

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
Departamento de Engenharia Química

G
E
Q



Trabalho de Conclusão de Curso

***EXTRATO DA FOLHA DE MORINGA COMO INIBIDOR
DE CORROSÃO PARA
AÇO-CARBONO 1020 EM MEIO ÁCIDO***

***Alexandre Henrique da Costa de
Medeiros***

***Orientadora: Prof.^a Eliane Bezerra de Moraes Medeiros
Co-orientador: Paulo Henrique Miranda de Farias***

Recife/PE

2025

ALEXANDRE HENRIQUE DA COSTA DE MEDEIROS

**EXTRATO DA FOLHA DA MORINGA COMO INIBIDOR DE
CORROSÃO PARA AÇO-CARBONO 1020 EM MEIO ÁCIDO**

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado à Coordenação do
Curso de Graduação em Engenharia
Química da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial à
obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Química.

Orientadora: Prof.^a Eliane Bezerra
de Moraes Medeiros

Recife/PE

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Medeiros, Alexandre Henrique da Costa de.

Extrato da folha de moringa como inibidor de corrosão para aço-carbono 1020 em meio ácido / Alexandre Henrique da Costa de Medeiros. - Recife, 2025.

59 p : il., tab.

Orientador(a): Eliane Bezerra de Moraes Medeiros

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Ácido Clorídrico. 2. Aço AISI 1020. 3. Hidroextração. 4. Inibidores verdes. 5. Moringa oleifera. I. Medeiros, Eliane Bezerra de Moraes. (Orientação). II. Título.

660 CDD (22.ed.)

ALEXANDRE HENRIQUE DA COSTA DE MEDEIROS

**EXTRATO DA FOLHA DE MORINGA COMO INIBIDOR DE CORROSÃO PARA
AÇO-CARBONO 1020 EM MEIO ÁCIDO**

TCC apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico da Vitória, como requisito para a obtenção do título de grau de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em: 11/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



ELIANE BEZERRA DE MORAES MEDEIROS

Data: 18/08/2025 21:19:25-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profº. Dr. Eliane Bezerra de Moraes Medeiros (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente



NELSON MEDEIROS DE LIMA FILHO

Data: 19/08/2025 14:58:57-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profº. Dr. Nelson Medeiros de Lima Filho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente



CHESQUE CAVASSANO GALVAO

Data: 19/08/2025 21:28:03-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Chesque Cavassano Galvão (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

*“A glória da ciência é testar para
saber se a ideia está errada.” (Richard
Feynman)*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por todo apoio, incentivo e motivação durante esta jornada de graduação, minha mãe Maria do Carmo Pereira da Costa e ao meu pai Alexandre Maia de Medeiros Correia.

À minha orientadora, Prof.^a Eliane Bezerra de Moraes Medeiros, pela assistência, ensinamentos concebidos e paciência para a realização deste trabalho.

Agradeço também a Universidade Federal de Pernambuco e em especial ao Laboratório de Processos Catalíticos pelo apoio, espaço e equipamentos compartilhados para o desenvolvimento das minhas pesquisas e experimentos.

Aos colegas e pós-graduandos do Laboratório de Processos Catalíticos, Paulo Henrique Miranda de Farias, Eduardo Mendonça Magalhães Vital e Chesque Cavassano Galvão pela disponibilidade e auxílio prestado durante as análises, uso dos equipamentos e do material em estudo.

A todos os alunos e professores que me ajudaram de alguma forma durante todo o percurso da minha formação e graduação em si, e tiveram parte da contribuição para chegar aonde eu estou hoje.

RESUMO

Existem diversas formas de minimizar o efeito de corrosão sobre metais, um deles é com o uso de inibidores verdes derivado de plantas. Estudando tal método, no presente trabalho, avaliou-se o comportamento da corrosão sobre placas (cupons) de aço AISI 1020 (~0,20% de carbono) em solução de ácido clorídrico 1 M, através do método de perda de massa (gravimétrico). O extrato foi obtido através da hidroextração das folhas de *moringa oleífera*. Os ensaios de corrosão foram realizados com os cupons imersos em 6 diferentes tempos de duração sem inibidor (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 e 3 horas). Após avaliação dos dados, determinou-se o tempo de 30 minutos para os ensaios seguintes devido a taxa de corrosão ter alcançado o valor máximo nesse intervalo ($18,81\text{mm.ano}^{-1}$). O ensaio de corrosão mostrou um aumento da taxa de corrosão, seguido de uma diminuição até alcançar uma taxa mais estável ($7,47\text{mm.ano}^{-1}$). Em seguida, foi investigado o uso de substâncias orgânicas como inibidores de corrosão: o extrato da folha de *moringa de oleífera*, o ácido ascórbico e a glicerina. O tempo de ensaio em 30 minutos e a concentração do ácido clorídrico 1 M foram utilizados para calcular as taxas de corrosão e a eficiência dos inibidores. O extrato da planta foi o que obteve melhor resultado como inibidor na concentração de 5% (v/v) em relação ao ácido ascórbico e a glicerina. Tendo uma eficiência de 88%. Foram realizados ensaios para se avaliar o efeito da temperatura na eficiência do inibidor com concentração 5%(v/v). Os resultados mostraram um comportamento do tipo adsorção física, devido a relação inversamente proporcional da temperatura com a eficiência do inibidor. A energia de ativação foi calculada através da equação de Arrhenius pela variação da perda de massa em diferentes temperaturas (30, 40, 50 e 60°C). A energia de ativação para a deterioração do aço carbono com inibidor foi de $24,0\text{ kJ.mol}^{-1}$ a qual se mostrou moderado para inibidores orgânicos.

Palavras-chave: Ácido clorídrico; Aço AISI 1020; Hidroextração; Inibidores verdes; *Moringa oleífera*;

ABSTRACT

There are several ways to minimize the effects of corrosion on metals, one of which is the use of green inhibitors derived from plants. Exploring this method, the present study evaluated the corrosion behavior of AISI 1020 steel plates (coupons) (~0.20% carbon) in 1 molar hydrochloric acid solution using the mass loss (gravimetric) method. The extract was obtained through hydro extraction of *Moringa Oleifera* leaves. Corrosion tests were conducted with the coupons immersed for six different durations (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, and 3 hours). After data collection, a test time of 30 minutes was selected for subsequent experiments, as the corrosion rate reached its peak within this interval ($18.81 \text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$). The corrosion test showed an initial increase in the corrosion rate, followed by a decrease until a more stable rate was reached ($7.47 \text{ mm}\cdot\text{year}^{-1}$). Next, the use of organic substances as corrosion inhibitors was investigated: the *Moringa oleifera* leaf extract, ascorbic acid, and glycerin. The test time of 30 minutes and the 1 molar hydrochloric acid concentration were used to calculate the corrosion rates and the efficiency of the inhibitors. The extract showed the best result as an inhibitor at a concentration of 5% (v/v) compared to ascorbic acid and glycerin, achieving an efficiency of 88%. Tests were also conducted to evaluate the effect of temperature on the inhibitor efficiency at a 5% (v/v) concentration. The results indicated physical adsorption behavior, due to the inverse relationship between temperature and inhibitor efficiency. The activation energy was calculated using the Arrhenius equation based on mass loss variation at different temperatures (30, 40, 50, and 60°C). The activation energy for the decomposition of carbon steel in the presence of the inhibitor was $24.0 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, which is considered moderate for organic inhibitors.

