

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ANDRÉ PEREIRA FONSECA

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA ANÁLISE DA CORROSÃO POR
PITES ATRAVÉS DE IMAGENS

BELO HORIZONTE

2023

ANDRÉ PEREIRA FONSECA

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA ANÁLISE DA CORROSÃO POR
PITES ATRAVÉS DE IMAGENS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado no Curso de Graduação em
Engenharia de Materiais do Centro Federal
de Educação Tecnológica de Minas Gerais
como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia de
Materiais.

Orientador(a): Dr. Marcello Dumont

BELO HORIZONTE

2023

ANDRÉ PEREIRA FONSECA

DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA ANÁLISE DA CORROSÃO POR
PITES ATRAVÉS DE IMAGENS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado no Curso de Graduação em
Engenharia de Materiais do Centro
Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Materiais.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcello Rosa Dummont - Orientador

Profa. Dra. Luciana Boaventura Palhares

Profa. Dra. Aline Silva Magalhães

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Marcello Rosa Dumont, pela orientação dedicada, valiosas sugestões e paciência ao longo de todo o processo de pesquisa. Seu apoio e expertise foram fundamentais para o desenvolvimento deste estudo.

Aos professores do curso de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, pela qualidade do ensino oferecido, que proporcionou uma base sólida para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos colegas de curso, que compartilharam experiências e conhecimentos, e aos amigos que ofereceram apoio e incentivo durante os desafios enfrentados ao longo dessa jornada acadêmica, o meu profundo agradecimento. Em especial, gostaria de deixar um agradecimento para os colegas Matheus Raphael Diniz Junqueira, Livia Costa do Val, Pollyanna Aparecida da Silva Araújo, Guilherme Heleno de Oliveira e Silva, Gabrielle Furtado Defeo e Pedro Ernesto Bento Silveira.

À minha família, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo amor, suporte emocional e compreensão. Agradeço especialmente aos meus pais, Márcio Pereira da Fonseca e Neyde Aparecida Pereira Fonseca, por todo o apoio incondicional e por acreditarem em mim.

RESUMO

A corrosão é um fenômeno prejudicial que afeta a integridade dos materiais metálicos, sendo a corrosão por pites uma das formas mais agressivas e desafiadoras de corrosão. Os aços inoxidáveis são comumente utilizados em aplicações industriais, tornando-se crucial compreender e mitigar os efeitos da corrosão por pites nesses materiais. Este trabalho consistiu no desenvolvimento de um software capaz de realizar a análise da corrosão por pites através de imagens. Para isso, foi necessária a preparação de amostras representativas de aço inoxidável 316L com corrosão por pites, por meio de uma metodologia estruturada que simula ambientes corrosivos. Posteriormente, foi aplicada uma análise das imagens das áreas corroídas através do software desenvolvido, visando quantificar e caracterizar os pites. Os resultados obtidos por essa análise foram comparados com os métodos tradicionais, e foi demonstrada a eficácia e precisão do método proposto para a análise da densidade de pites.

Palavras-chave: Corrosão por Pites, Aço Inoxidável, Análise de Corrosão, Análise Automatizada de Imagens.

ABSTRACT

Corrosion is a detrimental phenomenon that affects the integrity of metallic materials, with pitting corrosion being one of the most aggressive and challenging forms of corrosion. Stainless steels are commonly used in industrial applications, making it crucial to understand and mitigate the effects of pitting corrosion on these materials. This work involved the development of software capable of analyzing pitting corrosion through images. To achieve this, the preparation of representative samples of 316L stainless steel with pitting corrosion was necessary, using a structured methodology that simulates corrosive environments. Subsequently, an analysis of the images of the corroded areas was performed using the developed software, aiming to quantify and characterize the pits. The results obtained from this analysis were compared with traditional methods, demonstrating the effectiveness and precision of the proposed method for analyzing pit density.

Keywords: Pitting Corrosion, Stainless Steel, Corrosion Analysis, Automated Image Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Densidade de corrente crítica para passivação de ligas Fe-Cr	14
Figura 3.2 - Taxa de corrosão de ligas Fe-Cr em diferentes concentrações de Cr	14
Figura 3.3 - Composição química de aços inoxidáveis da Série 400	16
Figura 3.4 - Composição química de aços inoxidáveis da Série 300	17
Figura 3.5 - Tabela padrão para análise da corrosão por pites	20
Figura 3.6 - Imagens extraídas do processo de inspeção radiográfica de tubulações com diferentes estágios de corrosão	21
Figura 3.7 - Imagens termográficas de uma chapa após diferentes tempos de aquecimento	22
Figura 4.1 - Fluxograma para realização do trabalho	24
Figura 4.2 - Amostra 1 (a), Amostra 2 (b) e Amostra 3 (c)	25
Figura 4.3 - Sistema de cores HSV	26
Figura 4.4 - Imagem antes e depois do processamento	27
Figura 5.1 - Análise da Amostra 1 através do software	30
Figura 5.2 - Análise da Amostra 2 através do software	31
Figura 5.3 - Análise da Amostra 3 através do software	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Resultados da análise através do software	32
Tabela 5.2 - Classificação da densidade de pites obtidos através da análise realizada pelo software de acordo com a norma	32
Tabela 5.3 - Classificação do tamanho médio dos pites obtidos através da análise realizada pelo software de acordo com a norma	33
Tabela 5.4 - Resultados da análise através da tabela padrão	34
Tabela 5.5 - Comparação das classificações obtidas pelos métodos de análise	34

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo geral	12
2.2 Objetivos específicos	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 Aços inoxidáveis	13
3.1.1 <i>Aços inoxidáveis ferríticos</i>	15
3.1.2 <i>Aços inoxidáveis martensíticos</i>	15
3.1.3 <i>Aços inoxidáveis austeníticos</i>	16
3.2 Corrosão por pites	17
3.3 Métodos de avaliação da corrosão por pites	18
3.3.1 <i>Penetração de metal</i>	18
3.3.2 <i>Perda das propriedades mecânicas</i>	18
3.3.3 <i>Tabela padrão</i>	19
3.4 Automação dos processos de avaliação da corrosão	19
4 MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1 Materiais utilizados para o preparo das amostras	23
4.2 Metodologia	23
4.2.1 <i>Preparo das amostras</i>	23
4.2.2 <i>Elaboração do software de análise</i>	26
4.2.3 <i>Realização dos testes</i>	28
4.2.4 <i>Análise dos dados</i>	29
4.2.5 <i>Considerações</i>	29
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1 Análise dos pites pelo software de análise de imagens	30
5.2 Classificação dos resultados da análise do software de acordo com a norma ASTM G-46	32
5.3 Análise dos Pites pelo Método da Norma ASTM G-46	33

5.4 Comparação dos Resultados	33
5.5 Discussão dos Resultados	34
6 CONCLUSÕES	36
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	38
REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

De acordo com estudos realizados pela Association for Materials Protection and Performance (AMPP) e divulgados no ano de 2022, os custos globais anuais da corrosão totalizam 2,5 trilhões de dólares americanos. Como resultado desse número expressivo, vem se desenvolvendo vários métodos para diminuir a taxa de corrosão dos materiais metálicos e consequentemente diminuir os seus custos. Dentre estes métodos estão a mudança de composição através do desenvolvimento de novas ligas metálicas e o desenvolvimento de tecnologias para proteção das superfícies.

Acompanhando o desenvolvimento e a pesquisa, os métodos de análise da corrosão exercem um papel importante, permitindo que sejam obtidos os dados que quantificam as propriedades dos materiais. Dentre estes métodos, mais especificamente entre os métodos utilizados para analisar a corrosão por pites em aços inoxidáveis, está o método de avaliação através do uso de uma tabela padrão. Apesar de gerar resultados simples e eficazes, o método consome bastante tempo e também é considerado tedioso (ASTM G-46, 2021).

