



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO ANANINDEUA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ROSEANE MACEDO CORDEIRO

**ÓLEO ESSENCIAL DO BOTÃO DO CRAVO-DA-ÍNDIA (*SYZYGIUM
AROMATICUM*) COMO INIBIDOR NATURAL DA CORROSÃO DO AÇO
CARBONO EM MEIO ÁCIDO (HCl)**

ANANINDEUA

2025

ROSEANE MACEDO CORDEIRO

ÓLEO ESSENCIAL DO BOTÃO DO CRAVO-DA-ÍNDIA (*SYZYGIUM AROMATICUM*) COMO INIBIDOR NATURAL DA CORROSÃO DO AÇO CARBONO EM MEIO ÁCIDO (HCl)

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, do campus Universitário de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Dr. Marcos Vinicius da Silva Paula.

ANANINDEUA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C794o Cordeiro, Roseane Macedo.
Óleo essencial do botão do cravo-da-índia (*Syzygium aromaticum*) como inibidor natural da corrosão do aço carbono em meio ácido (HCl) / Roseane Macedo Cordeiro. — 2025.
59 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcos Vinicius da Silva Paula
Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará,
Campus Universitário de Ananindeua, Curso de Engenharia de
Materiais, Ananindeua, 2025.

1. Aço carbono. 2. Corrosão. 3. *Syzygium aromaticum*. 4.
Inibidor de corrosão. 5. Gravimetria. I. Título.

CDD 620.11

ROSEANE MACEDO CORDEIRO

ÓLEO ESSENCIAL DO BOTÃO DO CRAVO-DA-ÍNDIA (*SYZYGIUM AROMATICUM*) COMO INIBIDOR NATURAL DA CORROSÃO DO AÇO CARBONO EM MEIO ÁCIDO (HCl)


Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, do campus Universitário de Ananindeua da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Dr. Marcos Vinicius da Silva Paula.


Data de aprovação: ___/___/___

Conceito:

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **MARCOS VINICIUS DA SILVA PAULA**
Data: 04/12/2025 09:29:16-0300
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr.: Marcos Vinicius da Silva Paula. (FEMat – UFPA/CANAN)
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **ALACID DO SOCORRO SIQUEIRA NEVES**
Data: 10/12/2025 16:36:43-0300
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me.: Alacid do Socorro Siqueira Neves. (FEMat - UFPA/CANAN)
Examinador interno

Documento assinado digitalmente
 **ALCY FAVACHO RIBEIRO**
Data: 08/12/2025 08:34:25-0300
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr.: Alcy Favacho Ribeiro. (FAQUIM - UFPA/CANAN)
Examinador externo

Ao meu pai, *minha mãe in memoriam* e meus filhos pelo carinho e motivação para que isso fosse concretizado.

AGRADECIMENTOS

Todo o esforço durante o desenvolvimento desse trabalho, dedico as pessoas que foram de extrema importância para que este fosse possível acontecer depois de uma batalha tão longa e sofrida.

Gratidão primeiramente a Deus o criador de todas as coisas e a Maria mãe de Jesus, que intercedeu por mim diante de Deus para que tudo fosse possível para eu chegar até aqui.

Os agradecimentos também não podem faltar para a minha família, principalmente ao meu esposo Jorge José Gonçalves Cordeiro que sempre me deu muita força naqueles momentos de fraqueza quando pensei diversas vezes em desistir.

Aos meus filhos, Micael que sempre me buscava na parada naqueles dias de muito cansaço, meu filho Jorge Madjer que segurava as pontas quando não dava tempo de deixar a comida pronta, meu filho Lucas Mathaus que me descontraía sempre que eu estava tensa preocupada com as atividades ao longo dos semestres.

A minha primogênita Maira Gonçalves Macedo, que sempre me motivou no decorrer do curso.

Ao meu Pai que se enche de orgulho quando falo que estou me formando na Universidade Federal do Pará.

A minha mãe (*in memoriam*), eu certa que está orgulhosa de mim.

A todo corpo Docente que foram de extrema importância para o meu aprendizado, aos meus amigos da faculdade sem descrição de turma, que sempre pude contar e alguns deles estão aqui presentes.

Dedico imensa gratidão ao meu orientador, Marcos Vinícius da Silva Paula pela oportunidade e por toda dedicação para que eu pudesse realizar a minha pesquisa.

Todas as menções aqui dedico com carinho a todos, muito obrigada!

“Pois para Deus nada é impossível” Não importa qual situação você esteja passando ele pode mudar tudo! (Lucas, 1:37, 2014 p.1252).

RESUMO

Controlar processos de corrosão no setor industrial é fundamental na diminuição de custos e garantir a conservação de equipamentos e ferramentas em geral. Diante disso, são feitas várias investigações em materiais visando a busca de inibidores de corrosão cada vez mais eficientes e amigáveis do ponto de vista ambiental. Dessa forma, este trabalho tem o objetivo de investigar a eficiência anticorrosiva do óleo essencial do botão do cravo-da-índia (OEBC), (*Syzygium aromaticum*) para o aço carbono em meio de ácido clorídrico (HCl 1,0 mol L⁻¹). Para avaliação da ação anticorrosiva do óleo, empregou-se o método gravimétrico de perda de massa, com ensaios realizados em dois períodos de 24 h e outro em 7 dias. Nesses intervalos, foram determinadas a eficiência de inibição (EI) e a taxa de corrosão (TC). As concentrações do óleo essencial do botão do cravo-da-índia investigadas foram 0 g/L (isento ou branco), 0,5 g/L, 1,0 g/L, 2,0 g/L e 4,0 g/L. Assim, constatou-se uma eficiência de inibição de 97% para a corrosão do aço em meio ácido, utilizando 4,0 g/L de (OEBC) em 7 dias. Adicionalmente, observou-se uma redução na taxa de corrosão proporcional à concentração de (OEBC) empregada, tanto em 24 horas quanto em 7 dias. Logo conclui-se que (OEBC) apresenta potencial para aplicação como inibidor de corrosão do aço em meio ácido, minimizando o processo oxidativo nesse ambiente.

Palavras-chave: Aço carbono; Corrosão; (*Syzygium aromaticum*); Inibidor de corrosão; Gravimetria.

ABSTRACT

Controlling corrosion processes in the industrial sector is essential for reducing costs and ensuring the preservation of equipment and tools in general. Therefore, several materials investigations are being conducted to find increasingly efficient and environmentally friendly corrosion inhibitors. Therefore, this study aims to investigate the anticorrosive efficacy of clove bud essential oil (CBO) (*Syzygium aromaticum*) on carbon steel in a hydrochloric acid medium ($1.0 \text{ mol L}^{-1} \text{ HCl}$). To evaluate the oil's anticorrosive action, the gravimetric mass loss method was used, with tests performed in two 24-h periods and another in 7 days. During these intervals, the inhibition efficiency (EI) and corrosion rate (CR) were determined. The concentrations of clove bud essential oil investigated were 0 g/L (free or blank), 0.5 g/L, 1.0 g/L, 2.0 g/L, and 4.0 g/L. Thus, a 97% inhibition efficiency was observed for steel corrosion in an acidic environment using 4.0 g/L of (OEBC) over 7 days. Additionally, a reduction in the corrosion rate proportional to the concentration of (OEBC) used was observed, both at 24 hours and at 7 days. Therefore, it is concluded that (OEBC) has potential for application as an inhibitor of steel corrosion in acidic environments, minimizing the oxidative process in this environment.

Keywords: Carbon steel; Corrosion; (*Syzygium aromaticum*); Corrosion inhibitor; Gravimetry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Chapa plana de aço carbono.....	17
Figura 2 – Esquema das ligas metálicas a partir dos aços.....	19
Figura 3 – Formas de corrosão	22
Figura 4 – Corrosão em placas	22
Figura 5 – Corrosão Alveolar	23
Figura 6 – Corrosão puntiforme ou pite.....	23
Figura 7 – Ciclo do metal no processo corrosivo	26
Figura 8 – Compostos químicos: Óleo essencial do botão do cravo-da-índia	31
Figura 9 – Chapa metálica utilizada para a confecção dos cupons.....	33
Figura 10 – Óleo essencial (OEBC) e ácido clorídrico (HCl).....	34
Figura 11 – Cupons antes e após a decapagem	35
Figura 12 – Ensaio gravimétrico de perda de massa.....	36
Figura 13 – Fluxograma do procedimento experimental	37
Figura 14 – Os cps antes e após ataque corrosivo	39
Figura 15 – Gráfico da eficiência de inibição no período 24 h	41
Figura 16 – Gráfico da taxa de corrosão no período de 24 h	42
Figura 17 – Aço carbono antes e após ataque corrosivo com e sem (OEBC).....	43
Figura 18 – Gráfico da eficiência de inibição no período de 7 dias	45
Figura 19 – Gráfico da taxa de corrosão (MPY) do período de 7 dias	45
Figura 20 – Gráfico comparativo da (EI) dos cps nos tempos de 24 h e 7 dias	46
Figura 21 – Gráfico comparativo da (TC) dos cps com e sem (OEBC) 24 h e 7 dias.....	47
Figura 22 – Cps com 2,0g/L de (OEBC) período de 24 h.....	48
Figura 23 – Cps com 4,0g/L de (OEBC) período de 7 dias	49

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 – Percentuais de carbono nos aços carbono	20
Tabela 2 – Códigos dos cupons referente às concentrações (OEBC) 24 h e 7 dias	35
Tabela 3 – Resultados da (EI) e (TC) período de 24 h.....	40
Tabela 4 – Resultados da (EI) e (TC) período de 7 dias.....	44
Tabela 5 – Resultados de Pesquisas realizadas de inibidores naturais da corrosão em metais	50
Quadro 1 – Inibidores químico da corrosão	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação brasileira de normas técnica
Cp's	Corpos de prova
EI	Eficiência de inibição
FEMat	Faculdade de Engenharia de Materiais
g/L	gramas por litro
Mb	Massa do branco
Mc	Massa com inibidor
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
mf	massa final
mi	massa inicial
mol L	molar por litro
MPY	Milímetros por ano
OE	Óleo essencial
OE's	Óleos essenciais
OEBC	Óleo essencial do botão do cravo-da-índia
OEBC -0	Isento de concentração do óleo essencial botão do cravo-da-índia
OEBC -1	0,5 gramas-concentração do óleo essencial do botão do cravo-da-índia
OEBC -2	1,0 grama-concentração do óleo essencial do botão do cravo-da-índia
OEBC -3	2,0 gramas-concentração do óleo essencial do botão do cravo-da-índia
OEBC -4	4,0 gramas-concentração do óleo essencial do botão do cravo-da-índia
PIB	Produto Interno Bruto
TC	Taxa de corrosão
UFPA	Universidade Federal do Pará

LISTA DE SIMBOLOS

A	Àrea
C	Carbono
Cm ²	centímetro quadrado
D	Densidade
e ⁻	elétrons
Fe	Ferro
H ₂	molécula de Hidrogênio
Mn	Manganês
M	Metal
n	número de elétrons
O	Oxigênio
P	Fósforo
pH	potencial hidrogeniônico
S	Enxofre
Si	Silício
t	tempo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa	15
2 OBJETIVOS.	16
2.1 Objetivo geral.	16
2.2 Objetivos específicos	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.	17
3.1 Aço carbono	17
3.1.1 Classificação dos aços.	18
3.2 Corrosão.	20
3.2.1 As formas de corrosão	22
3.2.2 Mecanismos da corrosão	25
3.3 Inibidores de corrosão	27
3.3.1 Classificação dos inibidores da corrosão.....	28
3.4 Características dos Óleos Essenciais	30
3.5 (<i>Syzygium aromaticum</i>) e seus principais compostos	31
3.6 Gravimetria de perda de massa	32
4 MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1 Obtenção dos materiais	33
4.2 Método e procedimento experimental	34
4.2.1 Equação da taxa de corrosão.....	37
4.2.2 Equação da eficiência de inibição	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1 Características do aço carbono após ensaio gravimétrico de 24 h	39
5.2 Resultados da (EI) do (OEBC) e (TC) do aço carbono de 24 h	40
5.3 Características do aço carbono após ensaio gravimétrico de 7 dias	42
5.4 Resultados da (EI) do (OEBC) e (TC) do aço carbono de 7 dias	44
5.5 Comparativo dos resultados após 24 h e 7 dias da (EI) e (TC)	46
5.6 Comparativo de pesquisas realizadas de inibidores com menor (EI)	49
6 CONCLUSÃO	51
7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

O aço carbono é uma de ligas metálica constituída predominantemente por ferro e carbono, representando cerca de 90% da produção mundial de metais (Callister, 2020). Sua ampla utilização em diferentes setores decorre da possibilidade de incorporar elementos de ligas adicionais e de aplicar tratamentos térmicos, com o intuito de modificar e otimizar suas propriedades. As características mecânicas desse material são influenciadas pelo teor de carbono, o qual, na maioria dos casos, permanece inferior a 1,00% (Zou; Ding; Tang, 2021).

A corrosão constitui um tema de grande relevância para profissionais que atuam com materiais suscetíveis a esse fenômeno. Nesse contexto, torna-se essencial compreender as reações envolvidas e desenvolver estratégias eficazes de mitigação, por meio da avaliação de materiais já disponíveis, priorizando alternativa de menor custo e ambientalmente seguras quanto ao descarte (Gentil, 2022). Pesquisas direcionadas a essa área contribuem significativamente para a redução de gastos com manutenção preventiva, evitando a deterioração prematura dos materiais e, conseqüentemente, prevenindo acidentes que podem resultar em danos graves, inclusive com risco de fatalidades humanas (Křivý, 2022).

A deterioração é um problema que compromete intensamente materiais metálicos expostos em vários ambientes como, naturais e industriais. Atualmente, observa-se que a corrosão e a poluição são danosas interdependentes. Poluentes podem acelerar ou causar corrosão, ao mesmo tempo produtos de corrosão (oxidação) que também contribuem para a poluição de corpos d'água (Liduino *et al.*, 2022). Esses são processos que contaminam e anulam a qualidade do meio ambiente, a eficácia do setor e a resistência dos ativos de diversos ambientes, como incrustações em caldeiras e em tubulações de reservatórios de petróleo e outros (Gentil, 2022). Assim, é muito importante criar métodos e técnicas de domínio de engenharia que possam controlar processos corrosivos em metais (Ruy, 2022).

Alguns Inibidores químicos de corrosão também podem exercer um papel de poluidores ambientais, devido ao seu caráter tóxico, sendo necessário tratamento posterior após o descarte (Verma *et al.*, 2021). Por esse motivo, diversos estudos vêm sendo realizados com o objetivo de investigar a eficiência de produtos de origem vegetal ou materiais biologicamente degradáveis para desempenhar essa função. Quando aplicados ao substrato metálico, formam uma película protetora constituída por compostos orgânicos na superfície, de modo a minimizar a ação oxidativa (Rocha & Gomes, 2017).

Os óleos essenciais (OE's) são recursos naturais extraídos de diversas espécies vegetais e, recentemente, têm sido investigados como inibidores de corrosão devido às suas propriedades

antioxidantes, ao menor custo relativo e ao impacto ambiental. Esses compostos orgânicos atuam na barreira físico-química entre o metal e o ambiente agressivo (Dounia *et al.*, 2024).

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo investigar a eficiência anticorrosiva do óleo essencial botão do cravo-da-índia (*Syzygium aromaticum*) por meio de ensaios gravimétricos de perda de massa. Foram determinadas a eficiência de inibição (EI) e a taxa de corrosão (TC) em meio ácido (HCl 1,0 mol L⁻¹), nos intervalos de 24 h e outro em 7 dias, utilizando-se as concentrações de (OEBC): 0 g/L (sem concentração), 0,5 g/L, 1,0 g/L, 2,0 g/L e 4,0 g/L.

