

**ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL DOM BOSCO
FACULDADE DE ENGENHARIA DE RESENDE
ENGENHARIA MECÂNICA**

**GUILHERME LOPES NEMETALA FARIA
JEAN PAULO SAMPAIO DE SOUZA**

**AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À CORROSÃO DO
AÇO 1045 EM DIFERENTES TIPOS DE AMBIENTES
EXTERNOS**

**RESENDE
2023**

**ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL DOM BOSCO
FACULDADE DE ENGENHARIA DE RESENDE**

**Guilherme Lopes Nemetala Faria
Jean Paulo Sampaio de Souza**

**Avaliação da susceptibilidade à corrosão do Aço 1045 em diferentes tipos de ambientes
externos**

Trabalho de Graduação apresentado à Associação Educacional Dom Bosco, Faculdade de Engenharia de Resende, Administrativas e da Computação Dom Bosco Curso de Engenharia Mecânica, como requisito parcial para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Catalogação na fonte
Biblioteca Central da Associação Educacional Dom Bosco – Resende-RJ

F224 Faria, Guilherme Lopes Nemetala
Avaliação da susceptibilidade à corrosão do aço 1045 em diferentes tipos de ambientes externos / Guilherme Lopes Nemetala Faria; Jean Paulo Sampaio de Souza - 2023.
67f.

Orientador: Heloiza Alves Gomes Machado
Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial à finalização do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Resende da Associação Educacional Dom Bosco.

1. Engenharia mecânica. 2. Corrosão. 3. Aço. I. Souza, Jean Paulo Sampaio de. II. Machado, Heloiza Alves Gomes. III. Faculdade de Engenharia de Resende. IV. Associação Educacional Dom Bosco. V. Título.

CDU 620.19(043)



FACULDADES
DOM BOSCO

**GUILHERME LOPES NEMETALA FARIA
JEAN PAULO SAMPAIO DE SOUZA**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. (a).: MSc. Heloiza Alves Gomes Machado
Orientador

Prof. (a).: Dr. Eduardo de Freitas Miranda
Membro da Banca

Prof.(a).: Dr. Rodrigo Alexandre de Alencar Nascimento
Membro da Banca

Resende, 17 de novembro de 2023

dedico este trabalho
de modo especial, à minha família

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradecemos a Deus, fonte da vida e da graça por essa oportunidade de realizar este sonho. Agradeço a nossa vida, nossa inteligência, nossa família e nossos amigos.

A nossa orientadora, *Heloiza Alves Gomes Machado* por enriquecer nossa jornada com seu conhecimento e experiência.

Aos nossos pais, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram os nossos estudos;

Aos professores pelo ensino proporcionado durante esses cinco anos de muita dedicação e estudo.

Aos funcionários das Faculdades Dom Bosco pela dedicação e alegria no atendimento.

E pôr fim aos nossos colegas de turma que compartilharam esses cinco anos de curso superior.

A todos o nosso muito obrigado.

“Só sabemos com exatidão quando sabemos pouco; à medida que vamos adquirindo conhecimento, instala-se a dúvida.”

Goethe

RESUMO

A corrosão do aço é um problema que aflige vários setores econômicos, gerando altos custos para as empresas. Essa deterioração do aço, frequentemente, torna as estruturas inadequadas aos fins a que foram destinadas. Assim, os prejuízos advindos da corrosão do aço englobam as perdas de produção, paradas operacionais, quebra e descarte de máquinas e equipamentos, além de falhas mais graves, que são as perdas de vidas decorrentes de acidentes por falha dos materiais metálicos. Em vista disso, esta pesquisa tem como objetivo realizar uma análise da susceptibilidade à corrosão no aço 1045 simulando os ambientes propícios a corrosão. Para a realização deste estudo foi empregada uma metodologia dividida em duas etapas, em que a primeira foi a sua fundamentação teórica, a partir de uma pesquisa bibliográfica, enquanto a etapa seguinte consistiu em atividades experimentais com amostras de aço 1045, que foram submetidas a ambientes corrosivos simulados, para então serem analisadas visualmente. Considerando quatro ambientes corrosivos, ar atmosférico, sal, água doce e água salgada, os resultados evidenciaram que a água salgada foi o ambiente mais agressivo para as amostras, resultando em uma textura áspera com coloração escura de oxidação. A partir disso foi possível concluir que todas as etapas do experimento foram importantes para a precisão dos resultados, permitindo que o aço 1045 fosse analisado em relação aos efeitos causados pela sua corrosão nos quatro ambientes propostos.

PALAVRAS-CHAVE: Ambientes Corrosivos. Aço Carbono. Análise Macrográfica. Microscópio Estereoscópico.

ABSTRACT

Steel corrosion is a problem that affects several economic sectors, generating high costs for companies. This deterioration of steel often makes structures unsuitable for the purposes for which they were intended. Thus, losses arising from steel corrosion include production losses, operational stoppages, breakdown and disposal of machines and equipment, in addition to more serious failures, which are the loss of life resulting from accidents due to failure of metallic materials. In view of this, this research aims to carry out an analysis of the susceptibility to corrosion in 1045 steel, simulating the environments most prone to corrosion. To carry out this study, a methodology divided into two stages was used, in which the first was its theoretical foundation, based on bibliographical research, while the next stage consisted of experimental activities with samples of 1045 steel, which were subjected to environments simulated corrosives, to then be visually analyzed. Considering four corrosive environments, atmospheric air, salt, fresh water and salt water, the results showed that salt water was the most aggressive environment for the samples, resulting in a rough texture with a dark oxidation color. From this it was possible to conclude that all stages of the experiment were important for the accuracy of the results, allowing the 1045 steel to be analyzed in relation to the effects caused by its corrosion in the four proposed environments.

KEYWORDS: Corrosive Environments. Carbon steel. Macrographic Analysis. Stereoscopic Microscope.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1– Relação entre condutividade e corrosão.....	21
Figura 2– Corrosão galvânica em uma solda de aço carbono	22
Figura 3- Corrosão por pite em tubo de aço inoxidável AISI 304.....	23
Figura 4– Corrosão por frestas	25
Figura 5– CST em tubulação de latão em presença de amônia e umidade.....	27
Figura 6- Erosão por corrosão em tubo de aço-carbono.....	28
Figura 7– Corrosão por cavitação.....	29
Figura 8– Resultado da corrosão intergranular.....	31
Figura 9- Engrenagens metálicas em processo de corrosão uniforme.....	32
Figura 10 - diagrama de Pourbaix do sistema Fe-H ₂ O a 25 °C.....	35
Figura 11 - Micrografia Aço SAE 1045	40
Figura 12 – Microscópio Estereoscópico	43
Figura 13 – Fluxograma de atividades	44
Figura 14– Amostras de aço 1045	45
Figura 15 – Amostras dimensionadas antes do ensaio.....	46
Figura 16 – Ambientes simulados das amostras	47
Figura 17 – Amostras após 8 semanas.....	48
Figura 18 – Amostras após 8 semanas.....	49
Figura 19 - Amostras após 8 semanas	50
Figura 20 - Amostra após 8 semanas	51
Figura 21– (Borda) Amostras exposta a água doce	53
Figura 22 - (Topo) Amostras exposta a água doce	54
Figura 23– (Borda) Amostras exposta a água salgada.....	55
Figura 24 – (Topo) Amostras exposta a água salgada.....	56
Figura 25 – Amostras exposta a atmosfera.....	57
Figura 26 – Amostras exposta ao lado de um recipiente com sal	58
Quadro 1 - Possibilidades de corrosão entre o ferro e outros metais.....	20
Quadro 2 - Composição química do aço 1045 (% em peso)	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABTP	Associação Brasileira dos Terminais de Contêineres de Uso Público
ALWC	<i>Accelerated Low Water Corrosion</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CST	Corrosão Sob Tensão
IZA	<i>International Zinc Association</i>
mdd	miligramas por decímetro quadrado por dia
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
mmy	milímetros de penetração por ano
Mpa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira Registrada
PIB	Produto Interno Bruto
SCC	Stress Corrosion Cracking

LISTA DE SÍMBOLOS

H_2S	sulfeto de hidrogênio
CO_2	dióxido de carbono
M	Átomo de metal ou íon
n	número entre 1 e 3
e^-	Elétrons
$H_{(aq)}^+$	Íon de hidrogênio aquoso
$H_{2(g)}$	Gás hidrogênio
$H_2O_{(l)}$	Água no estado líquido
$OH_{(aq)}^-$	Íon hidroxila aquosa
$O_2 (aq)$	Oxigênio aquoso
Cr	Cromo
Ni	Níquel
Cu	Cobre
Al	Alumínio
Fe	Ferro
$Fe_3O_4(s)$	magnetita sólida
$Fe_2O_3(s)$	hematita sólida
$^{\circ}C$	Graus Célsius
pH	Potencial hidrogeniônico
C	carbono
$Mol L^{-1}$	Mol por litro
Mn	Manganês
Si	Silício
P	Fósforo
S	Enxofre
V	Volts
A/cm^2	Ampére por centímetro quadrado
Hcl	ácido clorídrico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo geral.....	14
1.2	Objetivos específicos.....	14
1.3	Justificativa	14
1.4	Limitação do estudo.....	15
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1	Corrosão do aço	16
2.2	Tipos de corrosão.....	17
2.2.1	Corrosão eletroquímica (ou corrosão galvânica)	17
2.2.2	Corrosão por pites (pitting)	22
2.2.3	Corrosão por frestas (crevice corrosion)	25
2.2.4	Corrosão por tensão (Stress Corrosion Cracking - SCC).....	26
2.2.5	Corrosão por erosão (Erosion-Corrosion).....	27
2.2.6	Corrosão por cavitação (Cavitation Corrosion)	28
2.2.7	Corrosão Intergranular.....	30
2.2.8	Corrosão uniforme	31
2.3	Caracterização do aço-carbono.....	33
2.3.1	Aço 1045	37
2.4	Ensaio de corrosão	39
2.4.1	Microscópios estereoscópicos	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1	Material	45
3.2	Corte	45
3.3	Limpeza	46
3.4	Simulações dos ambientes corrosivos	46
3.5	Análise visual.....	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1	Análise visual da amostra ao lado de um recipiente com sal.....	48
4.2	Análise visual da amostra exposta a atmosfera	49
4.3	Análise visual da amostra exposta a água doce	50
4.4	Análise visual da amostra exposta a água salgada	51
4.5	Análise com o microscópio estereoscópico	51

SUMÁRIO

4.5.1	Microscópio estereoscópico Olympus SZ61	52
4.5.2	Amostra exposta a água doce.....	53
4.5.3	Amostra exposta a água salgada	54
4.5.4	Amostra exposta a atmosfera	56
4.5.5	Amostra exposta ao lado de um recipiente contendo sal	57
5	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, resultante da ação química ou eletroquímica do meio ambiente, associada ou não a esforços mecânicos. Essa interação físico-química entre o material e o seu meio operacional promove alterações prejudiciais indesejáveis, tais como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, que acabam tornando-o inadequado para o uso (GENTIL, 2017).

A corrosão é um fenômeno oneroso e de extrema relevância para a indústria, infraestrutura e economia do Brasil. A *International Zinc Association* (IZA) (2013) estima que os prejuízos causados por esse processo correspondam a cerca de 4% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro anualmente, totalizando bilhões de reais em custos de reparo e substituição de materiais corroídos. Dentre as regiões brasileiras, o estado do Rio de Janeiro se destaca por sua vasta extensão litorânea de aproximadamente 635 km e pela importância nas atividades marítimas, industriais e de infraestrutura (MARTINS, 2019).

Segundo a Associação Brasileira dos Terminais de Contêineres de Uso Público (ABTP) (2021), no contexto das atividades marítimas no estado, o porto do Rio de Janeiro é responsável por movimentar anualmente mais de 7 milhões de contêineres e cerca de 41 milhões de toneladas de cargas diversas, sendo considerado um dos maiores portos do Brasil. A exposição de estruturas portuárias e navios ao ambiente corrosivo do oceano representa um desafio significativo para a conservação e vida útil desses materiais metálicos (GENTIL, 2017).

No que diz respeito aos ambientes fluviais, o estado do Rio de Janeiro conta com uma rede fluvial extensa, que inclui importantes rios como o Paraíba do Sul e o Guandu. Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (2021), a indústria de petróleo e gás é outro setor estratégico para a economia fluminense, com a produção de petróleo estimada em cerca de 47 milhões de barris por dia. As plataformas offshore e suas estruturas estão sujeitas à corrosão em ambientes marinhos altamente agressivos, que requerem soluções eficazes de proteção contra esse processo de degradação (MARTINS, 2019).

Conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2023), em relação aos ambientes industriais e urbanos, a presença de poluentes atmosféricos pode intensificar a corrosão em componentes e estruturas metálicas. As grandes áreas urbanas, como a Região Metropolitana do Rio de Janeiro, com uma população de mais de 13 milhões de habitantes, são especialmente propensas à emissão de poluentes atmosféricos provenientes do tráfego intenso de veículos e atividades industriais. Esses poluentes podem reagir com a superfície dos materiais metálicos, acelerando o processo corrosivo (GENTIL, 2017). Diante deste cenário o

seguinte trabalho tem como objetivo realizar uma análise da susceptibilidade à corrosão no aço 1045 simulando ambientes propícios a corrosão.

1.1 Objetivo geral

O presente estudo tem como objetivo realizar uma análise da susceptibilidade à corrosão no aço 1045 simulando ambientes propícios a corrosão.

1.2 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral, foram determinados os seguintes objetivos específicos:

- Descrever a corrosão do aço, em seus vários tipos;
- Realizar simulação de ambientes agressivos;
- Realizar ensaio macrográfico;
- Analisar os resultados das simulações e ensaios.

1.3 Justificativa

A escolha do tema do presente trabalho se deu devido à grande importância do aço para a economia. Isso porque esse material está diretamente ligado ao desenvolvimento tecnológico de uma nação e, conseqüentemente, ao seu crescimento econômico.

Desse modo, um estudo sobre a corrosão do aço se mostra altamente relevante para a sociedade, já que esse problema tem um grande impacto negativo, uma vez que atua em larga escala. Assim, espera-se que os resultados do presente estudo forneçam informações importantes sobre os fatores que influenciam a corrosão do metal em diferentes ambientes.

A compreensão desses padrões de corrosão possibilitará a adoção de medidas de proteção e manutenção adequadas, visando prolongar a vida útil do e minimizar os custos associados à corrosão, especialmente em ambientes marinhos e industriais.

Além disso, a obtenção de dados quantitativos e a compreensão dos fatores que influenciam a corrosão são fundamentais para fornecer recomendações práticas de proteção e manutenção, contribuindo para a otimização do uso desses materiais nas atividades econômicas e projetos de infraestrutura e, conseqüentemente, para a redução dos impactos econômicos e sociais causados pela corrosão em todo o Brasil.

1.4 Limitação do estudo

O presente estudo é limitado em relação ao tipo de aço em que serão realizadas as análises de susceptibilidade à corrosão, o aço 1045. Os resultados serão obtidos através de simulações de alguns meios corrosivos: água doce, água salgada, atmosfera e exposto ao sal em amostras de, respectivamente: 24,86x17,54x8,05 mm; 26,26 x17, 94x8,53 mm; 26,16x17,90x8,4 mm; e 26,07x17,94x8,12 mm e após analisados no laboratório da Faculdade de Engenharia de Resende.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Corrosão do aço

A corrosão é bem definida como o ataque destrutivo a um material por reação com seu ambiente. Essa degradação do material resulta na perda das propriedades mecânicas das estruturas, como resistência, ductilidade e resistência ao impacto. A degradação do material leva à perda de material e, às vezes, à falha total da estrutura (BHANDARI *et al.*, 2015).

O alto custo da corrosão afeta inúmeras indústrias, aplicações domésticas e setores públicos em todo o mundo e destaca a necessidade de medidas de inibição da corrosão aprimoradas. Todavia, a inibição eficaz da corrosão tem um alto valor econômico (DWIVEDI; LEPKOVÁ; BECKER, 2017).

Alguns dos efeitos econômicos da corrosão são: substituição de equipamentos e estruturas degradadas, superdimensionamento de tolerância à corrosão de estruturas, desperdício de recursos valiosos, desligamento de equipamentos devido a falha de corrosão, contaminação de produtos, redução e perda de eficiência e produtos e recursos valiosos, manutenção dispendiosa (AKPANYUNG; LOTO, 2019).

Assim, o custo anual da corrosão é estimado em 3 a 4% do PIB nos países desenvolvidos. Somente nas indústrias de petróleo, gás e química, a corrosão é uma das tarefas mais desafiadoras e estima-se que custe 170 bilhões de dólares por ano (DWIVEDI; LEPKOVÁ; BECKER, 2017).

Além de seus altos custos, a corrosão também possui riscos à saúde e ao meio ambiente, que frequentemente estão associados à falha potencial dos equipamentos industriais à base de aço, como os da indústria de petróleo e gás (SONG *et al.*, 2004). Além disso, a corrosão tende a comprometer a segurança e retardar o avanço tecnológico. A corrosão dá um efeito de serviço útil negativo na vida útil das propriedades, o custo de corrosão incorrido pelos fabricantes e distribuidores de produtos e serviços também repassa o custo para os consumidores (AKPANYUNG; LOTO, 2019).

Com relação às aplicações na indústria de petróleo e gás, as duas principais formas de corrosão são a corrosão por dióxido de carbono (CO₂), também conhecida como corrosão doce, e a corrosão por sulfeto de hidrogênio (H₂S), mais comumente conhecida como corrosão ácida (VILLAMIZAR *et al.*, 2007). Entre esses dois, a corrosão por CO₂ chamou muita atenção dos pesquisadores desde 1949 porque os poços de petróleo normalmente contêm CO₂ (DWIVEDI; LEPKOVÁ; BECKER, 2017).