Keywords: Hydrochloric acid; AISI 1020 steel; Hydroextraction; Green inhibitors; *Moringa oleifera*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos mais comuns de corrosão.	14
Figura 2 - Ilustração da formação da pilha eletroquímica na superfície do ferro.	15
Figura 3 - Constituintes do produto de corrosão em presença de água.	16
Figura 4 - Estruturas químicas dos ácidos fenólicos detectadas por fase reversa RP-HPLC de frações de solventes de Moringa oleifera.	26
Figura 5 - Sementes e folhas de Moringa oleifera.	29
Figura 6 - Fluxograma das etapas para ensaio de corrosão	30
Figura 7 - Folhas de Moringa de oleifera usadas na extração.	31
Figura 8 - Incubadora shaker da marca Marconi e suas configurações	32
Figura 9 - Filtração simples do extrato.	32
Figura 10 -Cupons de aço carbono AISI 1020 sem acabamento utilizados nos ensaios	33
Figura 11 - Pesagem do cupom em balança analítica da cientech.	34
Figura 12 - Soluções do extrato, do ácido ascórbico e do glicerol (1%, 5%, 10% e 15% em v/v)	34
Figura 13 - Soluções do extrato, do ácido ascórbico e do glicerol (1%, 5%, 10% e 15% em v/v).	35
Figura 14 - Configuração e equipamentos para ensaios de corrosão com variação de temperatura em banho termostático	37
Figura 15 - Bolhas de gás hidrogênio sendo liberadas.	
FONTE: autoria própria	38
Figura 16 - Estudo cinético de solução HCl 1M sem inibidor.	39
Figura 17 - Estrutura química dos inibidores utilizados como comparação, onde a direita tem o ácido ascórbico e a direita o glicerol.	40
Figura 18 - Variação da eficiência de inibição com a concentração (v/v) do inibidor Ácido ascórbico.	41
Figura 19 - Variação da eficiência de inibição com a concentração (v/v) do inibidor glicerol.	43
Figura 20 - Variação da eficiência de inibição com a concentração (v/v) do extrato da Moringa oleifera.	45
Figura 21 - Efeito da temperatura com extrato de Moringa oleifera a 5%(v/v).	46
Figura 22 - Efeito da temperatura sem inibidor.	47

Figura 23 - Curva de Arrhenius com extrato em 5% (v/v) em solução de HCl 1M.	50
Figura 24 - Curva de Arrhenius na ausência do inibidor.	51
Figura 25 - Comparação das curvas de Arrhenius com e na ausência do inibidor.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados para placa de Aço Carbono com solução de HCl 1M.	35
Tabela 2 - Perda de massa, perda de massa por área e a taxa de corrosão.	36
Tabela 3 - Eficiência do ácido ascórbico como inibidor em solução de HCl 1M.	39
Tabela 4 - Ensaio com solução de HCl 1M e glicerol como inibidor.	40
Tabela 5 - Ensaio com solução de HCl 1M com extrato de Moringa oleifera.	42
Tabela 6 - Efeito da temperatura com solução de HCl 1M e extrato a 5%(v/v).	43
Tabela 7 - Efeito da temperatura com solução de HCl 1M sem inibidor.	44
Tabela 8 - Eficiência do inibidor com o efeito da temperatura.	45
Tabela 9 - Valores para construção do gráfico da equação linearizada.	47
Tabela 10 - Valores para construção do gráfico sem inibidor.	49
Tabela 11 - Aumento percentual da Ea em diferentes estudos e inibidores.	51

LISTA DE ABREVIATURAS

T_c	Taxa de corrosão
T_{c0}	Taxa de corrosão sem presença do inibidor
T_{c1}	Taxa de corrosão com o inibidor
E_f	Eficiência do inibidor de corrosão
W	Perda de massa por unidade de área e tempo
Ea	Energia de ativação aparente
<i>Q_{H2O}</i>	Densidade do aço
FT-IR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
SEM	Microscopia Eletrônica de Varredura

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 CORROSÃO	13
2.2 VELOCIDADE DA CORROSÃO	16
2.3 INIBIDORES DE CORROSÃO	19
2.4. EXTRATOS VEGETAIS COMO INIBIDORES DE CORROSÃO DO AÇO CARBONO	22
3. METODOLOGIA	27
3.1 EQUIPAMENTOS	27
3.2 REAGENTES E SOLVENTES	28
3.3 MÉTODOS	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1 ENSAIO DE CORROSÃO SEM O INIBIDOR EM DIFERENTES TEMPOS	34
4.2 ENSAIO DE CORROSÃO COM ÁCIDO ASCÓRBICO COMO INIBIDOR EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES	39
4.3 ENSAIO DE CORROSÃO DO GLICEROL COMO INIBIDOR EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES	34
4.4 ENSAIO DE CORROSÃO DO GLICEROL COMO INIBIDOR EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES	
4.5 ENSAIO DE CORROSÃO DO EXTRATO DA FOLHA DE MORINGA OLEIFERA COMO INIBIDOR EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES	42
4.6 EFEITO DA TEMPERATURA	43
4.7 ENERGIA DE ATIVAÇÃO	46
5. CONCLUSÕES	52
REFERÊNCIAS	53

1. INTRODUÇÃO

Na indústria, diversos tipos de materiais e ligas estão sujeitos a corrosão por mais resistentes que eles sejam, ou foram alterados com tal finalidade. Muitas vezes por questões de eficiência econômica e limitação das propriedades dos materiais, usam-se substâncias conhecidas por terem uma forte resistência a reações de oxidação, ou que se oxidem no lugar do material que deseja proteger em sua superfície. Essas substâncias são comumente conhecidas como inibidores de corrosão de caráter químico, e têm comportamento genérico que atuam de forma considerável na maioria dos processos corrosivos.

O aço carbono é o material mais utilizado industrialmente devido principalmente ao seu alto custo-benefício para estruturas e pela facilidade de soldagem e conformação. Segundo Santos et al. (2019), as tubulações utilizadas na indústria de petróleo são condutos de aço carbono fechados de seção circular e ocos e alta área de superfície de contato. Eles são desenvolvidos de acordo com as especificações de segurança API (American Petroleum Institute) porém, ainda apresentam limitações por serem pouco resistentes à corrosão em comparação com ligas mais caras de níquel presentes no mercado. A grande diferença de custo ainda torna o aço carbono relevante em ambientes quimicamente agressivos e hostis ao metal.

O processo corrosivo afeta direta ou indiretamente diversos setores da sociedade e prova disso é o alto custo da economia mundial. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração 18 (IBRAM), estima-se que em 2019 o custo anual com a corrosão consistiu em 4% do PIB, equivalente a aproximadamente R\$290 bilhões. O IBRAM afirma que de acordo com a Nexa, com as devidas prevenções à corrosão, a economia poderia ser de R\$ 75 bilhões por ano (BADARÓ et al, 2022)

Entretanto, os inibidores de corrosão convencionais e eficientes são conhecidos por serem altamente tóxicos e isso acaba por dificultar seu manuseio e descarte. Por isso, inibidores de origem vegetal têm despertado interesse científico em função da atividade antioxidante, bem como ação de inibição a corrosão eletroquímica. O uso da *Moringa oleífera* como potencial aditivo para mitigação da corrosão em aço doce em ambiente ácido tem recebido atenção devido a busca de

alternativas mais ecológicas (*ecofriendly*) (JALAJAA et al., 2019; ALLAOUI et al., 2017).

Um relatório realizado pela *Reports and Data* e apresentado pela *Globe Newswire* indica que há uma estimativa para um crescimento no mercado global de inibidores de corrosão, começando por US\$7,2 bilhões em 2018 para US\$9,6 bilhões até 2026. Este avanço está atrelado a inovações na área de inibidores verdes e ecologicamente corretos, como os extratos vegetais.

Segundo Sheydaei (2024), os extratos das plantas têm sido vastamente estudados como inibidores devido seu baixo custo, abundante disponibilidade e biodegradabilidade. As principais partes objetivas de estudo devido à alta concentração de antioxidantes e flavonoides tem sido: casca, caule, raiz, folhas, flores e sementes. Porém, devido às suas peculiaridades e características complexas, elas podem apresentar diferentes eficiências de inibição de acordo com as diferentes quantidades dos metabólitos especiais e outras substâncias orgânicas presentes em cada parte.

Moringa oleifera Lam syn; uma família monogenérica de *Moringa* é uma daquelas plantas em que todas as partes são consideradas útil (folhas, flores, raízes e frutos) devido às suas propriedades medicinais e nutritivos (NADKARNI, 2009). As folhas de moringa, em particular, exibem boas propriedades antioxidantes devido à presença de vários compostos como flavonóides, ácido ascórbico, fenólicos, carotenóides etc. (ARABSHAHI et al., 2007).