1.1 Justificativa

A escolha do óleo essencial do botão do cravo-da-índia (*syzygium aromaticum*), para a investigação como inibidor de corrosão deve-se ao fato de conter compostos bioativos, como o eugenol, que apresentam grupos funcionais capazes de interagir com a superfície metálica, formando uma película que protege e reduz o contato do aço com o meio corrosivo. Além disso, esse óleo possui biodegradabilidade e menor impacto ambiental em comparação aos inibidores tradicionais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Investigar a eficiência anticorrosiva do óleo essencial botão do cravo-da-índia (*Syzygium aromaticum*) no aço de baixo carbono, por meio do método de gravimetria de perda de massa em meio ácido.

2.2 Objetivos específicos

Determinar o potencial do óleo essencial do botão do cravo-da-índia (OEBC) como inibidor da corrosão no aço carbono, após os períodos de 24 h e em 7 dias na presença de (HCl 1,0 mol L⁻¹).

Realizar a comparação macroscópica sobre o possível efeito anticorrosivo do (OEBC), com as concentrações utilizadas e identificar a concentração que apresentou maior eficiência.

Avaliar a taxa de corrosão (TC) em (MPY) do aço carbono, após imersão em solução de (HCl 1,0 mol L⁻¹), nos dois intervalos, comparando a condição entre as amostras (isenta ou branco) e na presença do (OEBC).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aço Carbono

Entre os diversos materiais utilizados em aplicações industriais, o aço destaca-se por suas propriedades como: ductilidade, resistência mecânica, maleabilidade entre outras, o que torna um dos materiais metálicos mais empregados em vários ramos da engenharia (Zhang *et al.*, 2023). E não somente na indústria mecânica, estão presentes na construção civil, em viadutos e pontes, ajudando a manter unidas as estruturas de concreto (Simões *et al.*, 2024), na indústria elétrica, na fabricação de motores que auxiliam a movimentar máquinas e equipamentos industriais. Sua aplicação não se limita ao setor mecânico: na construção civil, o aço é utilizado como armadura na sustentação em concreto armado, viadutos e pontes, assumindo um papel importante como elemento de reforço e resistência ao esforço de tração no interior de componentes sujeitos à compressão (Davi *et al.*, 2019).

O aço é uma liga metálica composta essencialmente de ferro (Fe) e carbono (C), em que o ferro predomina. O teor de carbono varia tipicamente cerca de 0,002% a 2,06% em massa. A classificação dos aços é feita de acordo com a sua microestrutura, composição química e utilização, conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Os aços de baixa-liga são aqueles cujo somatório total de elementos de liga, além de ferro e carbono, não ultrapassa aproximadamente de 3,5% (Callister, 2020). A Figura 1 mostra uma imagem de uma chapa de aço carbono.

Figura 1 – Chapa plana de aço carbono



Fonte: Google, (2020).

O aço ao carbono caracteriza-se por elevada resistência mecânica, sendo capaz de suportar solicitações intensas tais como tensões de tração, compressão, torção e impactos, quando adequadamente dimensionado. Suas propriedades mecânicas: dureza, limite de escoamento, tenacidade, podem ser refinadas por meio de adição de elementos de liga, como manganês, silício, cromo etc., bem como por tratamentos térmicos: tempera, revenido ou normalização. Os quais promovem modificações microestruturais que melhoram desempenho sob condições adversas em termo de durabilidade, sua vida útil pode ser substancialmente prolongada mediante proteção contra corrosão e desgaste (Mokhtari *et al.*, 2024). Ademais, do ponto de vista ambiental e econômico, além de apresentar boa reciclabilidade, podendo ser reciclado diversas vezes sem perda significativa de suas propriedades, o que contribui para custos relativamente baixos no ciclo de vida do material (Ashby, 2012).

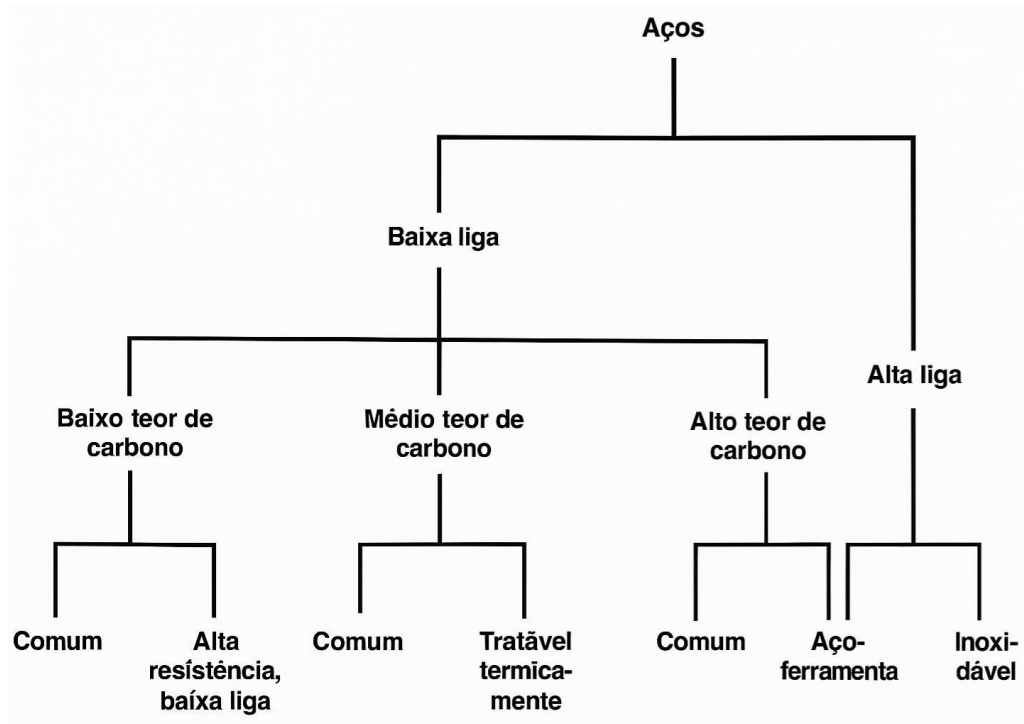
As principais características do aço carbono estão relacionadas a sua composição química, especificamente no teor de carbono, que juntamente com elementos considerados impuros ou de liga, tratamentos térmicos e processos de fabricação altera significativamente suas propriedades mecânicas e microestruturais (Amaral *et al.*, 2024).

3.1.1 Classificação dos aços Carbono

A classificação do aço quanto ao percentual de carbono nos aços de baixa liga, classificados baixo, médio e alto teor de carbono (Glossário de Propriedades do Aço, 2023). As propriedades mecânicas dos aços são relativas ao teor de carbono e aos elementos de ligas de adição que podem ser, cobre, manganês, molibdênio, níquel, fósforo, vanádio, são elementos que modificam a microestrutura dos aços de baixa liga proporcionando benefício como boa resistência a corrosão (Metal Zênite, 2025). A variação do teor de carbono em aços Fe-Cr-Ni é capaz de determinar diferentes microestruturas como, em baixos teores favorecem a fase ferrítica, teores intermediários permitem coexistência de ferrita e martensita ou austenita, e teores altos promovem precipitação de carbeto, além de modificar as propriedades mecânicas como resistência à tração e dureza (Glossário de Propriedades do Aço, 2025). Em aços carbono médio a alto, o tratamento por laminação gera particularidades na formação de estrutura, como maior formação de perlita, recristalização incompleta ou distribuição de partículas de carbeto com influência sobre a tenacidade e resistência ao desgaste (Lutsenko *et al.*, 2023). A quantidade de carbono também afeta o endurecimento por exemplo, em aços Fe-Mn-Al-C com baixa densidade, onde a precipitação de carbeto eleva a resistência e dureza, mantendo a ductilidade razoável (Banis *et al.*, 2023).

Os metais ferrosos formam ligas baseadas no sistema Fe-C, em que as ligas contendo até aproximadamente 2,06 a 2,14% de carbono são classificadas como aços, acima desse limite é considerado ferros fundidos. Dentro dos aços, há subdivisões segundo o teor de carbono como, mostra na Figura 2 uma classificação típica.

Figura 2 – Esquema das ligas metálicas a partir dos aços



Fonte: adaptado, Calliter, (2020).

A composição química dos aços quanto ao teor de carbono, como mostra na Figura 2 referentes as suas subclasses, podem obter desempenho otimizado, geralmente, quanto maior o teor de carbono, maior a resistência mecânica e a dureza do material, entretanto, há redução da ductilidade (Callister, 2020). Os aços com baixo teor de carbono, apresentam características de aço mole tem alta ductilidade, boa conformabilidade e soldabilidade; resistência e dureza relativamente moderadas, possui microestrutura (ferrita+perlita), sua aplicação em chapas, perfis estruturais vergalhões, parafusos etc. O aço médio teor de carbono responde entre melhor resistência, dureza e ductilidade, nesses são permitidos tratamentos térmicos como, têmpera e revenido para aumentar a resistência e dureza, com aplicações em eixos, engrenagens, trilhos de trem, peças forjadas requerem modesta resistência e desgastes. Aços de alto carbono, possuem alta dureza e resistência ao desgaste, menor ductilidade normalmente usados após tratamentos térmicos, tem microestrutura com maior fração de (perlita e carbeto), respondem bem a

têmpera, sua aplicação em molas ferramentas de corte, lâminas, fios de alta resistência etc. (Callister, 2020). A Tabela 1 apresenta os teores aproximados de carbono presentes nos diferentes tipos de aços, os quais podem conter ainda elementos de liga adicionados intencionalmente para aprimorar a microestrutura e suas propriedades mecânicas.

Tabela 1 - Percentuais de Carbono nos aços Carbono

Aços carbono	%C
Aço de baixo teor de carbono	< - 0,25-0,30
Aço de médio teor de carbono	- 0,30-0,60
Aço de alto teor de carbono	> - 0,60-1,4

Fonte: adaptado Callister, (2020).

Segundo Nascimento (2022), estudos recentes indicam que aços com baixo teor de liga (3,0-3,5 %), a quantidade desses elementos não basta para provocar mudanças significativas na estrutura dos aços e nos tratamentos térmicos aplicados. Já nos aços-ligas de alto teor (~ 10-12 %), a adição de elementos de liga altera profundamente tanto a microestrutura quanto os tratamentos térmicos, exigindo técnicas especializadas, cuidados rigorosos e, normalmente, múltiplas etapas de processamento. Entre dois casos, situam-se os aços de médio teor em liga, com valores intermediários.

3.2 Corrosão

A corrosão é definida como a deterioração de um material, que normalmente metálico, causada por reações químicas ou eletroquímicas com o ambiente ao qual está exposto. Esse processo pode ocorrer com ou sem ação de esforços mecânicos, resultando em perda de propriedades físicas ou químicas do metal, comprometendo sua funcionalidade e tornando-o inadequado para o uso (Zhang *et al.*, 2024). A deterioração espontânea que ocorre quando metal interage com o meio, resultando na formação de compostos como óxidos ou hidróxidos. Esse fenômeno tem predominância eletroquímica, caracterizado pela transferência de elétrons entre o metal e o meio ambiente. Durante o processo de corrosão, o metal perde elétrons em uma reação de oxidação, formando cátions metálicos que se dissolvem ou reagem com substâncias existentes no ambiente, essas perdas de elétrons ocorrem no ânodo, enquanto o cátodo passa por redução de íons, normalmente oxigênio ou hidrogênio (Silva, 2023).

A oxidação é uma forma específica de corrosão que se prolifera quando o metal reage diretamente com o oxigênio do ar ou da água, produzindo óxidos. Esse processo é uma reação de oxirredução, em que ocorre perda de elétrons pelo metal (oxidação) e o ganho de elétrons

por outra espécie química (redução). Fatores como umidade, temperatura, pH e presença de eletrólitos influenciam a taxa e a forma de corrosão (Silva, 2023). Compreender esses processos é fundamental para o desenvolvimento de materiais mais resistentes e para implementar estratégias eficazes de proteção contra corrosão.

A corrosão apresenta um impacto econômico significativo, sendo responsável por uma perda aproximada em torno de 3 a 4% do Produto Interno Bruto (PIB) mundial. Segundo estudo da NACE (National Association of Corrosion Engineers), esse valor corresponde a cerca de US\$ 2,5 trilhões anuais. Medidas preventivas e controle da corrosão poderiam mitigar parte dessas perdas, gerando economia substancial para a economia global (Iannuzzi; Frankel, 2022).

Uma forma geral de representar a equação iônica de oxidação e redução (Callister, 2020).



Onde o M representa um metal que, ao sofrer oxidação, perde seus elétrons de valência originando um cátion metálico (M^{n+}) e liberando elétrons, simbolizados por e^- (Callister, 2020).

De acordo com Atkins, (2022), a corrosão do ferro (Fe) em meio úmido, pode ser compreendida como a formação de uma célula eletroquímica heterogênea na qual diferentes áreas da superfície do metal funcionam como ânodo e cátodo.

Ânodo (oxidação):



Cátodo (redução do oxigênio dissolvido):



A reação global simplificada:



Onde:

Fe (s) sólido Ferro metálico, que sofre oxidação, representa o ânodo da célula eletroquímica;

O_2 (g) gás Oxigênio molecular, atua como agente oxidante recebe elétrons durante a redução (no cátodo);

H^+ (aq) aquoso Íons hidrogênio (prótons) presentes em meio ácido (formados pela ionização da água), participam da reação de redução do oxigênio;

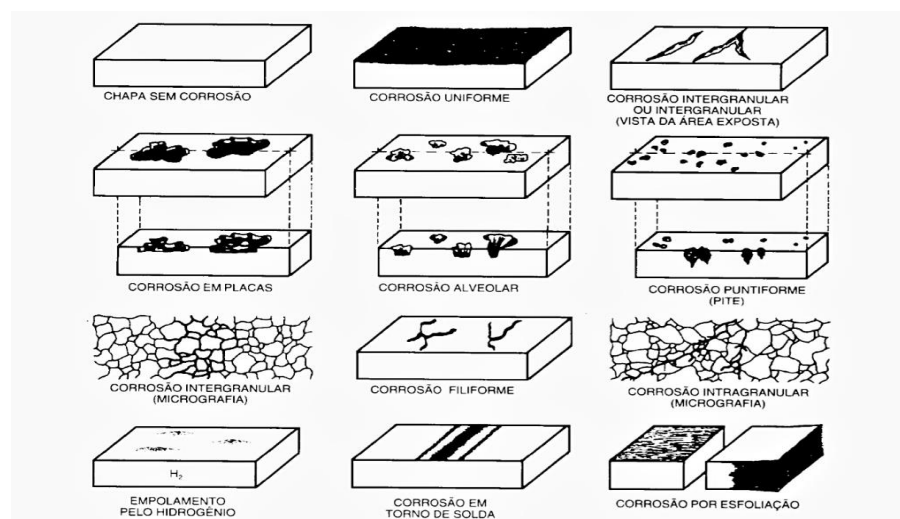
Fe^{2+} (aq) aquoso Íon ferroso, é o produto da oxidação do ferro metálico, indicando que o ferro passou do estado de oxidação 0 para +2;

H₂O (l) água líquida, produto da redução do oxigênio dissolvido no meio.