Sendo assim, o presente trabalho busca desenvolver uma solução que agilize a execução desta análise através de um programa computacional para facilitar o trabalho dos profissionais que realizam esta análise frequentemente. Dessa forma, é possível ter um maior controle sobre o processo corrosivo sem que seja demandada uma quantidade significativa de tempo.

A corrosão por pites é uma forma de deterioração localizada que ocorre em materiais metálicos, especialmente em aços inoxidáveis, e se manifesta através de pequenas perfurações ou "pites" na superfície do material. Esses pites podem levar a danos severos e falhas estruturais, tornando essencial a análise precisa e o entendimento do seu desenvolvimento.

No contexto dos dutos de transporte, por exemplo, a corrosão por pites representa uma ameaça significativa à integridade e segurança dos sistemas. Ela pode comprometer a funcionalidade dos dutos, aumentar os custos de manutenção e reparo, e, mais importante, colocar em risco a segurança das comunidades e do meio ambiente. Portanto, é crucial desenvolver métodos eficazes de análise e prevenção da corrosão por pites.

A aplicação da tecnologia na análise de imagens e a análise dos dados obtidos pode oferecer uma maneira mais eficiente e precisa de identificar, medir e caracterizar os pites, permitindo uma melhor compreensão do processo corrosivo e, conseqüentemente, o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de mitigação e prevenção.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver e validar um software capaz de realizar a análise da corrosão por pites em aços inoxidáveis, utilizando técnicas de análise de imagens.

2.2 Objetivos específicos

- Projetar e desenvolver um programa computacional utilizando a linguagem de programação Python para análise de imagens visando detectar, mensurar e caracterizar a corrosão por pites em aços inoxidáveis.
- Validar a solução proposta por meio da análise das imagens dos corpos de prova fabricados, comparando os resultados obtidos pelo programa desenvolvido com as análises manuais tradicionais.
- Propor melhorias e otimizações na solução desenvolvida, visando aprimorar sua eficiência, precisão e usabilidade para futuras aplicações na análise da corrosão por pites em aços inoxidáveis.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Seja em dutos de gás e óleo naturais que atravessam continentes, tubulações de indústrias nucleares ou qualquer outra aplicação, os materiais aplicados apresentam um papel importante de garantir a confiabilidade dessas operações. Tendo em vista que os metais são uma das classes de materiais mais utilizada na indústria e que a corrosão é um dos principais motivos de falhas relacionadas a esses materiais, a capacidade de gerenciar esse fenômeno é a parte central do seu uso eficiente e eficaz (REVIE, 2008).

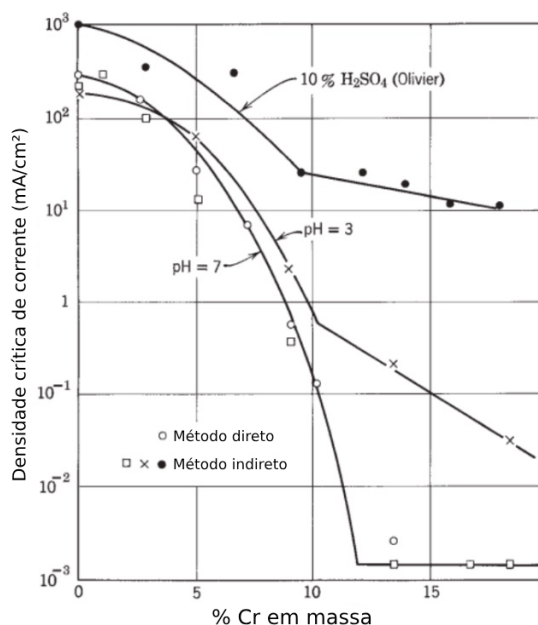
3.1 Aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis surgiram através de estudos realizados tanto na Inglaterra, quanto na Alemanha, no ano de 1912. Eram estudados uma liga de Fe-Cr contendo 13% de Cr e uma liga de Fe-Cr com adição de Ni, respectivamente. Àquela época, o conceito predominante era de que um material resistente à corrosão deveria resistir a interação com o ácido sulfúrico (CORBÓ, 2008).

Nos dias atuais, os aços inoxidáveis são ligas de Fe, C e Cr, com uma composição mínima de 12% de Cr. Além disso, podem conter outros elementos metálicos, mas o Cr é considerado o elemento mais importante, por ser o responsável por conferir a esses materiais uma elevada resistência à corrosão, devido a passividade (REVIE, 2008).

Segundo Mars Fontana (1987), “passividade se refere à perda de reatividade química experienciada por certos metais e ligas metálicas sob condições ambientais particulares”. O Cr é um metal naturalmente passivo, e é capaz de permanecer intacto durante anos quando exposto à atmosfera. A Figura 3.1 mostra a densidade de corrente crítica para a passivação de uma liga Fe-Cr em uma solução desaerada com 3% de Na_2SO_4 com pH 3 e 7, em temperatura de 25 °C. Podemos observar que a densidade da corrente para passivação nessas condições é da ordem de 2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, valor que facilmente será atingido ou superado em soluções aeradas, demonstrando o motivo pelo qual ligas Fe-Cr com mais de 12% de Cr são auto passivas.

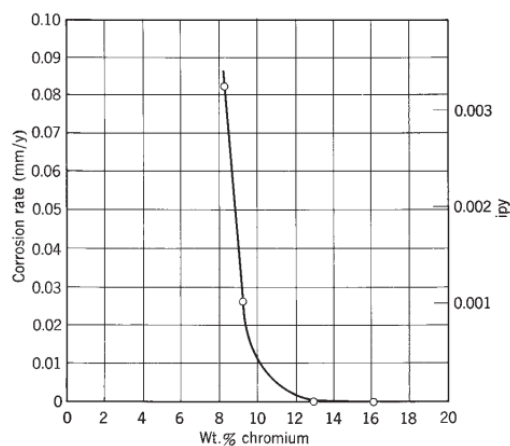
Figura 3.1 - Densidade de corrente crítica para passivação de ligas Fe-Cr



Fonte: REVIE, 2008.

As diferentes quantidades de Cr presentes nas ligas afetam a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis. Na Figura 3.2, a taxa de corrosão em mm/ano é mostrada para diferentes porcentagens de Cr presentes na liga, em peso. As medidas foram tomadas utilizando um spray de água intermitente e em temperatura ambiente (REVIE, 2008).

Figura 3.2 - Taxa de corrosão de ligas Fe-Cr em diferentes concentrações de Cr



Fonte: REVIE, R, 2008.

As diferentes composições e diferentes modos de produção desses materiais dão origem a três principais tipos de aços inoxidáveis, sendo eles: aços inoxidáveis ferríticos, aços inoxidáveis austeníticos e aços inoxidáveis martensíticos (CORBÓ, 2008).

3.1.1 *Aços inoxidáveis ferríticos*

Os aços inoxidáveis ferríticos apresentam geralmente uma quantidade de Cr superior aos martensíticos, o que os confere uma melhor resistência à corrosão, em detrimento de outras propriedades, como a resistência ao impacto. O que mais limita a utilização desse tipo de aço inoxidável é a sua soldabilidade. A formação parcial de martensita, a precipitação de carbonitretos de Cr e o crescimento excessivo do tamanho de grão nas regiões soldadas são fatores que conferem às soldas nesse aço uma maior fragilidade e menor resistência à corrosão (CORBÓ, 2008).

Uma das alternativas para contornar este problema é a adição de elementos de liga estabilizadores, como o Ti e o Nb, que são responsáveis pela formação de carbonetos e por limitar a formação de martensita e a precipitação de carbonitretos de Cr, devido à alta afinidade química desses elementos com o C. Estes são denominados aços inoxidáveis ferríticos estabilizados, e podem ser soldados sem apresentar perdas significativas das suas propriedades mecânicas (CORBÓ, 2008).