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo geral investigar a eficácia de extratos naturais de *Moringa oleifera* como inibidores de corrosão aplicados ao aço carbono AISI 1020, por meio da técnica gravimétrica, utilizando solução de ácido clorídrico 1 M como meio corrosivo. Para alcançar esse objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Obter os extratos das folhas e sementes de *Moringa oleifera* Lam;
- Analisar o impacto de diferentes concentrações do inibidor;
- Estudar a influência da temperatura no processo corrosivo, tanto na presença quanto na ausência do inibidor;
- Determinar a energia de ativação do sistema com e sem a ação inibidora dos extratos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CORROSÃO

A Corrosão é definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, pela ação química ou eletroquímica do meio ambiente, podendo ou não estar associada a esforços mecânicos. O fenômeno corrosivo ocorre através da formação de pilhas eletroquímicas na superfície metálica, onde há regiões de ânodo, nas quais ocorre a oxidação, e regiões de cátodo, onde ocorrem reações de redução (Gentil, 2017).

No geral, existem diversas formas de corrosão que um material pode sofrer a depender do ambiente em que está inserido ou exposto. A forma mais comum na literatura de divisão são as corrosões intrínseca e extrínseca. As corrosões intrínsecas são compostas pela corrosão geral, por pite, intergranular, parcial e generalizada. Já as corrosões extrínsecas são compostas por corrosão em fendas, corrosão galvânica, por erosão, por fricção e por fadiga como é visto na Figura 1 (GENTIL, 2017).

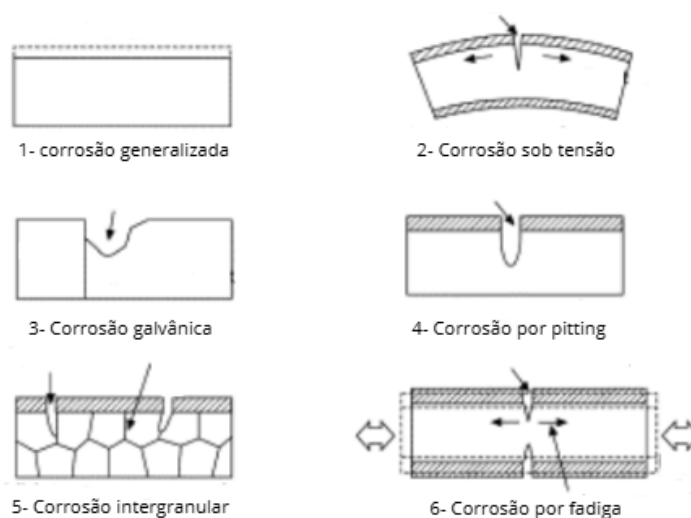


Figura 1 - Tipos mais comuns de corrosão.

Fonte: IA; ano 2025.

A corrosão uniforme é o tipo mais comum, ocorrendo de maneira homogênea em toda a superfície metálica, resultando numa perda regular e contínua de

espessura do material. Em certos casos, a camada de óxido pode até proteger o metal como no alumínio, onde esse fenômeno recebe o nome de passivação. A passivação pode ser natural, como no caso do aço inoxidável em contato com o oxigênio, ou pode ser induzida por tratamentos químicos específicos.

A corrosão galvânica surge da conexão elétrica entre dois metais diferentes em meio corrosivo, formando uma pilha galvânica onde o metal menos nobre sofre corrosão acelerada. A Corrosão por frestas acontece em espaços confinados e de difícil acesso, como frestas e fendas, onde há restrição ao oxigênio, criando um ambiente agressivo que acelera o ataque corrosivo. A puntiforme caracteriza-se pela formação localizada de pequenas cavidades ou perfurações profundas que evoluem rapidamente, podendo resultar em falhas prematuras dos materiais, já a granular ocorre quando o ataque corrosivo se concentra preferencialmente nas regiões adjacentes aos contornos de grão, devido a fenômenos de segregação ou precipitação de fases suscetíveis nessas regiões (OLIVEIRA, 2012).

A corrosão aparece como a ameaça mais grave para as refinarias de petróleo e pode ocorrer em vários segmentos, sendo dependente da interação entre o material metálico e o ambiente (MOUBARAKI e OBOT, 2021).

Diferentes tipos de ligas e metais podem apresentar diferentes fragilidades a certos tipos de corrosões. Materiais contendo liga de cromo e níquel apresentam uma resistência natural à corrosão do tipo intrínsecas. Já os materiais de ligas ferrosas como é o caso do aço AISI 1020, apresenta pouca resistência a corrosão por pite, intergranular e generalizada, a qual podem ser danosas e apresentar uma elevada taxa de corrosão em ambientes rico em cloreto e pH baixo.

O aço carbono consiste em uma liga de ferro-carbono que contém entre 0,008% e 2,0% de carbono, além de outros elementos residuais que são resultantes do processo de extração e fabricação, como o fósforo, enxofre, manganês e silício. Ele pode ser dividido em três classes, de acordo com o teor de carbono: baixo carbono ($C \leq 0,30\%$), médio carbono ($0,30\% < C < 0,50\%$) e alto carbono ($C \geq 0,50\%$) (GENTIL, 2014).

De acordo com Gentil (2017), a corrosão pode ser classificada como primária quando ocorre por ação direta do meio agressivo sobre a superfície do material metálico sem influência prévia de outros processos de degradação. Esse tipo de

corrosão é subdividido principalmente em duas categorias fundamentais: corrosão eletroquímica (Figura 2) e corrosão química.

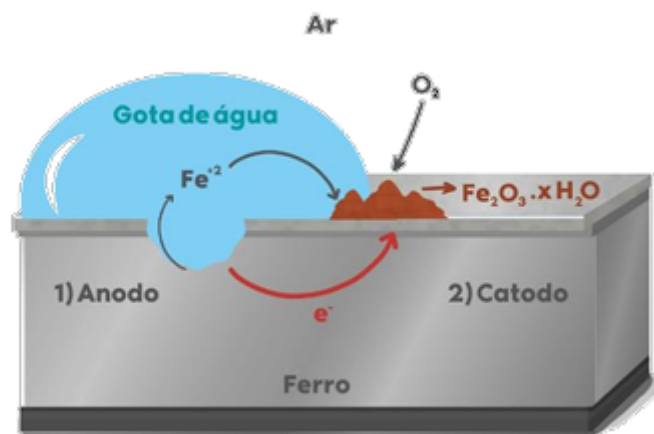


Figura 2- Ilustração da formação da pilha eletroquímica na superfície do ferro.

Fonte: adaptado de BADARÓ (2022)

A corrosão eletroquímica é comumente a forma predominante presente nos metais, sendo causada pela formação de pilhas eletroquímicas em diferentes regiões da sua superfície exposta a um eletrólito. A corrosão que se dá pelo ferro em meio ácido, é um mecanismo eletroquímico no qual o Fe sofre oxidação por reação anódica, e o íon H^+ liberado pelo HCl ou H_2S é reduzido por reação catódica (Equações 1 e 2) (ROCHA, 2008).



A principal característica da reação é a transferência de elétrons (Equações 1 e 2), onde acontece o desprendimento do metal pela formação do íon no meio aquoso, e a evolução do hidrogênio em forma de bolhas de gás que se formam na superfície. Ao entrar em contato com o oxigênio, é formado os diferentes tipos de óxidos a depender da superfície presente. Alguns conhecidos pela literatura são o óxido ferroso (FeO) com coloração preta, o óxido férrico (Fe_2O_3) conhecido pela cor vermelho-amarronzado sendo poroso e não protetor, e a magnetita ou óxido ferroso-férrico (Fe_3O_4) mais compacta e parcialmente protetora, o qual é mais comum em baixas concentrações de oxigênio. A Figura 3 apresenta os óxidos formados na superfície do aço.