Destaca-se que a água do mar é um dos meios mais complexos e agressivos, diante disso, é relevante esclarecer que a corrosão marinha depende de numerosos parâmetros interdependentes e combina fatores químicos, biológicos e mecânicos. A compreensão da influência de cada um desses parâmetros e fatores é a chave para a otimização do projeto de estruturas e dispositivos metálicos utilizados em ambientes marinhos (REFAIT *et al.*, 2020).

Aços-carbono de baixo custo são frequentemente usados como material de construção preferido nas indústrias em geral, sendo considerados a opção mais econômica do que as ligas resistentes à corrosão (IMIANOWSKY; WALENDOWSKY, 2017). Todavia, aços-carbono em geral são suscetíveis à corrosão em certas condições de operações industriais, por isso, altos níveis de inibição de corrosão são importantes para operações seguras e econômicas que ampliam os limites do uso de aços-carbono sozinhos (MIGAHED, 2005).

Assim, cabe citar que no ambiente marinho, vários fatores combinados, como a heterogeneidade dos materiais (limites de grão, inclusões, soldas...), aeração diferencial e atividade biológica são determinantes para o desenvolvimento dos processos de corrosão de aços carbono. O conhecido fenômeno *Accelerated Low Water Corrosion* (ALWC), que combina aeração diferencial e atividade de consórcio de bactérias, ilustra perfeitamente este ponto (REFAIT *et al.*, 2020).

Embora haja uma variedade de tipos de fenômenos de corrosão localizados (por exemplo, corrosão em frestas, corrosão por pitting, ataque intergranular, trinca por corrosão sob tensão, corrosão filiforme), eles compartilham várias características comuns. O principal deles é o desenvolvimento de uma solução extremamente agressiva localmente, que causa alta taxa de ataque localizado (KELLY *et al.*, 2002).

Assim, em geral, os principais tipos de corrosão são classificados com relação à aparência externa ou propriedades físicas alteradas (REVIE; UHLIG, 2008). Por exemplo, o pitting pode ser visto como corrosão em fenda em escala menor, com microporos ou heterogeneidades de superfície atuando para formar a fenda (KELLY *et al.*, 2002).

2.2 Tipos de corrosão

2.2.1 Corrosão eletroquímica (ou corrosão galvânica)

A corrosão galvânica, resultante do contato de um metal com outro material condutor em meio corrosivo, é um dos tipos mais comuns de corrosão (ZHANG, 2011). Ela ocorre quando dois materiais metálicos, de potenciais distintos, entram em contato na presença de um eletrólito.

Em tal situação, há a transferência de elétrons a partir da diferença de potencial. Assim, a corrosão galvânica é uma consequência do acoplamento de materiais metálicos dissimilares imersos em um eletrólito (GENTIL, 2017).

Desse modo, apesar de que em muitos casos, a corrosão galvânica resulte na rápida deterioração dos metais, em outros casos, essa reação pode resultar na proteção contra corrosão de um metal ligado, que é a base da proteção catódica por anodos de sacrifício (ZHANG, 2011).

Uma vez que é advinda do acoplamento entre materiais distintos, a corrosão galvânica frequentemente se manifesta nas proximidades dessa região de acoplamento (GENTIL, 2017). A corrosão galvânica possui quatro componentes essenciais: o anodo, o catodo, o eletrólito e a conexão elétrica. Na ausência de qualquer um desses componentes, a reação de corrosão será interrompida (TAVAKKOLIZADEH; SAADATMANESH, 2001).

Tem-se que o anodo é local onde ocorre a corrosão do metal. Isso porque o metal que perde elétrons, se torna o íon na solução, ou pode formar um produto insolúvel. Já o catodo é a parte que normalmente atrai os elétrons criados no anodo. Os elétrons são consumidos pelas reações no catodo. Tais reações podem ser a formação de um filme metálico, redução de oxigênio ou evolução de hidrogênio (TAVAKKOLIZADEH; SAADATMANESH, 2001).

O eletrólito, por sua vez, é a solução com condutividade suficiente para transferir os íons. E por fim, a conexão elétrica ocorre entre os elementos anódico e catódico para que ocorra a corrosão. Nos casos em que o anodo e o catodo não fazem parte do mesmo material, é necessária uma conexão física para que a corrente flua e ocorra a corrosão (TAVAKKOLIZADEH; SAADATMANESH, 2001).

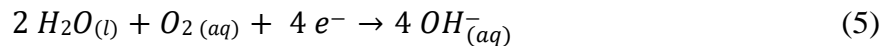
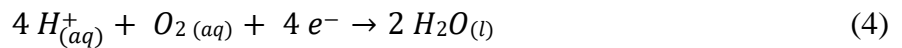
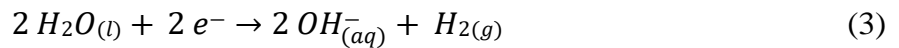
Se dois materiais com diferentes potenciais de corrosão forem imersos nesse eletrólito e acoplados eletricamente, haverá uma força motriz para uma corrente, chamada corrente galvânica, fluir entre eles. É esse fluxo de corrente que aumenta a corrosão do material com o potencial mais negativo, enquanto suprime a corrosão do material mais positivo (HACK, 2010).

A própria reação de corrosão envolve uma mudança na carga dos átomos de metal, indo de zero para um valor positivo, nos metais inseridos na solução. Como essa é uma mudança positiva na carga, a reação é chamada de reação anódica e pode ser escrita como (HACK, 2010):



Onde M é algum átomo de metal ou íon, e n é um número tipicamente entre 1 e 3, dependendo do metal e do eletrólito. Como essa reação gera elétrons livres e como a neutralidade de carga deve ser mantida, esses elétrons devem ser usados em uma ou mais

reações onde a carga é reduzida para que a corrosão prossiga (HACK, 2010). Estas são chamadas de reações catódicas, e as mais comuns encontradas em ambientes aquosos são (OLIVEIRA *et al.*, 2018):



Em que a equação 2 indica a reação catódica que ocorre em meio ácido na ausência de oxigênio e a equação 3 representa a reação catódica, também na ausência de oxigênio, que ocorre em meio neutro ou básico. Já as equações 4 e 5 representam situações na presença de oxigênio, respectivamente, para meio ácido e meio neutro ou básico (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

A corrosão não pode ocorrer a menos que todos os elétrons gerados pela reação anódica sejam usados pela reação catódica. O equilíbrio entre essas duas reações faz com que cada metal, liga ou condutor não metálico equilibre um potencial eletroquímico exclusivo desse material e eletrólito, chamado potencial de corrosão. Para determinado eletrólito, o potencial de corrosão de vários materiais pode ser listado em conjunto. Tal listagem, onde os materiais são arranjados de acordo com o potencial de corrosão ascendente ou descendente, é chamada de série galvânica.

Nesse contexto, pode-se destacar o quadro 1, onde estão demonstradas as possibilidades de corrosão de ferro e de um segundo metal, acoplados e totalmente imersos em solução aquosa de cloreto de sódio a 1%. Para compreender o quadro 1 é necessário observar o seguinte código (GENTIL, 2017):

- A: a taxa de corrosão do metal de referência não é influenciada pela ligação ou conexão com o metal de contato;
- B: a taxa de corrosão do metal de referência pode sofrer pequeno aumento pela ligação com o metal de contato;
- C: a taxa de corrosão do metal de referência sofre aumento considerável pela ligação com o metal de contato;
- D: na presença de umidade, mesmo em condições de pouca agressividade, evitar essas ligações sem que sejam usadas medidas protetoras;
- O: ausência de dados disponíveis.

Quadro 1 - Possibilidades de corrosão entre o ferro e outros metais

Metal de Referência \ Metal de Contato	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
2	B		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	A
3	C	B		A	A	A	A	A	A	A	B ou C	B	A	B ou C	C	A
4	C	B ou C	B ou C		B ou C	B ou C	A	A	A	A	B ou C	B ou C	A	B ou C	C	A
5	C	B	A	A		A	A	A	A	A	B ou C	B ou C	A	B ou C	C	A
6	C	B ou C	B ou C	B ou C	B		A ou C	A	A ou C	A	B ou C	B ou C	B ou C	B ou C	C	A
7	C	C	C	C	C	C		A	A	A	C	C	C	C	C	B
8	C	C	C	C	C	B	C		A	A	C	C	C	C	C	B
9	C	C	C	C	C	B	C	B		A	C	C	C	C	C	C
10	D	D	D	C	D	C	C	B ou C	B ou C		C	C	C	C	C	B ou C
11	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A		A	A	A	A	A
12	C	A ou C	A ou C	A ou C	A	A	A	A	A	A	A		A	A	O	A
13	C	C	C	C	B ou C	A	A	A	A	A	C	C		C	C	A
14	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A		A	A
15	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A		A
16	D	C	D	D	C	B ou C	B ou C	A	A	A	B ou C	B ou C	B ou C	B ou C	C	

Legenda:

- | | |
|---|--|
| 1, ouro, platina, ródio e prata; | 9, zinco; |
| 2, monel, inonel e liga níquel-molibdênio; | 10, magnésio e ligas de magnésio (cromatizadas); |
| 3, cobreníquel, solda de prata, bronze alumínio, bronze estanho e bronze para canhão; | 11, aços inoxidáveis austeníticos, 18Cr — 8Ni; |
| 4, cobre, latões e alpaca; | 12, aço inoxidável 18Cr — 2Ni; |
| 5, níquel; | 13, aço inoxidável 13Cr; |
| 6, chumbo, estanho e soldas fracas; | 14, cromo; |
| 7, aço e ferro fundido; | 15, titânio; |
| 8, cádmio; | 16, alumínio e ligas de alumínio. |

Fonte: Adaptado de Gentil (2017).

É importante ressaltar que, além da diferença de potencial vários outros fatores que desempenham papéis importantes na corrosão galvânica. Dependendo das circunstâncias, alguns ou todos os fatores listados a seguir podem estar envolvidos. Geralmente, para uma determinada dupla de metais, os fatores das categorias (a)–(c) variam menos de uma situação para outra do que os fatores das categorias (d)–(g) (ZHANG, 2011).

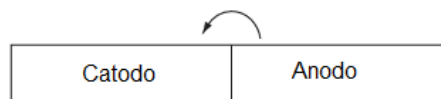
- (a) Potenciais de eletrodo reversíveis;
- (b) Reações: dissolução, redução de oxigênio, evolução de hidrogênio;
- (c) Fatores metalúrgicos: liga, tratamento térmico, trabalho mecânico;
- (d) Condições de superfície: tratamento de superfície, filme passivo, produtos de corrosão;

- (e) Fatores geométricos: área, distância, posição, forma, orientação;
- (f) Efeitos ambientais: formas de umidade, cíclico úmido/seco, radiação solar, clima, variações sazonais;
- (g) Propriedades do eletrólito: espécies iônicas, pH, condutividade, temperatura, volume, taxa de fluxo.

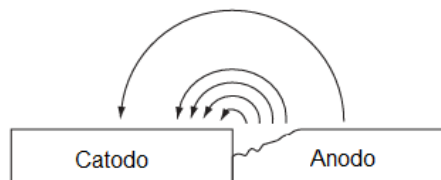
Entre as propriedades que interferem na corrosão galvânica, pode-se destacar a condutividade, onde a figura 1 demonstra como a corrosão está relacionada à condutividade

Figura 1– Relação entre condutividade e corrosão

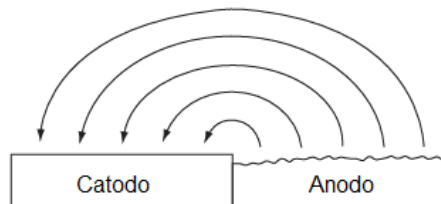
Baixa condutividade = baixa ou nenhuma corrosão



Condutividade moderada = corrosão próxima ao catodo



Alta condutividade = corrosão mais distribuída pelo anodo



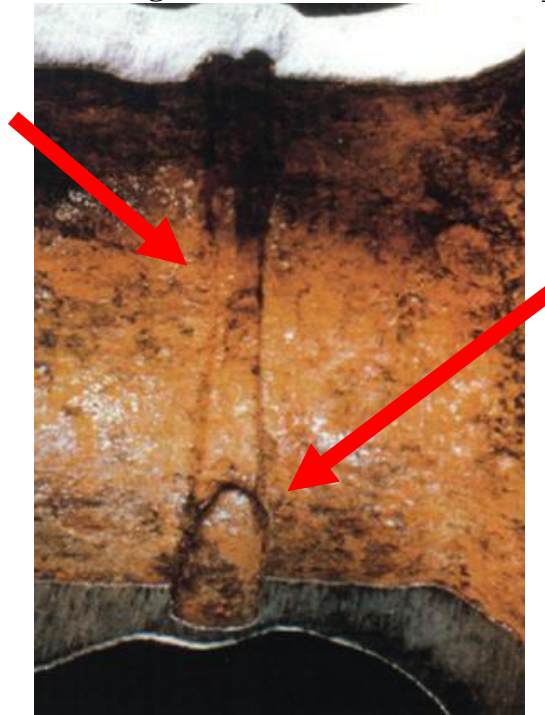
Fonte: Adaptado de Hack (2010).

Destaca-se que, em pares galvânicos grandes ou em que a resistência do eletrólito é alta, as taxas de corrosão galvânica são mais altas no anodo mais próximo do catodo e diminuem conforme a distância entre o anodo e o catodo aumenta. Essa queda na taxa de corrosão com a distância é um bom método para identificar a corrosão galvânica, embora se a condutividade for alta ou as distâncias forem pequenas, esse efeito de queda pode não ser observado (HACK, 2010).

Em comparação com a corrosão normal, a corrosão galvânica é geralmente mais complexa porque, além dos fatores materiais e ambientais, envolve fatores geométricos (ZHANG, 2011). Efeitos de fatores geométricos em ações galvânicas podem, em muitos casos, ser analisados matematicamente. Por outro lado, os efeitos das condições da superfície do eletrodo na cinética da reação em situações reais podem ser muito difíceis de determinar

(HACK, 2010). A figura 2 mostra a corrosão galvânica de uma solda de aço carbono, manifestada em uma tubulação de transporte de água marinha parcialmente desaerada (HACK, 2010).

Figura 2– Corrosão galvânica em uma solda de aço carbono



Fonte: Hack (2010).

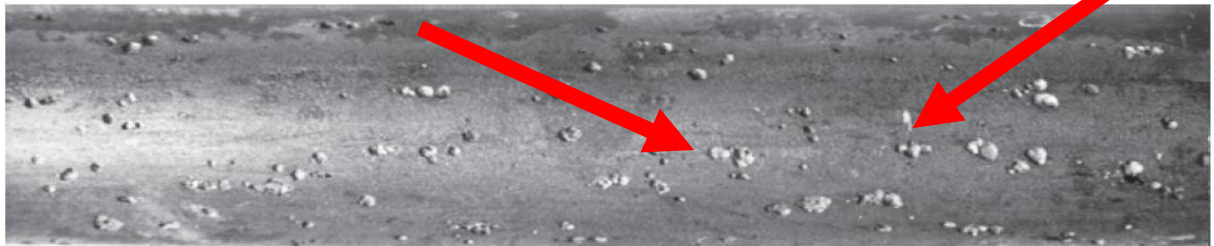
A corrosão galvânica acelera a corrosão normal de um eletrólito metálico. Mesmo sem ela, os metais podem sofrer corrosão uniforme, corrosão em frestas, pites ou outras formas. Assim, a corrosão galvânica tem um efeito acelerador nos demais tipos e, em alguns casos, causa a ocorrência de uma forma de corrosão que, de outra forma, não seria vista (HACK, 2010).

2.2.2 Corrosão por pites (pitting)

Uma das formas mais destrutivas de corrosão é a puntiforme ou por pite (pitting corrosion). Essa devastadora reação ocorre em pequenas áreas, ou pontos, que estão na superfície metálica e produzem pites. Os pites são cavidades que, em geral, apresentam profundidade maior que seu diâmetro, já seu fundo tende a possuir uma forma angulosa (GENTIL, 2017). O piting é considerado de natureza autocatalítica; uma vez que uma cava começa a crescer, as condições desenvolvidas são tais que um maior crescimento da cava é promovido (FRANKEL, 1998).

A corrosão por pite só ocorrerá na presença de espécies aniônicas agressivas, e os íons cloreto são geralmente, embora nem sempre, a causa. A severidade da corrosão tende a variar com o logaritmo da concentração total de cloreto. A razão para a agressividade do cloreto é por ser um ânion de um ácido forte, além disso, muitos cátions metálicos exibem considerável solubilidade em soluções de cloreto. O cloreto é um ânion relativamente pequeno com alta difusividade, interfere na passivação e é um contaminante onipresente. A presença de agentes oxidantes em um ambiente contendo cloreto é extremamente prejudicial e aumentará ainda mais a corrosão localizada (FRANKEL, 1998). A figura 3 ilustra essa problemática.

Figura 3- Corrosão por pite em tubo de aço inoxidável AISI 304



Fonte: Gentil (2017)

É insidiosa e devastadora esse tipo de corrosão porque ocorre em pequenas áreas, sendo muito difícil de ser detectada e por isso, muitas vezes causa grandes efeitos na integridade estrutural do metal afetado. O pitting não é facilmente detectado por causa de sua natureza microscópica (na superfície, o pite pode ser pequeno, mas aparece grande abaixo da superfície rebaixada e é coberto com filme ou depósito). Através dessa perfuração, o equipamento falha por ações de corrosão com muito pouco efeito de perda de peso (AKPANYUNG; LOTO, 2019).

Há dificuldade em medir o pite porque sua profundidade e distribuição variam muito em condições semelhantes. Assim, o “período de incubação”, ou seja, o tempo total necessário para uma estrutura passar pela nucleação da trinca até o momento em que a trinca progride a um grau crítico, que eventualmente termina em falha catastrófica, pode ser de meses ou anos (AKPANYUNG; LOTO, 2019).

A corrosão por pites é considerada, entre outros, como o principal mecanismo de degradação para a maioria dos metais expostos ao ambiente corrosivo. Destaca-se que rachaduras, falhas, quebras e arranhões na superfície metálica aumentam o crescimento do pite (AKPANYUNG; LOTO, 2019).