Na Figura 3.3 podemos ver a composição química de aços inoxidáveis da Série 400, composta por aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos.

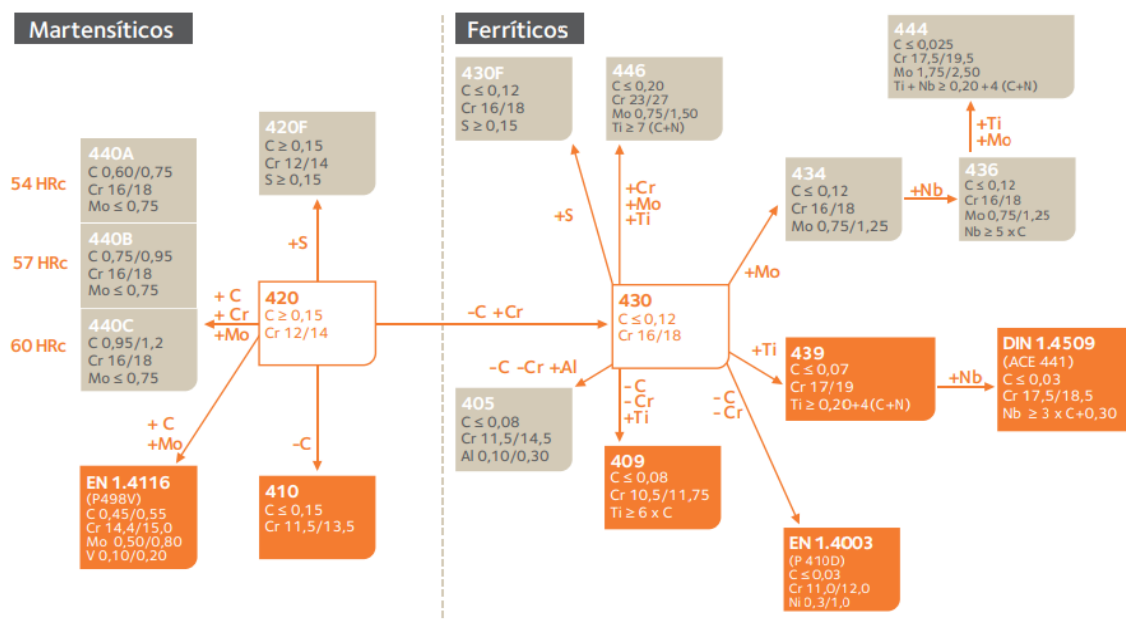
3.1.2 *Aços inoxidáveis martensíticos*

Nesse tipo de aço, o carbono está presente em uma concentração que permite que a ferrita se transforme em austenita em altas temperaturas, e durante o resfriamento, a austenita se transforme em martensita. Ou seja, após o recozimento, esse material tem que passar pelo processo de tratamento térmico de têmpera, para que ocorra a transformação da austenita em martensita. A martensita é uma solução sólida de ferro e carbono, rica em C, frágil e com elevada dureza (CORBÓ, 2008).

A Figura 3.3 mostra a composição química dos aços inoxidáveis martensíticos, que geralmente possuem maior quantidade de C, quando comparados aos ferríticos.

Figura 3.3 - Composição química de aços inoxidáveis da Série 400

Aços inoxidáveis da Série 400



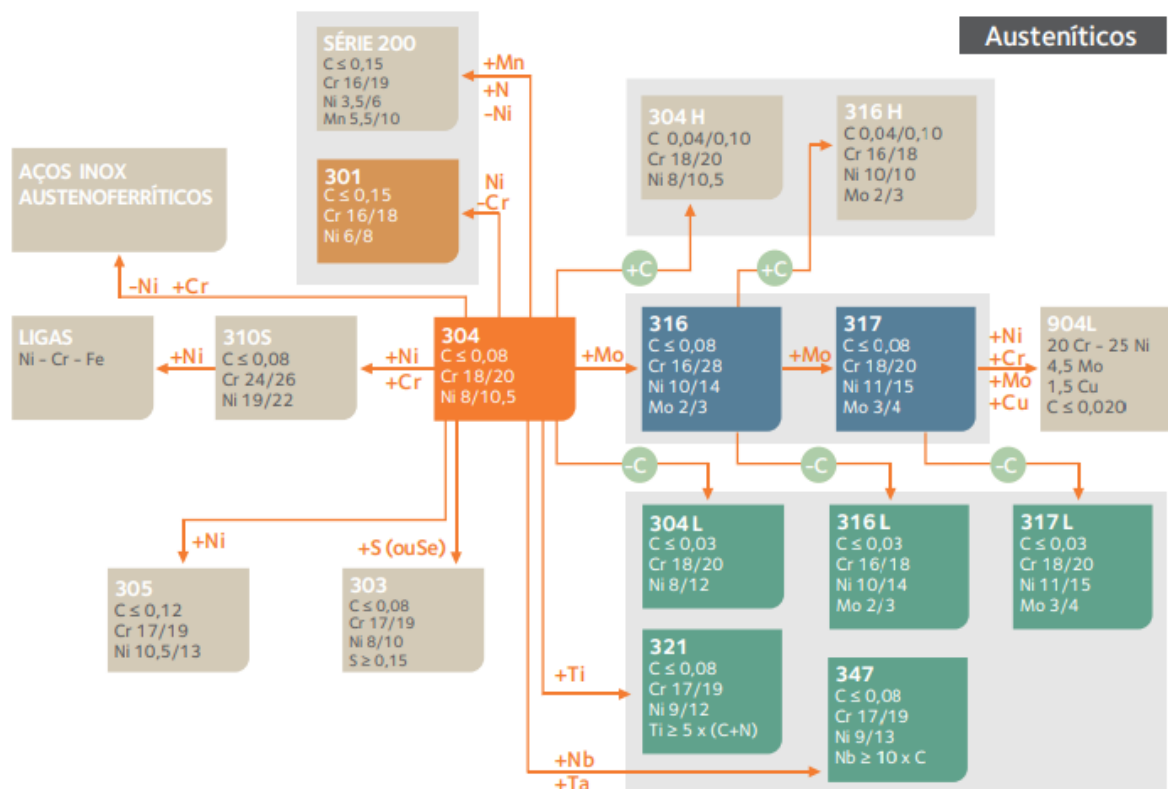
Fonte: CORBÓ, H, 2008.

3.1.3 Aços inoxidáveis austeníticos

A transformação da estrutura ferrítica em austenítica é possibilitada pela adição, em quantidades determinadas, de Ni como elemento de liga. Essa transformação confere aos aços inoxidáveis austeníticos uma excelente resistência à corrosão, excelente ductilidade e excelente soldabilidade. Como mostrado na Figura 3.4, além do Ni, também podem ser adicionados elementos estabilizadores, assim como nos aços inoxidáveis ferríticos, com o objetivo de evitar a sensitização. A sensitização é o empobrecimento de Cr em solução sólida nos contornos de grão, e é causada pela precipitação de carbonetos de cromo, o que diminui a resistência à corrosão nessa região, ocasionando a corrosão intergranular (CORBÓ, 2008).

Figura 3.4 - Composição química de aços inoxidáveis da Série 300

Aços inoxidáveis da Série 300



Fonte: CORBÓ, H, 2008.

3.2 Corrosão por pites

A corrosão por pites, também denominada de corrosão alveolar ou puntiforme, acontece principalmente quando o aço inoxidável é exposto a soluções que contêm a presença de elementos halogênios. Essa forma de corrosão se manifesta através de pequenas perfurações ou "pites" na superfície do material, e aços inoxidáveis expostos à água do mar estão suscetíveis a desenvolver pites profundos em apenas alguns meses, e os pites geralmente se iniciam em fendas ou em áreas de estagnação da solução eletrolítica.

