>

---

1 Currículo vide Lattes / Linkendin



## **Antonio Lisboa Pereira Nascimento**

Engenheiro Mecânico graduado pela Universidade Ceuma. Estagiou na Gerência de Engenharia de Projetos Capital do Porto, Corredor Norte na VALE, que foi aonde teve a oportunidade de trabalhar com excelentes profissionais, acompanhar grandiosos projetos e sem dúvidas adquirir valiosas experiências, aprendizados e lições. Fez monitoria no laboratório de física da Universidade Ceuma por três semestres consecutivos, participou ativamente do Grupo de Pesquisa em Engenharia Aero-náutica e Aeroespacial (GPEAA), liga acadêmica de projetos mecânicos (LAPROM) e projetos de extensão.

## **Diego Rosa dos Santos**

Professor da Universidade CEUMA lotado como professor dos cursos de graduação em Engenharia Mecânica e Engenharia Civil nas disciplinas mecânica geral (estática), resistência dos materiais, elementos de máquinas, mecanismos e dinâmica das máquinas, vibrações, engenharia de segurança e máquinas de fluxo desde 2015. Participante do Núcleo Docente Estruturante - NDE do curso de Engenharia Mecânica da Universidade CEUMA desde 2016. Possui graduação em Engenharia Mecânica pela UEMA (2011) e especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela LABORO/ESTÁCIO DE SÁ (2015). Mestre em Meio Ambiente pela universidade CEUMA (2018). Possui experiência como coordenador técnico. Coordenador do curso de especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho da Universidade CEUMA desde de março de 2018.

## **Francisco de Assis Martiniano Ferreira Resende**

Graduação em andamento em Engenharia Mecânica pela Universidade Ceuma, UNICEUMA, Brasil.

## **Luis Jorge Mesquita de Jesus**

Possui graduação em Física pela Universidade Federal do Maranhão (2008), onde participou de pesquisas na área de dinâmica não-linear, ótica não-linear e termocuidividade envolvendo os fenômenos físicos sôliton e quase-sôliton. Participou também de pesquisas voluntárias sobre aquecimento global e questões ambientais. Possui mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (2011) e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (2015), onde obteve experiência na área de simulação computacional usando método de elementos de contorno, método de integração radial e método da reciprocidade dual aplicados a fluidos, fenômenos térmicos, análise dinâmica, estabilidade, cascas e em aeronáutica. Desenvolveu pesquisas no Laboratory of Lightweight Structures, da Aalto University (Finlândia) entre 2014 e 2015, num período de



doutorado sanduíche. Durante o estágio obteve experiência em análises numéricas utilizando softwares comerciais de elementos finitos, trabalhou na implementação de rotinas computacionais referentes à análise transiente e modal de cascas feitas de materiais compósitos e também participou de treinamentos de formação relacionados com fabricação e testes mecânicos de compósitos reforçados com fibras. Foi Professor dos Cursos de Engenharia de Petróleo e Engenharia de Produção da Universidade CEUMA, atuando nas linhas de pesquisa de otimização, pesquisa operacional e modelagem na produção de gás natural e em reservatórios de petróleo. Atuou como consultor Ad Hoc do Comitê Assessor Técnico-Científico da FAPEMA.

### **Marcus Vinícius Lisboa Sousa**

Tem experiência na área de Engenharia, com ênfase em Engenharia Mecânica. Bacharel em Engenharia Mecânica no ano de 2020 pela Universidade Ceuma Participou da LAGEMA (Liga Acadêmica de Gestão da Manutenção) durante os anos 2017 e 2018.

### **Rafael Nunes Ferreira**

Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Ceuma, UNICEUMA, Brasil.

### **Raffaella de Castro da Silva**

Programadora Front-End, graduanda em Engenharia da Computação (UNICEUMA) sendo bolsista parcialmente. Técnica em Informática para Internet pela Instituição Federal de Ciência e Tecnologia do Maranhão. Terceira colocada no hackathon na Startup Weekend Universitário. Linhas de pesquisas em robótica, manufatura, automação, IA e sistemas embarcados.

### **Ramaiany Carneiro Mesquita**

Mestre em Engenharia de Materiais pelo Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Maranhão - IFMA (2013). Especialista em Ensino de Física pela Faculdade Noroeste de Minas - FINOM (2011) e Graduação em Física pela Universidade Federal do Maranhão-UFMA (2010). Tem experiência na área de Ciência e Engenharia dos Materiais, Mecânica e Metalúrgica, com ênfase em Caracterização Microestrutural; Propriedades mecânicas, Processamento Termomecânico; Aços inoxidáveis; Corrosão intergranular e Sensitização.

### **Renan Tavares Pinheiro Sampaio**

Engenheiro Mecânico pela Universidade Ceuma e Master in Business Administration (MBA) em Gestão da Manutenção na Indústria 4.0 pelo Instituto Navigare.



## **Thalia Cristina Gomes Oliveira**

Graduação em andamento em Engenharia Mecânica pela Universidade Ceuma, UNICEUMA, Brasil.



## ORGANIZADORES

### Patrício Moreira de Araújo Filho



**D**outor e Mestre em Engenharia Mecânica, na área de Projetos e Materiais, pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), Licenciado em Física pela Universidade Federal do Maranhão (UFMA). Consultor da Fundação de Amparo à Pesquisa no Maranhão (FAPEMA), é Professor/pesquisador Adjunto na Universidade do CEUMA (UniCeuma), Líder de grupo de pesquisa em engenharia aeronáutica e aeroespacial (GPEAA) e Coordena o Projeto SAE-UniCeuma desenvolvendo atividades nas áreas de Engenharia e Ensino.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9373-7858>

### Hugo Marcelo Silva Pinheiro



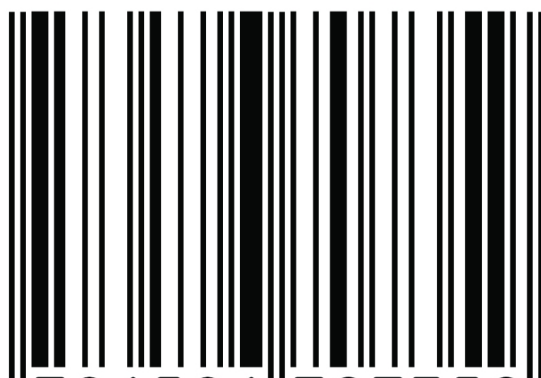
**B**acharel em Engenharia Mecânica pela Universidade CEUMA (2020), obteve experiência na área de simulação computacional usando método de elementos de contorno, análise dinâmica, estabilidade e aeronáutica. Desenvolveu pesquisas de simulação aerodinâmicas para aquisição de perfil de Asa para competição Aerodesigner/SAE Brasil, durante sua participação voluntária, no Grupo de Pesquisa em Engenharia Aeronáutica e Aeroespacial – GPEAA/Universidade CEUMA, pelo curso de Engenharia Mecânica. Possui conhecimento técnico em montagem e manutenção de computadores e rede.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9401-6684>

**A** obra “Engenharia, produção científica e tecnológica” é uma série especialmente preparada para conter as produções científicas de graduandos de Engenharia da Universidade CEUMA. No primeiro volume, concentramos estudos na área temática de Engenharia Mecânica, relacionando os temas aprovados em bancas de TCC, critério este que marcou a harmonização e organização dos capítulos ao longo desta obra.

ISBN: 978-65-86707-35-9

**BR**



9 786586 707359