É mostrado na literatura que o aumento do potencial associado aos agentes oxidantes aumenta a probabilidade de corrosão por pite (FRANKEL, 1998). Assim como a característica metalúrgica e a composição da liga metálica, fatores externos como a composição química

ambiental (concentração do eletrólito) e o pH, além de outros fatores eletroquímicos afetam a taxa e a natureza dos pites (AKPANYUNG; LOTO, 2019).

Alumínio, aço e outros metais que podem formar filmes passivos são mais propensos à corrosão por pite. Nesse caso, a quebra da passividade é a principal causa do pitting, isso porque os filmes superficiais se decompõem, quando submetidos a um ambiente de corrosão. Além disso, alguns metais e ligas têm locais que são preferencialmente suscetíveis à formação de corrosão por pite. Esses locais atuam como o ânodo, enquanto a massa restante da liga é o cátodo (AKPANYUNG; LOTO, 2019).

A ação de pite é de natureza autocatalítica, portanto, penetrando na liga e o efeito da heterogeneidade microestrutural leva a um comportamento eletroquímico heterogêneo que aumenta a suscetibilidade à corrosão do material (AKPANYUNG; LOTO, 2019).

O ambiente mais suscetível à corrosão por pite, é o ambiente marinho, onde existem íons como cloreto, brometo e iodeto. Em altas concentrações, esses íons levam à corrosão do aço, alumínio e outras ligas metálicas passivas. A corrosão do aço também pode ser induzida por íons tiosulfato (REVIE; UHLIG, 2008).

A corrosão pode ser iniciada por poeira ou partículas de sujeira em tubos de cobre que transportam água do mar. O pitting de cobre ocorre na parte mais quente com água macia e na parte mais fria com água dura do sistema de água (REVIE; UHLIG, 2008). Os determinantes da taxa de crescimento do pite uma vez formado são principalmente o tipo de material, o estado de tensão e as condições locais da solução. Mas, o uso de inibidores de base inorgânica aumenta a mitigação de pite de aço inoxidável em meio agressivo (FRANKEL, 1998).

Os pites se desenvolvem mais prontamente em um aço inoxidável que é metalurgicamente não homogêneo. Da mesma forma, a tendência de corrosão de um aço austenítico aumenta quando a liga é aquecida brevemente na faixa de precipitação de carboneto (sensibilização) (REVIE; UHLIG, 2008).

O pitting resultante da corrosão em fresta também é favorecido sempre que um aço inoxidável é coberto por um filme orgânico ou inorgânico ou por organismos incrustantes marinhos, que protegem parcialmente a superfície do acesso ao oxigênio. Já o movimento da água do mar corrente tende a manter toda a superfície em contato com a água aerada e uniformemente passiva, reduzindo qualquer tendência à corrosão localizada (REVIE; UHLIG, 2008).

2.2.3 Corrosão por frestas (crevice corrosion)

A corrosão por frestas, também conhecida como corrosão por contato (crevice corrosion), ocorre no ponto de contato/fresta entre um não metal e um metal ou entre dois metais, em um meio corrosivo (GENTIL, 2017). A figura 4 mostra a corrosão no interior da fresta com escorrimento de ferrugem pela área com bom estado da película de tinta.



Fonte: Gentil (2017)

É uma das formas mais frequentes de corrosão localizada e ao mesmo tempo uma das mais prejudiciais porque ocorre nas ligas que normalmente apresentam perfeita resistência à corrosão como o aço inoxidável e também ocorre em áreas que não são imediatamente visíveis (RASHIDI; ALAVI-SOLTANI; ASMATULU, 2007). A corrosão em frestas é um tipo de corrosão localizada que pode ser encontrada dentro de frestas ou em superfícies blindadas onde uma solução estagnada está presente (WIKI *et al.*, 2012).

Portanto, a corrosão em fresta pode levar a uma falha repentina e devastadora do metal em serviço. As fendas criam um ambiente químico diferente das superfícies expostas livremente e, portanto, aceleram a corrosão. Este ambiente retém a umidade, retém poluentes, concentra produtos de corrosão e, ao mesmo tempo, exclui o oxigênio (RASHIDI; ALAVI-SOLTANI; ASMATULU, 2007).

Os fatores responsáveis pelas taxas de corrosão em frestas seguem os mesmos princípios descritos para o crescimento de pite. Quanto maior a condutividade do eletrólito e maior a área do catodo fora da fenda, maior a taxa de ataque no anodo (REVIE; UHLIG, 2008).

O início da corrosão em fresta, no entanto, não depende de exceder o potencial crítico de pite. Em vez disso, depende apenas de fatores que influenciam a quebra da passividade dentro da fenda. Essa quebra pode ocorrer, por exemplo, pela depleção de oxigênio na fenda causada

pela corrosão lenta e uniforme da liga, seguida pelo estabelecimento de uma célula de aeração diferencial que resulta no acúmulo de produtos de corrosão anódica ácida na fenda (REVIE; UHLIG, 2008).

As mudanças na composição do eletrólito eventualmente destroem a passividade, estabelecendo assim uma diferença de potencial ainda maior entre o metal ativo na fenda e o metal passivo do lado de fora, análogo às células que operam na corrosão por pite. Esse mecanismo de iniciação da corrosão em fresta indica que os cloretos não são essenciais para sua ocorrência, sendo responsável pela observação de que a corrosão em fresta ocorre em soluções de sulfatos, nitratos, acetatos e assim por diante, bem como de cloretos (KELLY *et al.*, 2002).

A maioria dos casos de corrosão em fresta ocorre em soluções quase neutras nas quais o oxigênio dissolvido é o reagente catódico. As fendas nas quais ocorre a corrosão por frestas podem ser formadas por (RASHIDI; ALAVI-SOLTANI; ASMATULU, 2007):

1. A geometria da estrutura, por ex. placas rebitadas, fabricações soldadas, juntas roscadas;
2. Contato do metal com sólidos não metálicos, por ex. plásticos, borracha, vidro;
3. Depósitos de areia, sujeira ou produtos de corrosão permeáveis na superfície do metal (um tipo de corrosão por fresta que é chamada de ataque por depósito).

A proteção catódica efetivamente evita a corrosão em frestas, desde que a liga ao redor da fresta seja polarizada para o potencial de circuito aberto da superfície de liga ativa (não passiva) dentro da fresta. Isso contrasta com o requisito mais brando de polarização abaixo do potencial crítico para evitar a iniciação do pite (REVIE; UHLIG, 2008).

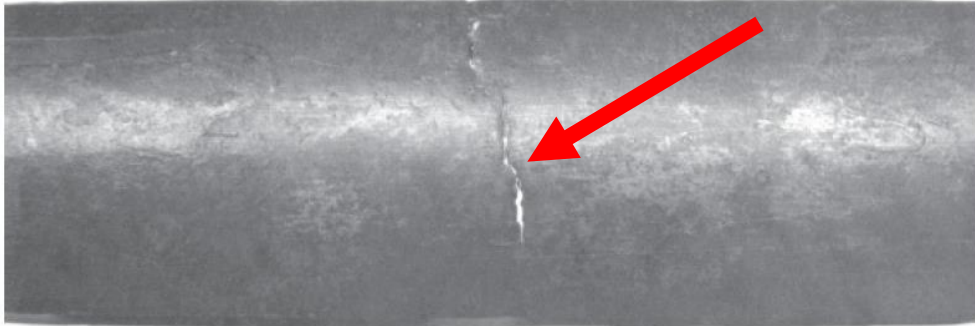
2.2.4 Corrosão por tensão (Stress Corrosion Cracking - SCC)

A Corrosão Sob Tensão (CST) comumente ocorre em tensão constante relativamente baixa, em que uma ação sinérgica do ambiente corrosivo e tensão de tração no material é necessária para causar CST. Assim, é necessária a presença simultânea de tensão de tração, condição metalúrgica suscetível e solução corrosiva crítica, atuando em conjunto para criar a corrosão sob tensão. (KAIN, 2011).

Portanto, na CST tem-se a ação simultânea de tensões residuais ou aplicadas e meios corrosivos, que resultam na fratura dos materiais em um período muito mais curto do que seria necessário para as ações isoladas da tensão e da corrosão agirem. Destaca-se as tensões que atuam nesse tipo de corrosão são solicitações estáticas, e não cíclicas ou alternadas, como no caso da corrosão sob fadiga (GENTIL, 2017).

Esse fenômeno é mais comum para materiais que possuem boa resistência à corrosão generalizada, tais como ligas de alumínio, de níquel, além de aços inoxidáveis austeníticos, entre outros (SCHVARTZMAN; MATIAS; CRUZ, 2010). A figura 5 mostra a corrosão sob tensão atuando em uma tubulação.

Figura 5– CST em tubulação de latão em presença de amônia e umidade



Fonte: Gentil (2017)

Em geral, a CST possui baixas taxas de corrosão, conforme as tensões que causam esse tipo de manifestação, que tendem a estar abaixo do limite de escoamento do material. Esse tipo de corrosão é frequentemente caracterizado pela formação de trincas, que por sua vez, contribuem com a ruptura brusca do material (KAIN, 2011).

2.2.5 Corrosão por erosão (Erosion-Corrosion)

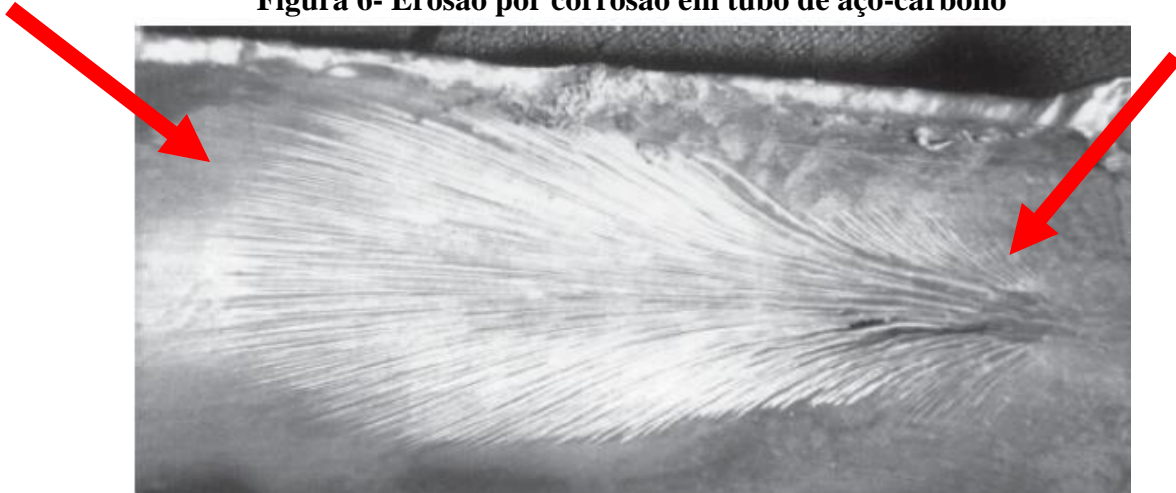
Enquanto a erosão é definida como um fenômeno puramente mecânico, em que há a remoção ou destruição de um metal, o processo de corrosão por erosão pode ser definido como um fenômeno de intensificação da corrosão por meio do choque de partículas contidas em um fluido em uma superfície sólida. O referido fluido e suas respectivas partículas podem ser gotas de líquido em um gás, partículas sólidas em um líquido, partículas sólidas em gás, entre outras situações (GOMES, 2005).

A corrosão por erosão é um fenômeno sinérgico, em que as interações entre efeitos mecânicos e eletroquímicos os tornam mais intensos, produzindo taxas de desgaste maiores do que a soma dos seus efeitos se agissem separadamente (SILVA et al., 2013).

Em geral, esse tipo de dano é causado em metais que realizam o transporte de líquidos quimicamente agressivos, como o caso da indústria petrolífera. Assim, alguns locais que sofrem com a corrosão por erosão são rotores de bombas multifásicas, dutos de transferência e tubos de revestimento (ANNA, 2008). Gentil (2017) afirma que, na prática, todos os tipos de

equipamentos, expostos a fluidos em movimento, estão sujeitos à corrosão por erosão. A figura 6 mostra esse tipo de corrosão.

Figura 6- Erosão por corrosão em tubo de aço-carbono



Fonte: Gentil (2017)

Na corrosão por erosão, como mostra a figura 6, são formados sulcos, crateras, ondulações ou ainda, furos arredondados, que em geral, estão no mesmo sentido direcional de ataque. Devido a esse fenômeno, a superfície que sofreu esse ataque tende a ficar isenta de possíveis produtos de corrosão (GENTIL, 2017).

Devido a sua natureza sinérgica, a corrosão por erosão pode ser considerada um tipo de corrosão acelerada, sendo mais severa em meios bifásicos ou multifásicos. Em que há o surgimento de pequenas regiões anódicas em contato com grandes extensões catódicas, levando a rápida falha do material (GOMES, 2005).

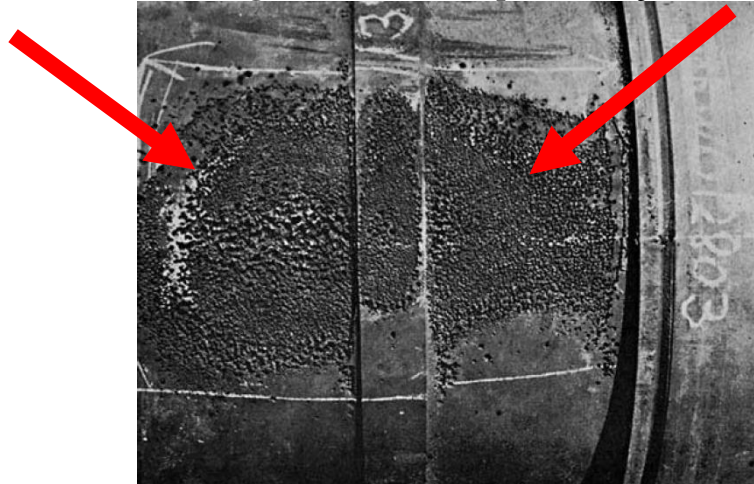
Dentre os fatores que mais influenciam na corrosão por erosão pode-se citar: ângulo de incidência, velocidade de escoamento, temperatura, forma das partículas, dureza. Onde, em geral, o aumento da velocidade resulta em um ataque mais acentuado. Todavia, é importante considerar que em altas velocidade é mais difícil que ocorra a deposição do material em suspensão, o que evita a formação de pilhas de concentração ou de aeração diferencial, diminuindo a ação corrosiva (GENTIL, 2017).

2.2.6 Corrosão por cavitação (Cavitation Corrosion)

A corrosão por cavitação, como seu nome indica, é a perda de material causada pela exposição à cavitação, um fenômeno que é a formação e colapso de bolhas de vapor em uma interface dinâmica entre metal e líquido, que foram induzidas pela flutuação da pressão do

líquido (CAO *et al.*, 2020). Este tipo de corrosão causa uma sequência de depressões, às vezes aparecendo em um formato de “favo de mel”, ou seja, com pequenas fissuras relativamente profundas (REVIE; UHLIG, 2008). A figura 7 ilustra esse tipo de corrosão.

Figura 7– Corrosão por cavitação



Fonte: Revie e Uhlig (2008)

Como mostra a figura 7, os danos pela corrosão por cavitação são um sério problema para componentes metálicos durante suas condições de serviço. Ressalta-se que, em ambientes marinhos, entretanto, a corrosão por cavitação raramente ocorre sozinha, coexistindo constantemente com a erosão, determinando o fenômeno denominado erosão-corrosão por cavitação (CAO *et al.*, 2020).

Assim, as fontes que mais sofrem com a cavitação, no contexto das aplicações técnicas, são objetos em movimento rápido em um fluido, como rotores de bombas centrífugas, turbinas hidráulicas, anéis de pistão e rolamentos, válvulas de controle, vertedouros, motores, hélices, entre outras. Além disso, a cavitação pode ser responsável pela ocorrência de ruídos devido a vibrações e perda de eficiência energética (AMANN; WAIDELE; KAILER, 2018).

Devido ao seu impacto econômico, a prevenção e o controle da erosão-corrosão por cavitação têm sido extensivamente estudados. Verificou-se que o comportamento da erosão por cavitação se correlaciona fortemente com as propriedades mecânicas dos metais. Além disso, a superposição de erosão mecânica e corrosão eletroquímica é assumida como o principal mecanismo de degradação para ligas de engenharia de cavitação em ambiente corrosivo (AMANN; WAIDELE; KAILER, 2018).

2.2.7 Corrosão Intergranular

A corrosão intergranular é um tipo de ataque localizado nos limites dos grãos de um metal ou liga metálica, resultando em perda de resistência e ductilidade. Um grande problema desse tipo de corrosão é que, em geral, só é detectada quando ocorre a ruptura do material (VALOSIO; SILVA; SABOR, 2000).

Esse tipo de corrosão ocorre quando o material de contorno de área limitada, atuando como anodo, está em contato com grandes áreas de grão atuando como catodo. O ataque costuma ser rápido, penetrando profundamente no metal e às vezes causando falhas catastróficas (REVIE; UHLIG, 2008).

Aços inoxidáveis com tratamento térmico inadequado ou ligas do tipo Duralumin (4% Cu - Al) estão entre as ligas mais sujeitas à corrosão intergranular. Pode-se citar ainda os aços inoxidáveis, como materiais altamente suscetíveis à corrosão intergranular, isso devido à precipitação do carboneto de cromo na região de contorno de grão, resultando no empobrecimento do cromo na matriz (VALOSIO; SILVA; SABOR, 2000).

Em temperaturas elevadas, a corrosão intergranular pode ocorrer porque, sob algumas condições, fases de baixo ponto de fusão se formam e penetram ao longo dos limites dos grãos. Por exemplo, quando ligas à base de níquel são expostas a ambientes gasosos contendo enxofre, o sulfeto de níquel pode se formar e causar falhas. Este tipo de ataque é geralmente chamado de sulfidação (REVIE; UHLIG, 2008).