Aços inoxidáveis martensíticos e ferríticos são mais suscetíveis à corrosão por pites do que os austeníticos, já que elementos como Ni e Mo, devido à alta afinidade química desses elementos com o C, tendem a formar carbonetos, diminuindo a precipitação de carbonetos de Cr. Além disso, aços inoxidáveis expostos a soluções de cloreto que contêm íons despolarizantes ativos, como por exemplo o Fe^{3+} , Cu^{2+}

ou Hg^{2+} , são capazes de formar pites visíveis em poucas horas, o que faz com que essas soluções sejam usadas para testes com a finalidade de avaliar a susceptibilidade ao pitting (REVIE, 2008).

3.3 Métodos de avaliação da corrosão por pites

A American Society for Testing and Materials (ASTM), através da norma G46-21, abrange uma seleção de métodos que podem ser utilizados para identificar e analisar a corrosão por pites e determinar suas consequências, apesar de não abordar todos os aspectos relacionados à segurança.

Existem várias formas de descrever os pites, seja uma expressão quantitativa para indicar sua significância ou usada para prever a vida útil de um material. Na sequência, estão descritas algumas das formas mais utilizadas atualmente.

3.3.1 *Penetração de metal*

Neste método, os pites mais profundos são medidos e a penetração do metal é expressa em termos do pite mais profundo e/ou em termos da média dos dez pites mais profundos. Usualmente, este método é mais utilizado para aplicações onde o metal está sendo usado para armazenamento ou transporte de um gás ou líquido. Isso porque nesses casos, um pite muito profundo pode acabar ocasionando um furo e conseqüentemente o vazamento de alguma substância (ASTM G-46, 2021).

Deve-se levar em consideração que este método pode ser difícil de ser utilizado em campo, dependendo da aplicação do material.

3.3.2 *Perda das propriedades mecânicas*

No caso em que a corrosão por pites é predominante sob as outras formas de corrosão e a densidade de pites é relativamente alta, as mudanças das propriedades mecânicas podem ser utilizadas para avaliar o grau da corrosão por pites. As propriedades que podem ser analisadas são: resistência à tração, alongamento, resistência à fadiga, resistência ao impacto e pressão de ruptura (ASTM G-46, 2021).

Neste método, dois corpos de provas idênticos são preparados e apenas um deles é exposto ao ambiente corrosivo. Após a exposição, as propriedades mecânicas de ambos são medidas, e a diferença do resultado é atribuída à corrosão (ASTM G-46, 2021).

O principal fator que faz com que esse método não seja utilizado para avaliar peças em uso é que a maior parte dos ensaios realizados para se obter os dados relacionados às propriedades mecânicas são ensaios destrutivos, o que implica na perda do material testado e da necessidade de se remover o material do local onde está aplicado para que se possa realizar os testes (ASTM G-46, 2021).

3.3.3 Tabela padrão

Ao utilizar uma tabela padrão para comparação, mostrada na Figura 3.5, este método avalia a corrosão por pites em razão da densidade, tamanho e profundidade dos pites. As colunas A e B estão relacionadas às dimensões superficiais dos pites no metal. Um metal avaliado como A-2, B-1, C-3, por exemplo, apresentaria uma densidade de pites de 1×10^4 pites/m², um tamanho médio de pites de 0,5 mm² e uma profundidade média de pites de 1,6 mm. Por apresentar resultados simples, a comunicação entre aqueles que estão familiarizados com a tabela é efetiva. Além disso, também devido à simplicidade, os dados podem ser facilmente armazenados e utilizados para fins comparativos (ASTM G-46, 2021).

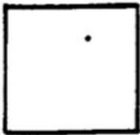
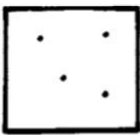
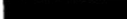
Contudo, a análise por este método é tediosa e consome muito tempo, o que faz com que este método não seja comumente utilizado (ASTM G-46, 2021).

3.4 Automação dos processos de avaliação da corrosão

A palavra controle denota o ato ou poder de exercer domínio, fiscalizar, supervisionar. No contexto tecnológico, assume papel primordial dentre os modelos e processos existentes. Desde a invenção dos primeiros reguladores mecânicos desenvolvidos por James Watt em 1778 até as instrumentações eletrônicas criadas no século XX, mecanismos de controle vêm sendo estudados para aumentar a confiabilidade de processos. Desde 1960, computadores são utilizados para trabalhar seguindo instruções codificadas (RIBEIRO, 1999).

Os fenômenos corrosivos, que apresentam grande impacto na confiabilidade dos processos industriais, seguiram o mesmo caminho. Vários mecanismos de análise e avaliação da corrosão foram e vêm sendo desenvolvidos com o mesmo propósito.

Figura 3.5 - Tabela padrão para análise da corrosão por pites

	<u>A</u> <u>DENSITY</u>	<u>B</u> <u>SIZE</u>	<u>C</u> <u>DEPTH</u>
1	 $2.5 \times 10^3 / \text{m}^2$	 0.5 mm^2	 0.4 mm
2	 $1 \times 10^4 / \text{m}^2$	 2.0 mm^2	 0.8 mm
3	 $5 \times 10^4 / \text{m}^2$	 8.0 mm^2	 1.6 mm
4	 $1 \times 10^5 / \text{m}^2$	 12.5 mm^2	 3.2 mm
5	 $5 \times 10^5 / \text{m}^2$	 24.5 mm^2	 6.4 mm

Fonte: ASTM G-46, 2021.

Os mecanismos automáticos de identificação e avaliação da corrosão se destacam em aplicações onde o material metálico não pode ser facilmente acessado, como em tubulações subaquáticas de estações petrolíferas. De acordo com dados do ano de 2020 da Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, a segunda maior causa de incidentes em oleodutos e gasodutos é a corrosão. De forma ainda mais específica, de acordo com Biezma *et al* (2020), 15% das fatalidades consequentes de incidentes em dutos são causadas devido a falhas ocasionadas pela corrosão por pite.

Atualmente, várias tecnologias vêm sendo desenvolvidas para identificação automática da corrosão. Um trabalho técnico científico realizado por Felisberto *et al* (2005) apresenta metodologias aplicadas à automação de partes do processo de inspeção radiográfica de tubulações para monitoramento de corrosão, onde as espessuras de parede dos tubos são mensuradas. As imagens extraídas dos tubos por este método podem ser visualizadas na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Imagens extraídas do processo de inspeção radiográfica de tubulações com diferentes estágios de corrosão



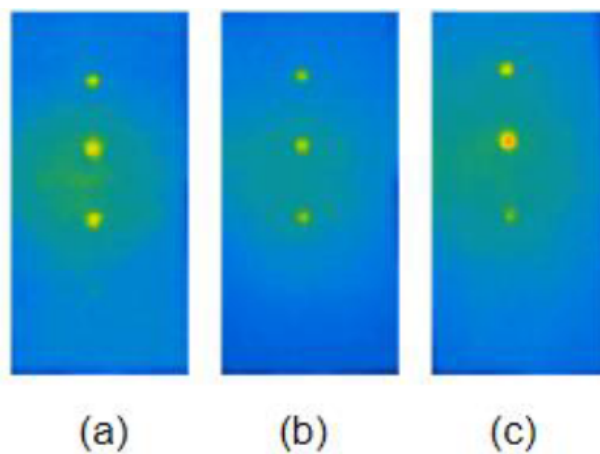
- (a) Tubo que apresenta corrosão em sua parede.
- (b) Tubo com parede em bom estado.

Fonte: Felisberto *et al*, 2005.

Outra tecnologia, utiliza a termografia ativa para a detecção e dimensionamento da corrosão em aço carbono revestido. O estudo realizado por Costa *et al* (2020) utiliza um ensaio não destrutivo, com alta velocidade de inspeção e fácil automatização, onde as imagens termográficas obtidas são capazes de demonstrar um gradiente de temperatura nas regiões oxidadas. Após o processamento das imagens, é possível localizar os defeitos ao longo do corpo de prova analisado em função da sua posição por diferença no valor da escala de

cinza. A Figura 3.7 apresenta as imagens termográficas de uma chapa após certo período de aquecimento (COSTA et al, 2020).