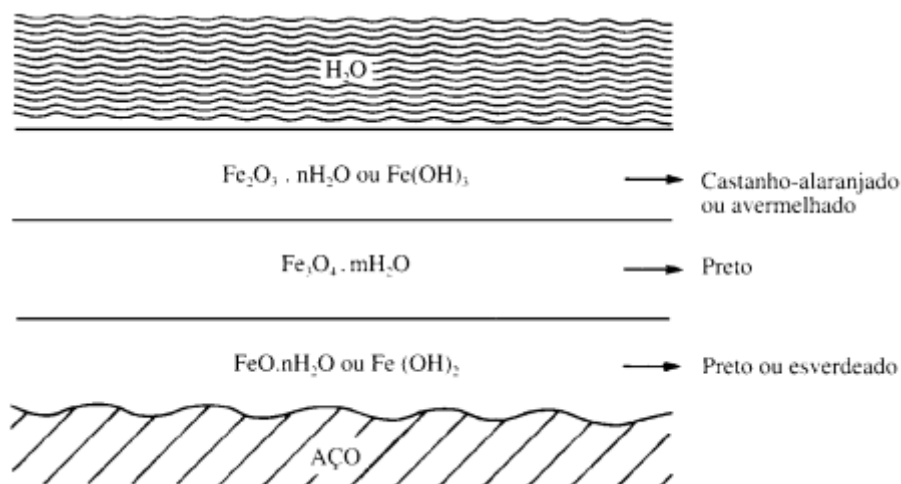


Figura 3- Constituintes do produto de corrosão em presença de água.

FONTE: GENTIL (2011)

Já na corrosão química acontece o ataque de algum agente químico diretamente sobre determinado material, que pode ou não ser um metal. Ela não precisa da presença de água e não há transferência de elétrons como na corrosão eletroquímica (FOGAÇA, 2018).

A transferência do ferro metálico da superfície para o meio aquoso causando uma variação de massa após um intervalo de tempo, é o que viabiliza o seu estudo usando o método gravimétrico. Esse método é amplamente utilizado em estudos de novos inibidores verdes em laboratórios devido à sua simplicidade, confiabilidade e baixo custo operacional (GENTIL, 2017).

2.2 VELOCIDADE DA CORROSÃO

A velocidade de corrosão pode ser entendida como a rapidez com que um material metálico sofre deterioração em um ambiente específico. Para a avaliação técnica e quantitativa deste fenômeno, diversos métodos são empregados para medir a velocidade de corrosão, cada um com suas vantagens, limitações e aplicações específicas. Segundo Gentil (2017), ela é influenciada por fatores como a composição do meio, a temperatura, a presença de oxigênio e a condutividade elétrica da solução.

O método mais tradicional para o seu estudo é o de perda de massa, que consiste em expor amostras metálicas a um meio corrosivo por um tempo

determinado, pesando-as antes e depois da exposição para calcular a variação de massa. Esse método é simples, direto e fornece resultados confiáveis, sendo amplamente recomendado por normas técnicas. O método citado segue a ASTM G1-03 (*reapproved 2017*) – *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens* e ela descreve como preparar as amostras metálicas para ensaio de corrosão, como realizar a limpeza antes e depois do ensaio (para remover produtos de corrosão sem atacar o metal) e como medir a perda de massa e calcular a velocidade de corrosão, expressa geralmente em milímetros por ano (mm/ano) ou $\text{mg}/\text{cm}^2\cdot\text{dia}$.

Outro método amplamente utilizado é o eletroquímico, que inclui técnicas como a polarização potenciodinâmica e a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS). Essas técnicas permitem avaliar a taxa de corrosão de forma mais rápida e com maior sensibilidade, além de fornecerem informações sobre os mecanismos de corrosão e a eficácia de inibidores. Métodos eletroquímicos são particularmente úteis em estudos laboratoriais e em aplicações onde a resposta em tempo real é necessária.

Além disso, métodos indiretos como a medição da resistência elétrica de sensores metálicos expostos ao meio corrosivo também são utilizados, especialmente em monitoramentos contínuos em campo. Cada método deve ser escolhido de acordo com o tipo de material, ambiente de exposição e objetivo do estudo. De acordo com Fontana e Greene (1967), a velocidade de corrosão é uma variável fundamental em aplicações de engenharia, pois permite prever a durabilidade e o desempenho de materiais metálicos em diferentes meios corrosivos. Os mesmos autores destacam que a velocidade de corrosão pode ser expressa em diferentes unidades, como milímetros por ano (mm/ano), mils por ano (mpy) ou mesmo em perda de massa por unidade de área e tempo.

Uma das utilidades em se conhecer a respeito desta velocidade, é poder estimar o tempo de vida útil de uma determinada estrutura e comparar com estudos de inibidores de corrosão, tornando possível mensurar a concentração ideal do inibidor para uma faixa de inibição desejada para tal equipamento. A norma ASTM G1-03 (2017) calcula a taxa de corrosão (T_c) pela seguinte equação abaixo:

$$T_c = \frac{K \cdot \Delta m}{A \cdot t \cdot \rho} \quad (3)$$

Onde:

- Δm a perda de massa em gramas;
- A é a área em cm^2 ;
- t é o tempo de exposição em horas;
- ρ é a massa específica do material em g.cm^{-3} ;
- K é igual a $8,76 \times 10^4$, que é uma constante específica para obtenção da taxa de corrosão na unidade de mm.ano^{-1} .

O pH do meio exerce um papel decisivo na taxa de corrosão e nos produtos formados durante esse processo. Em meios ácidos ($\text{pH} < 7$), a corrosão do ferro é intensificada, uma vez que os íons hidrogênio (H^+) atuam como agentes oxidantes, sendo reduzidos a gás hidrogênio (H_2). A reação típica que ocorre nessa condição é: $\text{Fe(s)} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2(\text{g})$. Nessas circunstâncias, não há formação de camadas passivadoras na superfície do metal, o que favorece uma corrosão contínua e agressiva. Além disso, os óxidos de ferro tendem a ser solúveis em meios ácidos, o que impede a formação de barreiras protetoras sobre o substrato metálico (GENTIL, 2017).

Em meios neutros com pH próximo a 7, a corrosão ainda ocorre, principalmente pela ação do oxigênio dissolvido na água. Nesse caso, a reação catódica predominante envolve a redução do oxigênio, conforme representado por: $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$. Nessa faixa de pH, é comum a formação de produtos como hidróxidos de ferro, que podem se transformar em óxidos como Fe_2O_3 (óxido férrico) ou Fe_3O_4 (óxido ferroso-férrico). No entanto, esses produtos geralmente são porosos e não aderentes, o que permite a penetração contínua de agentes corrosivos e, portanto, não impedem a progressão da corrosão.

Já em meios alcalinos com $\text{pH} > 9$, há uma significativa redução na taxa de corrosão do ferro. Nessas condições, pode ocorrer a formação de uma camada passiva composta por hidróxidos ou óxidos mais estáveis, como o Fe_3O_4 , que atua como barreira física, dificultando o ataque corrosivo. Gentil (2017) destaca que, em

valores de pH superiores a 9, especialmente entre 9 e 13, o ferro entra em uma "zona de passividade", onde a taxa de corrosão é extremamente baixa. Esse comportamento é explorado na proteção do aço em estruturas de concreto armado, uma vez que o concreto possui pH superior a 12,5, promovendo um ambiente altamente alcalino e inibidor da corrosão.

Dessa forma, o pH é um dos principais fatores a serem considerados no controle da corrosão do ferro, sendo que ambientes ácidos favorecem a corrosão ativa, enquanto ambientes alcalinos promovem a passivação e proteção do metal. (GENTIL, 2017).