O tratamento térmico inadequado de aços inoxidáveis ferríticos ou austeníticos faz com que os limites dos grãos, que separam os cristais individuais, se tornem especialmente suscetíveis à corrosão. A corrosão deste tipo leva a uma redução catastrófica da resistência mecânica (REVIE; UHLIG, 2008). A figura 8 mostra a corrosão intergranular.

Figura 8– Resultado da corrosão intergranular



Fonte: Valosio, Silva e Sabor (2000).

As temperaturas e tempos específicos que induzem a suscetibilidade à corrosão intergranular são chamados de tratamentos térmicos de sensibilização. Com isso, se diz que o aço está sensitizado. No caso dos aços austeníticos, a temperatura de sensibilização está entre 400-900°C e para os ferríticos em torno de 925°C (GENTIL, 2017).

E assim, as condições para corrosão intergranular são diferentes para os aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos. A este respeito, a transição nas temperaturas de sensibilização para aços contendo 18% Cr ocorre em cerca de 2,5 – 3% Ni. Aços inoxidáveis contendo menos que esta quantidade de níquel são sensibilizados na faixa de temperatura típica dos aços ferríticos, isentos de níquel, enquanto aqueles contendo mais níquel respondem à faixa de temperatura típica dos aços inoxidáveis austeníticos (REVIE; UHLIG, 2008).

A partir do momento que o material perde suas propriedades mecânicas, o mesmo pode se fraturar caso seja solicitado por esforços mecânicos, o que resulta na já citada corrosão sob tensão (GENTIL, 2017).

2.2.8 Corrosão uniforme

A corrosão uniforme é também conhecida como corrosão generalizada. Esse tipo de corrosão ocorre quando toda uma superfície metálica tem sua espessura diminuída após ser atacada por corrosão devido a estar em contato com um meio corrosivo. São criadas micropilhas de ação local, que resultam em uma ação uniforme sobre a superfície metálica em contato com o meio corrosivo. Assim, uma vez que o desgaste é uniforme em toda a superfície, seu

acompanhamento é mais fácil, todavia, pode levar a falhas significativas do equipamento (ZIMER, 2009).

Este tipo de corrosão inclui a comumente reconhecida ferrugem do ferro ou mancha da prata. A “nebulização” do níquel e a oxidação de metais em alta temperatura também são exemplos desse tipo (REVIE; UHLIG, 2008). Ela ocorre em metais e ligas relativamente homogêneos, que estão expostos a condições também homogêneas.

Por isso, a uniformidade da corrosão pode ser reflexo tanto do ambiente como da homogeneidade intrínseca do material, mas também pode ser devido a não seletividade do ambiente à aspectos específicos do material. Um exemplo de material que sofre com esse tipo de corrosão são os aços carbono expostos a atmosfera (BANDEIRA, 2021). A figura 9 mostra um exemplo de corrosão uniforme.

Figura 9- Engrenagens metálicas em processo de corrosão uniforme



Fonte: Pannoni (2011)

Taxas de ataque uniforme são relatadas em várias unidades, com as terminologias aceitas sendo milímetros de penetração por ano (mmy) e miligramas por decímetro quadrado por dia (mdd) (REVIE; UHLIG, 2008). Estas unidades referem-se à penetração do metal ou à perda de peso do metal, excluindo quaisquer produtos de corrosão aderentes ou não aderentes na superfície (PANNONI, 2011).

Para lidar com meios químicos cujo ataque é uniforme, os metais são classificados em três grupos de acordo com suas taxas de corrosão e aplicação pretendida. Essas classificações são as seguintes (REVIE; UHLIG, 2008):

- a) 0,15 mmy: os metais nesta categoria têm boa resistência à corrosão na medida em que são adequados para peças críticas, por exemplo, eixos e impulsores de bombas, molas, etc.;

- b) 0,15 a 1,5 mmy: metais neste grupo são satisfatórios se uma taxa mais alta de corrosão puder ser tolerada, por exemplo, para tanques, tubulações, corpos de válvulas e cabeças de parafusos;
- c) 1,5 mmy: geralmente são insatisfatórios.

O aço, por exemplo, corrói a uma taxa relativamente uniforme na água do mar de cerca de 0,13 mmy ou 25 mdd, que são valores que representam uma média de tempo. Geralmente, para ataque uniforme, a taxa de corrosão inicial é maior do que as taxas subsequentes. A duração da exposição sempre deve ser fornecida quando as taxas de corrosão são relatadas, porque muitas vezes não é confiável extrapolar uma taxa relatada para tempos de exposição muito superiores ao período de teste (REVIE; UHLIG, 2008).

Uma determinada perda de peso por unidade de área para um metal leve (por exemplo, alumínio) representa uma perda real maior de espessura do metal do que a mesma perda de peso para um metal pesado (por exemplo, chumbo) (REVIE; UHLIG, 2008).

2.3 Caracterização do aço-carbono

O aço é um material fornecido em diferentes graus, formas, tamanhos e condições. Tem uma resistência à tração de 400-850 MPa. A maioria dos tipos de aço (especialmente aço de médio carbono) tem boas propriedades mecânicas, como usinabilidade, propriedades de impacto, soldabilidade e alta resistência. Por isso, tem inúmeras aplicações industriais. Além disso, suas propriedades físicas e mecânicas podem ser alteradas por tratamento térmico para diferentes usos (SINGH *et al.*, 2021).

Os aços carbono são usados em uma ampla gama de aplicações, como componentes estruturais na construção civil, tubulações industriais e utensílios de cozinha (IMIANOWSKY; WALENDOWSKY, 2017). Os aços carbono são materiais amplamente utilizados para aplicações marítimas. Eles são produzidos em massa ($\sim 1,8 \times 10^9$ toneladas em todo o mundo em 2018), já que possuem baixos custos e oferecem boas propriedades mecânicas (REFAIT *et al.*, 2020).

Os aços-carbono normalmente contêm menos de 1,5% de teor de carbono, juntamente com a presença mínima de Mn, Si, P e S. A variação da porcentagem de teor de carbono permite atingir diferentes propriedades mecânicas, como resistência, ductilidade, dureza, etc. Com base na porcentagem de carbono, a classificação é dividida em três formas (DWIVEDI; LEPKOVÁ; BECKER, 2017):

- Aços com baixo teor de carbono (<0,25% C)

- Aços de médio carbono (0,25–0,70% C)
- Aços de alto carbono (0,70–1,05% C).

Com base nas propriedades do aço, relacionadas ao teor de carbono, os aços-carbono comuns são ainda divididos em certos graus, como o grau 1008 (0,08% em peso C), que é bom para conformação e tem boa ductilidade; grau 1018 (0,18% em peso C), útil para aplicações gerais e bom para soldagem; grau 1030 (0,30% em peso C), que possui baixa temperabilidade; grau 1045 (0,45% em peso C), que tem aplicações em transmissão de força e eixos; e X-65, que é uma classe sem costura e soldável (DWIVEDI; LEPKOVÁ; BECKER, 2017).

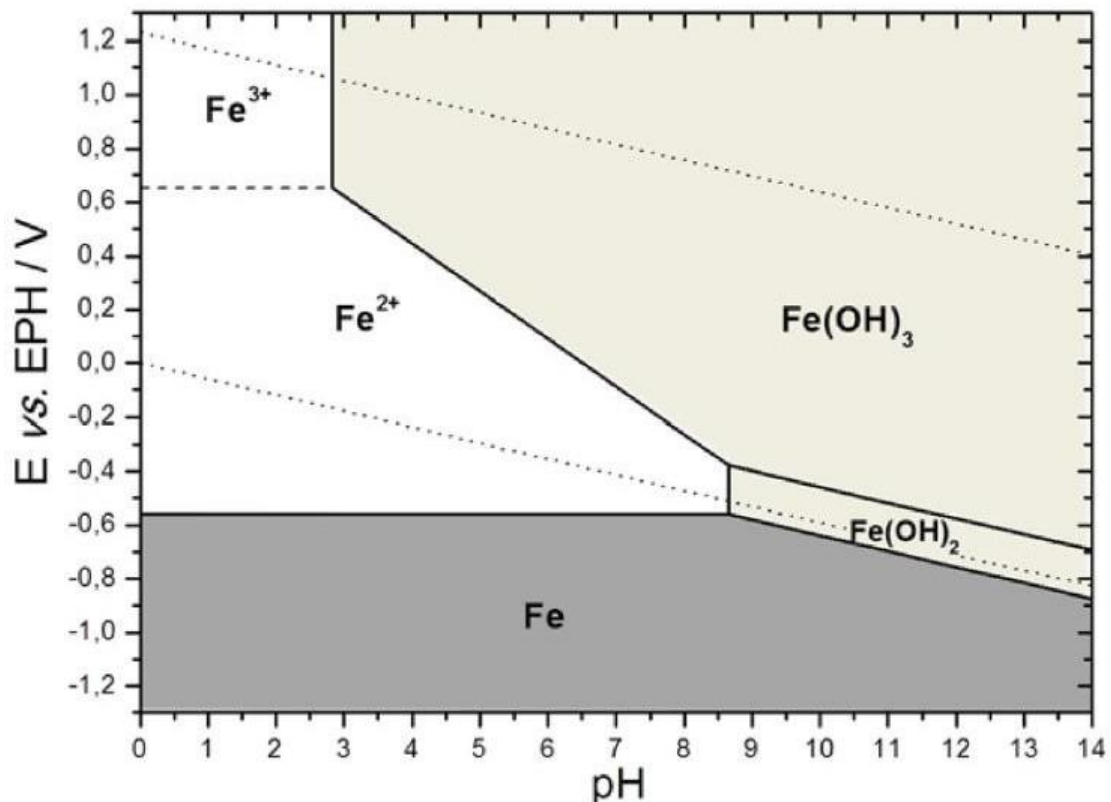
Em geral, os aços carbono possuem em sua composição um teor de cerca de 97% de Ferro e de aproximadamente 0,008% a 2,11% de carbono e mais outros componentes. Uma vez que o ar é o meio no qual os materiais estão frequentemente expostos, a oxidação do Fe(s) é comum, porque esse elemento é termodinamicamente instável na presença do O₂(g). Além disso, a ação combinada de O₂(g) e H₂O (g) torna o meio ainda mais agressivo aos aços carbono, contribuindo com a sua corrosão (SILVA *et al.*, 2015).

Desse modo, fica evidente que a corrosão do aço carbono é diretamente ligada a reações que ocorrem com o Ferro componente desse material. Nesse sentido, destaca-se que uma importante ferramenta para caracterizar a corrosão é o diagrama de Pourbaix (RÊGO, 2016).

Esse diagrama é construído a partir dos princípios termodinâmicos, considerando as equações eletroquímicas que relacionam o potencial de dissolução do material com o pH e a influência da concentração de íons envolvidos. Por meio disso, o diagrama de Pourbaix indica as regiões de potencial e pH em que o material considerado é corroído e também as regiões em que o mesmo é protegido contra corrosão (RÊGO, 2016).

Assim, para contribuir na caracterização da corrosão do aço-carbono é possível utilizar o diagrama de Pourbaix simplificado para o sistema Fe-H₂O a 25 °C, onde são indicadas linhas entre as regiões de estabilidade do material. As reações químicas utilizadas na construção desse diagrama são associadas ao ferro em condições úmidas ou aquosas, excluindo aquelas que geram produtos secos como a magnetita (Fe₃O₄(s)) e hematita (Fe₂O₃(s)) e outros com insuficiente informação na literatura como os oxi-hidróxidos e oxiânions (OLIVEIRA *et al.*, 2018). A figura 10 ilustra o diagrama de Pourbaix simplificado para o sistema Fe-H₂O a 25 °C.

Figura 10 - diagrama de Pourbaix do sistema Fe-H₂O a 25 °C



Fonte: Oliveira et al. (2018).

Para a construção do diagrama da figura 10 foi utilizada a concentração de $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$ de $10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$, 100 vezes maior do que a de $\text{Fe}^{3+}(\text{aq})$, uma vez que é o produto inicial da corrosão em meio ácido. Já a concentração de $\text{Fe}^{3+}(\text{aq})$ foi fixada em $10^{-6} \text{ mol L}^{-1}$, valor comum para ácidos minerais (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

A figura 10 ilustra três regiões de estabilidade, diferenciadas por cor. Sem cor é a região denominada como domínio de corrosão, constituída por cátions. A área cinza escura é chamada de domínio de imunidade, formada pelo metal puro. E por fim, a região cinza clara é denominada de domínio de passividade, sendo formada por um filme considerado, a princípio, protetor do metal. Essas representam as condições teóricas onde pode, não pode e não acontece corrosão, respectivamente (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

As linhas tracejadas sobre o diagrama delimitam a região de estabilidade da água. Uma reação de corrosão pode ocorrer conforme o potencial de redução $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})/\text{Fe}(\text{s})$ logo abaixo de tais linhas. Considerando as equações 2 a 5, demonstradas anteriormente no presente trabalho, nota-se que o ferro pode ser oxidado em toda a faixa de pH. Mas, na ausência de oxigênio, $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$ e $\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{aq})$ são mais estáveis. Já na presença de oxigênio, o meio se torna mais oxidante e tais espécies são oxidadas a $\text{Fe}^{3+}(\text{aq})$ e $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{aq})$ (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

É importante ressaltar que, embora a concentração de $O_2(g)$ no ar possa ser considerada constante, a sua solubilidade em água é muito baixa, sendo este consumido rapidamente sobre a superfície do aço. Assim, o $O_2(g)$ será repostado naturalmente, mas este deverá atravessar uma camada de ferrugem cada vez mais espessa para atingir uma área exposta cada vez menor, diminuindo a velocidade de corrosão no decorrer do tempo (SILVA *et al.*, 2015).

É importante citar ainda a velocidade de corrosão, que pode ser expressa a partir da perda de massa por unidade de área por unidade de tempo, ou ainda pela perda de espessura (GENTIL, 2017). Assim, a velocidade de corrosão também pode ser definida como a taxa de corrosão de um material metálico, demonstrando a rapidez com que a reação de corrosão ocorre. Em geral, a taxa de corrosão é determinada por meio de ensaios normalizados, sendo importante para verificação da vida útil de estruturas metálicas (OSTROSKI, 2019).

Em termos eletroquímicos, a velocidade de corrosão é diretamente proporcional à intensidade da corrente de corrosão que, por sua vez, depende do potencial da célula de corrosão e da resistividade dos circuitos metálico e eletrolítico (TICIANELLI; GONZALEZ, 2005). Em geral, quanto menor for a corrente de troca da reação catódica ou anódica, menor será a magnitude da corrosão. Vale observar que a taxa de corrosão pode ser utilizada para corrosão uniforme e não se emprega em casos de corrosão localizada (OSTROSKI, 2019).

Isto posto, fica evidente que a superfície dos aços-carbono deve ser sempre protegida da atmosfera e, caso isto não seja possível, deve-se procurar um procedimento alternativo que dificulte o progresso da reação anódica ou catódica, porque desta maneira diminuirá a velocidade da reação de corrosão (SILVA *et al.*, 2015). Os métodos mais comuns de proteção consistem em cobrir a superfície com um revestimento metálico, inorgânico, orgânico ou superposição destes com o intuito de isolar o material do meio. Assim, tem-se a proteção catódica, a proteção anódica o uso de inibidores de corrosão ou o uso de barreiras do tipo revestimento (BEER; PASSARELLI, 2010).

A proteção catódica consiste em polarizar catodicamente o metal a ser protegido, baixando o seu potencial de forma que a dissolução do metal seja descontinuada ou ocorra muito lentamente. Existem duas principais formas de proteção catódica: usando anodos de sacrifício (metais com um potencial de corrosão menor que o metal a ser protegido que são acoplados a esse) e por corrente impressa (MELGES, 2022).

Segundo Revie e Uhlig (2008), é apropriado usar um revestimento isolante na aplicação de proteção catódica, seja por anodo de sacrifício ou por corrente impressa, pois ao isolar o metal que está recebendo os elétrons, a eficiência da proteção pode aumentar drasticamente, especialmente em meios condutores.

A proteção anódica consiste em polarizar anodicamente o metal a ser protegido, para que se forme uma camada passiva, e o manter em um potencial em que se sabe que a camada passiva formada é estável. Proteção anódica é uma técnica mais recente que a proteção catódica e é usada com menor frequência, principalmente devido às limitações de sistemas metal e meio agressivo em que a aplicação de um potencial anódico resultaria em uma diminuição da taxa de corrosão (MELGES, 2022).

Inibidores de corrosão são substâncias que diminuem a taxa de corrosão de um determinado sistema quando adicionados em uma pequena concentração ao meio agressivo. Esses compostos atuam por diversos mecanismos, podendo ser classificados segundo à sua composição (orgânicos e inorgânicos) e de acordo com seu mecanismo de atuação (oxidantes, não oxidantes, anódicos, catódicos, mistos e de adsorção) (MELGES, 2022).

Dentre os revestimentos, são incluídos os filmes de pré-tratamento seguidos da aplicação de camadas de tintas, sendo que os primeiros garantem maior aderência entre a tinta e o metal. Os pré-tratamentos para metais mais utilizados tradicionalmente possuem base fosfatos e cromo hexa e tri valentes, chamados de fosfatização e cromatização, respectivamente. Todavia, o cromo hexavalente é tóxico e cancerígeno e os íons fosfato geram lodo e podem ser responsáveis pela eutrofização das águas superficiais (MORAES *et al.*, 2010).

Um substituto promissor é o filme feito de material híbrido, constituído pela combinação adequada de componentes orgânicos e inorgânicos que, normalmente, apresentam propriedades complementares. Esse material é homogêneo devido à mistura dos componentes em nível molecular, usualmente, em escala de nanômetro a sub-micrômetro. Há duas grandes vantagens associadas ao seu uso: o fato de o filme ser classificado como atóxico e de não gerar resíduos sólidos (BEER; PASSARELLI, 2010).