Figura 3.7 - Imagens termográficas de uma chapa após diferentes tempos de aquecimento



- (a) Imagem após 3 segundos de aquecimento da chapa.
- (b) Imagem após 6 segundos de aquecimento da chapa.
- (c) Imagem após 9 segundos de aquecimento da chapa.

Fonte: Costa *et al*, 2020.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo apresenta todos os materiais, o fluxograma e a metodologia de trabalho utilizado para o desenvolvimento deste estudo.

4.1 Materiais utilizados para o preparo das amostras

- Amostras de aço inoxidável 316L com 45 mm de altura por 20 mm de largura;
- 60 gramas de cloreto de amônio (NH_4Cl) da marca NEON;
- 60 gramas de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;
- 2000 ml de água destilada;
- Balança eletrônica analítica;
- 2 béqueres.

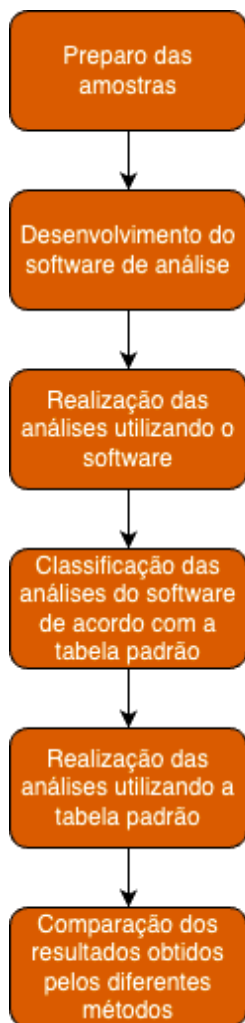
4.2 Metodologia

Para a realização deste estudo, foi definido um fluxo de trabalho que está ilustrado na Figura 4.1.

4.2.1 *Preparo das amostras*

A metodologia de preparo das amostras começou com o uso de amostras de aço inoxidável 316L com 45 mm de altura por 20 mm de largura. Um dos principais objetivos era simular situações reais de estresse no material, e, por isso, optou-se por não realizar o polimento das amostras, seguindo as diretrizes das normas ASTM G48-11 e ASTM G1-03 (2017).

Para a imersão das amostras, duas soluções foram preparadas. A primeira solução consistiu em uma solução aquosa de cloreto de amônio, obtida através da diluição de 60 gramas de cloreto de amônio (NH_4Cl) da marca NEON em 1000 ml de água destilada, resultando em uma concentração de 6% (m/v). A medição precisa da massa do cloreto de amônio foi realizada com o auxílio de uma balança eletrônica analítica.

Figura 4.1 - Fluxograma para realização do trabalho

Fonte: próprio autor.

A segunda solução utilizada foi uma solução de cloreto férrico III, preparada com 60 gramas de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ diluídos em 1000 ml de água destilada, alcançando uma concentração de 6% (m/v). Ambas as soluções foram preparadas com rigor, de acordo com os padrões especificados pelas normas ASTM G1-03 (2017) e ASTM G48-11 (2020).

As amostras foram imersas em béqueres estéreis, que foram previamente tratados com radiação ionizante e devidamente fechados durante o processo de imersão. As condições de imersão foram as seguintes:

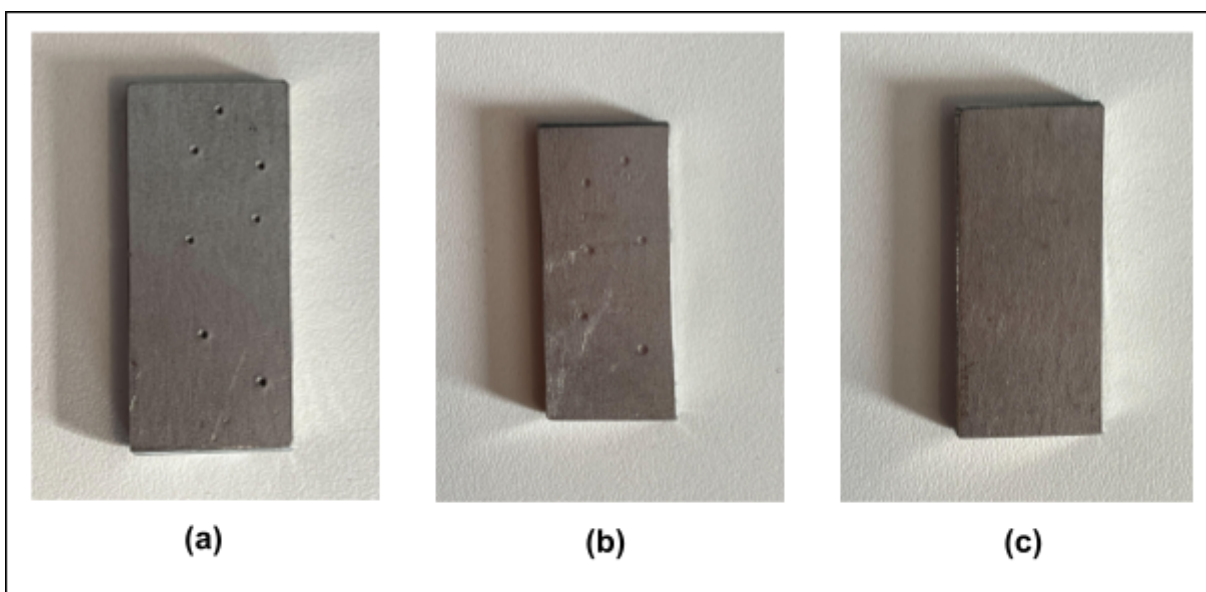
- Solução de Cloreto de Amônio: As amostras foram mantidas imersas nesta solução com uma concentração de 6% (m/v) por um período de 72 horas, conforme as diretrizes da norma ASTM G48-11.
- Solução de Cloreto Férrico III: Da mesma forma, as amostras foram imersas em uma solução aquosa de cloreto férrico III com concentração de 6% (m/v) e mantidas sob as mesmas condições por 72 horas, em conformidade com a norma ASTM G48-11.

Após o período de teste, as amostras passaram por um processo de pós-imersão que incluiu o enxágue minucioso com água, a utilização de uma escova de cerdas de nylon em água corrente para remover os produtos de corrosão, a limpeza com álcool etílico e, finalmente, a secagem ao ar.

Esses procedimentos detalhados foram estritamente seguidos para garantir a conformidade com as normas citadas anteriormente, que visam avaliar a susceptibilidade à corrosão por pite. A não realização do polimento nas amostras desempenhou um papel fundamental na simulação de condições reais de estresse no material, contribuindo para a representatividade dos resultados.

A Figura 4.2 apresenta as amostras com diferentes graus de corrosão por pites que foram selecionadas para a realização das análises, sendo elas a Amostra 1 (a), Amostra 2 (b) e Amostra 3 (c), respectivamente.