3.2.1 As formas de corrosão

A ocorrência de corrosão em metais, se manifestam por padrões característicos que dependem do ambiente e da composição do material, sendo cada um deles associado a uma série de consequências mecânicas distintas (Han *et al.*, 2023). A Figura 3 mostra as formas de corrosão, destacando as formas em placas, alveolar e puntiforme (pites) que fragilizam o material e apresentam profundidade, podendo demandar riscos de fraturas.

Figura 3 – Formas de corrosão em metais



Fonte: Gentil, (2022).

A corrosão em placas, ocorre quando áreas específicas da superfície metálica são atingidas com formação de placas ou orifícios que eventualmente desprendem-se. Essas placas agem como regiões de delaminação, ou seja, separando as camadas que compõe o material expondo o metal adjacente a novo ataque corrosivo (Ibrahimi; Nardeli; Guo, 2021), a Figura 4 mostra o aspecto de corrosão em placas.

Figura 4 – Corrosão em Placas



Fonte: Gentil, (2022)

Corrosão Alveolar é um tipo de corrosão localizada, caracteriza-se por sulcos ou cavidades arredondadas de superfície metálica, em que a profundidade dessas depressões é geralmente menor do que seu diâmetro, ocorre normalmente em ambientes úmidos ou marinho especialmente quando há presença de íons cloreto (Cl^-), que rompem a película passiva protetora do metal. Esse tipo de ataque é comum em estruturas navais, tubulações e superfícies metálicas submersas, a Figura 5 mostra essa forma de corrosão (Hibrahimi; Nardeli; Guo, 2021).

Figura 5 – Corrosão Alveolar



Fonte: Gentil, (2022)

A corrosão puntiforme é um tipo de ataque altamente localizado que se manifesta pela formação de pequenas cavidades (pite), cuja profundidade pode exceder o diâmetro superficial. Essas cavidades podem atuar como pontos de concentração de tensões, favorecendo o surgimento de trincas e fraturas, mesmo com mínima perda de massa a Figura 6 mostra uma imagem de corrosão puntiforme ou pite (Han *et al.*, 2023).

Figura 6 – Corrosão Puntiforme ou Pite



Fonte: Gentil, (2022)

A corrosão uniforme se caracteriza por um ataque homogêneo que se dispersa de maneira de maneira relativamente constante por toda a superfície metálica. Esse tipo de corrosão ocorre com frequência em ambientes industriais, na presença de oxigênio e umidade, resultando em uma perda gradual e uniforme de material (Engenheiros de Materiais, 2019).

Corrosão intergranular também denominada intercristalina, manifesta-se com predominância ao longo dos contornos de grãos de metal, onde ocorre a degradação dessas regiões. É um processo que compromete a coesão entre os grãos, causando redução significativa das propriedades mecânicas do material e tornando-o suscetível à fratura quando submetido a esforços mecânicos, em condições de corrosão sob tensão (Gentil, 2022).

A forma de corrosão denominada filiforme caracteriza-se por formação de filamentos ou trilhas finas que se propagam sob revestimentos metálicos ou pinturas protetoras, normalmente em várias direções e com dimensões semelhantes. Trata-se de um processo superficial, sem penetração significativa, no qual os produtos de corrosão apresentam aspecto coloidal com pelo menos duas ou três fases heterogêneas. Esse fenômeno ocorre preferencialmente em superfície metálica revestidas, quando há elevada umidade relativa do ar (superior a 85%) e o revestimento apresenta permeabilidade ao oxigênio e à água, conseqüentemente, ocorre o destacamento do revestimento e o aparecimento de riscos, especialmente em áreas de bordas e arestas (Gentil, 2022).

Corrosão transgranular ou transcristalina, desenvolve-se através dos próprios grãos da rede cristalina do material, em contraste com a corrosão intergranular, que ocorre nos contornos de grão. Essa forma de corrosão promove a degradação interna da estrutura cristalina, resultando na perda de propriedades mecânicas e tornando o material suscetível à fratura mesmo sob baixos níveis de tensão, caracterizando-se como uma forma de corrosão sob tensão fraturante (Gentil, 2022).

Essa forma de corrosão empolamento por hidrogênio ocorre quando átomos de hidrogênio se infiltram na estrutura metálica e difundem-se rapidamente por regiões que apresentam defeitos como inclusões ou descontinuidades internas. Nessas áreas, os átomos de hidrogênio combinam-se para formar moléculas de H_2 , onde o maior volume facilita para o acúmulo de pressão interna. Esse processo resulta na formação de bolhas no interior do material, comprometendo sua integridade e suas propriedades mecânicas (Gentil, 2022).

A região adjacente ao cordão de solda apresenta suscetibilidade à corrosão, especialmente em aços inoxidáveis que contêm teores de carbono superiores a 0,03%. Nesses casos, ocorre precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grão durante o processo de

soldagem, favorecendo o surgimento de corrosão intergranular de maneira localizada e característica (Gentil, 2022).

A corrosão por esfoliação manifesta-se em superfícies metálicas de forma paralela, geralmente em materiais que passam por processos de conformação, como a extrusão. No decorrer desses processos, os grãos metálicos sofrem alongamentos e achatamento, tornando a estrutura mais vulnerável à delaminação progressiva ao longo dessas direções (Gentil, 2022).

3.2.2 Mecanismos da corrosão

O estudo dos processos de corrosão requer a compreensão e a análise das variáveis envolvidas, uma vez que o comportamento corrosivo depende tanto das características dos materiais metálicos quanto das condições do meio ao qual estão expostos. Essa interação é influenciada ainda pelos diferentes tipos de operações ou tratamentos aos quais os metais são submetidos. Assim, o conhecimento sobre a compatibilidade entre materiais e ambientes corrosivos é fundamental para a seleção adequada de componentes e equipamentos, bem como para a previsão e mitigação dos mecanismos de deterioração (Fontana, 2021).

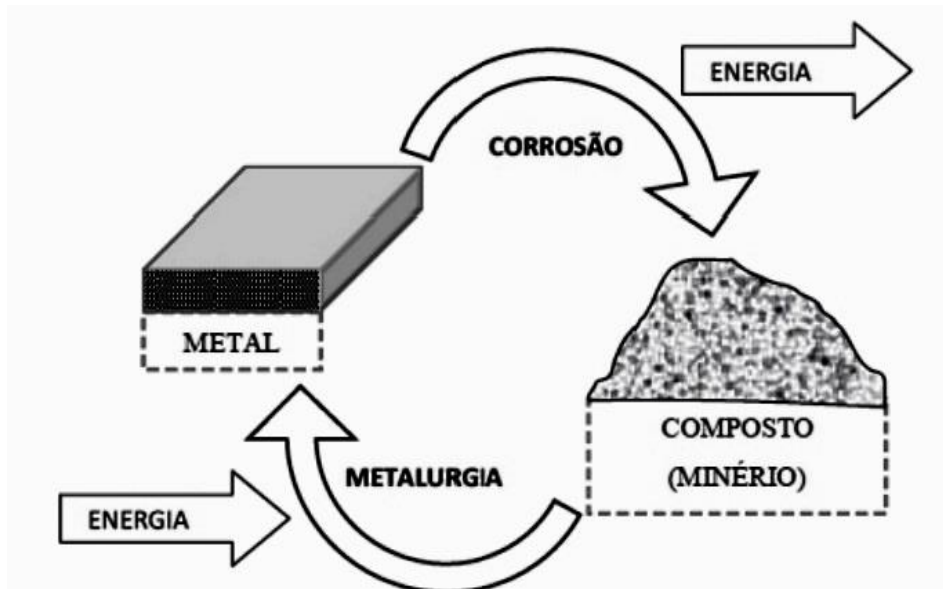
Os processos corrosivos podem ocorrer por meio de mecanismos químicos e/ou eletroquímicos. Nesses sistemas, determinadas substâncias atuam como fornecedoras de espécies iônicas, promovendo reações que liberam ou consomem energia, favorecendo a transferência de íons através de interfaces metálicas. Contudo esse fenômeno altera a cinética eletroquímica na superfície do metal, acelerando a degradação. Ambientes como água do mar, sistemas de refrigeração, solo com elevada concentração de sais ou, matéria orgânica e meios contaminados por micro-organismos são particularmente propícios à ocorrência desse tipo de corrosão (Sedricks, 2021).

Para que o processo de corrosão possa ser entendido, alguns conceitos básicos devem ser analisados. Inicialmente, consideremos a imersão de um metal M em uma solução contendo íons (solução eletrolítica). Este conjunto, metal/solução eletrolítica é conhecido como eletrodo e determina o estabelecimento de uma diferença de potencial entre as fases sólida e líquida. Esta ddp é simultaneamente de natureza elétrica e química e, devido a isto, se denomina diferença de potencial eletroquímico (Gentil, 2022).

O mecanismo de corrosão química, também denominado corrosão seca, caracteriza-se pela ausência de transporte de elétrons entre ânodo e cátodo, ocorrendo predominantemente por reações diretas entre o metal e substâncias oxidantes do meio. Esse tipo de corrosão manifesta-se, geralmente, em temperaturas elevadas, sendo comum em equipamentos industriais como caldeiras, fornos e reatores. Além disso, pode ocorrer em presença de compostos agressivos, como constituintes do ácido sulfúrico, solventes, agentes oxidantes e poluentes atmosféricos

que reagem com a superfície metálica ou mesmo com estruturas de concreto (Jones, 2021). A Figura 7 mostra o comportamento do metal como um ciclo, desde a sua origem até a transformação em óxido de ferro após o término da vida útil.

Figura 7 – Ciclo do metal no processo corrosivo



Fonte: Callister, (2020).

Os metais seguem um ciclo natural no qual, em seu estado original, encontra-se sob a forma de compostos minerais, como óxidos ou sulfetos. Para serem convertidos em metais utilizáveis, é necessário um processo de redução que exige elevado consumo energético, transformando-o em materiais metálicos, como o aço. No entanto, quando expostos ao meio ambiente, esses metais tendem a perder gradualmente a energia incorporada durante sua fabricação, reagindo com agentes oxidantes e retornando ao seu estado termodinamicamente estável, geralmente sob a forma de óxidos (Callister, 2020).

Os meios corrosivos devem ser amplamente compreendidos, pois exercem influência direta sobre a degradação dos materiais metálicos. Esses meios podem ter origem atmosférica, aquosa, terrestre ou química, apresentando diferentes graus de agressividade conforme suas características físico-químicas. A corrosão atmosférica é influenciada por fatores como umidade relativa do ar, temperatura, velocidade dos ventos, presença de gases, partículas e poluentes. De acordo com a intensidade e a frequência da umidade, esse tipo de corrosão pode ser classificado como seca, úmida ou molhada. O controle desses agentes é essencial para prevenir incrustações por sais e evitar riscos de explosões em sistemas industriais expostos a atmosferas agressivas (Fontana, 2021).

Nos meios aquosos, como a água do mar, a corrosão é intensificada pela presença de íons cloreto e magnésio, além de micro-organismos e compostos dissolvidos, que aumentam a condutividade elétrica e aceleram as reações eletroquímicas de oxidação. A presença de sais dissolvidos potencializa a corrosividade do meio ao favorecer o transporte iônico e o estabelecimento de diferença de potencial entre áreas metálicas (Jones, 2021). Portanto, a seleção de medidas preventivas deve considerar o tipo de corrosão predominante e as condições ambientais específicas a que o aço carbono ou outro material metálico estará exposto, visando prolongar sua vida útil e garantir a segurança operacional (Callister; Rethwisch, 2022).

3.3 Inibidores de corrosão

Inibidor de corrosão é uma substância química que, adicionada em concentrações baixas ao meio corrosivo, diminui significativamente a velocidade da corrosão de um material metálico sem necessariamente alterar de forma relevante a concentração dos agentes presentes (Zouarhi, 2023). Essa ação protetora ocorre pela interação do inibidor com o ambiente corrosivo, podendo atuar através de adsorção sobre a superfície metálica, formando filmes protetores ou películas passivantes, ou ainda por inibições das reações eletroquímicas envolvidas, tanto no ânodo quanto no cátodo (“Journal of coatings and research – springer”, 2018). Em termos funcionais, o inibidor reduz a taxa de corrosão servindo como uma barreira física ou química entre o metal e o meio corrosivo, retardando ou impedindo os processos de dissolução metálica ou as reações redox que promovem a degradação do metal (Răută; Matei; Avramescu, 2025). Do ponto de vista quantitativo, para que um composto seja considerado um inibidor de corrosão efetivo, espera-se que sua eficiência seja alcançada em concentrações relativamente baixas e que o efeito de proteção seja mensurável comparativamente a um sistema sem inibidor (Zouarhi, 2023). Uma definição mais recente sendo bastante citada de uma literatura clássica “inibidor é uma substância ou mistura de substâncias que, quando presente em concentrações adequadas, no meio corrosivo, reduz ou elimina a corrosão” (Gentil, 2022).

A aplicação de inibidores para proteger metais contra a corrosão tem se tornado cada vez mais comum, especialmente em ambientes industriais. Por isso, é fundamental compreender os fatores associados ao processo de corrosão no meio específico em que se atua, para assegurar que o inibidor seja utilizado de maneira eficiente e adequada (Verma et al., 2021).

Identificar a origem da corrosão é uma etapa crucial que guia a escolha do tipo de inibidor mais apropriado. Devem-se considerar os custos com o inibidor, de modo que estes não superem os prejuízos oriundos da corrosão (Zouarhi, 2023). Também é importante avaliar

as propriedades e o mecanismo de ação do inibidor selecionado, para verificar sua compatibilidade com o material que será exposto. Além disso, condições operacionais que influenciam a corrosão como presença de contaminantes, interação com o meio ambiente e toxicidade precisam ser bem controladas, falhas nesse controle tendem a comprometer os resultados esperados (Zouarhi, 2023).

3.3.1 Classificação dos inibidores da corrosão

São classificados de acordo com a composição das substâncias que podem ser de origem orgânica ou inorgânica, sintética ou natural, que desaceleram ou paralisam o fenômeno da corrosão em superfície metálica (Vasques, 2021). De uma forma mais clara, quando inseridos no substrato a ser tratado, interage com a superfície do metal onde ocorre a formação de uma película de espessura fina impedindo que o meio ou o ambiente corrosivo possa agredir, combatendo ou diminuindo a ação da corrosão. Assim, os inibidores de corrosão podem ser classificados, mas usualmente ou divididos como proteção anódicos, catódicos e de adsorção (Shansa *et al.*, 2020).

Os anódicos têm a capacidade de formar filmes aderentes que não se dissolve facilmente na superfície do metal, promovendo a polarização anódica, retardando ou bloqueando a oxidação no material pela reação anódica (Gentil, 2022). Quando os inibidores são introduzidos no sistema, eles interagem com os íons metálicos liberados no ânodo, promovendo reações que conduzem à formação de produtos de proteção. Frequentemente esses produtos envolvem hidróxidos metálicos formados pela hidrólise dos constituintes do inibidor ou pela precipitação com íons OH^- gerados localmente, os quais depositam-se na superfície do metal e atuam como uma camada passivante, reduzindo a taxa de dissolução anódica e a transferência de espécie corrosivas (Răută; Matei; Avramescu, 2025). Assim, se esses inibidores possuem uma concentração restrita, caso a proteção não se estenda por toda a superfície do material, o inibidor não consegue proteger toda a áreas da superfície deixando o metal susceptível a corrosão. Diante disso a concentração deverá ser criada de acordo com a concentração crítica. Este tipo de inibidor anódico se divide em dois tipos distintos, os oxidantes que são os cromatos e nitritos que por sua vez, os cromatos por serem agressivos ao meio ambientes são substituídos por substancias de menor agressividade ao meio ambiente e os do tipo não oxidante se tem os molibdatos que agem como inibidor de corrosão e são menos tóxicos ao meio ambiente (Gentil, 2022).