Assim, uma nova geração de revestimentos para pré-tratamento foi recentemente lançada, devido à necessidade de processos amigáveis ambientalmente. Entre eles estão os silanos e os nanocerâmicos (MORAES *et al.*, 2010).

Bossardi (2007) fez um estudo comparativo do desempenho de silanos e nanocerâmicos sobre aço carbono, com o tratamento de fosfatização. Os ensaios foram realizados sem pintura posterior ao pré-tratamento e em diferentes condições de imersão, umidade e pH. Os resultados referentes à resistência à corrosão tanto para o nanocerâmico como para o silano foram ligeiramente superiores quando comparados com o fosfato de zinco.

2.3.1 Aço 1045

O aço SAE 1045 é um material comumente utilizado na fabricação de peças para as indústrias automotiva, agrícola, entre outras, em que a dureza e a tenacidade são exigidas no produto final. Além disso, seu custo relativamente baixo também contribui para sua popularidade na manufatura em geral (CÁRDENAS-ARIAS *et al.*, 2020).

Na composição química do aço SAE 1045, o teor de carbono é significativamente controlado, devendo ser de 0,45%, porém, os demais componentes não exigem tamanha especificação. Por isso, esse tipo de aço tende a possuir custos menores, se comparado a outros tipos de aço que exigem maior controle de seus elementos constituintes. Já Singh e Singh (2017) afirmam que o aço 1045 é um aço de médio carbono, cuja porcentagem de carbono na composição elementar é superior a 0,3%. O quadro 2 demonstra a composição do aço 1045 identificada por autores distintos.

Quadro 2 - Composição química do aço 1045 (% em peso)

Elemento	C	MN	Si	P	S	Al	Cr
Norma SAE	0,42/0,50	0,60/0,90	-	0,030	0,035	-	
Rocha (2001) – SAE	0,467	0,707	0,217	0,018	0,011	0,050	
CALIK; SAHIN; UCAR (2009) – AISI	0,47	0,71	0,29	0,02	0,04	-	0,18
Rêgo (2016) -AISI	0,42/0,50	0,60/0,90	-	0,040	0,050		

Fonte: Elaborado pelo Autor

O aço SAE 1045 também é chamado de aço AISI 1045. É um tipo de aço tenaz e duro, devido ao seu teor de carbono. A dureza do aço de 1045 o torna adequado para lâminas de arado, pás, molas, arestas de corte ou outras aplicações de alto desgaste. Assim, as aplicações do aço SAE 1045 adquirem muitas vibrações e cargas cíclicas atuadas nas peças. A utilização do aço SAE 1045 é considerada por suas propriedades mecânicas que geralmente são duras e tenazes para alto desgaste (SINGH; SINGH, 2017).

Em relação a sua resistência a corrosão, Bigueti, Bertelli e Freitas (2019), aplicaram a técnica de polarização potenciodinâmica na presença de cloreto para investigar tal propriedade. A partir do perfil da curva de polarização, mediante aplicação da extrapolação de Tafel, foi possível determinar que o potencial de corrosão do aço SAE 1045 é da ordem de -0,69V, com uma densidade de corrente de corrosão de $3,38 \times 10^{-6}$ A/cm². Além disso, a referida curva identifica um perfil típico de material que não sofre passivação.

Andreatta *et al.* (2009), ao investigar as propriedades relativas a corrosão do aço SAE 1045 soldado, alcançaram como resultado potencial de corrosão de -0,44 V e uma densidade de corrente de corrosão de $2 \times 10^{-5} \text{ A cm}^{-2}$. Além disso, para interfaces de metal/solda, as densidades limites de corrente anódica foram distintas, onde, o caso aço/cermet foi de -0,36V e para aço/Ni-Cu-Ni/cermet o valor foi de -0,31. Com isso, os autores concluíram que a camada Ni – Cu – Ni provavelmente atrasou o aumento da densidade de corrente na interface com o aço.

Marques et al. (2019), demonstraram que o aço 1045 possui uma taxa de corrosão ou velocidade de corrosão, para H₂O destilada, de 0,0436 mm/ano, já para o HCl, tal taxa é de 0,4634 mm/ano. Assim, os autores concluíram que a taxa de corrosão foi menor na H₂O destilada devido seu pH ser menos ácido (7,0), quando comparado com o HCl (1,03). Observou-se que a corrosão com a H₂O destilada, foram baixas e uniformes, a mesma uniformidade sendo observada para o HCl, mas com maior taxa de corrosão, devido à maior acidez do meio.

Rêgo (2016), por sua vez, também analisou a velocidade de corrosão do aço 1045. Os resultados do autor demonstraram que a taxa de corrosão desse metal é de 0,0417 mm/ano. Além disso, o autor evidenciou que a corrente de corrosão desse material é de 3,589 $\mu\text{A/cm}^2$, com um potencial de corrosão de -0,589 V.

2.4 Ensaaios de corrosão

Os ensaios de corrosão são empregados para a caracterização da agressividade de um dado meio corrosivo. Assim, são importantes para possibilitar o controle da corrosão. Segundo o objetivo pretendido, um ensaio pode ser realizado no laboratório ou em campo (OSTROSKI, 2019).

No caso de ensaios em laboratório, as condições são controladas e simuladas, o que permite que a composição do meio corrosivo seja fixada conforme desejado. Além disso, também é possível acelerar o processo para obter resultados mais velozes, em que a duração das análises é menor para evitar a variação da corrosividade do meio (OSTROSKI, 2019).

Já ensaios em campo são realizados nas condições reais, o que permite uma avaliação da situação real e mais exata do meio corrosivo sobre o material. Todavia, esse tipo de análise demanda mais tempo para ser realizada (OSTROSKI, 2019).

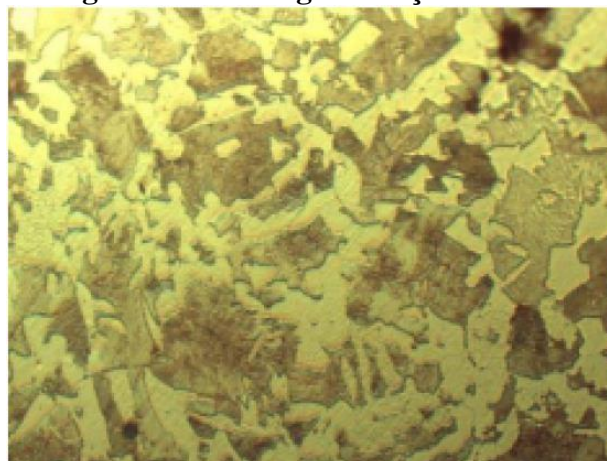
Os ensaios de corrosão são utilizados para controle de qualidade de produto, caracterização do meio de exposição e verificação de desempenho. Alguns dos mais comuns nas indústrias e na literatura são (FREITAS, 2012):

- Ensaios eletroquímicos: potencial de corrosão, ruído eletroquímico, impedância eletroquímica, sonda Kelvin;
- Ensaios complementares: Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) AFM, Microscopia de elétrons Auger;
- Ensaios de corrosão: ensaios de imersão, avaliação da suscetibilidade a corrosão intergranular, por pite, à corrosão em frestas, ensaios acelerados (névoa salina, dióxido de enxofre, umidade);
- Ensaios de corrosão específicos: ensaios de imersão em meios que simulam as condições reais de uso;
- Ensaios de corrosão em campo: ensaios não acelerados de corrosão.

Dentre os ensaios mais importantes está a metalografia, que consiste em estudos estruturais e morfológicos do material. Assim, esse ensaio fornece informações sobre a composição do metal ou da liga metálica analisada, além das etapas de processamento e fabricação do material, assim como pode prever as propriedades químicas e mecânicas de sua aplicação (FERNANDES *et al.*, 2022).

As metalografias também são feitas para estudar se há alguma alteração na microestrutura do material. Suas variações são metalografia macrográfica e a metalografia micrográfica (FERNANDES *et al.*, 2022). A figura 11 ilustra uma micrografia do aço SAE 1045.

Figura 11 - Micrografia Aço SAE 1045



Fonte: Fernandes (2022).

A micrografia exige a ampliação microscópica, de modo a observar as fases presentes e identificar a granulação do material teor aproximado de carbono no aço, a natureza e a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões, no material (LEITE *et al.*, 2017).

Na macrografia utiliza-se uma ampliação de cerca de 10 vezes na superfície em análise, podendo também ser realizada a olho nu. Por seu intermédio tem-se uma ideia do conjunto, referente à homogeneidade do material, a distribuição e natureza das falhas, impureza e ao processo de fabricação, entre outras características (LEITE *et al.*, 2017).

A macrografia consiste no exame do aspecto de uma peça ou amostra metálica, a partir de uma seção plana adequadamente polida e atacada por um reagente específico. Tal preparação é necessária para criar uma macroestrutura adequada para análise a olho nu ou com o auxílio de uma lupa (COLPAERT, 2008).

A técnica de preparo dos corpos de prova para a realização da macrografia abrange as seguintes etapas: escolha e localização da seção a ser estudada, preparação de uma superfície plana e polida e ataque dessa superfície por um reagente químico adequado (COLPAERT, 2008).

Quando a seção a examinar não é definida por quem solícita o ensaio (ou pela norma aplicável à avaliação em questão, é necessário levar em conta a forma da peça, as informações que se deseja obter, e entre outras considerações. Para produtos semi-acabados e de geometria regular as seções longitudinais e transversais são as mais comuns (COLPAERT, 2008).

A obtenção de uma superfície adequada para o exame macrográfico compreende duas etapas: Corte ou desbaste e o polimento. Em que o corte é feito com serra ou com cortador de disco abrasivo. Quando esse meio não é viável, recorre-se ao desbaste por usinagem (por exemplo, com auxílio da plaina) ou com esmeril comum, até atingir à região de interesse para o exame. Por meio de uma lixadeira é realizado o polimento para a obtenção de uma superfície uniforme (COLPAERT, 2008).

A submissão a um agente reativo, em geral, ataca mais fortemente certas regiões de uma superfície do que outras, o que pode ser devido a diversidade de composição química ou de estrutura cristalina. O contato do corpo-de-prova com o reativo pode ser realizado de três modos (COLPAERT, 2008):

- 1) Ataque por imersão: a superfície polida é mergulhada em uma cuba contendo certo volume de reagente.
- 2) Ataque por aplicação: uma camada de reagente é aplicada sobre a seção em estudo, com auxílio de um pincel ou chumaço de algodão.
- 3) Impressão direta de Baumann: uma folha de papel fotográfico, umedecido com um reagente específico, é aplicada sobre a superfície polida, e obtendo-se sobre ele um decalque da superfície.

Além disso, é possível classificar um ataque de reagente em lento ou profundo e rápido e superficial, conforme sua duração e profundidade. Em geral, os mais velozes são mais utilizados (COLPAERT, 2008).

2.4.1 Microscópios estereoscópicos

Microscópios estereoscópicos, também conhecidos como microscópios de dissecação ou binoculares, são instrumentos ópticos que permitem a observação tridimensional de objetos e amostras. Assim, tal tecnologia é promissora para obtenção de informações mais acuradas sobre as amostras em análise (SPLABOR, 2022).

Eles diferem dos microscópios tradicionais por oferecerem uma visão estereoscópica, que permite uma visualização em profundidade, semelhante à visão humana. Essa característica torna os microscópios estereoscópicos ideais para tarefas que exigem a inspeção detalhada de amostras tridimensionais, como na pesquisa biológica, metalurgia, eletrônica e em muitas outras áreas (RAMOS, 2019).

Esse microscópio utiliza duas fontes de luz e dois sistemas ópticos para construir uma imagem ampliada da amostra em três dimensões. Para isso, são necessárias duas lentes separadas, que permitem a sobreposição de imagens capturadas por cada uma delas. Tais lentes são colocadas em ângulos específicos nesse microscópio, de maneira a permitir que a profundidade e detalhes adicionais sejam observáveis (SPLABOR, 2022).

Assim, os microscópios estereoscópicos são baseados no efeito de paralaxe e, como tal, requerem duas lentes para focar em dois pontos diferentes. As restrições geométricas, no entanto, restringem as suas aberturas numéricas, limitando assim a resolução do sistema (LONG et al., 2022).

Eles podem ser classificados em tipos Greenough e tipos de objetivo principal comum (CMO). A primeira utiliza duas objetivas para formar caminhos de luz para as imagens esquerda e direita, mas suas dimensões físicas devem ser restritas, para evitar o contato entre as lentes. Conseqüentemente, as aberturas numéricas são limitadas a aproximadamente 0,2 (LONG et al., 2022).

O tipo CMO, por sua vez, usa uma objetiva de abertura única e maior ($\sim 0,35$) para lidar com os dois caminhos de luz. No entanto, os microscópios CMO são mais caros que os microscópios Greenough devido ao complexo design e fabricação das suas lentes objetivas (LONG et al., 2022). A figura 12 mostra um microscópio estereoscópico.

Figura 12 – Microscópio Estereoscópico



Fonte: SPLABOR (2022).

Com base em sua tecnologia, os microscópios estereoscópicos podem se diferenciar em certos tipos, conforme características próprias e usos específicos. Alguns dos tipos mais comuns desse tipo de microscópio são (SPLABOR, 2022):

- Estereoscópio trinocular = Esse microscópio possui uma terceira lente, além das duas utilizadas para a geração da imagem 3D, empregada para acoplamento de uma câmera fotográfica ou de vídeo;
- Estereoscópio com Zoom = Têm a opção de variar os níveis de ampliação da imagem 3D, a partir de zoom ajustável nas lentes;
- Estereoscópio digital = Possui uma conexão digital para computador, permitindo que as imagens observadas sejam capturadas, formando imagens digitais.
- Macro Estereoscópio = Utilizado para observação de objetos maiores, que não podem ser observados com os outros microscópios citados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

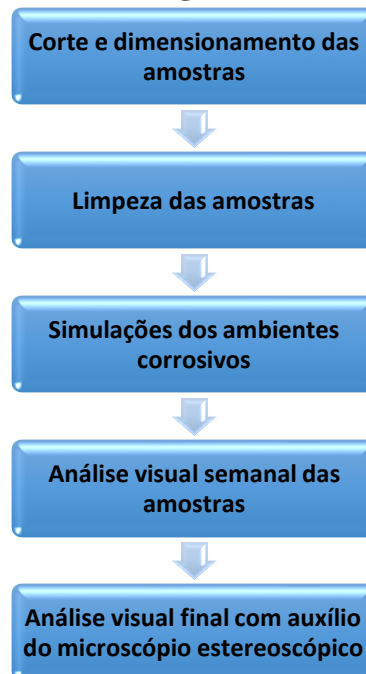
Esta pesquisa foi elaborada mediante análise bibliográfica em livros acadêmicos renomados na engenharia, dissertações, monografias e artigos científicos, todos relacionados a corrosão do aço carbono, especialmente em relação ao aço 1045. Tal etapa foi necessária para fundamentar teoricamente as seguintes, que foram atividades experimentais.

Com base na fundamentação teórica, a etapa das atividades experimentais se iniciou a partir da obtenção de amostras de aço 1045, que após seu tratamento adequado, foi submetido a simulações de ambientes corrosivos, para que sua corrosão em tais situações fosse investigada.

Foi realizada uma análise visual semanal, por 8 semanas, das amostras submetidas aos ambientes corrosivos. Após essa análise visual, foi realizada ainda, com as amostras que sofreram a corrosão por 8 semanas, uma análise visual com o auxílio de um microscópio estereoscópico.

A seguir, na figura 13 pode-se identificar as etapas da metodologia usada para realizar o estudo descrito acima.

Figura 13 – Fluxograma de atividades



Fonte: Elaborado pelos autores

3.1 Material

Neste experimento foram analisadas amostras do aço 1045 (Figura 14), de médio teor de carbono, esse tipo de material é muito utilizado em indústrias, componentes estruturais etc. Possui uma ampla gama de aplicações devido à sua combinação de resistência, tenacidade e facilidade de usinagem. Quatro amostras foram separadas e a preparação delas para a análise macrográfica foi feita na seguinte ordem:

1. Preparação das amostras (corte e dimensionamento);
2. Simulações dos ambientes corrosivos, e
3. Análise visual das amostras semanalmente.

Figura 14– Amostras de aço 1045



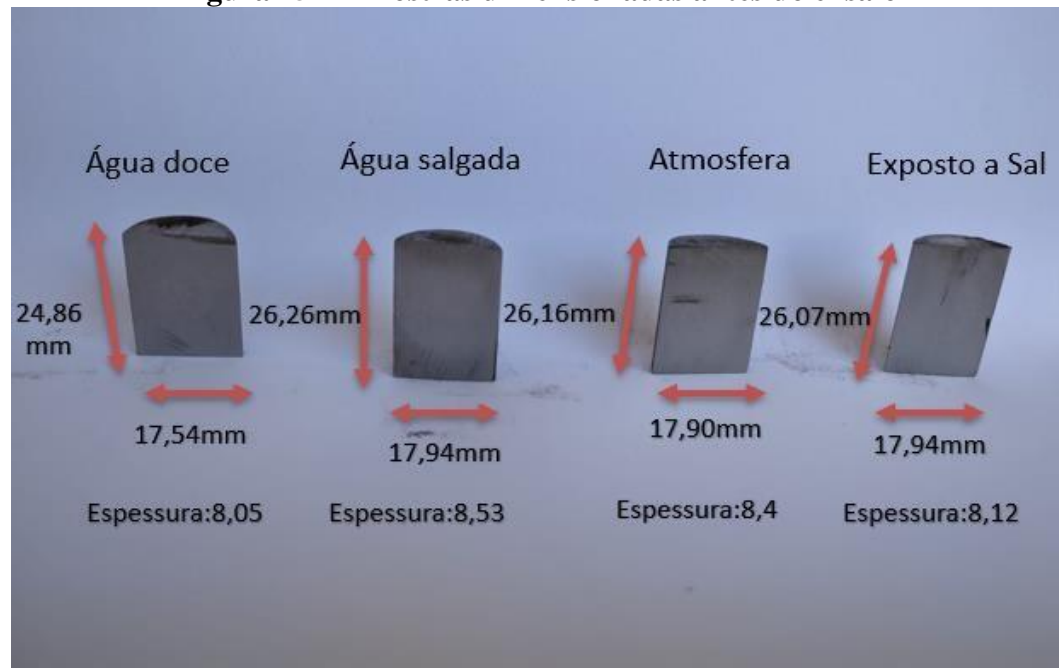
Fonte: Elaborado pelos autores

3.2 Corte

Os corpos de provas originalmente era uma barra redonda de 18 mm de diâmetro, para realizar o corte nessa barra utilizamos a máquina serra de corte, este tipo de procedimento foi realizado a fim de facilitar a observação dos resultados obtidos pós simulações dos ambientes corrosivo, bem como no ensaio macrográfico.