Figura 4.2 - Amostra 1 (a), Amostra 2 (b) e Amostra 3 (c)



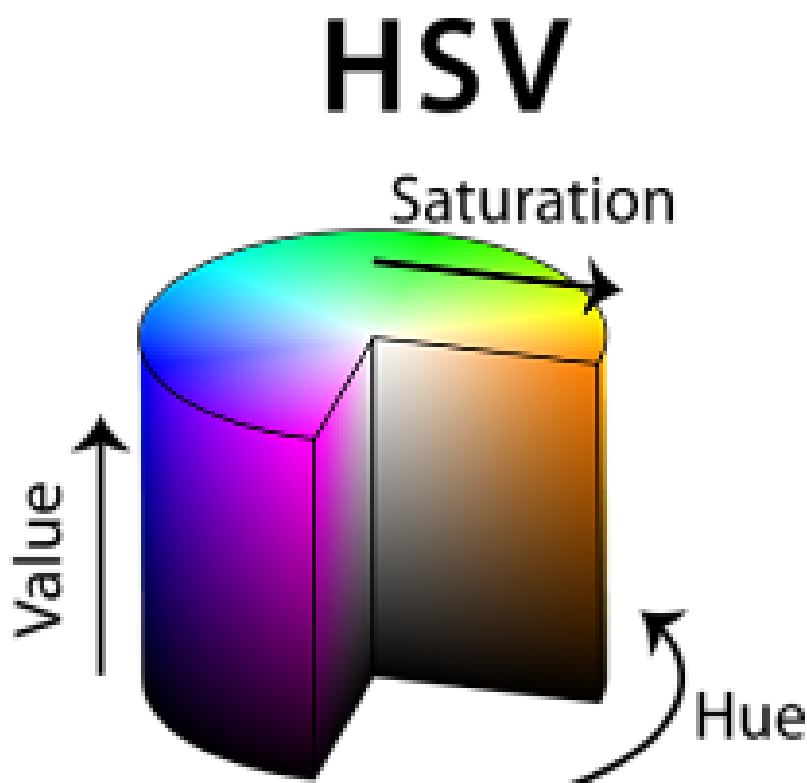
Fonte: próprio autor.

4.2.2 Elaboração do software de análise

Para a elaboração do software de análise, foi utilizada a linguagem de programação Python junto das bibliotecas Pillow, que provém uma variedade de recursos de processamento de imagens, e Tkinter, que facilita a construção de interfaces gráficas de usuário (HACKELING, 2017).

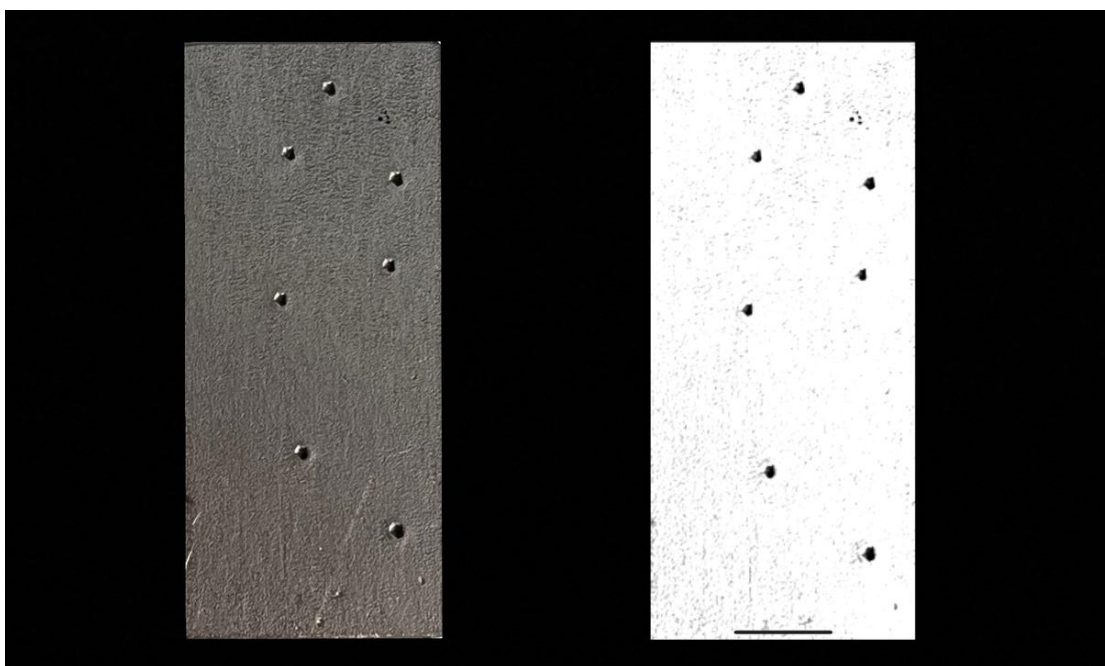
O software de análise realiza o processamento da imagem da amostra através da escala de cinzas, que é feito utilizando o sistema de cores HSV (matiz, saturação, valor), criado por Alvy Ray Smith no ano de 1974. Este sistema de cores está exemplificado na Figura 4.3. A imagem inserida no programa é tratada com parâmetros de brilho e contraste escolhidos pelo próprio usuário para que a imagem final apresente os pontos de corrosão por pites na cor preta, enquanto o restante da amostra (área onde não existe ocorrência de pites) apresente a cor branca. A Figura 4.4 representa um exemplo de como se dá o processamento da imagem, ilustrando a foto original e a foto processada.

Figura 4.3 - Sistema de cores HSV



Fonte: Wikipedia, 2022.

Figura 4.4 - Imagem antes e depois do processamento



Fonte: próprio autor.

O software, de forma automatizada, percorre cada pixel da imagem e verifica se a sua cor se aproxima mais da cor branca ou da cor preta. Através dessa verificação, o software é capaz de entender se cada pixel da imagem está representando uma área onde existe a corrosão por pites (cor preta) ou uma área livre de corrosão (cor branca). Para realizar a contagem da quantidade de pites, o software foi programado para classificar pixels pretos adjacentes como pixels pertencentes a um mesmo pite.

Através da quantificação de pixels classificados como pretos (áreas onde existem pites) e a comparação com a área total da peça, informada pelo próprio usuário na interface de usuário do software, e utilizando a Equação 4.1, o software foi capaz de determinar a porcentagem da área corroída.

$$\% \text{ Área corroída} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Áreas de cor preta}}{\text{Área total da peça}} \times 100 \quad (4.1)$$

Já a densidade de pites, pode ser determinada pelo software através da Equação 4.2.

$$Densidade\ de\ pites = \frac{Número\ de\ pites}{Altura\ real\ da\ amostra * Largura\ real\ da\ amostra} \quad (4.2)$$

Por fim, o tamanho médio dos pites pode ser determinado pelo software através da Equação 4.3.

$$Tamanho\ médio\ dos\ pites = \frac{\sum_{i=1}^n Tamanho\ do\ pite\ i}{n} \quad (4.3)$$

Dessa forma, o trabalho tedioso e que consome grande quantidade de tempo que é realizado através do método de análise tradicional, poderá ser poupado e o material analisado poderá ser classificado comparando o resultado com a tabela padrão contida na norma ASTM G-46.

4.2.3 Realização dos testes

A confiabilidade do software desenvolvido para facilitar o método de análise proposto na norma ASTM G-46 foi testada comparando o resultado da avaliação da corrosão por pites através do software e do resultado da avaliação através da tabela padrão citada na norma.

Para realização da análise através do software, foi necessário realizar fotografias das amostras, com um ângulo de 90° em relação à superfície da peça. As imagens obtidas foram processadas utilizando o software desenvolvido para realçar e identificar as regiões corroídas por pites. As características dos pites, como tamanho médio, densidade e número de pites foram quantificadas a partir destas imagens, fornecendo dados essenciais para a análise da corrosão por pites. Após a obtenção dos resultados, foi feita a classificação da corrosão por pites de acordo com a tabela padrão da norma ASTM G-46, sendo o valor considerado aquele que mais se aproxima dos dados contidos na tabela.

Enquanto isto, a condução do teste através da tabela padrão foi feita conforme a norma ASTM G-46 e os resultados obtidos foram registrados para serem discutidos.

4.2.4 Análise dos dados

Os dados obtidos foram submetidos a uma análise rigorosa para identificar padrões de corrosão por pites e correlacionar as variáveis relevantes. Esta análise foi fundamental para compreender as relações entre os fatores estudados e os padrões de corrosão observados nas imagens. Os dados obtidos pelos dois métodos de análise foram comparados para avaliação da assertividade das medidas realizadas pelo software de análise e para validação do método proposto.