Os inibidores catódicos atuam reduzindo as reações no catodo, interferindo no processo de redução que ocorre na superfície metálica. Essas substâncias liberam ou disponibilizam íons

metálicos que interagem com íons hidroxila presente no meio, resultando na precipitação de compostos insolúveis sobre as regiões catódicas (Ahmed; Amin; Mohamed, 2024). Este filme protetor compõe-se muitas vezes de hidróxidos ou de outros sais metálicos insolúveis, bloqueando a difusão do oxigênio e inibindo o fluxo de elétrons, o que leva a um aumento significativo da polarização catódica e à atenuação de redução (Răută; Matei; Avramescu, 2025).

Os inibidores de adsorção atuam sobre os processos eletroquímicos da corrosão por meio da formação de uma película protetora sobre as regiões anódica e catódica do metal. Nesse grupo, destacam-se principalmente substâncias orgânicas apolares, capazes de se adsorver na superfície metálica e criar uma barreira física e química que reduz a taxa de reação corrosiva (Ahmed *et al.*, 2024).

A adsorção ocorre quando as moléculas do inibidor migram para a superfície do material, substituindo a camada de água previamente aderida ao metal. Esse processo favorece a interação entre as espécies do inibidor e o substrato metálico, promovendo uma camada compacta e aderente, que impede a difusão de íons agressivos e o contato direto com o eletrólito (Rajesh *et al.*, 2021). O Quadro 1 apresenta a relação das principais substâncias empregadas em diferentes tipos de inibidores, conforme (Fauda *et al.*, 2018). Estudos mais recentes ampliam esse entendimento ao descrever os modelos de adsorção, isoterma e parâmetros termodinâmicos associados à eficiência dos filmes orgânicos sobre superfícies metálicas, tanto em meios aquosos quanto salinos, consolidando os inibidores de adsorção como uma alternativa eficiente e sustentável na mitigação da corrosão (Ahmed *et al.*, 2024; Răută, 2025).

Quadro 1 – Inibidores químico da corrosão.

Anódico	Catódico	Adsorção
Hidróxidos-(OH ⁻)-	Sulfatos de zinco	Coloides
Carbonatos	Sulfato de magnésio	Sabões de metais pesado
Fosfato terciários de metais alcalinos	Sulfato de níquel	Subst. orgânicas c/ átomos de oxigênio
Silicato		

Fonte: Ahmed, (2024).

Os inibidores convencionais sintéticos, incluindo inibidores anódicos, catódicos, de adsorção ou mistos, são amplamente utilizados para controlar ataques químicos em meios ácidos e básicos (“Journal of coatings and research – springer”, 2018). No entanto no que se refere às alternativas naturais, não há sempre compostos bem estabelecidos ou comercialmente

viáveis que cumpram todos os mesmos critérios de desempenho (Barbu *et al.*, 2025). Muitos inibidores sintéticos apresentam desvantagens, alguns podem ser cancerígenos ou conter metais pesados, terem alta toxicidade ambiental, difícil degradação, e geralmente custo elevado (Zaher *et al.*, 2024). As camadas protetoras formadas por esses inibidores, em regra, não exibem ação antimicrobiana ou antioxidante, embora existam exceções: compostos com propriedades biológicas específicas podem também inibir microrganismos ou atuar como antioxidantes (Zaher *et al.*, 2024).

Diante dos impactos ambientais e toxicológicos associados a muitos inibidores químicos comerciais, cresceu o interesse por inibidores verdes, entre os quais se destacam óleos essenciais e extratos vegetais (Milad, 2024). Esses materiais naturais são atraentes por serem, em geral, mais sustentáveis, de baixo custo relativo e de fácil obtenção, além de conterem compostos, como terpenos, fenóis e compostos oxigenados capazes de se adsorver na superfície metálica e diminuir as taxas de corrosão. Por isso, diversos estudos têm testado extratos de frutas e óleos essenciais em metais imersos em meios agressivos, avaliando-se eficiência por ensaios eletroquímicos e por perda de massa (Holla *et al.*, 2024), os resultados frequentemente mostram que muitos extratos naturais funcionam como inibidores mistos (comportamento anódico/catódico) e podem atingir eficiências significativas dependendo da concentração e do método de extração (Al-Moubaraki *et al.*, 2022). No entanto, a aplicabilidade industrial ainda exige a atenção à padronização, estabilidade e viabilidade de escala desses inibidores verdes (Shwetha; Devendra, 2024).

3.4 Características dos óleos essenciais

Óleos essenciais são complexos de origem vegetal, aromáticos e altamente voláteis, cuja composição química natural é multifacetada. O termo “essenciais” deriva da “essência”, evocando sobretudo o aroma característico desses compostos (Acidi *et al.*, 2023). São extraídos de diferentes partes da planta mediante processos físicos, tais como destilação a vapor, destilação sob pressão reduzida, entre outros métodos (Verma *et al.*, 2024). Devido à sua estrutura química, que combina frações apolares (hidrofóbica) frequentemente compostas por hidrocarbonetos com frações polares (hidrofílicas) contendo grupos funcionais oxigenados ou aromáticos, os óleos essenciais podem adsorver-se sobre superfície metálicas, atuando como inibidores de corrosão (Dounia *et al.*, 2024).

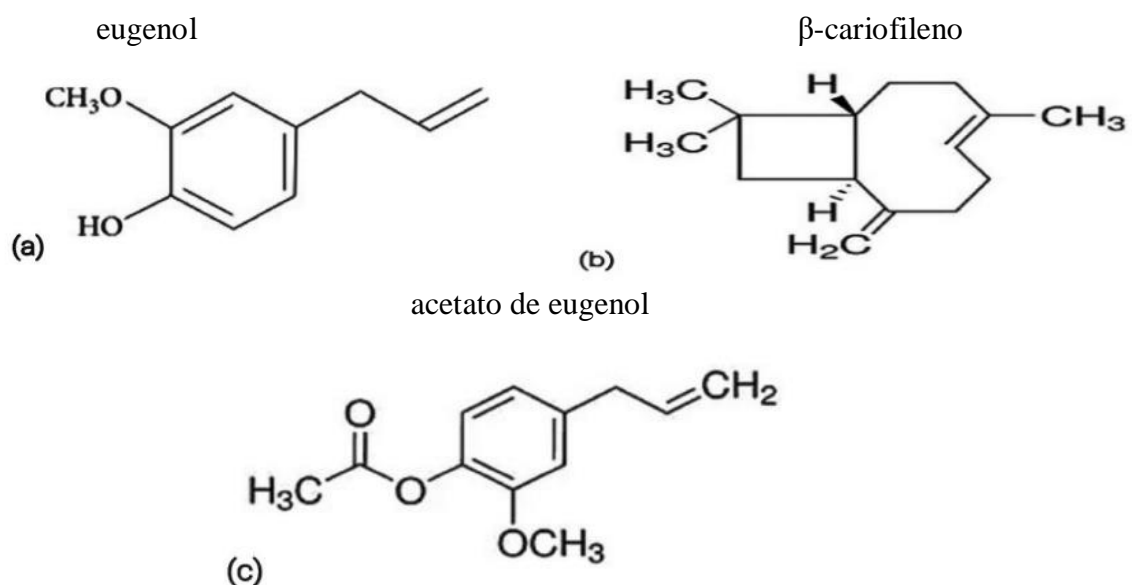
Pesquisas demonstram que a composição dos óleos essenciais pode variar significativamente segundo a espécie vegetal, condições climáticas, solo e manejo de cultivo. Essas variações influenciam tanto o rendimento do óleo quanto os constituintes químicos

majoritários, de modo que cultivadas sob diferentes regimes climáticos (temperatura, umidade, regime de pluviométrico, luminosidade) ou estações distintas produzem essências com perfis e compostos diferentes (Verma *et al.*, 2024). O crescente interesse acadêmico e industrial pelos óleos essenciais advém de suas múltiplas aplicações, potenciais e benefício associados, bem como do aumento de pesquisas que avaliam eficácia como inibidores de corrosão. Além disso, a busca por métodos verdes e sustentáveis fortalece a sua utilização, especialmente quando se demonstra como opção de substituir inibidores sintéticos mais tóxicos ou ambientalmente danosos (Ansari *et al.*, 2024).

3.5 (*Syzygium aromaticum*) e seus principais compostos

O botão floral do cravo-da-índia, (*Syzygium aromaticum*), pertence à família Myrtaceae e é originário do arquipélago das Molucas (província de Maluku), na Indonésia (Asri *et al.*, 2019). O Óleo essencial obtido dos botões florais apresenta uma mistura complexa de compostos orgânicos voláteis (Acidi *et al.*, 2023), entre esses constituintes, o eugenol destaca-se como componente majoritário, tipicamente correspondendo a uma parcela substancial do óleo relatado em alguns estudos entre ~60-90% dependendo da procedência, método de extração e estado de conservação (Maggini *et al.*, 2024) (Vasconcelos, 2024). Além do eugenol, outros compostos relevantes frequentemente identificados incluem β -cariofileno e acetato de eugenila (eugenyl acetate), os quais contribuem para o perfil aromático e para as propriedades biológicas do óleo (Silva *et al.*, 2024). A Figura 8 ilustra as estruturas moleculares básicas de (a) eugenol, (b) β -cariofileno e (c) acetato de eugenol, compostos responsáveis por grande parte da atividade biológica atribuída ao óleo essencial do cravo (Maggini *et al.*, 2024).

Figura 8 – Compostos químicos: óleo essencial do botão do cravo-da-índia



Fonte: Bakry apud Pandey, (2024).

A Figura 8a) apresenta a estrutura química do eugenol, um dos principais componentes de diversos óleos essenciais, especialmente do óleo essencial do botão do cravo-da-índia (OEBC), conhecido por sua ação antioxidante (Burt, 2024). A Figura 8b) mostra a estrutura química do β -cariofileno, constituinte presente do (OEBC). Por fim, a Figura 8c) exibe a estrutura química do acetato de eugenol, também denominado acetato de eugenila, outro composto característico desse óleo essencial (Acidi *et al.*, 2023).

3.6 Gravimetria de perda de massa

Entre os diversos métodos empregados para a análise e monitoramento da corrosão, a avaliação por perda de massa se distingue pela sua simplicidade operacional (Malaret, 2024). O procedimento consiste em expor cupons metálicos com massa e geometria previamente definida a uma solução de ensaio durante um intervalo de tempo determinado, de modo a quantificar a corrosão a partir da massa do metal que foi removida (Gin, 2024).

Para execução do ensaio, inicia-se com a preparação dos cupons, como limpeza, verificação das dimensões e pesagem de cada amostra. De acordo com a versão mais recente da norma ASTM G1-25 (2025), o processo de limpeza pode incluir a utilização de desengordurantes (solventes orgânicos ou detergentes alcalinos aquecidos), decapagem química ou a brasão mecânica. Em seguida, realiza-se enxágue, secagem com ar quente e armazenamento em dessecador para estabilização da amostra (Junior, 2020).

Decorrido o tempo de exposição definido, procede-se à observação da aparência dos cupons, registrando-se os depósitos formados, sua localização e natureza. Essas são informações relevantes para a interpretação do mecanismo corrosivo presente.

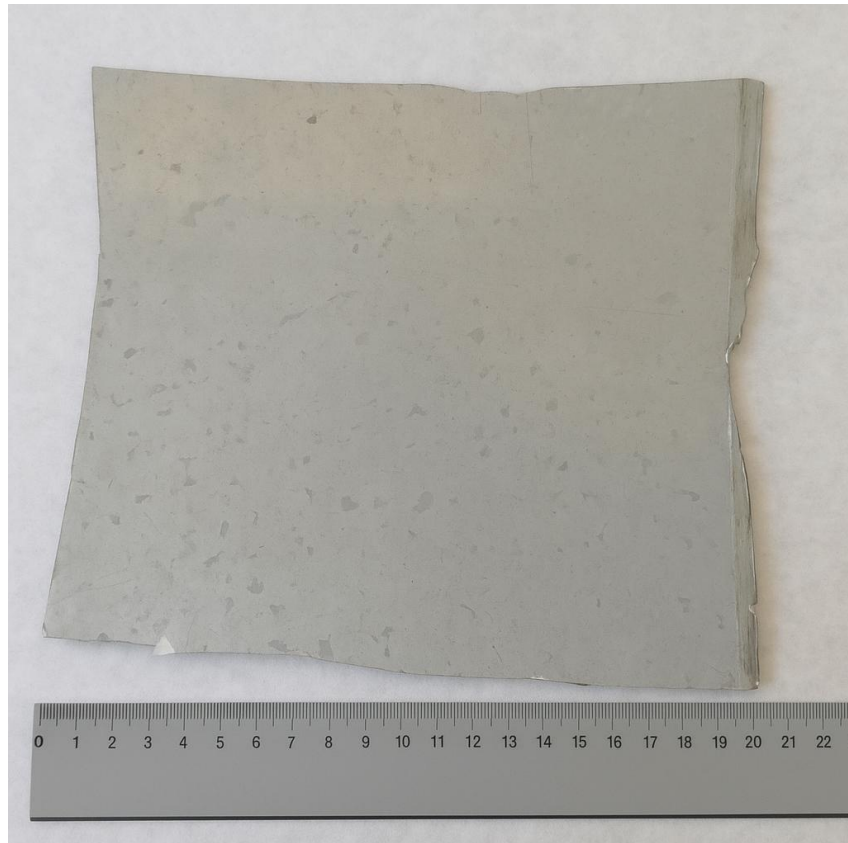
Antes de uma nova pesagem, aplica-se a limpeza final dos produtos de corrosão aderidos seguindo as normas ASTM G1-25 (2025), conforme os métodos recomendados pela norma, de modo a assegurar que a variação de massa corresponda apenas à remoção de metal sem a presença de óxido ou outros contaminantes (Ahmed *et al.*, 2024). A taxa de corrosão é então calculada a partir da diferença de massa do metal exposto, considerando-se também a área superficial, o tempo de exposição e a densidade do material de acordo com as fórmulas normalmente empregadas (Cruz, 2024).

4 MATERIAIS E METODOS

4.1 Obtenção dos materiais

A chapa metálica de aço carbono empregada na pesquisa foi obtida em uma distribuidora comercial localizada na capital paraense. A Figura 9 apresenta a imagem da referida chapa, classificada pela distribuidora como aço de baixo carbono.

Figura 9 – Chapa metálica utilizada para a confecção dos cupons



Fonte: Elaborado pela autora, (2025).

A chapa metálica utilizada na pesquisa constitui um dos principais materiais de estudo, em razão de sua ampla aplicação em diferentes setores, como o industrial, automotivos, de fabricação de ferramentas e na construção civil. Além disso, esse material apresenta boa disponibilidade comercial e baixo custo, características que justificam sua utilização (Compraco, 2025).

O ácido acético utilizado para a limpeza da superfície metálica do aço carbono foi adquirido em estabelecimento comercial, sendo empregado com a finalidade de remover a proteção galvânica e impurezas, garantindo uma superfície adequada para os ensaios.

O óleo essencial proveniente dos botões florais de (*Syzygium aromaticum*), da marca terra flor, e o ácido clorídrico (HCl) da marca NEON, contendo concentração de 37%, também

foram adquiridos comercialmente. A Figura 10, na imagem 10a), o óleo essencial do botão do cravo-da-índia e na imagem 10b), apresenta o processo de preparação da solução de (HCl 1,0 mol L⁻¹), realizado sob a capela do Laboratório de Química da Universidade Federal do Pará (UFPA).