Sendo que o alicerce do nosso experimento é analisar a corrosão no material, as amostras foram selecionadas conforme melhores aspectos visuais e superficiais, e sendo dimensionados com auxílio de um paquímetro digital, conforme figura 15.

Figura 15 – Amostras dimensionadas antes do ensaio



Fonte: Elaborado pelos autores

3.3 Limpeza

As amostras foram submetidas a uma etapa inicial de limpeza, utilizando água e álcool etílico, este utilizado para secagem ocorrer mais rápida. Sendo essa etapa essencial para evitar abrasivos e poeiras, dessa forma permitindo uma melhor análise da superfície do metal.

3.4 Simulações dos ambientes corrosivos

As amostras utilizadas estavam sem nenhum tipo de camada protetora, sendo expostas a quatro tipos de ambientes corrosivos: Água salgada sendo que nessa análise foi utilizada água da praia residencial localizada em Angra dos Reis, água doce simulando rios, ao lado de um recipiente contendo sal e na atmosfera. Vale ressaltar que esses ambientes foram simulados todos de forma caseira. As amostras foram simuladas conforme (Figura 16).

Figura 16 – Ambientes simulados das amostras



Fonte: Elaborado pelos autores

Conforme ilustrado na figura 16 da esquerda para direita, estão os ambientes simulados ao lado de um recipiente contendo sal, atmosfera, água doce e água salgada.

3.5 Análise visual

Após de dois meses as amostras sendo expostas a esses quatro tipos de ambientes, foram feitas análises visuais semanais, ao todo foram feitas oito análises para acompanhar o processo de corrosão de cada amostras.

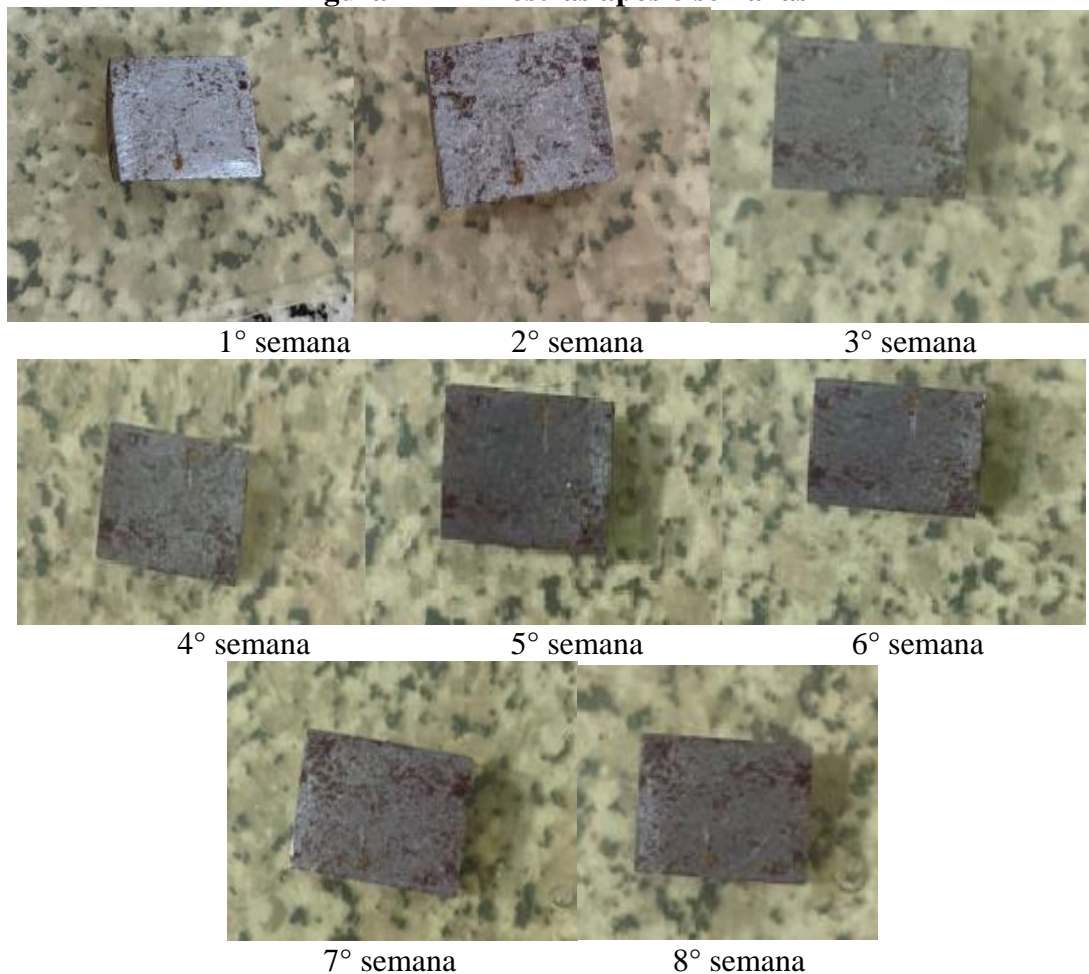
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi realizada uma análise visual das amostras. A seguir são demonstrados os resultados.

4.1 Análise visual da amostra ao lado de um recipiente com sal

A amostra após oito de semana de análises visuais, sendo indicado na figura 17.

Figura 17 – Amostras após 8 semanas



Fonte: Elaborado pelo autor

A exposição com proximidade ao sal pode acelerar o processo de corrosão, uma vez que o sal é higroscópico (atrai a umidade) e aumenta a condutividade elétrica, tornando o ambiente mais corrosivo.

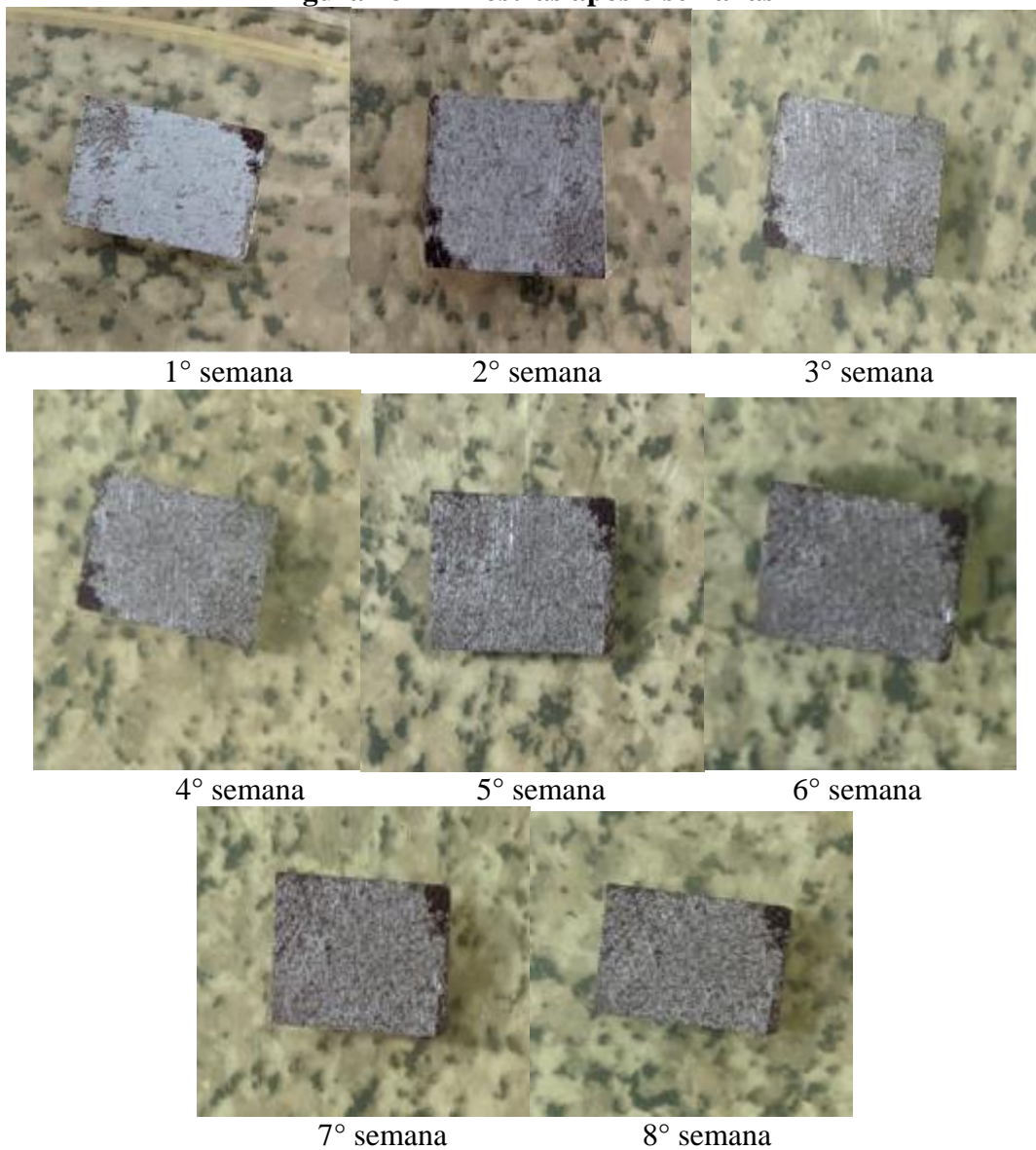
Inicialmente, podemos notar a formação de pequenas manchas de corrosão na superfície do aço, essas manchas podem ser visíveis como áreas descoloridas ou pontos de início de corrosão. Ao longo do tempo as manchas de corrosão tenderam a crescer se espalhando pela

superfície da amostra e com isso podemos notar o aparecimento de ferrugem que tem uma cor marrom-avermelhada.

4.2 Análise visual da amostra exposta a atmosfera

A amostra após oito semanas expostas ao ambiente corrosivo, sendo indicado na figura 18.

Figura 18 – Amostras após 8 semanas



Fonte: Elaborado pelo autor

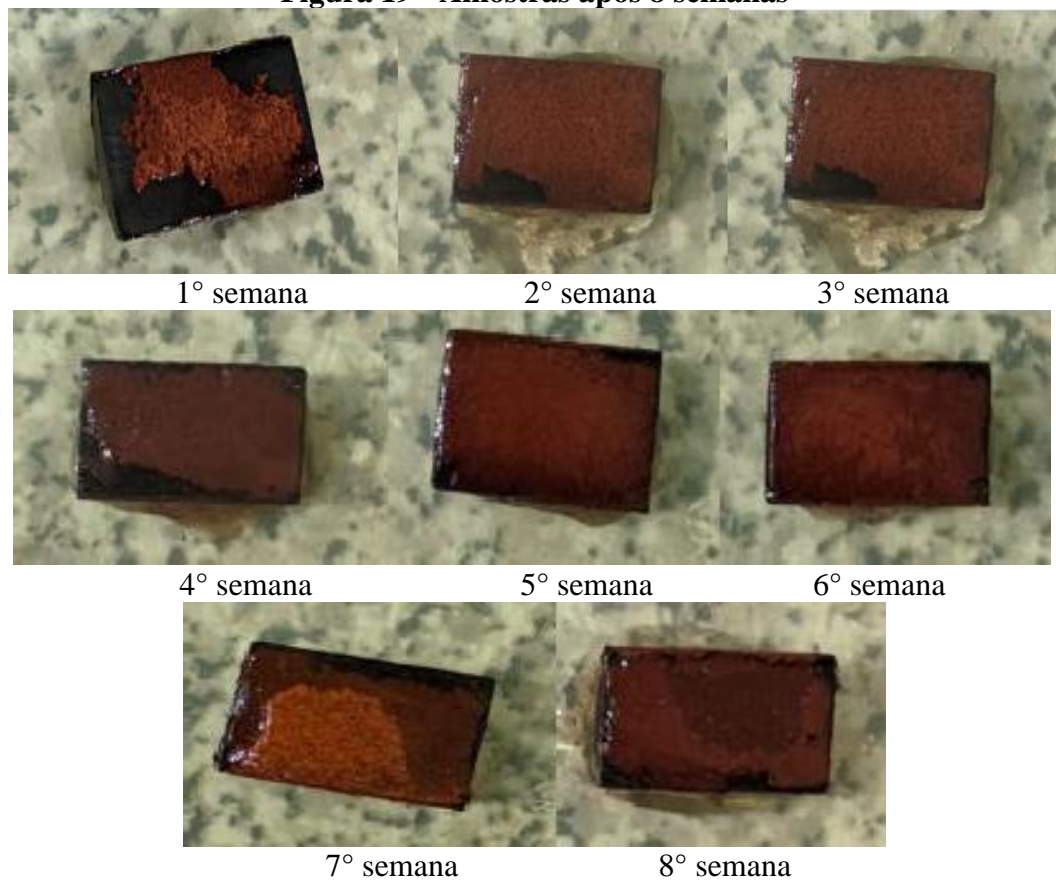
Podemos notar que ao longo da análise que processo de corrosão na superfície da amostra foi mais lenta, sendo possível visualização de manchas, pontos de ferrugem, sendo que com

passar do tempo essas manchas de corrosão foram ficando mais visíveis e aumentando o número de manchas na amostra.

4.3 Análise visual da amostra exposta a água doce

A amostra após oito semanas expostas ao ambiente corrosivo, sendo indicado na figura 19.

Figura 19 - Amostras após 8 semanas



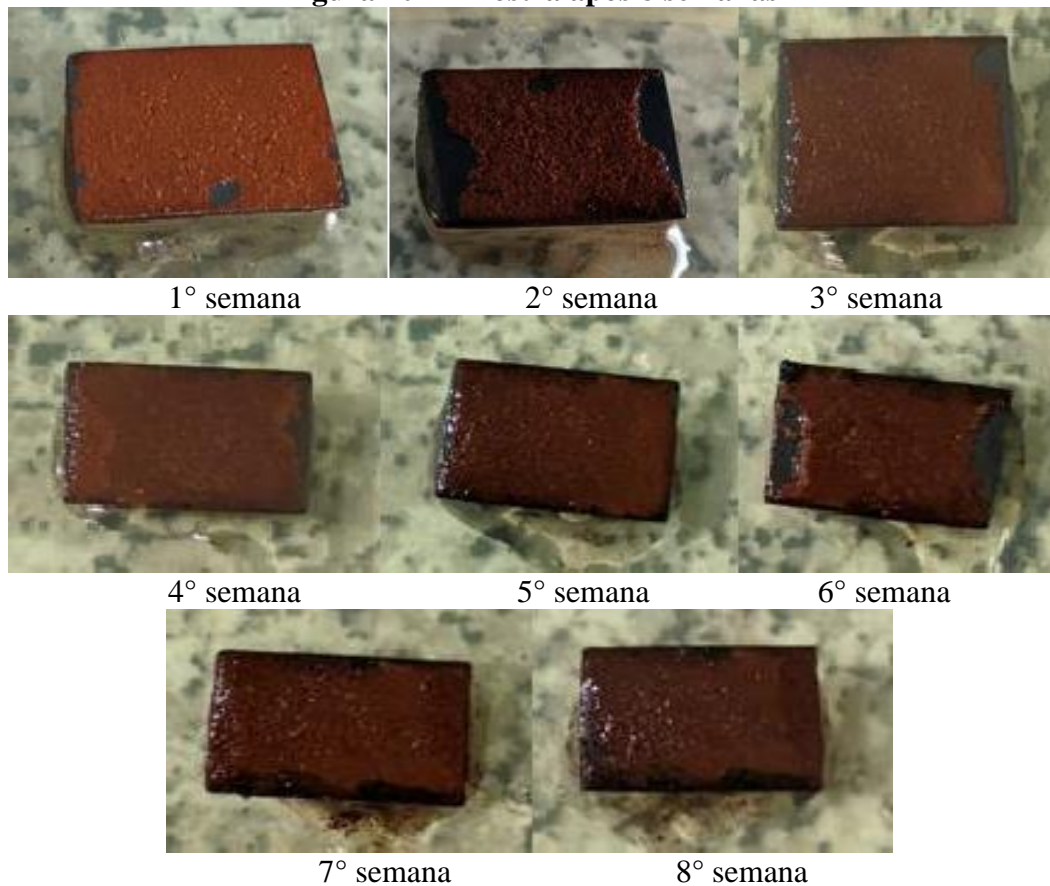
Fonte: Elaborado pelo autor

Podemos observar durante as análises visuais na amostra exposta a água doce já na primeira semana já teve um processo considerável de corrosão sendo quase na sua superfície por inteira, e no decorrer do experimento essa camada de oxidação foi aumentado, dessa forma podendo notar sua superfície mais áspera e irregular.

4.4 Análise visual da amostra exposta a água salgada

A amostra após oito semanas expostas ao ambiente corrosivo, sendo indicado na figura 20.

Figura 20 - Amostra após 8 semanas



Fonte: Elaborado pelo autor

A água salgada é altamente corrosiva devido ao teor de cloreto, com isso podemos notar um processo de corrosão maior em comparação dos outros três ambientes corrosivo simulado nesse presente experimento. Ao longo dessa análise podemos notar uma coloração mais escura de oxidação na superfície da amostra, e sua textura mais áspera que as demais amostras.