4.2.5 Considerações

Essa metodologia proporcionou um processo estruturado e confiável para a preparação das amostras de aço inoxidável 316L com corrosão por pites, garantindo a coleta de dados consistentes e precisos para análise. A análise automatizada das imagens obtidas permitiu uma avaliação mais eficiente e detalhada da corrosão por pites, contribuindo para a compreensão deste fenômeno.

Após a realização da análise dos dados obtidos é possível não só avaliar a efetividade do método, quanto também é possível discutir possíveis pontos de melhorias e de correção para aperfeiçoamento do software.

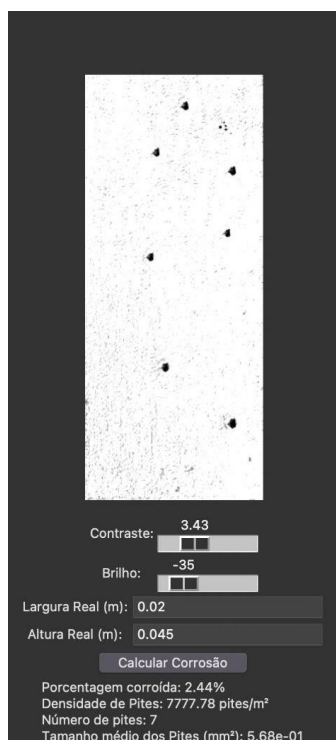
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, apresentaremos os resultados obtidos a partir da análise da corrosão por pites nas amostras de aço inoxidável AISI 316L, utilizando dois métodos distintos: o software de análise de imagens desenvolvido e o método da norma ASTM G-46. Essa abordagem permitirá uma comparação direta entre os dois métodos, destacando suas diferenças e semelhanças.

5.1 Análise dos pites pelo software de análise de imagens

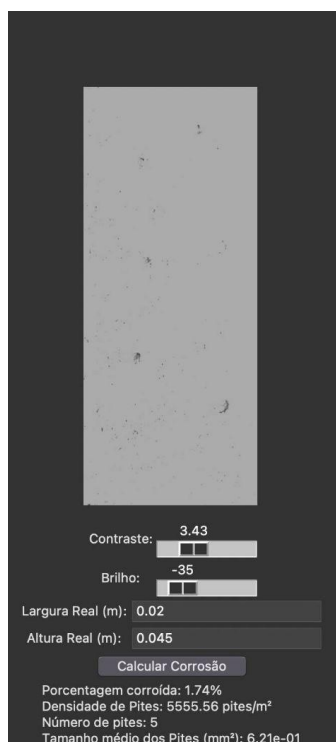
A análise dos pites por meio do software de análise de imagens proporcionou resultados detalhados sobre a área total dos pites, a quantidade de pites e a densidade de pites por metro quadrado em cada amostra. Os testes foram realizados em todas as amostras, e a Figura 5.1, Figura 5.2 e Figura 5.3 apresentam imagens dos resultados das análises realizadas pelo software para as amostras 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 5.1 - Análise da Amostra 1 através do software



Fonte: próprio autor.

Figura 5.2 - Análise da Amostra 2 através do software



Fonte: próprio autor.

Figura 5.3 - Análise da Amostra 3 através do software



Fonte: próprio autor.

Os resultados obtidos para cada uma das três análises são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Resultados da análise através do software

Características	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Área corroída (%)	2,44	1,74	0
Densidade de pites (pites/m ²)	$7,77 \times 10^3$	$5,55 \times 10^3$	0
Tamanho médio dos pites (mm ²)	$5,68 \times 10^{-1}$	$6,21 \times 10^{-1}$	0
Número de pites	7	5	0

Fonte: próprio autor.

5.2 Classificação dos resultados da análise do software de acordo com a norma ASTM G-46

A classificação da corrosão por pites da amostra foi realizada com os dados obtidos pelo software de análise e a Tabela 5.2 indica o resultado obtido para a densidade de pites, enquanto a Tabela 5.3 indica o resultado obtido para o tamanho médio dos pites.

Tabela 5.2 - Classificação da densidade de pites obtidos através da análise realizada pelo software de acordo com a norma

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Densidade de pites indicada pelo software (pites/m ²)	$7,77 \times 10^3$	$5,55 \times 10^3$	0
Densidade de pites mais próxima classificada pela norma (pites/m ²)	$1,0 \times 10^4$	$2,5 \times 10^3$	0
Classificação	A-2	A-1	-

Fonte: próprio autor.

Tabela 5.3 - Classificação do tamanho médio dos pites obtidos através da análise realizada pelo software de acordo com a norma

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Tamanho médio dos pites indicado pelo software (mm ²)	5,68 x 10 ⁻¹	6,21x10 ⁻¹	0
Tamanho médio dos pites mais próximo classificado pela norma (mm ²)	5,00 x 10 ¹	5,00 x 10 ¹	0
Classificação	B-1	B-1	-

Fonte: próprio autor.

Dessa forma, a classificação obtida para a amostra 1 é A-2, B-1, enquanto a classificação obtida para a amostra 2 é A-1, B-1. O software de análise não foi capaz de realizar a classificação da profundidade dos pites, não sendo possível classificá-los de acordo com a norma.

5.3 Análise dos pites pelo método da norma ASTM G-46

A análise dos pites seguindo o método da norma ASTM G-46 proporcionou resultados que serviram de comparação com a análise realizada pelo software. Os testes foram realizados nas três amostras, e os resultados obtidos para cada uma delas são apresentados na Tabela 5.4.

Dessa forma, a classificação da amostra 1 é A-2, B-3, C-3, enquanto a classificação da amostra 2 é A-1, B-3, C-2. A amostra 3, por não possuir nenhum ponto de corrosão por pites, não é classificada.

5.4 Comparação dos resultados

Para melhor compreender a eficácia e a precisão dos dois métodos de análise, é fundamental comparar os resultados obtidos. A Tabela 5.5 expõe as classificações obtidas pelos métodos de análise.

Tabela 5.4 - Resultados da análise através da tabela padrão

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Densidade de pites (pites/m ²)	1,0 x 10 ⁴	2,5 x 10 ³	0
Tamanho médio dos pites (mm ²)	8,0	8,0	0
Profundidade do pite mais profundo (mm)	1,6	0,8	0
Classificação	A-2, B-3, C-3	A-1, B-3, C-2	-

Fonte: próprio autor.

Tabela 5.5 - Comparação das classificações obtidas pelos métodos de análise

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Análise através do software	A-2, B-1	A-1, B-1	-
Análise através da norma	A-2, B-3, C-3	A-1, B-3, C-2	-

Fonte: próprio autor.

5.5 Discussão dos resultados

Como podemos observar na Tabela 5.5, os resultados obtidos revelaram uma capacidade notável do software desenvolvido para analisar com precisão a densidade de pites nas amostras de aço inoxidável 316L, já que em ambos métodos de análise a Amostra 1 foi classificada como A-2 e a Amostra 2 foi classificada como A-1. Além disso, o software também não detectou nenhum ponto de corrosão na Amostra 3. Isso sugere que a abordagem adotada para a quantificação e caracterização das áreas corroídas mostrou-se eficaz na contagem confiável dos pites presentes nas amostras.

Por outro lado, a análise do tamanho médio dos pites e a avaliação da profundidade dos pites realizada pelo software não foi precisa, já que de acordo com a Tabela 5.5, a classificação apresentou divergências quanto à análise realizada de acordo com a norma ASTM G-46. A divergência na classificação do tamanho médio

dos pites pode ser atribuída a desafios associados à manipulação manual das imagens, à variações na iluminação e às diferentes profundidades dos pites, o que pode ter impactado na identificação correta dos limites dos pites. Ao realizar a manipulação das imagens através do software, pites mais rasos apresentam uma coloração mais clara do que pites mais profundos, o que afeta a classificação da coloração dos pites realizada pelo software, o que consequentemente infere em uma análise menos precisa por parte do programa computacional.