Figura 10 – Óleo essencial (OEBC) e Ácido clorídrico (HCl)



Fonte: Elaborado pela autora, (2025).

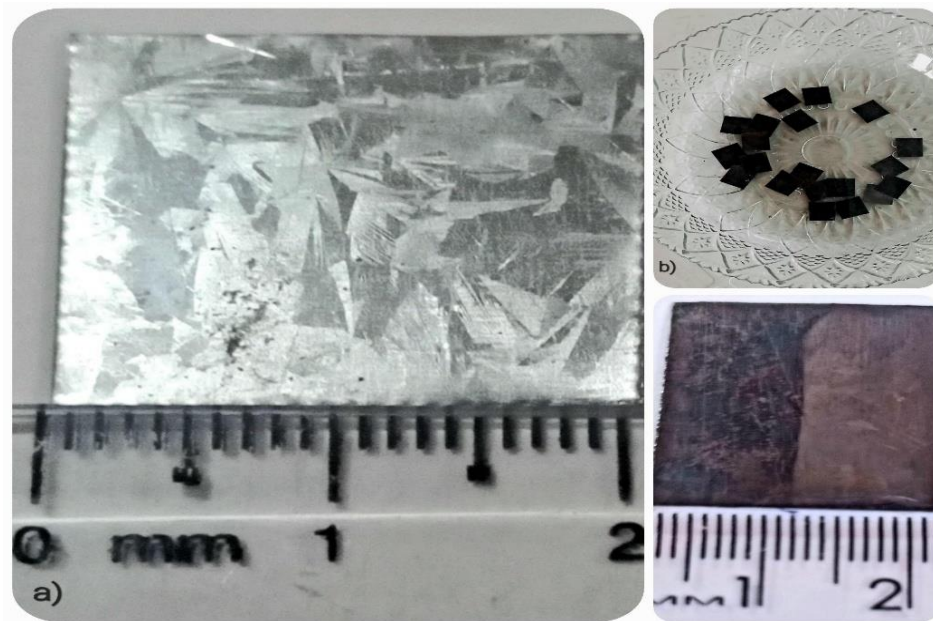
Os materiais empregados na presente investigação foram essenciais para testar a capacidade do óleo essencial do botão do cravo-da-índia como inibidor natural da corrosão do aço carbono, as amostras metálicas foram simultaneamente submetidas a ataque químico em solução de ácido clorídrico.

4.2 Método e Procedimento experimental

O método experimental adotado foi o de gravimetria por perda de massa. Nesta técnica, os cupons metálicos foram pesados antes e após a exposição ao meio corrosivo, a diferença de massa permite quantificar a corrosão macroscópica e calcular a taxa de corrosão e a eficiência de inibição através das fórmulas que estão nos subtópicos 4.2.1 e 4.2.2.

Antes dos cálculos, os cupons de aço carbono foram submetidos ao processo de decapagem a partir do ácido acético por um período de 12 h, com o intuito de retirar a camada protetora de galvanização para substituí-la pelo óleo essencial do botão do cravo-da-índia. A Figura 11, mostra os cupons no processo de decapagem.

Figura 11 – Cupons antes e após a decapagem



Fonte: Elaborado pela autora, (2025).

Para a realização dos ensaios houve a necessidade de codificar os corpos e prova em conformidade às concentrações do óleo essencial do botão do cravo-da-índia, para os dois intervalos de tempo 24 h e também 7 dias. A Tabela 2 mostra as codificações dos cupons com a sigla do óleo essencial (*Syzygium aromaticum*) e as concentrações em g/L.

Tabela 2 – Códigos dos cupons referente às concentrações (OEBC) de 24 horas e 7 dias.

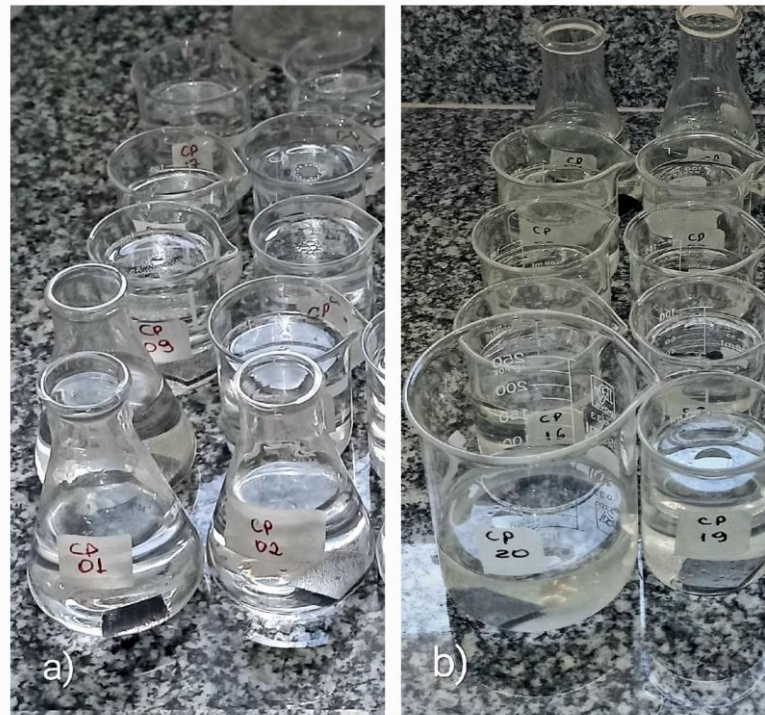
Códigos das amostras	Concentrações em g/L (OEBC)
OEBC - 0	Branco
OEBC - 1	0,5
OEBC - 2	1,0
OEBC - 3	2,0
OEBC - 4	4,0

Fonte: Elaborado pela autora, (2025).

O ataque químico dos corpos de prova foi realizado utilizando solução de ácido clorídrico, com o objetivo de induzir o processo de corrosão. Algumas amostras foram submetidas a diferentes concentrações do óleo essencial (*Syzygium aromaticum*), em quanto uma amostra foi mantida isenta do inibidor, servindo como referência para análise inicial

macroscópica da eficiência de inibição. A Figura 12 apresenta as imagens dos sistemas experimentais após os períodos de exposição em 24 h e em 7 dias.

Figura 12 – Ensaio gravimétrico de perda de massa

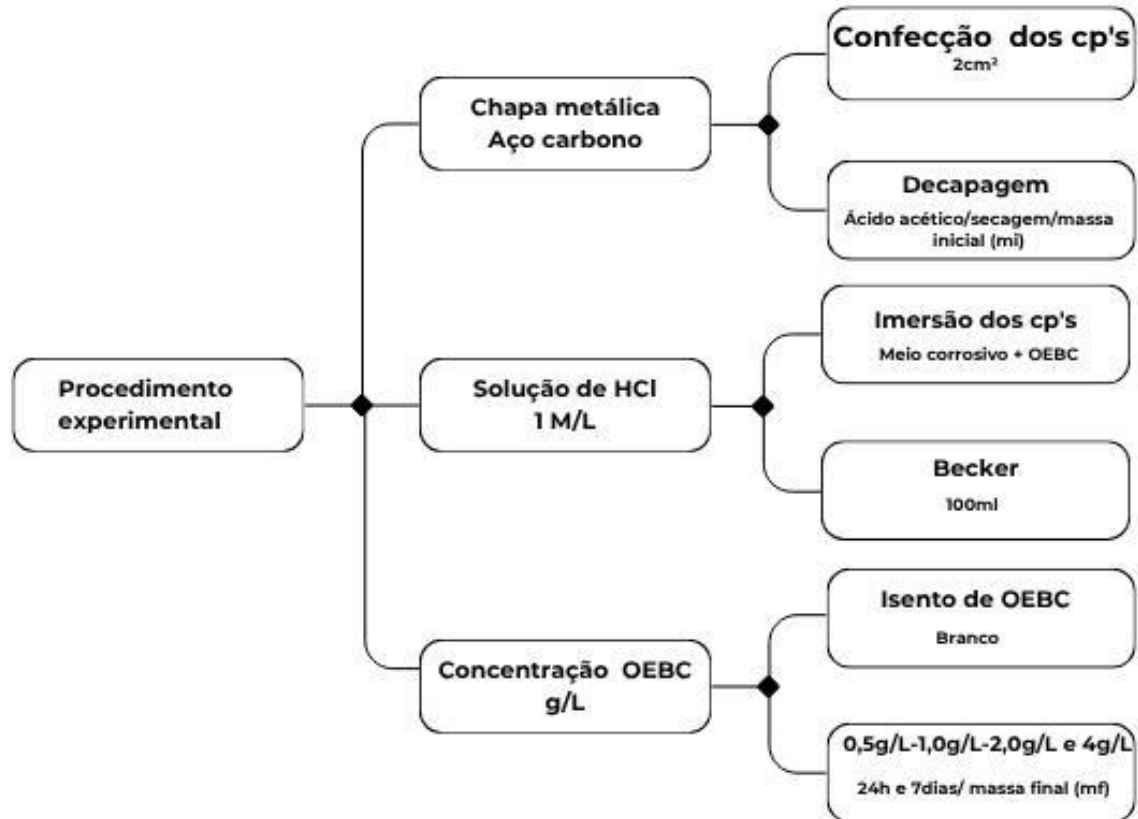


Fonte: Elaborada pela autora, (2025).

Os sistemas experimentais utilizados nos ensaios gravimétricos foram elaborados em conformidade com as normas pertinentes para a determinação da perda de massa. Nas amostras, as concentrações do inibidor, óleo essencial (*Syzygium aromaticum*), foram aplicadas sobre a superfície dos corpos de prova, previamente preparados, e em seguida imersos em 100 ml de solução de ácido clorídrico. A Figura 12a) apresenta o sistema após 24 h de exposição, enquanto a Figura 12b) exhibe o sistema após 7 dias de imersão.

Após os períodos de exposição, os corpos de prova foram removidos do sistema, lavados e submetidos à secagem superficial. Em seguida, procedeu-se à secagem completa em estufa, mantida a uma temperatura aproximada entre 80 e 100 °C, durante 30 minutos. Posteriormente, as massas finais (mf) dos corpos de prova foram determinadas utilizando uma balança analítica. Na Figura 13 mostra todo o procedimento referente a pesquisa.

Figura 13 – Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: Elaborado pela autora, (2025).

Ao término do ensaio de gravimetria de perda de massa, foram realizadas as análises da taxa de corrosão (TC) e da eficiência de inibição (EI), para a determinação do percentual de inibição do (OEBC). As fórmulas utilizadas para os cálculos da (TC) e (EI), estão presentes nos tópicos a seguir.

4.2.1 Equação da taxa de corrosão-(TC)

Os cálculos da taxa de corrosão relacionados aos cp's, a partir das massas iniciais e massas finais conforme as concentrações do (OEBC), obtidas através das equações:

$$TC \left(\frac{\text{mg}}{\text{cm}^2\text{h}} \right) = \frac{\Delta m}{A \cdot t} \quad (5)$$

Ou

$$TC \left(\frac{\text{mm}}{\text{ano}} \right) = 87,6 \frac{\Delta m}{D \cdot A \cdot t} \quad (6)$$

Em que,

Δm (mg): é a diferença do peso do corpo de prova antes e depois de ser imerso na solução;

A: área do corpo de prova (cm²);

t: período de tempo em horas (h);

D: densidade do metal em g/cm³) e

87,6: o fator de conversão.

4.2.2 Equação da Eficiência de inibição – (EI) (%)

A partir das médias das massas inicial e massa final conforme as concentrações do OEBC, foram realizados os cálculos por meio da expressão a seguir:

$$E.I (\%) = \left(\frac{M_b - M_c}{M_b} \right) \times 100 \quad (7)$$

Sendo que,

EI: eficiência do inibidor;

M_b: perda de massa do cp sem inibidor (Branco) e

M_c: perda de massa do cp com inibidor

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Características do aço carbono após ensaio gravimétrico em 24h.

O (OEBC) foi avaliado como um inibidor natural de corrosão, utilizando-se o ensaio gravimétrico para quantificar a perda de massa, determinar a taxa de corrosão e calcular o percentual de inibição em ambientes ácidos.

Esses ensaios permitiram observar de forma detalhada a eficácia do (OEBC) na proteção da superfície do aço carbono, evidenciando a formação de uma camada protetora que reduz a intensidade do ataque corrosivo.

A Figura 14 apresenta a comparação do corpo de prova tratado com 2,0 g/L de (OEBC) após 24 horas de imersão na solução ácida, destacando a diferença visual em relação aos corpos de prova sem inibidor. Os resultados indicam que mesmo em curtos períodos de exposição, o (OEBC) demonstra ação significativa na redução da corrosão, sugerindo seu potencial como inibidor natural eficiente em soluções ácidas.

Figura 14 – Os cp's antes e após ataque corrosivo isento e com (OEBC) período 24 h



Fonte: Elaborado pela autora, (2025).

O aspecto visual das amostras de aço carbono evidencia o efeito do (OEBC) como inibidor de corrosão. Na Figura 14a), observa-se o aço carbono ileso, sem alterações na superfície. Já a Figura 14b) mostra o corpo de prova sem proteção do (OEBC), submetido ao ataque corrosivo, apresentando sinais visíveis de degradação. Por sua vez, a Figura 14c) apresenta o corpo de prova que, além de ter sido exposto ao ácido, foi tratado com (OEBC),

demonstrando menor degradação superficial. Esses resultados indicam que o (OEBC) exerce efeito inibidor significativo sobre a corrosão do aço carbono, mesmo em um período relativamente curto de 24 horas (Bhardwaj e Rahimi, 2022).

5.2 Resultados da (EI) do (OEBC) e (TC) do aço carbono após 24h

As análises quantitativas, realizadas por meio dos cálculos da taxa de corrosão (TC) e da eficiência de inibição (EI) do (OEBC), permitiram avaliar o desempenho do inibidor após 24 horas de exposição. A Tabela 3 apresenta os percentuais de inibição obtidos para os corpos de prova testados em diferentes concentrações de (OEBC), bem como os valores correspondentes da (TC) no período estudado.

Tabela 3 – Resultados da (EI) e (TC) do período de 24h.

Códigos das amostras	Composição do (OEBC) Em g/L	Eficiência de inibição (EI) Em %	Taxa de corrosão (TC) Em MPY
OEBC - 0	Branco	-	1,929583
OEBC - 1	0,5 g/L	85 %	0,190885
OEBC - 2	1,0 g/L	92 %	0,101042
OEBC - 3	2,0 g/L	93,3 %	0,084375
OEBC - 4	4,0 g/L	92,5 %	0,094792

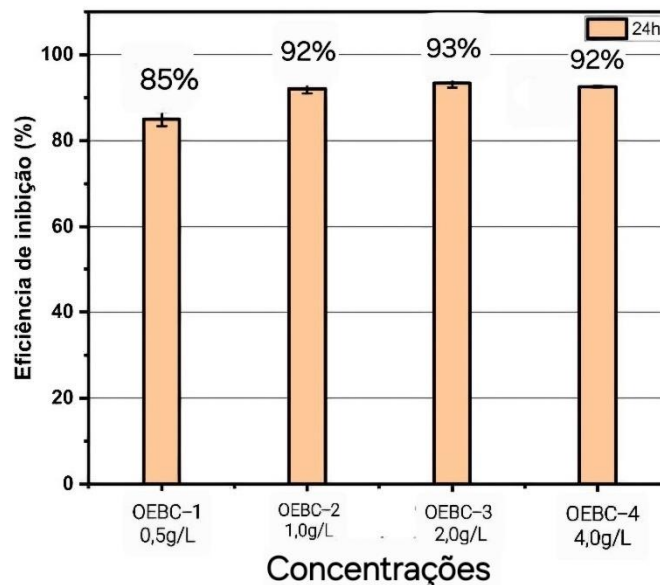
Fonte: Elaborado pela autora, (2025).