2.3 INIBIDORES DE CORROSÃO

De acordo com Gentil (2017) existem alguns métodos comuns de prevenção contra a corrosão usados pela indústria. Esses métodos são: Emprego de inibidores de corrosão, modificações de propriedades de metais, emprego de revestimentos protetores metálicos e não metálicos, proteção catódica e proteção anódica. Ele também classifica inibidores de corrosão como substâncias ou misturas que em concentrações adequadas, são capazes de reduzir ou eliminar por completo o processo de corrosão. As substâncias podem ser apresentadas na literatura com as seguintes classificações: anódicos, catódicos ou mistos, não críticos, críticos, oxidantes ou não oxidantes e orgânicos ou inorgânicos.

Os inibidores, precisam atender a três requisitos para ter classificação *ecofriendly*, e são eles: não devem ser bioacumuláveis, devem ser biodegradáveis e por último, devem ter um nível de toxicidade marinha nulo ou muito baixo (UMOREN et al., 2019).

Os inibidores de adsorção são compostos orgânicos que possuem insaturações e/ou grupamentos fortemente polares contendo nitrogênio, oxigênio ou enxofre, cuja estrutura geralmente possui partes hidrofóbicas e hidrofílicas ionizáveis. Devem ser solúveis ou facilmente dispersáveis no meio que envolve o metal. Como exemplo, tem-se as aminas, aldeídos, compostos heterociclos nitrogenados, compostos contendo enxofre e compostos acetilênicos (WANG, XU, et al., 2011)

Compostos orgânicos com grupos funcionais eletronegativos e estruturas contendo ligações duplas ou triplas conjugadas demonstram eficácia como inibidores, atuando principalmente por meio da doação de elétrons, o que contribui significativamente para o processo de inibição.

A seleção de um inibidor de corrosão adequado deve considerar uma série de critérios técnicos, econômicos e ambientais, conforme destacado por Gentil (2011). De modo geral, o inibidor deve apresentar alta eficiência inibidora, mesmo em baixas concentrações, ser estável quimicamente nas condições operacionais do sistema, ter baixa toxicidade e ser compatível com os materiais metálicos e não metálicos envolvidos no processo. É igualmente desejável que o inibidor forme uma película protetora uniforme e aderente sobre a superfície metálica, evitando o contato direto entre o metal e os agentes agressivos presentes no meio corrosivo, como íons cloreto ou hidrogênio.

Entretanto, mesmo quando os inibidores atendem a esses critérios iniciais, a sua eficiência pode ser comprometida por diversos fatores secundários. Segundo Gentil (2017), a instabilidade do inibidor em determinadas faixas de pH ou sob altas temperaturas pode causar a degradação do composto, reduzindo sua ação protetora. Além disso, a presença de impurezas ou contaminantes no meio pode provocar reações indesejadas que neutralizam o efeito do inibidor ou dificultam sua adsorção sobre a superfície metálica. Outro aspecto crítico é a formação de produtos insolúveis, como precipitados ou lodos, que podem obstruir o sistema e alterar as propriedades físico-químicas da solução.

É destacado que a interação do inibidor com outros aditivos químicos, como biocidas, dispersantes e antiespumantes, pode resultar em efeitos sinérgicos ou antagônicos, comprometendo a eficiência da proteção. Em sistemas onde se utilizam inibidores orgânicos, a ação de microrganismos pode levar à biodegradação do composto, diminuindo sua durabilidade e exigindo reposições frequentes. Ademais, a dificuldade em manter a concentração ideal do inibidor, especialmente em sistemas abertos ou com variação constante de volume, pode gerar intervalos de exposição do metal ao meio agressivo, favorecendo a corrosão localizada (GENTIL, 2017).

Entretanto, caso a concentração do inibidor esteja abaixo da concentração crítica, sua eficiência é consideravelmente reduzida. Isso ocorre porque não há

cobertura suficiente da superfície metálica, o que permite que porções expostas do metal fiquem vulneráveis à ação do meio agressivo. E destaca que, nessa condição, a corrosão pode ocorrer de maneira ainda mais intensa e localizada, uma vez que o inibidor parcialmente adsorvido pode promover diferenciações na superfície do metal, criando micro células galvânicas entre as regiões protegidas e as não protegidas. (GENTIL, 2017).

Os inibidores anódicos são aqueles que atuam principalmente sobre a reação de oxidação do metal (reação anódica), retardando a liberação de elétrons pela superfície metálica. Normalmente, esses inibidores promovem a formação de uma película passivadora, composta por óxidos ou sais insolúveis, que cobre a superfície do ânodo. Um exemplo clássico de inibidor anódico é o cromato, que induz a passivação de metais como o ferro e o alumínio.

Os inibidores catódicos atuam sobre a reação de redução, ou seja, interferem nos processos catódicos como a redução de íons H^+ (em meios ácidos) ou a redução de oxigênio (em meios neutros e alcalinos). Esses inibidores geralmente funcionam por adsorção na superfície catódica, bloqueando os sítios de reação e reduzindo a velocidade da reação catódica. Alguns também atuam por precipitação de compostos insolúveis, como os fosfatos e carbonatos, que formam uma barreira protetora sobre a superfície metálica. Diferentemente dos inibidores anódicos, os catódicos não têm a mesma sensibilidade à subdosagem, sendo, por isso, considerados mais seguros em algumas aplicações industriais.

Essa inibição provoca acentuada polarização catódica. Sulfatos de zinco, de magnésio e de níquel são usados como inibidores catódicos, pois os íons Zn^{2+} , Mg^+ e Ni^{2+} , reagem com as hidroxilas na área catódica, e formam os respectivos hidróxidos insolúveis: $Zn(OH)_2$, $Mg(OH)_2$ e $Ni(OH)_2$, cessando o processo corrosivo (GENTIL, 2017).

Segundo Brycki et al. (2018), inibidores de corrosão orgânicos atuam por adsorção na superfície metálica, formando filmes protetores que reduzem a taxa de corrosão. Essa adsorção é facilitada pela presença de heteroátomos como nitrogênio, oxigênio e enxofre, bem como de sistemas conjugados de elétrons π .

Para Ahmed et al. (2024), o processo de adsorção pode ocorrer por interações físicas (forças eletrostáticas) ou químicas (ligação covalente com a superfície metálica), sendo este último mais eficiente na proteção contra corrosão.

De acordo com Al-Amiery et al. (2023), compostos naturais e sintéticos ricos em grupos funcionais polares demonstram excelente desempenho como inibidores adsorptivos, especialmente em meio ácido.

Nishikawa et al. (2018) utilizaram simulações de dinâmica molecular para demonstrar que a adsorção de compostos como o benzotriazol em superfícies de cobre ocorre com orientação específica e forte interação via orbitais π e pares de elétrons não ligantes.

Além dessas categorias, Gentil (2017) ainda menciona os inibidores mistos, que afetam simultaneamente as reações anódica e catódica, sendo muitas vezes os mais utilizados em sistemas reais por sua eficiência abrangente.

Os inibidores mistos são formados por misturas de inibidores anódicos e catódicos, acarretando um efeito sinérgico com a formação de filme protetor sobre o metal e, de maneira passiva, reduzindo a permeabilidade, e consequentemente, a penetração de íons cloreto nas partes anódicas (MACEDO, 2016).

Autores afirmam que a eficácia dos inibidores está relacionada à afinidade da molécula com a superfície metálica, à natureza dos grupos funcionais do inibidor, à estrutura molecular espacial, à estrutura eletrônica molecular, e ainda à aromaticidade e os possíveis efeitos estéricos (FLORES-DE LOS RÍOS et al., 2015; GUTIÉRRES et al., 2016).

Atrelado aos fatores responsáveis pela eficácia dos inibidores estão as características moleculares necessárias para que isso ocorra. Dentre os inibidores já estudados e conhecidos observam-se a presença de heteroátomos, como oxigênio, nitrogênio e enxofre, ligações múltiplas e/ou anéis aromáticos, que permitirão a adsorção à superfície metálica devido a presença de pares de elétrons livres e/ou elétrons π (FLORES-DE LOS RÍOS et al., 2015).

A eficiência dos inibidores pode ser determinada utilizando a expressão:

$$Ef = \frac{T_s - T_c}{T_c} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

- E_f é a eficiência em percentuais (%);
- T_s é a taxa de corrosão sem uso de inibidor em mm por ano;
- T_c é a taxa de corrosão com uso de inibidor em mm por ano.