Quanto à impossibilidade de analisar a profundidade dos pites, esta limitação destaca a oportunidade de aprimoramentos no software para incorporar uma funcionalidade mais robusta de medição de dimensões tridimensionais. Essa melhoria pode ser crucial para obter uma compreensão mais abrangente da extensão da corrosão por pites nas amostras.

Essas observações oferecem percepções valiosas para futuras melhorias no software, visando aprimorar sua capacidade de caracterização abrangente da corrosão por pites em amostras de aço inoxidável.

6 CONCLUSÕES

A conclusão do presente trabalho destaca-se pela abordagem abrangente na análise da corrosão por pites em amostras de aço inoxidável 316L. Os resultados obtidos, tanto por meio do software de análise quanto pelo método da norma ASTM G-46, oferecem informações valiosas sobre a densidade, tamanho médio e profundidade dos pites presentes nas amostras. A convergência dos resultados da classificação da densidade de pites alcançada pelo software revela sua eficácia em fornecer resultados precisos para esta análise. Por outro lado, a divergência dos resultados da classificação do tamanho médio dos pites e a não classificação das amostras em termo da profundidade dos pites revelam pontos de melhoria para o software desenvolvido.

Contudo, é importante ponderar sobre as limitações identificadas, como a manipulação manual das imagens e a possível influência de diferentes condições de iluminação nos resultados. Essas limitações destacam oportunidades para aprimoramentos futuros. A análise manual de imagens, por sua natureza, é suscetível a erros humanos, uma vez que a subjetividade do operador pode influenciar o processo de seleção e medição dos pites. Diferentes operadores podem interpretar as imagens de maneira variada, resultando em discrepâncias nos resultados.

Quanto às diferentes condições ambientais em que as imagens são capturadas, variações na luminosidade e nas condições de iluminação podem afetar a qualidade das imagens, tornando a detecção e medição dos pites mais desafiadoras. A intensidade da luz e a presença de sombras nas imagens podem obscurecer os detalhes das características de corrosão e prejudicar a precisão da análise.

Além disso, também foi possível observar o impacto da profundidade dos pites na identificação dos mesmos. A Amostra 1, por possuir pites com maiores profundidades, apresentou uma coloração mais escura na área dos pites, o que facilitou a análise do software.

A conscientização dos pontos de melhoria do software é fundamental para interpretar os resultados com cautela e considerar possíveis fontes de variação nos dados. Melhorias futuras podem envolver o desenvolvimento de métodos de análise

mais automatizados e a padronização das condições de captura de imagens para mitigar essas limitações.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A identificação e a marcação dos pites nas amostras são realizadas de forma manual, o que pode introduzir um grau de subjetividade e depender da habilidade do operador. Uma melhoria sugerida envolveria o desenvolvimento de um software com capacidade de análise tridimensional, capaz de utilizar algoritmos de visão computacional para identificar os pites de forma mais precisa e rápida, medir a profundidade dos pites e reduzir a influência da intervenção manual.

Diferentes ambientes com variações na luminosidade, ângulo de visão e outras condições podem afetar o resultado dos testes. Para minimizar a influência de variações na luminosidade e variações no ângulo de captura da imagem, futuros trabalhos podem explorar a padronização das condições de captura de imagens, de modo a garantir resultados mais consistentes e comparáveis.

Uma outra abordagem sugerida envolve a implementação de algoritmos de aprendizado de máquina, permitindo ao software adaptar-se e aprimorar suas capacidades ao longo do tempo. Essa adaptação contínua poderia contribuir para reduzir a dependência da habilidade do operador e aprimorar a consistência das análises (HACKELING, 2017).

Essas sugestões visam fortalecer a eficácia geral do software, destacando seu potencial contínuo de contribuição para análises precisas e eficientes da corrosão por pites em amostras de aço inoxidável.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G1-03 (2017)**: Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. West Conshohocken, PA, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G46-21 (2021)**: Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion. Pennsylvania, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G46-94 (2005)**: Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion. West Conshohocken, PA, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G48-11 (2020)**: Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution. West Conshohocken, PA, 2020.

ASSOCIATION FOR MATERIALS PROTECTION AND PERFORMANCE. **AMPP**: Cost of corrosion study. Texas, 2002. Disponível em: <<https://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/NACE/cedda8a4-c3c0-4583-b1b6-3b248e6eb1f2/UploadedImages/Resources/pdf/ccsupp.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2022.

BEOMSOO, K; YEONWON, K; JEONGHYEON, Y. Detection of corrosion on steel plate by using Image Segmentation Method. **Journal of the Korean Institute of Surface Engineering**, v. 54, n.2, p. 84-89, abr. 2021. Disponível em: <<http://koreascience.or.kr/article/JAKO202116056909004.page>>. Acesso em: 16 out. 2022.

BIEZMA, M.V.; ANDRÉS, M.A.; AGUDO, D.; BRIZ, E.. Most fatal oil & gas pipeline accidents through history: A lessons learned approach. **Elsevier - Engineering Failure Analysis**, Espanha, 2020.

CHERNOV, V; ALANDER, J; BOCHKO, V. Integer-based accurate conversion between RGB and HSV color spaces. **Computers & Electrical Engineering**. v. 46, p. 328-337, nov. 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045790615002827>>. Acesso em: 16 out. 2022.

CORBÓ, H.M. **Aços Inoxidáveis**: aplicações e especificações. São Paulo. ArcelorMittal. 2008.

FONTANA, M. G. **Corrosion engineering**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, Inc, 1987.

FONTANA, M. G; STAEHLE, R. W. **Advances in Corrosion Science and Technology**. 1. ed. New York: Springer, Inc, 2013.

HACKELING, G. **Mastering Machine Learning with scikit-learn**. 2. ed. Birmingham, UK: Packt Publishing, 2017.

KIVY. **Kivy**: The Open Source Python App development Framework, 2022. Disponível em: <<https://kivy.org/doc/stable/>>. Acesso em: 16 out. 2022.

PEDREGOSA, F. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. **Journal of Machine Learning Research**. v. 12, p. 2825-2830, 2011. Disponível em: <<https://jmlr.csail.mit.edu/papers/volume12/pedregosa11a/pedregosa11a.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2022.

PEREIRA, M. C. **Estudo morfológico e cinético da corrosão por pites em liga de alumínio 1050**. 2010. 166 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/103764>>. Acesso em: 16 out. 2022.

PETRICCA, L. et al. Corrosion Detection Using A.I : A Comparison of Standard Computer Vision Techniques and Deep Learning Model. **Computer Science & Information Technology**, v. 6, p. 91-99, mai. 2016. Disponível em: <<https://www.airccj.org/CSCP/vol6/csit65308.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2022.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Python Language Site**: Documentation, 2022. Disponível em: <<https://www.python.org/doc/>>. Acesso em: 16 out. 2022.

REVIE, R. W; UHLIG, H. H. **Corrosion and corrosion control**: an introduction to Corrosion Science and Engineering. 4. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2008.

RIBEIRO, M. A. **Automação Industrial**. 4. ed. Salvador: Tek Treinamento e Consultoria Ltda. 1999.

SUK-JONG, Y; YUN-HA, Y. (2018). Study on Corrosion Behaviors of Automotive Steels Under Various Accelerated Corrosion Tests. **Transaction of The Korean Society of Automotive Engineers**. v. 26, p. 221-228, mar. 2018. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/journal/Transactions-of-Korean-Society-of-Automotive-Engineers-1225-6382>>. Acesso em: 16 out. 2022.

WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. v. 49. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.