Os resultados indicam que o (OEBC) apresentou eficiência crescente com o aumento da concentração, refletindo diretamente na redução da taxa de corrosão. Essa tendência corrobora os dados visuais observados nas Figuras 14a) e 14c), evidenciando que o (OEBC) atua de forma eficaz na proteção da superfície do aço carbono frente ao ataque corrosivo em meio ácido (Endo *et al.*, 2012).

De acordo com os valores apresentados na Tabela 3, a amostra que apresentou melhor desempenho foi aquela tratada com a concentração de 2,0 g/L de (OEBC), alcançando uma eficiência de inibição de 93,3%. A Figura 15 apresenta o gráfico da eficiência de inibição para o período de 24 horas, incluindo os percentuais, permitindo visualizar claramente a superioridade do desempenho da amostra com 2 g/L em relação às demais concentrações

testadas. Esses resultados confirmam a eficácia do (OEBC) como inibidor de corrosão em soluções ácidas, reforçando seu potencial aplicação como agente protetor natural em aço carbono (Muller *et al.*, 2022; Soares *et al.*, 2025 e Felipe *et al.*, 2013).

Figura 15 – Gráfico da eficiência de inibição no período de 24h.

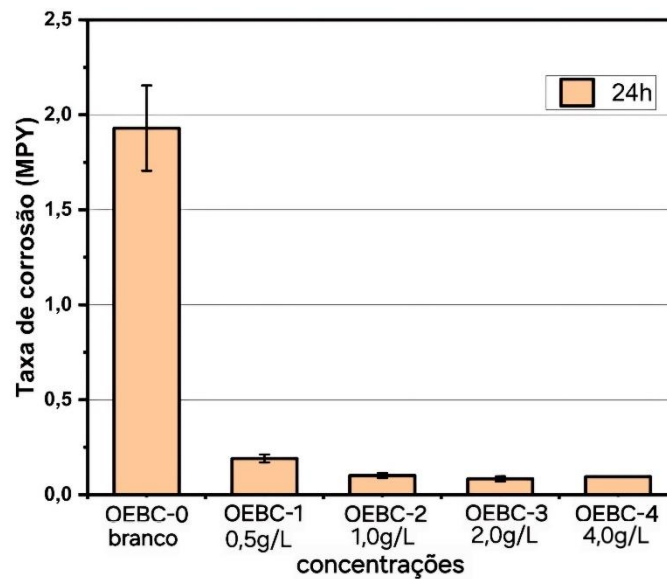


Fonte: Elaborado pela autora, (2025).

A análise do gráfico da eficiência de inibição (EI) evidencia a diferença no percentual de proteção entre a concentração mais baixa de 0,5 g/L e as concentrações mais elevadas de 1,0 g/L, 2,0 g/L e 4,0 g/L, que variou entre 7% e 8,3%. Isso indica que, acima de 0,5 g/L, o aumento da concentração do (OEBC) proporcionou apenas melhorias marginalmente adicionais, sugerindo que a eficiência do inibidor se aproxima de um limite máximo em concentrações com a mais altas.

A taxa de corrosão (TC), expressa em (MPY), também corrobora esses resultados. A Figura 16 apresenta a comparação visual, em gráfico de barras, entre os corpos de prova isentos de (OEBC) e aqueles tratados com o inibidor durante o período de 24 horas. Observa-se claramente que os corpos de prova protegidos pelo (OEBC) apresentaram uma redução significativa na taxa de corrosão em relação aos não protegidos, reforçando a efetividade do inibidor em curto prazo (Hossain *et al.*, 2020 e Bathily *et al.*, 2021).

Figura 16 – Taxa de corrosão do período de 24 h



Fonte: Elaborado pela autora, (2025).

No gráfico da Figura 16, as amostras foram codificadas da seguinte forma: (OEBC-0) corresponde ao corpo de prova sem (OEBC), (OEBC-1) com 0,5 g/L, (OEBC-2) com 1,0 g/L, (OEBC-3) com 2,0 g/L e (OEBC-4) com 4,0 g/L. Observa-se que o corpo de prova tratado com 2,0 g/L de (OEBC) (OEBC-3) apresentou o melhor desempenho, registrando a menor diferença na taxa de corrosão, de 0,08 (MPY), em comparação ao corpo de prova isento de inibidor (OEBC-0) e às demais amostras tratadas com (OEBC). Esses resultados indicam que a concentração de 2,0 g/L é suficiente para alcançar alta eficiência de proteção do aço-carbono em soluções ácidas (Lahhit *et al*, 2019).

5.3 Características do aço carbono após ensaio gravimétrico de 7 dias

Para o período de 7 dias, foram avaliadas as mesmas concentrações de (OEBC) utilizadas no ensaio de 24 horas. A Figura 17 apresenta um comparativo visual das amostras de aço carbono: o estado inicial antes do ataque corrosivo em solução de (HCl 1,0 mol L⁻¹), os corpos de prova submetidos ao ataque sem proteção do (OEBC) e aqueles tratados com (OEBC). Observa-se que, mesmo após sete dias de exposição, os corpos de prova protegidos pelo (OEBC) apresentaram menor degradação superficial em comparação aos corpos de prova sem inibidor, evidenciando a eficácia prolongada do (OEBC) como agente de proteção contra corrosão em ambiente ácido (Ouachikh *et al*, 2009 e Daoudi *et al.*, 2022).

Figura 17 - Aço carbono antes e após ataque corrosivo com e sem (OEBC) 7 dias



Fonte: Elaborado pela autora, (2025).

A comparação visual apresentada na Figura 17 evidencia a eficácia do (OEBC), destacando o corpo de prova tratado com 4,0 g/L, que apresentou excelente desempenho na proteção contra corrosão.

Em contraste, o corpo de prova sem inibidor sofreu corrosão agressiva, comprometendo aproximadamente mais de 50% de sua superfície, o que demonstra a severidade do ataque em ausência do (OEBC).

As variações nos percentuais de inibição e na taxa de corrosão para o período de 7 dias estão apresentadas na Tabela 4, com os dados provenientes das análises realizadas. Esses resultados indicam que, mesmo em exposições prolongadas, o (OEBC) mantém alta eficiência, especialmente em concentrações maiores, confirmando sua capacidade de proteção sustentada do aço carbono em meio ácido (Rekkab *et al.*, 2012).

Tabela 4 – Resultados da (EI) e (TC) do período de 7 dias.

Código das amostras	Composição do (OEBC)	Eficiência de inibição (EI)	Taxa de corrosão (TC)
	Em g/L	Em %	Em MPY
OEBC - 0	Branco	-	29,2244
OEBC - 1	0,5 g/L	90,8 %	2,665476
OEBC - 2	1,0 g/L	94,6 %	1,566667
OEBC - 3	2,0 g/L	95,8 %	1,203571
OEBC - 4	4,0 g/L	96,9 %	0,918452

Fonte: Elaborado pela autora, (2025).

Os valores percentuais de eficiência de inibição (EI) observados no período de 7 dias mostraram aumento proporcional ao crescimento da concentração de (OEBC). Isso indica que concentrações mais elevadas do inibidor proporcionam uma proteção mais eficaz e contínua da superfície do aço carbono frente ao ataque corrosivo em solução ácida (Bathily *et al.*, 2021 e Lahhiti *et al.*, 2019).

5.4 Resultados da (EI) do (OEBC) e (TC) do aço carbono após 7 dias

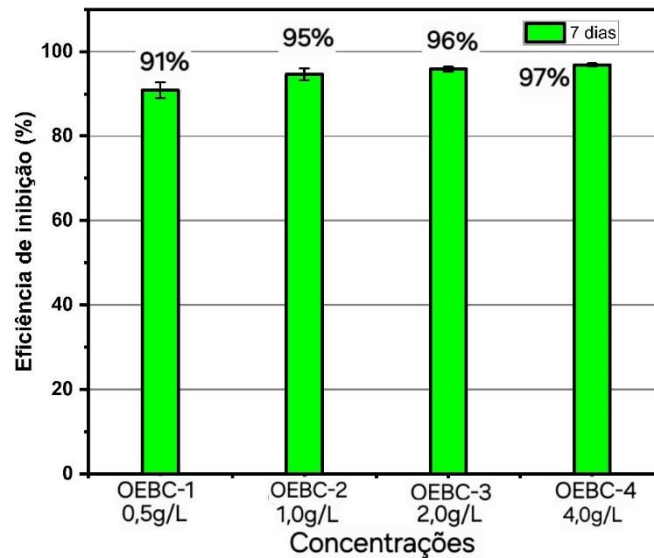
Na Figura 18, o gráfico apresenta a eficiência de inibição (EI) das amostras durante o período de 7 dias. Observa-se um crescimento gradativo da (EI) com o aumento da concentração de (OEBC), evidenciando que concentrações mais elevadas proporcionam maior proteção ao aço carbono em meio ácido.

Esses resultados confirmam a tendência observada nos dados gravimétricos e visuais, demonstrando a eficácia contínua do inibidor ao longo do tempo.

A diferença no percentual de inibição entre as menores concentrações de (OEBC), 0,5 g/L e 1,0 g/L, foi de 3,8%, enquanto entre as concentrações maiores, 2,0 g/L e 4,0 g/L, a diferença foi mínima, cerca de 1%, atingindo percentuais de 95,8% e 96,9%, respectivamente.

Esses dados indicam que, acima de 2,0 g/L, o aumento da concentração do (OEBC) proporciona apenas melhorias marginalmente adicionais na proteção do aço carbono (Muller *et al.*, 2022).

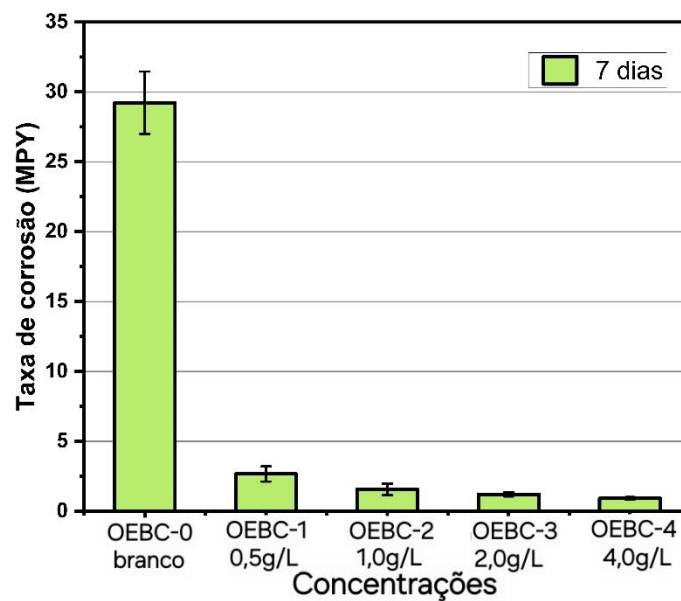
Figura 18 – Gráfico da eficiência de inibição do período de 7 dias



Fonte: Elaborado pela autora, (2025).

A Figura 19 apresenta a taxa de corrosão (TC) para o período de 7 dias, confirmando os resultados da eficiência de inibição por meio da perda de massa, expressa em mils por ano (MPY). O gráfico evidencia claramente a redução significativa da taxa de corrosão nas amostras protegidas pelo (OEBC) em comparação aos corpos de prova sem inibidor, reforçando a eficácia contínua do (OEBC) em condições de exposição prolongada (Bathily *et al.*, 2021).

Figura 19 – Gráfico da taxa de corrosão (MPY) do período de 7 dias.



Fonte: Elaborado pela autora, (2025).

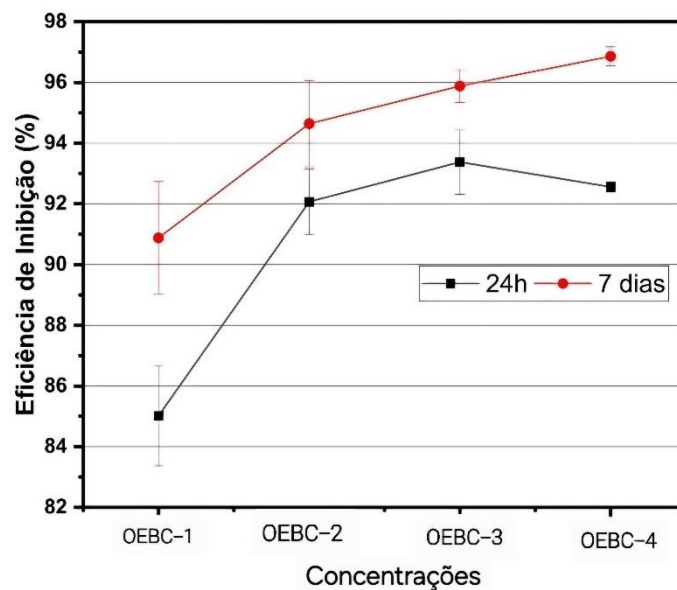
O gráfico da taxa de corrosão para o período de 7 dias reafirma a eficiência do (OEBC) como inibidor de corrosão.

Os corpos de prova foram submetidos a um tempo de exposição mais prolongado do que o ensaio de 24 horas, e observou-se que a (TC) diminuiu à medida que a concentração de (OEBC) aumentou. O corpo de prova tratado com 4,0 g/L de (OEBC) (OEBC-4) apresentou a menor taxa de corrosão durante o período de 7 dias, demonstrando a eficácia do inibidor em fornecer proteção sustentada do aço carbono em solução ácida (Lahhit *et al*, 2019).

5.5 Comparativo dos resultados após 24h e 7 dias da (EI) e (TC)

A figura 20, em que mostra o gráfico sobre comportamento dos cp's no período de 24h e 7 dias em relação a EI.

Figura 20 - Gráfico comparativo da (EI) dos cps com (OEBC) nos tempos de 24h e 7 dias.



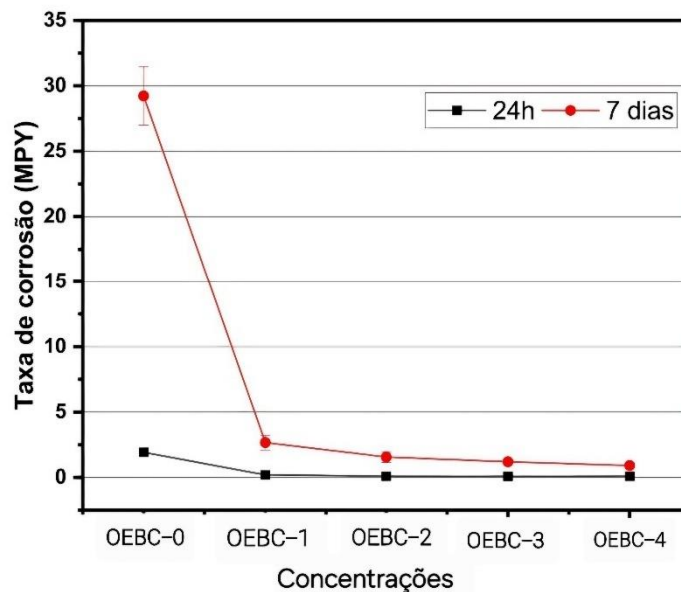
Fonte: Elaborado pela autora, (2025).