2.4. EXTRATOS VEGETAIS COMO INIBIDORES DE CORROSÃO DO AÇO CARBONO

Os extratos vegetais, por sua vez, são compostos majoritariamente por moléculas como alcalóides, flavonóides, taninos, triterpenos, fenóis e óleos essenciais, muitos dos quais possuem justamente esses elementos funcionais em sua estrutura química. A ação inibidora ocorre, em geral, por adsorção física (forças de Van der Waals) ou adsorção química (formação de ligações coordenadas) entre os grupos funcionais do extrato e os átomos do metal, criando uma barreira protetora que reduz a troca de íons com o meio corrosivo.

Gentil (2017) também destaca que a eficiência dos inibidores orgânicos depende de fatores como a estrutura química da molécula, a polaridade, a área de adsorção e a afinidade com o substrato metálico. Esses princípios são compatíveis com os mecanismos relatados na literatura contemporânea sobre extratos vegetais, os quais têm se mostrado promissores especialmente em meios ácidos, como HCl e H_2SO_4 , frequentemente usados em processos de decapagem ou limpeza industrial.

Além disso, o uso de extratos vegetais apresenta vantagens relacionadas à biodegradabilidade, disponibilidade regional, baixo custo e baixa toxicidade ambiental, aspectos cada vez mais valorizados na engenharia de materiais e na química verde. Com base nas considerações teóricas de Gentil (2017), pode-se afirmar que os extratos vegetais se enquadram dentro da categoria dos inibidores orgânicos adsorventes, cuja ação está ligada à formação de filmes protetores por meio da interação química entre os constituintes do extrato e a superfície do metal.

Tendo finalidade de testar a eficiência de inibição para meio ácido em HCl 1,0 mol.L⁻¹ e meio neutro em casca de laranja, maracujá, caju e manga. Rocha e Gomes (2018) utilizaram extratos hidroalcóolicos a 400 ppm. O extrato de bagaço a 2% foi o único que apresentou bom resultado com eficiência de 72% de inibição em meio neutro após 72 horas de imersão, por técnica gravimétrica. Já em meio ácido, os

extratos obtiveram uma variação de 93 a 97% de eficiência de inibição. Isso mostra que certos inibidores possuem uma faixa ótima de pH, onde é mais comum terem melhor eficiência em meio ácido.

Extrato aquoso de casca de café a 800 ppm em meio ácido (HCl 1,0 mol.L⁻¹) foi testado por Cordeiro *et al.* (2018) sob imersão em 24h, o qual obteve um resultado satisfatório de 89,2% em eficiência de inibição.

Extrato aquoso de folhas pertencentes a *Citrus aurantifolia* (Lima comum) em meio ácido (H₂SO₄ 0,5 mol.L⁻¹) estudado por Haldhar *et al.* (2019) conseguiram obter 96,46% de eficiência de inibição em concentração mais baixa que 250 ppm.

O extrato aquoso das sementes de *Coriandrum sativum*, popularmente conhecido como coentro, foi avaliado nos 2 meios ácidos mais usados (H₂SO₄ 0,5 mol L⁻¹ e HCl 1,0 mol L⁻¹), e resultou em boas eficiências de inibição para ambos, na mesma concentração de 1000 ppm, obtendo 96,7% para sulfúrico e 93,7% para clorídrico (KADIRI *et al.*, 2018).

Souza *et al.*, (2010) estudaram a inibição de extratos de *Camellia sinensis* (chá-verde) em diferentes concentrações com objetivo de descobrir a relação do seu efeito antioxidante em óleo de soja, obtendo um valor crescente e diretamente proporcional ao aumento da concentração, com um máximo de 9,19 horas em 1000 ppm. Já em extrato do produto natural de concentração de 500 mg L⁻¹, SOARES *et al.* (2010) obtiveram um resultado de eficiência no aço-carbono AISI 1020 acima de 90%.

O Extrato de *Pongamia pinnata* apresentou resultados positivos na eficiência de inibição em aço, em meio ácido (HCl 1 mol.L⁻¹) de acordo com Quraishi *et al.*, (2010) sugerindo que tal inibidor formou um filme protetor que se adsorveu de forma eficiente na superfície do metal.

Torres *et al.* (2011) avaliaram os extratos aquosos de borra de café, variando o tempo de imersão do aço carbono AISI 1020 em meio ácido (HCl 1 mol.L⁻¹), através da técnica de cozimento e da infusão na inibição da corrosão. Utilizando ensaios de perda de massa para teste com imersão em 24,48 e 72 horas, obtiveram uma diminuição na sua eficiência de 97% a 80%, ambas em mesma concentração do infuso (400 mg.L⁻¹). Já para um aumento de temperatura de 25 °C para 55 °C, ocorreu um aumento de 76% para 91%.

As extrapolações das retas de Tafel obtidas pelo ensaio de curva potenciodinâmica mostraram que o fenômeno de adsorção do inibidor interfere na dissolução do metal.

O efeito inibidor de extratos hidroetanólicos (30%v/v em água etanol) de uva verde estudado por Da Rocha, et al. (2012) em aço carbono com meio ácido (HCl 1 mol L⁻¹) tanto o extrato concentrado, quanto o diluído foram baseados no decréscimo da densidade de corrente da curva de polarização anódica e catódica. Tal resultado indicou fortemente a atuação dos dois extratos como inibidores de adsorção. Já a diminuição da corrente no extrato cru e concentrado de 84% e 95% respectivamente, para 7% e 69% com aumento da temperatura (25 °C a 60 °C), mostram um comportamento de adsorção física devido a sua reversibilidade perante aspectos termodinâmicos.

Em 2 diferentes métodos de medição de eficiência de inibição à corrosão, Adebayo e Aigbogun, (2021) obtiveram 82% por polarização potenciodinâmica e 50% por perda de massa com extrato de *Thaumatococcus daniellii* (katemfe) em acetona (1x10⁴ ppm).

Outro ponto importante mencionado é que a solubilidade dos compostos ativos presentes nos extratos vegetais em diferentes meios (ácidos, alcalinos ou salinos) pode influenciar diretamente na eficiência do inibidor. Portanto, a seleção do meio adequado para a aplicação desses extratos é fundamental para garantir que a proteção contra a corrosão seja duradoura e eficaz.

Em resumo, os extratos vegetais apresentam-se como uma alternativa sustentável e eficaz para a proteção contra a corrosão, com a vantagem de serem biocompatíveis e menos agressivos ao meio ambiente. No entanto, para a implementação prática, é necessário controle rigoroso da qualidade e da concentração dos extratos, além de testes contínuos para garantir a consistência e a eficácia da proteção oferecida por esses inibidores naturais.

O extrato de folhas de *Moringa oleifera* apresenta atividade inibidora da corrosão principalmente devido à presença de diversos compostos fitoquímicos, entre os quais se destacam fenóis, flavonoides, taninos, glicosídeos e alcalóides. Essas moléculas possuem grupos funcionais que interagem com a superfície metálica, promovendo adsorção e formação de uma camada protetora, reduzindo significativamente a taxa de corrosão (UGBE et al., 2014).

Em particular, o estudo conduzido por Ugbe *et al.* (2014) identificou, no extrato etanólico da folha de moringa, fitoquímicos como saponinas, taninos, flavonoides, glicosídeos, carboidratos, açúcares redutores, terpenóides, esteróides e alcalóides, atribuindo a eles a interação adsorptiva com a superfície metálica e consequentemente a atividade inibitória. Estruturas de ácidos fenólicos e flavonoides como ácido quínico, gallico, cafeico, p-cumarico, quercetina, kaempferol, luteolina etc. (Figura 4) foram as principais moléculas responsáveis pelas características antioxidantes encontrados no extrato hidro-metanólico de acordo com o estudo de Bennour *et al.* (2020).