4.5 Análise com o microscópio estereoscópico

No decorrer do experimento, empregamos a técnica de Análise Macrográfica com o auxílio de um microscópio estereoscópico. A análise macrográfica, nesse contexto, refere-se ao estudo e avaliação de características visíveis a olho nu ou com o suporte de instrumentação

óptica de baixa ampliação. Essa técnica permite a inspeção de propriedades gerais, tais como tamanho, forma, cor, textura e características superficiais de objetos e materiais.

Os microscópios estereoscópicos, por sua vez, são dispositivos ópticos que fornecem uma visualização tridimensional de amostras, possibilitando uma observação detalhada com baixa ampliação. Eles desempenham um papel fundamental na análise macrográfica, oferecendo uma visão estereoscópica que facilita a identificação e a caracterização preliminar de amostras sob investigação. Na coleta de dados, foram empregados microscópios estereoscópicos da renomada marca Olympus, especificamente do modelo SZ61.

4.5.1 Microscópio estereoscópico Olympus SZ61

A Olympus é uma fabricante líder de equipamentos ópticos e médicos. O microscópio estereoscópico modelo SZ61 é reconhecido por sua qualidade e confiabilidade. Ele é amplamente utilizado em laboratórios, instituições de pesquisa e indústrias para observações detalhadas em três dimensões. O SZ61 é apreciado por suas lentes de alta qualidade, design ergonômico e recursos avançados que o tornam uma escolha comum em aplicações que exigem precisão e acuidade visual. Algumas de suas características são:

- **Ampliação Variável:** O microscópio Olympus SZ61 é altamente versátil, permitindo uma ampla gama de ampliações. Os operadores podem escolher entre diferentes objetivas e oculares para atingir a ampliação desejada, adaptando-se às necessidades específicas de sua aplicação.
- **Lentes de Alta Qualidade:** As lentes objetivas do SZ61 são conhecidas por sua qualidade óptica, fornecendo imagens nítidas e detalhadas. Isso é essencial para a observação de estruturas minúsculas e detalhes em amostras.
- **Iluminação Ajustável:** O modelo SZ61 oferece sistemas de iluminação ajustável, permitindo que os usuários controlem a intensidade e o ângulo da iluminação. Isso é crucial para realçar características específicas da amostra e minimizar reflexos.
- **Portabilidade:** O SZ61 é projetado para ser relativamente compacto e portátil, tornando-o adequado para uso em diferentes locais de pesquisa ou campo.
- **Aplicações Diversas:** Este microscópio é usado em diversas aplicações, como biologia, ciência dos materiais, geologia, eletrônica, entomologia, e outras áreas onde a visualização tridimensional é essencial.

Devido à sua qualidade óptica, versatilidade e facilidade de uso. Ele desempenha um papel fundamental em muitas áreas de pesquisa, fornecendo uma visão detalhada e tridimensional de uma ampla gama de amostras e objetos.

4.5.2 Amostra exposta a água doce

A partir da análise da amostra exposta à água doce, foram obtidos os seguintes resultados, ilustrados pelas figuras 21 e 22:

- **Superfície Irregular:** A superfície da amostra corroída apresenta irregularidades e texturas não homogêneas devido à perda gradual de material.
- **Coloração Desigual:** A superfície corroída adquire uma coloração característica, frequentemente incluindo tons de ferrugem, como resultado da oxidação do metal.
- **Perda de Brilho:** A superfície da amostra perde seu brilho original e apresenta um aspecto fosco devido à formação de produtos de corrosão.

Figura 21– (Borda) Amostras exposta a água doce



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 22 - (Topo) Amostras exposta a água doce



Fonte: Elaborado pelo autor

Essas características são típicas da corrosão uniforme em amostras de aço carbono 1045 expostas à água doce e podem ser observadas e quantificadas para avaliar a extensão e o impacto desse processo corrosivo.

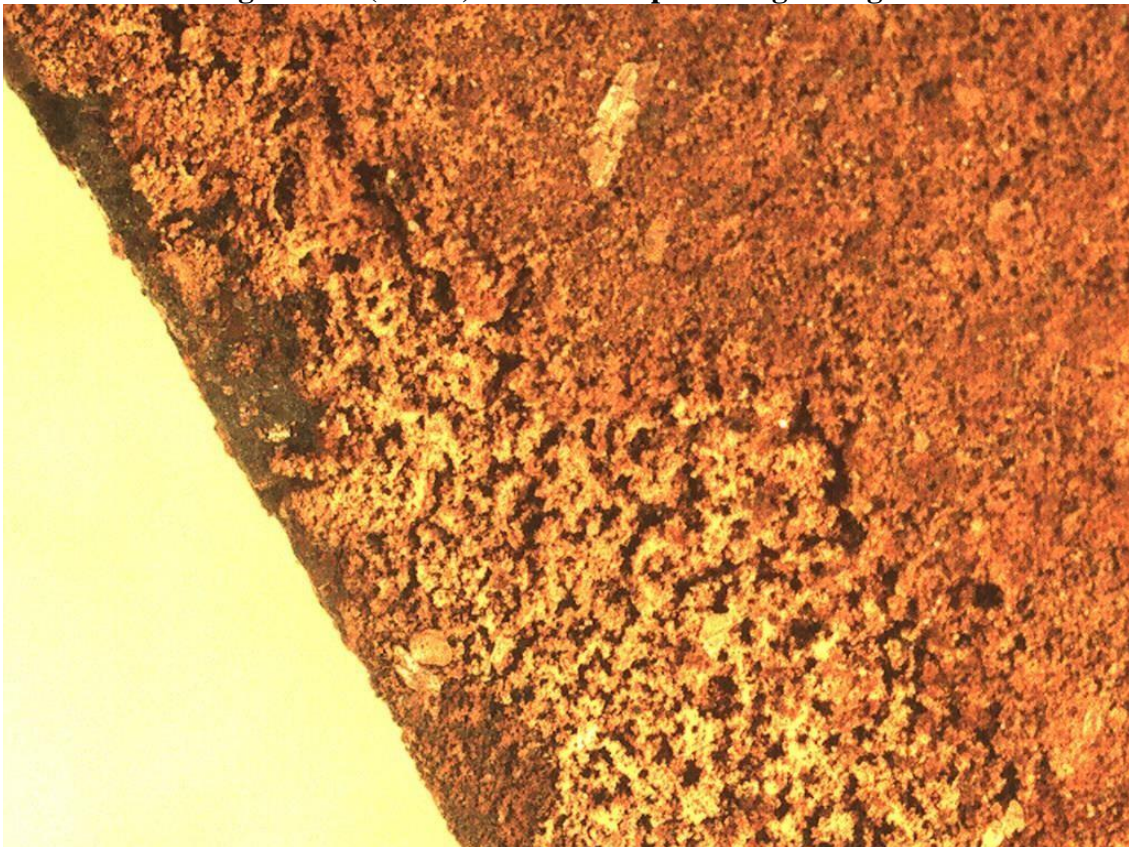
4.5.3 Amostra exposta a água salgada

Após a análise da amostra exposta à água salgada, foram obtidos os seguintes resultados, indicados nas figuras 23 e 24:

- **Superfície Irregular:** A superfície da amostra corroída revela irregularidades e texturas não homogêneas devido à perda gradual de material causada pela corrosão uniforme e à presença de pequenas crateras (pites) com contornos aguçados.

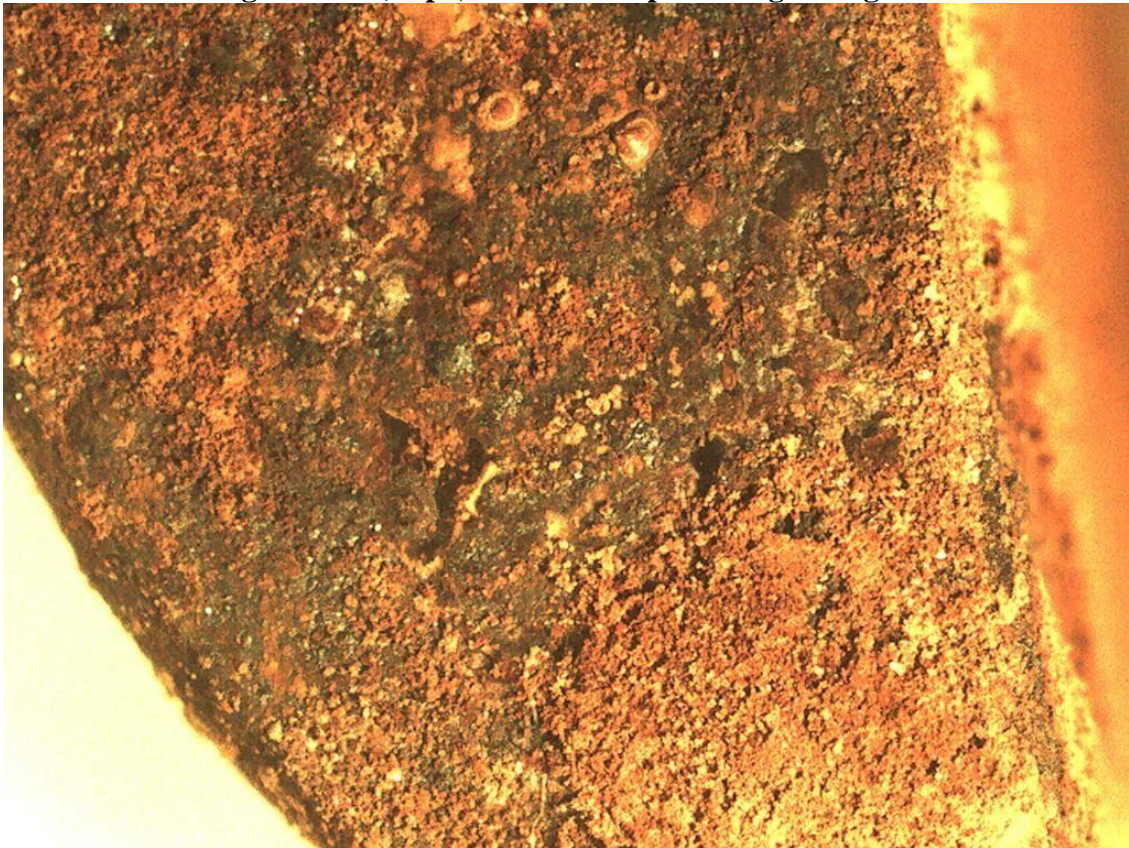
- **Coloração Variada:** A superfície corroída pode apresentar uma coloração variada, incluindo áreas com tons de ferrugem e áreas mais brilhantes onde ocorre a formação das pites.
- **Rugosidade Acentuada:** A superfície corroída e com pites torna-se altamente rugosa devido à presença das pites, que são pequenas cavidades com contornos afiados.

Figura 23– (Borda) Amostras exposta a água salgada



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 24 – (Topo) Amostras exposta a água salgada



Fonte: Elaborado pelo autor

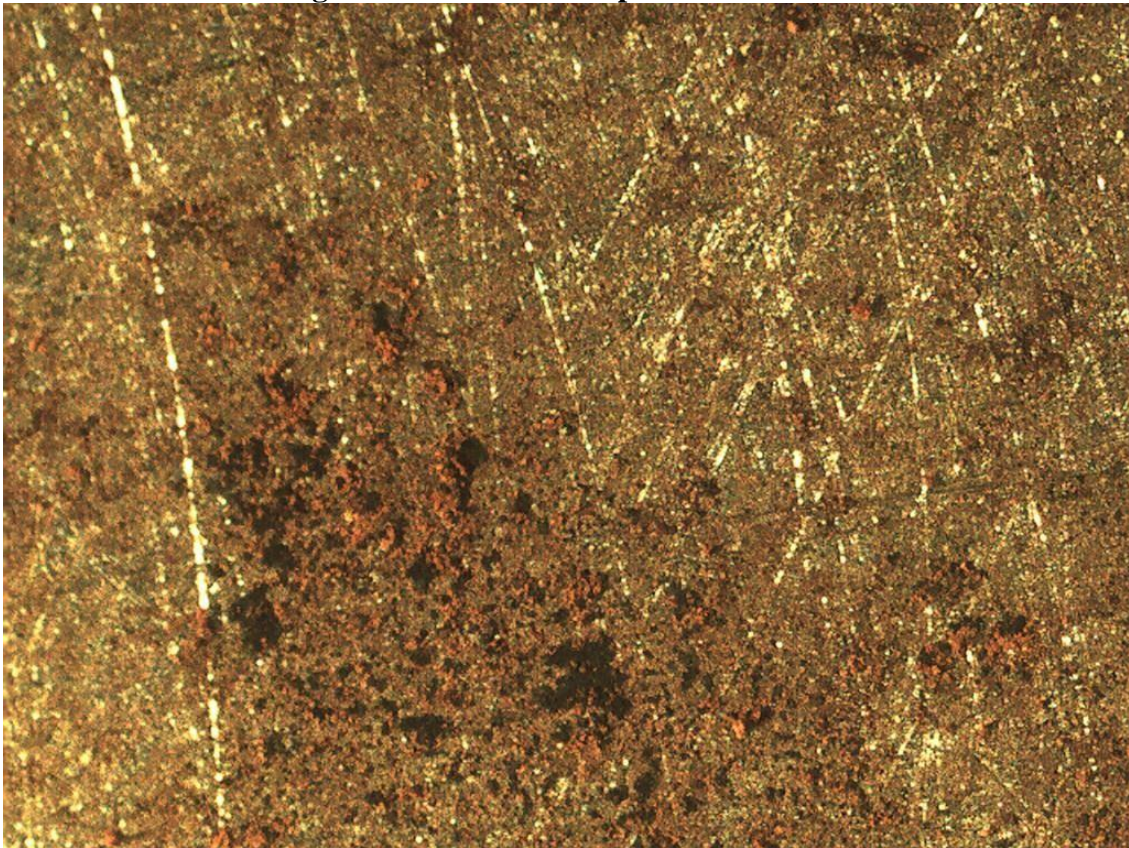
Essas características são observáveis e quantificáveis, permitindo uma avaliação precisa da extensão e do impacto da corrosão uniforme em amostras de aço carbono 1045 expostas à água salgada.

4.5.4 Amostra exposta a atmosfera

Com base na análise da amostra exposta à atmosfera, foram obtidos os seguintes resultados, exibidos na figura 25.

- **Superfície Rugosa:** A superfície da amostra corroída mostra rugosidades devido à remoção gradual de material superficial, resultando em uma textura não uniforme.
- **Coloração Desigual:** A superfície corroída pode adquirir uma coloração variável, frequentemente incluindo tons de ferrugem, como resultado da oxidação do metal.
- **Alteração na Aparência Visual:** A aparência da amostra é afetada, exibindo manchas de descoloração, corrosão e uma aparência geral deteriorada.

Figura 25 – Amostras exposta a atmosfera



Fonte: Elaborado pelo autor

Essas características são típicas da corrosão superficial em amostras de aço carbono 1045 expostas à atmosfera e podem ser observadas e quantificadas para avaliar a extensão e o impacto desse processo corrosivo.

4.5.5 Amostra exposta ao lado de um recipiente contendo sal

Com base na análise da amostra exposta à água ao lado de um recipiente com sal, foram obtidos os seguintes resultados, demonstrados na figura 26:

- **Formação de Pites:** A superfície da amostra exhibe pequenas crateras de corrosão, conhecidas como pites, com contornos aguçados e fundos irregulares.
- **Superfície Rugosa e Irregular:** A superfície corroída torna-se altamente rugosa e irregular devido aos pites e à erosão, criando uma textura não uniforme.
- **Coloração Variada:** A superfície corroída exhibe coloração variável, incluindo áreas com tons de ferrugem e áreas mais brilhantes onde ocorre erosão.

Figura 26 – Amostras exposta ao lado de um recipiente com sal



Fonte: Elaborado pelo autor

Essas características são observáveis e mensuráveis, permitindo uma avaliação precisa da extensão e do impacto da corrosão por pites e da erosão em amostras de aço carbono 1045 expostas à proximidade de um recipiente com sal.

5 CONCLUSÃO

Neste experimento, analisamos os efeitos da corrosão no aço 1045 quando exposto a quatro diferentes ambientes corrosivos: água doce, água salgada, proximidade a um recipiente contendo sal e atmosfera. O objetivo é estudar a corrosão do material sem camadas protetoras em sua superfície. Quatro amostras de aço 1045 foram selecionadas, passando por corte e limpeza prévios.

As análises visuais revelaram que a exposição próxima ao sal acelerou a corrosão, resultando em pequenas manchas que se espalharam ao longo do tempo, formando ferrugem. No ambiente atmosférico, a corrosão foi mais lenta, apresentando manchas e pontos de ferrugem crescentes. Na água doce, houve uma corrosão acelerada, formando uma camada de oxidação, tornando a superfície áspera. Já na água salgada, observou-se um processo de corrosão ainda mais intenso, com uma coloração escura de oxidação e textura áspera.

Cada etapa do experimento desempenhou um papel crucial na obtenção de resultados precisos, permitindo a análise dos efeitos da corrosão no aço 1045. O estudo para a engenharia ao possibilitar uma melhor compreensão dos efeitos da corrosão em materiais usados na indústria e em estruturas. Compreender a corrosão é vital para a preservação e manutenção adequada desses materiais, garantindo sua durabilidade e segurança. Portanto, concluímos que este experimento científico ajuda no avanço da engenharia e o desenvolvimento de materiais mais resistentes e tecnologias de proteção contra a corrosão.