O gráfico apresenta a análise da eficiência de inibição (EI) dos corpos de prova em função das concentrações de (OEBC), codificadas da seguinte forma: (OEBC-1) 0,5 g/L, (OEBC-2) 1,0 g/L, (OEBC-3) 2,0 g/L e (OEBC-4) 4,0 g/L. De maneira geral, tanto no período de 24 horas quanto no de 7 dias, os corpos de prova com a menor concentração 0,5 g/L apresentaram a eficiência mais baixa em ambos os ensaios. As concentrações intermediárias 1,0 g/L e 2,0 g/L mostraram pouca diferença entre si, indicando praticamente estabilidade na eficiência de inibição ao longo do tempo. Para a maior concentração 4,0 g/L, observou-se uma ligeira queda na (EI) após 24 horas, enquanto no período de 7 dias ocorreu um aumento na eficiência.

Uma análise mais detalhada indica que a amostra com 2,0 g/L apresentou maior (EI) do que a de 4,0 g/L, possivelmente devido à forma como as concentrações foram aplicadas nas superfícies dos corpos de prova. No caso da amostra com 4,0 g/L no ensaio de 24 horas, a aplicação não cobriu totalmente a superfície do aço carbono, influenciando o resultado e ocasionando uma redução no percentual de (EI), apesar de se tratar da maior concentração utilizada. Esse fato evidencia a importância da uniformidade na aplicação do inibidor para garantir a máxima proteção do substrato.

A comparação das taxas de corrosão (TC) em (MPY) para os dois períodos de exposição é apresentada na Figura 21. Observa-se uma diferença significativa entre os corpos de prova sem (OEBC) (branco) e aqueles protegidos pelo inibidor, evidenciando a eficácia do (OEBC) na redução da corrosão do aço carbono em ambos os períodos avaliados (Ouachikh *et al.*, 2009; Daoudi *et al.*, 2022 e Rekkab *et al.*, 2012).

Figura 21 – Gráfico comparativo da (TC) dos cps com e sem (OEBC) dos períodos de 24h e em 7 dias



Fonte: Elaborado pela autora, (2025).

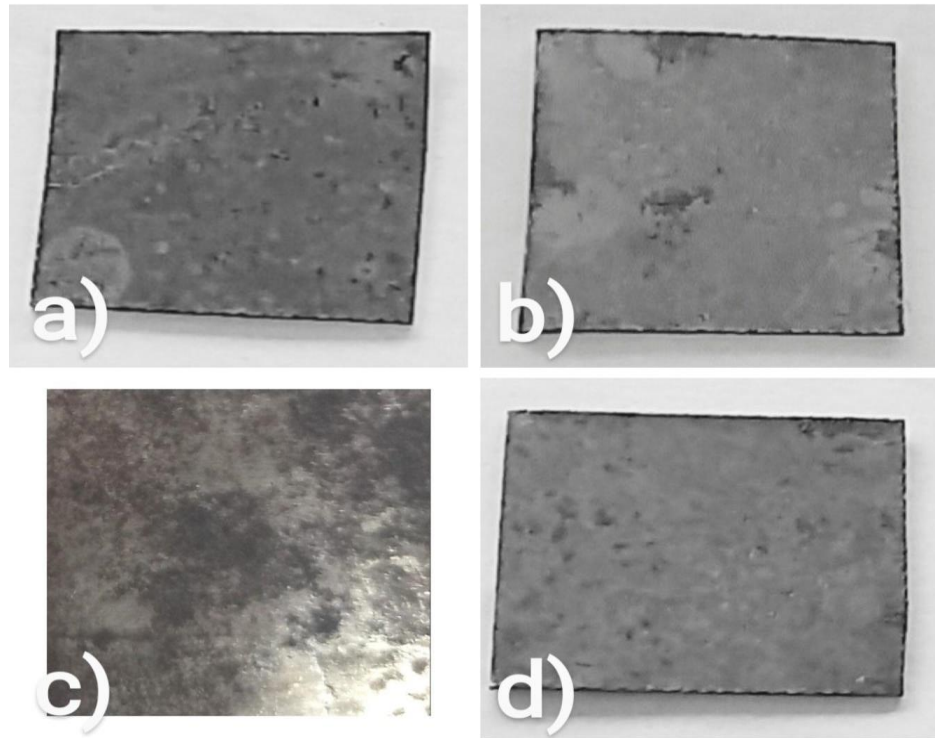
O gráfico das formulações, que apresenta as taxas de corrosão (TC) para os dois períodos de ensaio com base nos cálculos realizados, mostra que o corpo de prova sem (OEBC) (OEBC-0), submetido a ataque em solução ácida de (HCl 1,0 mol L⁻¹), apresentou (TC) de 1,9 (MPY) para 24 horas e 29,2 (MPY) para 7 dias.

As demais amostras tratadas com (OEBC) mostraram estabilidade na (TC) durante o período de 24 horas. Para o período de 7 dias, observou-se uma redução gradual da (TC)

conforme o aumento da concentração de (OEBC), indicando maior proteção do aço carbono em concentrações elevadas do inibidor.

Foram preparados 20 corpos de prova para os ensaios, e as Figuras 22 e 23 apresentam imagens das amostras que obtiveram melhores desempenho em termos de eficiência de inibição e menor taxa de corrosão.

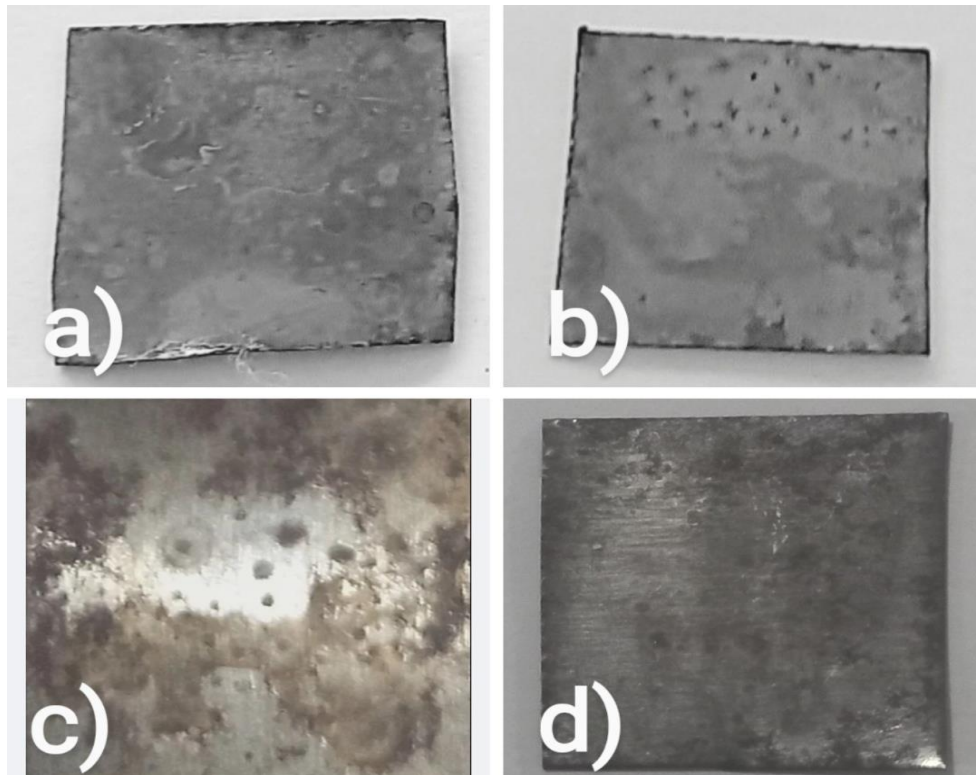
Figura 22 - Cp's com 2,0 g/L de OEBC 24h



Fonte: Elaborado pela autora, (2025).

Nos corpos de prova foi possível observar macroscopicamente a presença de pigmentos do óleo essencial *Syzygium aromaticum* (OEBC) aderidos à superfície do aço carbono. O contato do (OEBC) com os substratos metálicos evidencia a formação de uma camada protetora, a qual contribuiu para a mitigação do processo corrosivo demonstrando de forma visual a eficiência do inibidor natural aplicado (Hossain *et al.*, 2020; Bathily *et al.*, 2021 e Lahhit *et al.*, 2019).

Figura 23 – Cp's com 4,0g/L OEBC 7 dias.



Fonte: Elaborado pela autora, (2025).

O óleo essencial do botão do cravo-da-Índia (*Syzygium aromaticum*) apresentou bom desempenho ao longo do período de 7 dias. Os resultados indicam que quanto maior o tempo de contato da superfície do aço carbono com o inibidor, maior é sua capacidade de proteção, evidenciando que o (OEBC) forma uma barreira mais estável e duradoura contra a corrosão em meio ácido (Daoud *et al.*, 2022).

5.6 Comparativo de pesquisas realizadas de inibidores com menor (EI)

A busca por inibidores de corrosão naturais tem se intensificado nos últimos anos, motivada pelo interesse em alternativas mais sustentáveis e de menor custo. Pesquisadores realizam estudos contínuos com diferentes óleos essenciais, avaliando seu potencial como agentes de proteção contra a corrosão em metais. A Tabela 5 apresenta resultados de pesquisas que evidenciam a variedade de fontes naturais investigadas e seus respectivos desempenhos como inibidores de corrosão (Bhardwaj, 2022 e Rahimi, 2022).

Tabela 5 – Resultados de pesquisas realizadas sobre inibidores naturais da corrosão em metais

Autor (s) ano	OE	Resultados (EI) %	Metal/liga	Meio corrosivo
OBOT et al., 2021	Óleo essencial laranja-doce (<i>Citrus sinensis</i>)	80%	Aço carbono	HCl 1,0 mol.
ZAHER et al., 2024	Óleo essencial ammi visnaga	83%	Aço carbono	HCl 1,0 mol.
CORDEIRO; PAULA, 2025.	Óleo essencial do botão do cravo-da-índia	97%	Aço carbono	HCl 1,0 mol. L ⁻¹

Fonte: adaptado autora, 2025.

A comparação dos resultados entre os óleos essenciais de laranja-doce (*Citrus sinensis*), ammi visnaga e botão do cravo-da-índia (*Syzygium aromaticum*) evidencia diferenças significativas na eficiência de inibição em aço carbono ao meio de (HCl 1,0 mol L⁻¹). Assim observa-se na Tabela 5, que todos os óleos apresentam desempenho satisfatório como inibidores naturais, porém o óleo essencial do botão do cravo-da-índia se destacou por demonstrar maior eficiência anticorrosiva, sugerindo maior potencial para aplicação industriais além de serem ambientalmente sustentáveis.

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados, é possível concluir que o óleo essencial do botão do cravo-da-índia (*Syzygium aromaticum*) apresenta desempenho significativo como inibidor natural da corrosão para o aço carbono em ambientes ácidos.

A elevada eficiência de inibição, especialmente na concentração com 4,0 g/L após 7 dias de exposição em ácido clorídrico, evidencia a formação de uma barreira de proteção eficaz sobre a superfície do aço reduzindo de maneira expressiva a taxa de corrosão.

Observou-se uma relação direta entre o aumento da concentração do óleo essencial e a diminuição relativa da taxa corrosiva, indicando a atuação favorável dos compostos ativos presentes no (OEBC).

Assim, o estudo demonstra o potencial de aplicação do óleo essencial do botão do cravo-da-índia como uma nova alternativa sustentável e ambientalmente segura, na proteção de metais em ambientes ácidos.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante das limitações nesta pesquisa, recomenda-se as seguintes abordagens:

- Caracterização morfológica das amostras por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a fim de identificar o tipo de corrosão predominante nas superfícies metálicas;
- O monitoramento de potencial Hidrogeniônico (pH) da solução para o entendimento da influência da acidez na interação entre o metal e o inibidor;
- Realizar pesquisas com maiores intervalos de tempo, diferentes concentrações do ácido clorídrico e do (OEBC);
- Aplicação de técnicas eletroquímicas, como análise de curvas de polarização para confirmar os resultados dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ACIDI, A. et al. Examination of the main chemical components of essential oil of *Syzygium aromaticum* as a corrosion inhibitor on the mild steel in 0.5 M HCl medium. **Journal of Molecular Liquids**, v. 391, p. 123423, 1 dez. 2023.
- AHMED, M. A.; AMIN, S.; MOHAMED, A. A. Current and emerging trends of inorganic, organic and eco-friendly corrosion inhibitors. **RSC Advances**, v. 14, n. 43, p. 31877–31920, 1 jan. 2024.
- AL-MOUBARAKI, A. H. et al. Development of Natural Plant Extracts as Sustainable Inhibitors for Efficient Protection of Mild Steel: Experimental and First-Principles Multi-Level Computational Methods. **Materials**, v. 15, n. 23, p. 8688-8688, 6 dez. 2022.
- AMARAL, E. M., FONSECA, D. P. M., CANDIOTO, K. C. G. et al. The Role of Carbon Content on the Microstructure of Rapidly Solidified Fe–Cr–Ni Duplex Steels. **Steel Research International**. (2024).
- ANSARI, A. et al. Assessment of Warionia saharea Essential Oil as a Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in HCl: Experimental and Computational Studies. **Coatings**, v. 14, n. 9, p. 1164, 9 set. 2024
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7480:2020 – **Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado**. Rio de Janeiro, 2020.
- ASTM G1-25 – Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens (2025).
- ASTM G31 – Standard practice for laboratory immersion corrosion testing of metals, 2004.
- ASHBY, M. Seleção de Materiais no Projeto Mecânico/(tradução de Arlete Simile)-Rio de Janeiro: **Elsevier**, 2012.
- ASRI, S. M. et al. Morphological Traits of Maluku Native Forest Clove (*Syzygium aromaticum* L. Merr e Perry). **Journal of Tropical Crop Science**, v. 6, n. 02, p. 105-111, 17 jul. 2019.
- ATKINS, P.; de PAULA, J.; KEELER, J. Atkins' **Physical Chemistry**. 12th ed. Oxford University Press, 2022.(Capítulos 19–21: Electrochemical Cells, Electrode Potentials, Applications of Electrochemistry).
- BAKRY, A.M., ABBAS, S., ALI, B., MAJEED, H., ABOUELWAFI, M.Y., MOUSA, A., LIANG, L. **Microencapsulation of oils: a comprehensive review of benefits, techniques, and applications**, **Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.** 15 (1) (2016) 143–182, <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12179>. Acesso novembro 2024.
- BHARDWAJ, N. et al.: Monte Carlo simulation, molecular dynamic simulation, quantum chemical calculation and anti-corrosive behaviour of citrus limetta pulp waste extract for stainless steel (SS-304) in acidic medium. **Master. Chem. Phys.** 284 (2002).

BANIS, A. et al. Microstructure evolution and mechanical behavior of Fe–Mn–Al–C low-density steel upon aging. **Materials Science and Engineering: A**, v. 875, p. 145109, 2 maio 2023.

BARBU, C. A. et al. Critical Review Regarding the Application of Plant Extracts as Eco-Friendly Corrosion Inhibitors—A Sustainable Interdisciplinary Approach. **Molecules**, v. 30, n. 18, p. 3722–3722, 12 set. 2025.

BATHILY, Malick et al. Revisão sobre óleos essenciais e suas propriedades inibidoras de corrosão. *Am. J. Appl. Chem*, v.9, n. 3, p. 65-73, 2021.

BURT, S. **Essential oils: their antibacterial properties and potencial applications in foods-a review**. *Int. J. Food. Microb.*,v. 94, p. 223-253,2004.