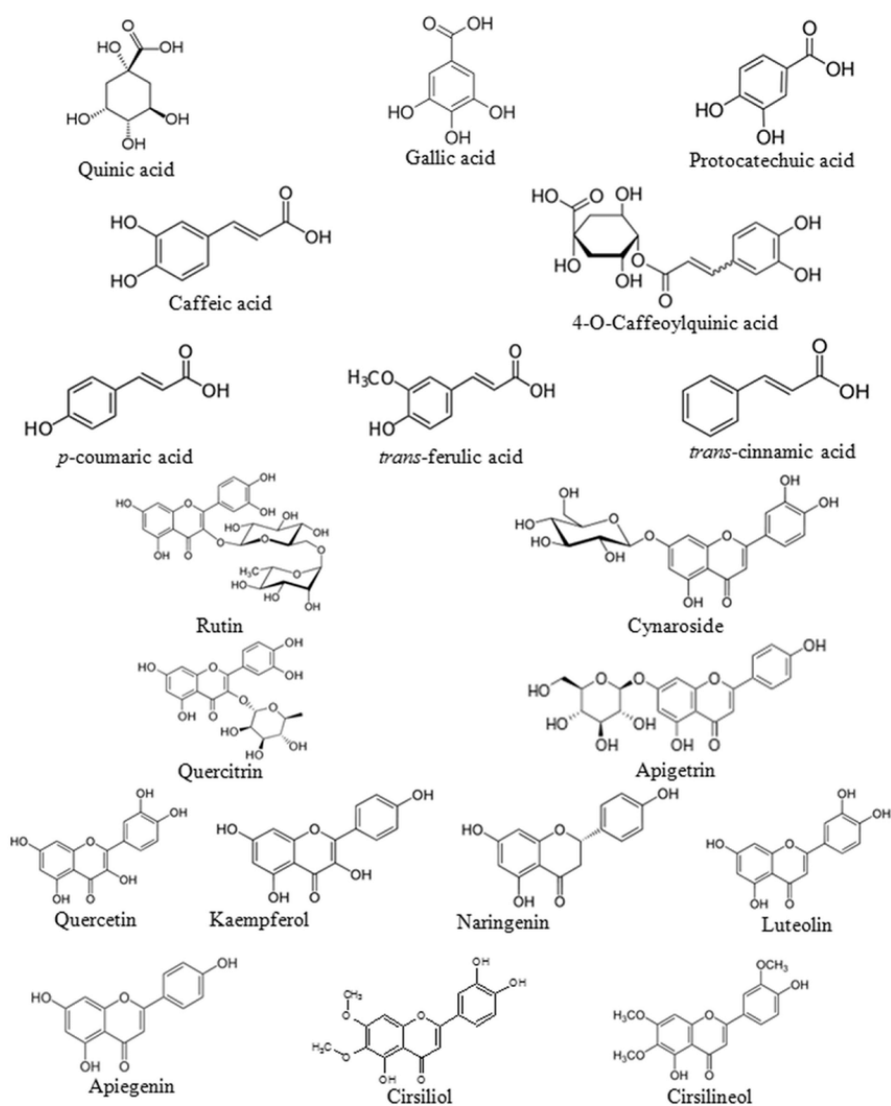


Figura 4- Estruturas químicas dos ácidos fenólicos detectadas por fase reversa RP-HPLC de frações de solventes de *Moringa oleifera*

Fonte: Bennour *et al.* (2020)

Mais recentemente, Didouh et al. (2023), ao estudar o extrato aquoso (MOLE) em meio ácido, realizaram análises espectroscópicas (FT-IR, UV-vis) e identificaram grupos funcionais como hidroxila (OH) e carbonila como principais responsáveis pela adsorção física na superfície do aço. Os autores demonstraram que a eficiência inibidora pode atingir até 99%, reforçando o potencial da *Moringa oleifera* (Figura 5) como uma alternativa verde e eficaz para o controle da corrosão metálica em meios agressivos.



Figura 5- Sementes e folhas de *Moringa oleifera*

Fonte: Shopee 2025

Dessa forma, conclui-se que, embora não haja uma única molécula responsável, os compostos fenólicos e flavonóides contendo grupos funcionais ativos são os principais agentes responsáveis pela formação da camada protetora que inibe o processo corrosivo.

3. METODOLOGIA

Nesta seção, serão abordados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do presente trabalho de pesquisa.

3.1 MATERIAIS

- Vidrarias
- Papel filtro D150mm 80G
- Almofariz e pistilo
- Banho ultratermostatizado Marconi MA - 184
- Agitador magnético
- Condensador de bolas
- Mangueira
- Balança analítica
- Refrigerador
- Resistência elétrica em bastão
- Estufa
- Vidro ou frasco âmbar
- Funil de separação
- Becker (250 mL)
- Evaporador rotativo
- Cupons de aço-carbono AISI 1020 (3,0 cm x 2,0 cm x 0,06 cm)
- Fios de nylon
- Água destilada
- Papel esmeril (400, 600 e 1200 mesh)
- Etanol
- Termopar
- Folhas de Moringa oleífera
- Balão de vidro de três bocas
- Incubadora shaker Marconi MA - 420
- Peneira comum
- Rolha de silicone.

A Figura 6 mostra as etapas para preparação do inibidor e Cupons.

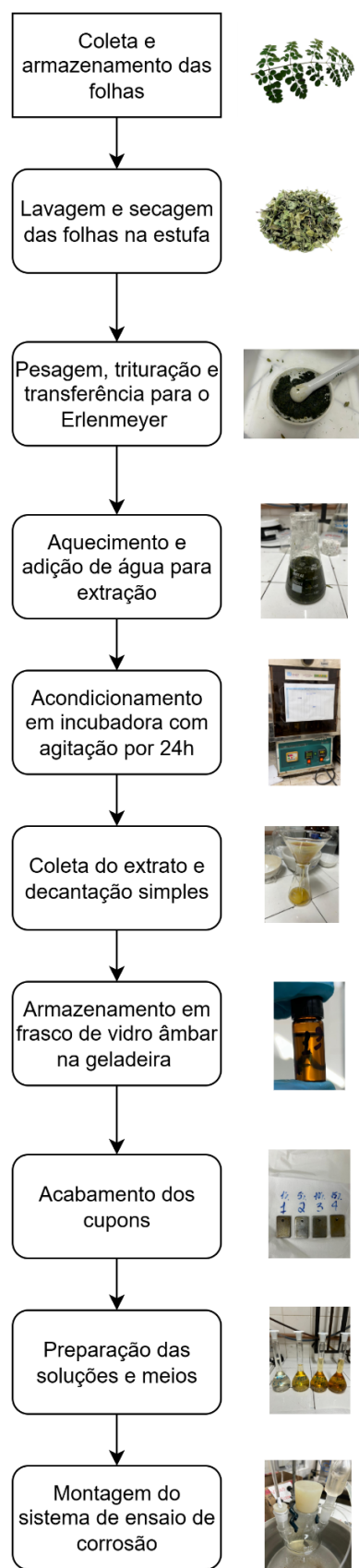


Figura 6- Fluxograma das etapas para ensaio de corrosão

3.2 OBTENÇÃO DO INIBIDOR VERDE

Foram coletadas folhas de Moringa (Figura 7) um dia antes do início do processo de extração (500g), sendo anotada a hora, data e local de coleta das folhas. Após a coleta, as folhas foram limpas em água corrente, secadas a temperatura ambiente por 2 horas, acondicionadas e armazenadas em um saco plástico previamente identificado a -20°C .



Figura 7- Folhas de *Moringa de oleífera* usadas na extração

Fonte: autoria própria

Para o processo de extração por infusão, foram pesados 160 g de folhas, que foram trituradas com almofariz e pistilo, e misturadas com 500 mL de água destilada previamente fervidas por 20 minutos ou até levantar fervura. A extração foi realizada por 24 horas na incubadora shaker (Figura 8) agitando a uma velocidade de 30 Hz e temperatura de 30°C com a finalidade de promover uma agitação e mudar o modo de transferência de massa para uma convecção forçada. A agitação aumenta a taxa de transferência de massa, pois promove a remoção das camadas limites de fluido próximo à superfície de contato, permitindo que os componentes se movam mais rapidamente para a região onde está sendo transferido, com o efeito de resistência à transferência de massa da camada limite reduzida.