REFERÊNCIAS

- ABTP – Associação Brasileira dos Terminais de Contêineres de Uso Público. Notícias. 2021. Disponível em: <<https://www.abtp.org.br/>> Acesso em: 12 set. 2023.
- AKPANYUNG, K. V.; LOTO, R. T. Pitting corrosion evaluation: a review. **In: Journal of Physics: Conference Series**. IOP Publishing, 2019. p. 022088. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1378/2/022088/pdf>> Acesso em: 18 set. 2023.
- AMANN, T.; WAIDELE, M.; KAILER, A. Analysis of mechanical and chemical mechanisms on cavitation erosion-corrosion of steels in salt water using electrochemical methods. **Tribology International**, v. 124, p. 238-246, 2018. Disponível em: <<https://publica.fraunhofer.de/bitstreams/1264ed76-aba2-4752-8514-3c2dddc77e63/download>> Acesso em: 11 set. 2023.
- ANDREATTA, F. et al. SAE 1045 steel/WC–Co/Ni–Cu–Ni/SAE 1045 steel joints prepared by dynamic diffusion bonding: Microelectrochemical studies in 0.6 M NaCl solution. **Electrochimica acta**, v. 55, n. 2, p. 551-559, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468609011840>> Acesso em: 22 set. 2023.
- ANNA, L. B. S. **Estudo da erosão-corrosão nos aços ABNT 8550 e inoxidável 301**. 2008. 91 f. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação; Mecânica dos Sólidos) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008. Disponível em: <https://www.lareferencia.info/vufind/Record/BR_d8effc58a277ec31965d65189667b5bc> Acesso em: 21 set. 2023.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Notícias**. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br>> Acesso em: 10 set. 2023.
- BANDEIRA, T. T. **Patologia do aço**: estudo de caso da corrosão em pilares treliçados de aço na cidade de Iguatu-CE. 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/7913/1/TiagoTB_MONO.pdf> Acesso em: 19 set. 2023.
- BEER, G. F.; PASSARELLI, T. S. **Proteção contra corrosão de aço carbono aplicando revestimentos híbridos**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/p/augusto.neiva/TCC/arquivos/1289484114.pdf>> Acesso em: 28 set. 2023.

BHANDARI, J. et al. Modelling of pitting corrosion in marine and offshore steel structures—A technical review. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 37, p. 39-62, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Vikram-Garaniya/publication/279299025_Modelling_of_Pitting_Corrosion_in_Marine_and_Offshore_Steel_Structures_-_A_Technical_Review/links/5c04cc80299bf1a3c15e480c/Modelling-of-Pitting-Corrosion-in-Marine-and-Offshore-Steel-Structures-A-Technical-Review.pdf> Acesso em: 30 set. 2023.

BIGUETTI, W. J.; BERTELLI, F.; FREITAS, E. S. Estudo da resistência à corrosão do Aço SAE 1045 na presença de solução de cloreto. **Anais do Encontro Nacional de Pós-graduação**, v. 3, n. 1, p. 433-437, 2019. Disponível em: <<https://periodicos.unisanta.br/index.php/ENPG/article/viewFile/2206/1709>> Acesso em: 01 out. 2023.

BOSSARDI, K. **Nanotecnologia Aplicada a Tratamentos Superficiais Para Aço Carbono 1020 Associado ao Fosfato de Zinco**. Dissertação de Mestrado em Eng. Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007, 140 p. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/10889>> Acesso em: 02 out. 2023.

CALIK, A.; SAHIN, O.; UCAR, Nebahattin. Mechanical properties of boronized AISI 316, AISI 1040, AISI 1045 and AISI 4140 steels. **Acta physica polonica a**, v. 115, n. 3, p. 694-698, 2009. Disponível em: <<https://bibliotekanauki.pl/articles/1808113.pdf>> Acesso em: 19 set. 2023.

CAO, L. et al. Effect of passive film on cavitation corrosion behavior of 316L stainless steel. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 15, n. 1, p. 628-638, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1452398123101829/pdf?md5=9c8faeed3ea9d01e2af27a56d5933f03&pid=1-s2.0-S1452398123101829-main.pdf>> Acesso em: 17 set. 2023.

CÁRDENAS-ARIAS, C. G. et al. Elasticity modulus variation of the AISI SAE 1045 steel subjected to corrosion process by chloride using tension test destructive. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2020. p. 012059. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/844/1/012059/pdf>> Acesso em: 15 set. 2023.

COLPAERT, H. et al. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Editora Blucher, 2008. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=skGxDwAAQBAJ&lpg=PA1&ots=sGWBefFoh9&dq=COLPAERT%2C%20H.%20et%20al.%20Metalografia%20dos%20produtos%20sider%C3%BArgicos%20comuns&lr&hl=pt-BR&pg=PA1#v=onepage&q&f=false>> Acesso em: 15 set. 2023.

DWIVEDI, D.; LEPKOVÁ, K.; BECKER, T. Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods. **RSC advances**, v. 7, n. 8, p. 4580-4610, 2017. Disponível em: <<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2017/ra/c6ra25094g>> Acesso em: 15 set. 2023.

FERNANDES, C. A. et al. **Análise de Processos de Cementação e Revestimento GEOMET 500 em Tarugos de Aço SAE 1045 Trefilado**. 2022. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/27027/1/TCC%20FINAL_Equipem%209-Ynae%20-%20Rev.29-11-2022%20%281%29.pdf> Acesso em: 16 set. 2023.

FRANKEL, G. S. Pitting corrosion of metals: a review of the critical factors. **Journal of the Electrochemical society**, v. 145, n. 6, p. 2186, 1998. Disponível em: <https://kb.osu.edu/bitstream/handle/1811/45442/1/FrankelG_JournalElectrochemicalSociety_1998_v145n6_p2186-2198.pdf> Acesso em: 17 set. 2023.

FREITAS, D. S. **Técnicas para avaliação da corrosão**. Laboratório de corrosão e proteção (LACOR). 2012. Disponível em: <http://sulgas.usuarios.rdc.puc-rio.br/Corrosao_Ensaios.pdf> Acesso em: 03 out. 2023.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3ª ed. Rio de Janeiro. Editora S.A, 2017. Disponível em: <<https://www.amazon.com.br/Corros%C3%A3o-Vicente-Gentil/dp/8521618042>> Acesso em: 16 set. 2023.

GOMES, A. C. T. **Análise da corrosão e da erosão-corrosão do aço carbono em meio com NaHCO₃ e CO₂**. Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2005. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Ana-Abrantes-6/publication/26976832_Analise_da_corrosao_e_da_erosao_-_corrosao_do_aco_carbono_em_meio_com_NaHCO3_e_CO2/links/597f858ca6fdcc1a9acec1d2/Analise-da-corrosao-e-da-erosao-corrosao-do-aco-carbono-em-meio-com-NaHCO3-e-CO2.pdf> Acesso em: 01 out. 2023.

GUTIHÁ JUNIOR, L. M. **Corrosão e sistemas de proteção**. Engenharia Elétrica Telemática-Pedra Branca, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/2533>> Acesso em: 03 out. 2023.

HACK, H. P. **Galvanic corrosion**. ASTM International. Elsevier. 2010. Disponível em: <<https://dl.asminternational.org/technical-books/edited-volume/chapter-pdf/536777/a0003663.pdf>> Acesso em: 29 set. 2023.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**. 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/> Acesso em: 01 set. 2023.

ICZ – Instituto de Metais Não Ferrosos. **Aplicações Internacionais da Galvanização Contra a Corrosão em Pontes e Viadutos**. São Paulo: 2013. Disponível em: <<https://www.icz.org.br/upfiles/arquivos/apresentacoes/Bridges-Brazil-2013.pdf>> Acesso em: 29 set. 2023.

IMIANOWSKY, G. W.; WALENDOWSKY, M. A. Os principais aços carbono utilizados na construção civil. **Conselho regional de engenharia e arquitetura de Santa Catarina**, Santa Catarina, p. 2-21, 2017. Disponível em: <<http://www.crea-sc.org.br/portal/arquivosSGC/a%C3%A7os%20carbono%20constru%C3%A7%C3%A3o%20civil.pdf>> Acesso em: 30 set. 2023.

KAIN, V. Stress corrosion cracking (SCC) in stainless steels. In: **Stress corrosion cracking**. Woodhead Publishing, 2011. p. 199-244. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845696733500055>> Acesso em: 30 set. 2023.

KELLY, R. G. et al. **Electrochemical techniques in corrosion science and engineering**. CRC Press, 2002. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/55681149/Kelly_R_et_al._Electrochemical_Techniques_in_Corrosion_Sci.pdf> Acesso em: 19 set. 2023.

LEITE, S. S. et al. Ensaio de tração mecânica e análise metalográfica do aço SAE 1045. **Revista Engenharia em Ação UniToledo**, v. 2, n. 1, 2017. Disponível em: <<http://www.ojs.toledo.br/index.php/engenharias/article/viewFile/2579/153>> Acesso em: 19 set. 2023.

LONG, Yong et al. Metalens-based stereoscopic microscope. **Photonics Research**, v. 10, n. 6, p. 1501-1508, 2022. Disponível em: <<https://opg.optica.org/prj/fulltext.cfm?uri=prj-10-6-1501>> Acesso em: 10 set. 2023.

MARQUES, G. I. et al. Corrosão Eletroquímica Utilizando Soluções H₂O Destilada e HCl, nos Aços Estruturais 1020, 1045 e 1060. **Anais do Encontro Nacional de Pós-graduação**, v. 3, n. 1, p. 6-10, 2019. Disponível em: <<https://periodicos.unisanta.br/index.php/ENPG/article/viewFile/2080/1580>> Acesso em: 12 set. 2023.

MARTINS, I. I. **Planejamento e síntese de 1, 2, 3-triazóis aril substituídos como potenciais inibidores de corrosão**. 2019. Disponível em: <https://app.homologacao.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/15080/MFC%202019.2_Iago%20Immediato%20Martins.pdf?sequence=1> Acesso em: 11 set. 2023.

MELGES, F. C. **Avaliação da autorreparação e proteção contra corrosão de aço carbono por revestimento epóxi com plasticidade reversa aditivado com microesferas de policaprolactona**. 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-21092022-105405/publico/FernandoCozimMelgesCorr22.pdf>> Acesso em: 02 out. 2023.

MIGAHED, M. A. Corrosion inhibition of steel pipelines in oil fields by N, N-di (poly oxy ethylene) amino propyl lauryl amide. **Progress in Organic Coatings**, v. 54, n. 2, p. 91-98, 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944005001207>> Acesso em: 11 set. 2023

MORAES, J. A. et al. Estudo do revestimento nanocerâmico zircônio/titânio em aço carbono na proteção contra corrosão. Fortaleza: **INTERCORR**, 2010. Disponível em: <https://intercorr.com.br/anais/2010/INTERCORR2010_312.pdf> Acesso em: 10 set. 2023

OLIVEIRA, M. C. et al. Um estudo termodinâmico da corrosão dos aços carbono pelo sulfeto de hidrogênio-Explorando conceitos de equilíbrio químico. **Química Nova**, v. 41, p. 594-599, 2018. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/qn/a/4X4pF7nSJZSgB9zWbq7mBwL/?lang=pt&stop=next&format=html>> Acesso em: 15 set. 2023

OSTROSKI, V. C. Avaliação da velocidade de corrosão nos equipamentos portuários. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 848-880, 2019. Disponível em: <https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/download/7185/4352> Acesso em: 18 set. 2023

PANNONI, F. D. **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio**. 5. ed. Rio de Janeiro: Gerdau, 2011. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/62242308/manual_corrosao20200301-66210-bnrl8p.pdf> Acesso em: 11 set. 2023

RAMOS, D. M. **Avaliação de soldabilidade dos aços inoxidáveis ferríticos ABNT 430 e ABNT 409 ao processo GTAW**: estrutura de solidificação, propriedades mecânicas e estampabilidade. 2019. Disponível em: <https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/3578/1/MONOGRRAFIA_Avalia%C3%A7%C3%A3oSoldabilidadeA%C3%A7os.pdf> Acesso em: 11 set. 2023

RASHIDI, N.; ALAVI-SOLTANI, S. R.; ASMATULU, R. **Crevice corrosion theory, mechanisms and prevention methods**. 2007. Disponível em: <<https://soar.wichita.edu/bitstream/handle/10057/917/grasp+216.pdf%20rel='nofollow'?sequence=1>> Acesso em: 18 set. 2023

REFAIT, P. et al. Corrosion of carbon steel in marine environments: Role of the corrosion product layer. **Corrosion and Materials Degradation**, v. 1, n. 1, p. 10, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2624-5558/1/1/10/html>> Acesso em: 30 set. 2023

RÊGO, G. C. **Produção e caracterização de revestimentos híbridos a base de sílica e titânia por sol-gel no aço AISI 1045 e na liga de alumínio AA7075**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18158/tde-12092016-110501/publico/DISSERTACAO.pdf>> Acesso em: 30 set. 2023

REVIE, R. W.; UHLIG, H. H. **An Introduction to Corrosion Science and Engineering**. 2008. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=HJHMHogrEiwC&oi=fnd&pg=PR5&dq=REVIE,+R.+W.%3B+UHLIG,+H.+H.+An+Introduction+to+Corrosion+Science+and+Engineering&ots=vwlbC-rFsZ&sig=UiXPaUgDgZtYI9X4rHARfBXo0L4>> Acesso em: 08 set. 2023

ROCHA, M. R. et al. **Aço ABNT 1045 esferoidizado: estudo da cinética de coalescimento e correlações entre microestruturas e propriedades mecânicas**. 2001. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/79597/180505.pdf?sequence=1>> Acesso em: 02 set. 2023

SCHVARTZMAN, M. M. A. M.; MATIAS, A.; CRUZ, J. R. B. Avaliação da corrosão sob tensão em aço inoxidável AISI 321 em ambiente de reator nuclear. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 15, p. 40-49, 2010. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rmat/a/Tm9LpFfVktmsTxCh48ChMd/?lang=pt>> Acesso em: 03 set. 2023

SILVA, F. J. et al. EROSÃO-CORROSÃO DO AÇO ABNT 8550 NITRETADO. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 3, n. 4, p. 46-51, 2013. Disponível em: <<https://www.tecnologiammm.com.br/article/10.4322/tmm.00304008/pdf/1573492069-3-4-46.pdf>> Acesso em: 19 set. 2023

SILVA, M. V. F. et al. Corrosão do aço-carbono: uma abordagem do cotidiano no ensino de química. **Química Nova**, v. 38, p. 293-296, 2015. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/qn/a/cVwbpdPmGzTFRGCBFsc368M/?lang=pt>> Acesso em: 03 set. 2023

SINGH, H.; SINGH, A. An Enhancement of properties of material SAE 1045 steel. **Imp. J. Interdiscip. Res**, v. 3, n. 2, p. 1678-1685, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Arashdeep-Singh-7/publication/326264829_An_Enhancement_of_properties_of_material_SAE_1045_steel/link>

s/5b42fceca6fdccbcf90db8ae/An-Enhancement-of-properties-of-material-SAE-1045-steel.pdf> Acesso em: 29 set. 2023

SINGH, S. et al. Effect of heat treatment processes on the mechanical properties of AISI 1045 steel. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 5097-5101, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785321006829>> Acesso em: 17 set. 2023

SONG, F. M. et al. Predicting Carbon Dioxide Corrosion of Bare Steel Under an Aqueous Boundary Layer, August 2004. **Corrosion**, v. 60, n. 08, 2004. Disponível em: <<https://onepetro.org/corrosion/article-abstract/116565/Predicting-Carbon-Dioxide-Corrosion-of-Bare-Steel>> Acesso em: 02 set. 2023

SPLABOR. **O que é um estereoscópio** – Guia do Comprador. 2022. Disponível em: <<https://www.splabor.com.br/blog/microscopio-estereoscopio/o-que-e-um-estereoscopio-e-como-ele-funciona/>> Acesso em: 03 de nov. 2023.

TAVAKKOLIZADEH, M.; SAADATMANESH, H.. Galvanic corrosion of carbon and steel in aggressive environments. **Journal of Composites for construction**, v. 5, n. 3, p. 200-210, 2001. Disponível em: <<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=4610ac807a9cae143e256c983cc67bb8c975bb6d>> Acesso em: 09 set. 2023

TICIANELLI, E. A.; GONZALEZ E.R. **Eletroquímica, Princípios e Aplicações**, 2ª Ed, São Paulo, Edusp, 2005. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=xxvO1eQUTr8C&lpg=PA9&ots=4zZjgUuPv0&dq=TICIANELLI%20E.%20A.%20B%20GONZALEZ%20E.R.%20Eletroqu%C3%ADmica%20Princ%C3%ADpios%20e%20Aplica%C3%A7%C3%B5es%20a%20Ed%20OS%C3%A3o%20Paulo%20Edusp%20&lr&hl=pt-BR&pg=PA9#v=onepage&q&f=false>> Acesso em: 18 set. 2023

VALOSIO, H. J.; SILVA, J.; SABOR, W. **Corrosão Intergranular Em Juntas Soldadas De Aços Inoxidáveis Austeníticos**. 2000. Disponível em: <<http://200.17.228.88/disciplinas/EME733/Semin%C3%A1rios%20Inox/Sensitiza%C3%A7%C3%A3o%20Inox%20%20%20Thiago.pdf>> Acesso em: 11 set. 2023

VILLAMIZAR, W. et al. CO₂ corrosion inhibition by hydroxyethyl, aminoethyl, and amidoethyl imidazolines in water–oil mixtures. **Journal of Solid State Electrochemistry**, v. 11, p. 619-629, 2007. Disponível em: <<https://www.academia.edu/download/99210969/s10008-006-0208-x20230227-1-1dirymi.pdf>> Acesso em: 17 set. 2023

WIKÅ, S. F. et al. **Pitting and crevice corrosion of stainless steel under offshore conditions**. 2012. Dissertação de Mestrado. Institutt for materialteknologi. Disponível em: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/249144/566900_FULLTEXT01.pdf?sequence=2> Acesso em: 14 set. 2023

ZHANG, X. G. **Galvanic corrosion**. **Uhlig's Corrosion Handbook**, v. 51, p. 123, 2011. Disponível em: <<https://www.azoresuperyachtservices.pt/images/downloads/MAINTENANCE/GALVANIC%20CORROSION/Galvanic%20Corrosion%20-%20X.G.%20Zhang.pdf>> Acesso em: 04 set. 2023

ZIMER, A. M. **Estudo da corrosão do aço ao carbono em meio de sulfeto**. 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/6159/3075.pdf?sequence=1>> Acesso em: 30 set. 2023