CALLISTER, W. D., Jr.; Rethwisch, D. G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 10ª edição, John Wiley & Sons, 2020.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 11th ed. **Hoboken**: John Wiley & Sons, 2022.

COMPRACO **Indústria e Construção**. Disponível em: <<https://compraco.com.br/en>>. Acesso em: 20 out. 2025.

CRUZ, K. O. **PANORAMA DOS INIBIDORES DE CORROSÃO VERDES PARA MEIO ÁCIDO**. UFRJ, 2024. Acesso em: 20 out. 2025.

DAOUDI, Walid et al. **Óleo essencial de Dysphania ambrosioides como inibidor de corrosão verde para aço carbono em solução de HCl**. *Jornal of Molecular Liquids*, V. 363, 2022.

DAVI et al. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E MICROESTRUTURAL DO AÇO CARBONO 1016. **Revista Valore**, v. 4, n. 1, p. 789–797, 12 jul. 2019.

DOUNIA AZZOUNI et al. **Experimental and Theoretical Investigation of the Inhibitor Efficiency of Eucalyptus globulus Leaf Essential Oil (EuEO) on Mild Steel Corrosion in a Molar Hydrochloric Acid Medium**. *Molecules*, v. 29, n. 14, p. 3323–3323, 15 jul. 2024.

ENDO, S; PFENNIGSDORFF, A; GOSS, K; Salting-out effect in aqueous NaCl solutions: trends with size and polary of solute molecules. **Environn. Sci. Technol.** 2012, 46, 3, 1496-1503.

ENGENHEIRO DE MATERIAIS. **As formas de corrosão**. 2017. Disponível em: <https://engenheirodemateriais.com.br/2017/04/26/as-formas-de-corrosao/>. Acesso em: 10 set. 2025.

FAUDA, A. S.; ELMORSI, M. A.; SHABAM, S. M.; FAYED, T.; AZAZY, O. **Evaluation of N-(3-(dimethyl hexadecyl ammonio)propyl) palmitamide bromide as cationic surfactant corrosion inhibitor for API N80 steel in acidic environment**. *Egyptian Journal of Petroleum*, v. 27, n. 4, p. 683-694, Dec, 2018.

FELIPE, Maria Beatriz MC et al. Aspectos gerais sobre corrosão e inibidores vegetais. Revista **Virtual de Química**, v. 5, n4, p. 746-759, 2013.

FONTANA, M. G. Corrosion Engineering. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2021.

GENTIL, Vicente; CARVALHO, Ladimir José de. **Corrosão**. 7. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

GIN DAVID CHURA RIVERA, J. M. Q.-A. Review of the Application of Gravimetric and Electrochemical Techniques to Evaluate Corrosion Mechanisms in Metal Materials. **Journal of Electrical Systems**, v. 20, n. 5s, p. 496–503, 13 abr. 2024.

Glossário de Propriedades do Aço e Principais Aplicações. Disponível em: <<https://metalzenith.com/pt/blogs/steel-properties>>. Acesso 1 de outubro de 2025.

HAN, X. et al. Enhanced Pitting Corrosion Resistance of Nanostructured AISI 304 Stainless Steel via Pipe Inner Surface Grinding Treatment. **Nanomaterials**, v. 13, n. 2, p. 318–318, 12 jan. 2023.

HOLLA, B. R. et al. Plant Extracts as Green Corrosion Inhibitors for Different Kinds of Steel: A Review. **Heliyon**, v.10, n. 14 p. e33748-e33748, 1 jul. 2024.

HOSSAIN, SMZ.; RAZZAK, AS.; HOSSAIN, MM.; **Application of Essential Oils as Green Corrosion Inhibitors**. ArabianJournal for Science andEngineering. 2020.

HOSSAIN, S.M.Z., Razzak, S.A. &Hossain, M.M. **Aplicação de óleos essenciais como inibidores de corrosão verde**. *Árabe J SciEng* **45**, 7137–7159 (2020).

IANNUZZI, M.; FRANKEL, G. “The Carbon Footprint of Steel Corrosion.” **npj Materials Degradation**, v. 6, n. 1, art. 101, 2022.

IBRAHIMI, B. E.; NARDELI, J. V.; GUO, L. An Overview of Corrosion. **ACS Symposium Series**, p. 1–19, 15 nov. 2021.

JONES, D. A. Principles and Prevention of Corrosion. 3rd ed. Upper Saddle River: **Pearson Education**, 2021.

Journal of Coatings Technology and Research - Springer. Disponível em: <<https://link.springer.com/journal/11998>>. Acesso em: 15 de outubro, 2025.

Journal of Saudi Chemical Society. Disponível em: <<https://link.springer.com/journal/44442>>. Acesso em: 17 de outubro, 2025.

JUNIOR, P. E. da S. **ESTUDO DE INIBIDOR DE CORROSÃO A BASE DE IMIDAZOLINA QUATERNÁRIA PARA APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS EM CONDIÇÕES DE ALTAS TEMPERATURA E PRESSÃO**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-08042021-104730/publico/PauloEdsondaSilvaJuniorCorr20.pdf>>. São Paulo, 2024. Acesso em: 20 out. 2025.

KINA, Aline. Yae. **Inibidores de corrosão para sistemas de aço carbono submetidos a meios de alta salinidade e presença de CO₂**. 2011. 79f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Metalúrgica e Materiais) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

KŘIVÝ, V. Special Issue: Corrosion Properties and Mechanism of Steels. **Materials**, v.15, n. 19, p. 6796, 30 set. 2022.

LAHHIT, N. et al. Óleo essencial de funcho (*Foeniculum vulgare*) como inibidor de corrosão verde de aço carbono em solução de ácido clorídrico. *Portugaliae Electrochimica Acta*, v. 29, n. 2, p. 127-138, 2011.

LIDUINO, V. S. et al. Investigation of carbon steel corrosion by oilfield nitrate- and sulfate-reducing prokaryotes consortia in a hypersaline environment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 4, p. 10830–10840, 10 set. 2022.

LUCAS, S. **Bíblia Pastoral**. ed. Paulus, São Paulo, Janeiro, 2014, P. 1252. Acesso novembro 2024.

LUTSENKO, V. A. et al. Peculiarities of Formation of High-Carbon Steel Structure During Rolling. **Materials Science**, v. 58, n. 5, p. 621–628, 1 mar. 2023.

MAGGINI, V. et al. **Antimicrobial activity of *Syzygium aromaticum* essential oil and main constituents** — estudo experimental e discussão sobre percentuais típicos de eugenol e outros componentes (2024).

MALARET, F. Exact calculation of corrosion rates by the weight-loss method. **Experimental Results**, v. 3, 2022.

METAL ZENITH. Disponível em: <<https://metalzenith.com/pt>>. Acesso em: 1 out. 2025.

MILAD SHEYDAEI. The Use of Plant Extracts as Green Corrosion Inhibitors: A Review. **Surfaces**, v. 7, n. 2, p. 380–403, 1 jun. 2024.

MONTEIRO, H. L. **Avaliação da eficácia dos óleos essenciais das espécies *piper divaricatum* e *eugenia caryophyllus* como inibidores de corrosão em aço carbono**. Orientadora: Ana Áurea Barreto Maia. 2023. 91 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/15844>. Acesso em: 23 dez. 2024.

MOKHTARI, E.; AMIN HEIDARPOUR; FATEMEH JAVIDAN. Mechanical performance of high strength steel under corrosion: A review study. **Journal of Constructional Steel Research**, v. 220, p. 108840–108840, 19 jun. 2024

MULLER, Duan Gabriel et al. **avaliação do óleo essencial de oregano emulsionado em diferentes surfactants aplicado a revestimentos anticorrosivos**.2022.

NACE Internacio. Corrosion basic: An Introduction. Ed. Houston. **Nace Internacional**, 2016.

NASCIMENTO, F. M. C. **Caracterização dos aços inoxidáveis: comportamento microestrutural, propriedades e processamento térmico sob diferentes composições**. 2022. Tese (ou Dissertação) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

- OBOT, A. S.; BOEKOM, E. J. OBOT, I. B.; ITA, B. N.; AZUBUIKE, A. C. Chemical evaluation and quantum analysis of methanol extracts of *costus lucanusianus* as corrosion inhibitors for mild steel and aluminium in 1 M HCl solution. **Elixir Corrosion e Dye**, v.159, p. 55648-55659, 2021.
- OUACHIKH, O. et al. **aplicação de óleo essencial de Artemisia herba alba como inibidor de corrosão verde para aço em 0,5 MH 2 SO 4**. Surface Review and Letters, v. 16, n. 01, p. 49-54, 2009.
- PANDEY, V. Kumar et al. **Bioactive properties of clove (*Syzygium aromaticum*) essential oil nanoemulsion: A comprehensive review**. Heliyon, v. 10, n. 1, p. e22437, 2024. ISSN 2405-8440. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023096457>. Acesso em: 15 março. 2025.
- KODAMA L.A.; HOTSUMI T. N. ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE SÃO PAULO **INVESTIGAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PRODUTOS NATURAIS COMO INIBIDORES DE CORROSÃO ATÓXICOS PARA AÇO CARBONO EM MEIO DE ÁCIDO CLORÍDRICO**. [s.l:s.n.]. Disponível em: <<https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/9c62cfbe1294412b8982e2aca32bd053/ArthurLKodama.pdf>>. acesso 17 março 2025.
- PERES, J. et al. **Estudo da eficiência do Orbignya oleifera como inibidor verde de corrosão para aço com baixo teor de carbono comparado com inibidor comercial em solução HCl 1M**. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 24, n. 3, 2019. Acesso 2 Jan. 2025.
- RAHIMI, A. et al. **Novel sucrose derivative as a themally stable inibtor for mild steel corrosion in 15% HCl médium: na expperimental and computational study**. *Chem. Eng. J.* 245, 136933 (2022).
- RAJKOWSKA, K.; KUNICKA-STYCZYŃSKA, A.; MAROSZYŃSKA, M. **Selected Essential Oils as Antifungal Agents Against Antibiotic-Resistant *Candida* spp.: In Vitro Study on Clinical and Food-Borne Isolates**. *Microbial Drug Resistance, Łódz*, v. 23, n. 1, p. 18–24,. DOI 10.1089/mdr.2016.0001, (2017).
- RĂUȚĂ, D.-I. (GHEORGHE); MATEI, E.; AVRAMESCU, S.-M. Recent Development of Corrosion Inhibitors: Types, Mechanisms, Electrochemical Behavior, Efficiency, and Environmental Impact. **Technologies**, v. 13, n. 3, p. 103, 5 mar. 2025.
- RAJESH HALDHAR et al. Corrosion inhibition, surface adsorption and computational studies of *Momordica charantia* extract: **a sustainable and green approach**. v. 3, n. 1, 1 jan. 2021.
- REKKAB, S. et al. **Inibidor de corrosão verde de óleo essencial de *Eucalyptus globulus* (Myrtaceae) para aço C38 em solução de Ácido sulfúrico**. *J. Mater. Eviron . Sci*, v. 3, n. 4, p. 613-627, 2012.
- ROCHA, J.C.& GOMES, J. A. C. P. **Inibidores de corrosão naturais** - Silva, et al. – *Acta Brasiliensis* 3(1):21-24,201924 Proposta de obtenção de produtos ecológicos de baixo custo a partir de resíduos industriais. *Revista Matéria (Rio de Janeiro)*, 22 (suppl.1), e-11927.doi: 10.1590/s1517-707620170005.0263, (2017).

RUY, V. **Impactos econômicos da corrosão na indústria**. Disponível em: <https://www.alkim.com.br/post/osefeitosimpactosecon%C3%B4micosacorros%C3%A3o-na-industria>. Acesso em: 10 nov. 2024.

SEDRICKS, A. J. *Corrosion of Stainless Steels*. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2021.

SHAMSA, A.; et al. Performance evaluation of an imidazoline corrosion inhibitor in a CO₂-saturated environment with emphasis on localised corrosion. **Corrosion Science**, 176, p. 108916, 2020.

SHWETHA, K. M.; B.M, P.; DEVENDRA, B. K. A review on corrosion inhibitors: types, mechanisms, electrochemical analysis, corrosion rate and efficiency of corrosion inhibitors on mild steel in an acidic environment. **Results in Surfaces and Interfaces**, p. 100258, 20 jul. 2024.

SILVA, J. K. P. M. **Estudo de caso a respeito da corrosão encontrada em veículos automotores**. Universidade Federal do Ceará- Curso de Ciência da Computação, Russas, 2023.

SILVA, M. V. et al. **Clove essential oil and eugenol: a review of their significance and uses** — revisão sobre métodos de extração, composição e aplicações (2024).

SIMÕES, J. E. Q.; SPOZITO, R. S.; MENEZES, I. S. “**Estudo da tensão de aderência entre barras de aço e concretos com resíduos de construção civil**.” Revista Principia, v. 61, n. 3, p. 755-773, 2024.

SOARES, Pricila Veloso Nogueira. **AVALIAÇÃO DO EFEITO DE ÓLEOS ESSENCIAIS E FIXOS COMO INIBIDOR DE CORROSÃO NA PRESENÇA DE METAIS**. 2025. Tese de doutorado. Universidade Federal do Maranhão.

Wang, X., Xie, Z., Su, W., & Shang, C. “*Role of Carbon Content on Microstructure Evolution and Impact Toughness in Coarse-Grained Heat-Affected Zone of High-Strength Steel*.” **Metals**, vol. 13, n.º 1, 2023.

"The green plant-based corrosion inhibitors — a sustainable strategy for corrosion protection" Autores: Bandeira, R.M.; Lima, F.P.; Nunes, M.S.; et al. **Publicado em Surface Science and Technology**, volume 3, art. nº 19, em 24 de junho de 2025.

VASCONCELOS, P. G. S. et al. **Syzygium aromaticum essential oil and its major constituents: assessment of activity against Candida spp. and toxicity** (2024).

VASQUES, R.B; et al. **A theoretical and experimental study of phosphate ester inhibitors for AISI 1018 in carbon dioxide-saturated 3.5 wt% NaCl solution**. **Materials and Corrosion**, 71, p. 1417–32, 2021.

VERMA, C. et al. Principles and theories of green chemistry for corrosion science and engineering: design and application. **Green Chemistry**, v. 26, n. 8, p. 4270–4357, 1 jan. 2024.

VERMA, C. et al. Recent developments in Sustainable Corrosion Inhibitors: Design, Performance, and industrial scale applications. **Materials Advances**, 2021.

ZAHER, A et al. Bio-Based Corrosion Inhibition of Carbon Steel Using Ammi visnaga L. Essential Oil Acidic Mediums: Experimental Analysis and Molecular Modeling. **Coatings**, v. 14, n. 12, p. 1556, dez. 2024.

ZHANG, X. et al. Study on the Bending Performance of High-Strength and High-Ductility CRE-Reinforced Concrete Beams. **Buildings**, v. 13, n. 11, p. 2746, 30 out. 2023.

ZHANG WENQI; ZHU RIZHANG. Corrosion of Metal. **The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy**, p. 402–405, 1 jan. 2024.

Zou, Y., Ding, H., & Tang, Z. “*Effect of Carbon Content on Deformation Behavior and Partitioning of Manganese in Medium-Mn Steels.*” **Metals**, vol. 11, n.º 4, 2021.

ZOUARHI, M. Bibliographical Synthesis on the Corrosion and Protection of Archaeological Iron by Green Inhibitors. **Electrochem**, v. 4, n. 1, p. 103–122, 6 mar. 2023.