Figura 8- Incubadora shaker da marca Marconi e suas configurações

Fonte: autoria própria

Após a extração, o líquido foi filtrado com filtro Whatman N°1 (Figura 9) e armazenado na geladeira por 24 horas. Ao término do período de extração, a micela contendo óleo e solvente foi passada para um evaporador rotativo por 30 minutos a uma temperatura de 70°C no banho. O processo foi repetido 4 vezes, ou até que se obteve uma quantidade próxima de 100 mL.



Figura 9- Filtração simples do extrato

Fonte: autoria própria

3.3 ENSAIOS DE IMERSÃO COM MEDIDA DE PERDA DE MASSA

3.3.1 Preparação dos Corpos de Prova

Os corpos de prova (cupons) de aço carbono 1020 foram utilizados nas dimensões médias de 3,0 cm x 2,0 cm x 0,06 cm (Figura 10). Os cupons foram lixados com papel de esmeril até a remoção total de óxidos, lavados com água, detergente, imersos em etanol e secos com papel absorvente.

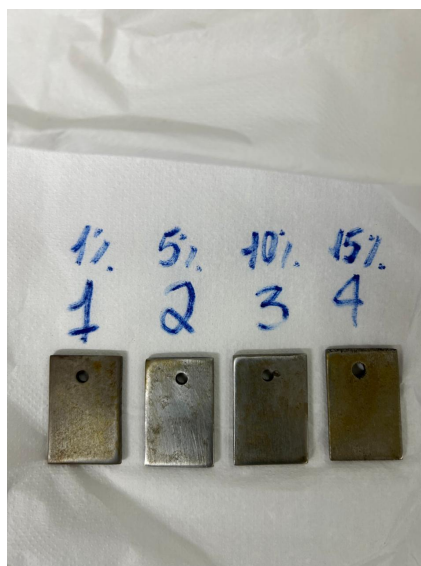


Figura 10- Cupons de aço carbono AISI 1020 sem acabamento utilizados nos ensaios

Fonte: autoria própria

Esses cupons foram presos em fios de nylon e imersos em béqueres contendo 100 mL de solução HCl 1M.

3.3.2 Ensaios de perda de massa

Os ensaios de perda de massa foram realizados em presença e ausência de inibidor. Após determinado tempo, os corpos de prova foram retirados, imediatamente limpos, secos e pesados em balança analítica (Figura 11).

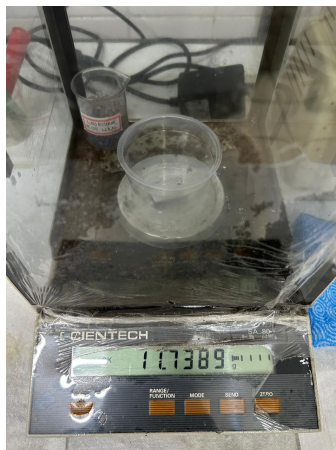


Figura 11- Pesagem do cupom em balança analítica da cientech

FONTE: autoria própria

Este procedimento foi repetido para diferentes tempos de imersão variando de meia em meia hora até 3 horas, totalizando 6 pontos experimentais em duplicata, com o meio sem inibidor, avaliando a perda de massa antes e depois do ensaio. A preparação do extrato foi realizada em teores de 0%, 1%, 5%, 10% e 15% (v/v) no meio com tempo fixo de 0,5 hora e temperatura de 30°C devido às condições ótimas encontradas nos testes que o antecederam estes ensaios (Figura 12).



Figura 12- Ensaios de corrosão para diferentes concentrações do extrato da moringa (15%, 5% e 0%) em $t = 0,5$ hora, $C_{HCl} = 1$ M e $T = 30^{\circ}C$

Fonte: autoria própria

A critério de comparação com outros inibidores, também foram realizados ensaios usando os mesmos parâmetros (temperatura, tempo e faixa de concentração), mudando o inibidor para ácido ascórbico e glicerol nas mesmas faixas de concentrações de 1%, 5%, 10% e 15% (v/v) (Figura 13).



Figura 13- Soluções do extrato, do ácido ascórbico e do glicerol (1%, 5%, 10% e 15% em v/v)

Fonte: autoria própria

3.3.3 Avaliação da temperatura

Para a avaliação do efeito da temperatura, os ensaios foram realizados em um sistema com aquecimento (banho termostático), utilizando um balão de vidro de três bocas com condensador e termopar como mostra a Figura 14. As medições foram feitas em triplicatas, fixando-se cada um dos três parâmetros, exceto pela temperatura variando de 30°C até 60°C (concentração e tempo) com intervalos de 10°C, em condições de 5% de concentração do inibidor e 0,5 hora de tempo do ensaio. Os parâmetros foram escolhidos para o ensaio de corrosão com variação de temperatura pelo fato dessa configuração apresentar o maior valor da taxa de corrosão (T_c), promovendo uma maior amplitude para a sua variação.



Figura 14 - Configuração e equipamentos para ensaios de corrosão com variação de temperatura em banho termostático

Fonte: autoria própria

Após os ensaios, os cupons oxidados foram lavados com água destilada, seguidos de imersão em etanol PA por 1 minuto e secos com papel absorvente. Após a limpeza dos óxidos, os cupons foram secados e pesados novamente. Os dados de massa inicial e final obtidos pela pesagem foram usados na equação 3 para cálculo da taxa de corrosão. Consecutivamente, foram usados os dados das taxas de corrosão na equação 4 para obter as respectivas eficiências de corrosão nas diferentes condições de temperatura e concentração. A densidade do aço ($\rho_{\text{aço}}$) utilizada foi de 7,86 (g.cm⁻³) e a constante de conversão (K) foi de 87600 (mm.g⁻¹.cm⁻².ano⁻¹).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIO DE CORROSÃO SEM O INIBIDOR EM DIFERENTES TEMPOS

Primeiramente, foi estudado o comportamento dos cupons em meio ácido 1M em HCl em diferentes tempos, para posterior construção da curva da taxa de corrosão por tempo.

Foi constatado a ocorrência da evolução do hidrogênio nos primeiros segundos da reação (Figura 15), mostrando a agressividade do meio ácido (HCl, 1 M) ao aço carbono AISI 1020 escolhido.

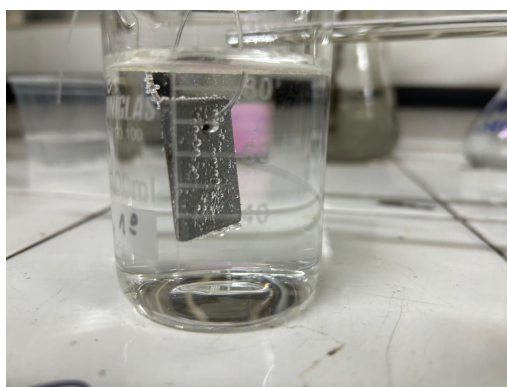


Figura 15 - Bolhas de gás hidrogênio sendo liberadas.

FONTE: autoria própria

Entretanto, devido ao meio ácido e ao baixo tempo de exposição (5 horas), não foram observados a presença visível de ferrugem ou óxido férrico (Fe_2O_3) disperso no meio, só em regiões pontuais, mostrando o início da sua formação.

Esse resultado está de acordo com o esperado, já que em meio ácido a tendência é primeiramente, a formação de camadas de magnetita ou óxido de ferroso-férrico (Fe_3O_4) para depois formar o óxido férrico. Em soluções mais concentradas de ácido, ele tende a formar-se como um intermediário em reações redox, onde o ferro se encontra tanto no estado de oxidação +2 quanto +3.

Logo após os ensaios, é seguido com os valores necessários para efetivar o cálculo da taxa de corrosão dos cupons estudados em diferentes tempos de imersão na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados para placa de Aço Carbono com solução de HCl 1M

Tempo (h)	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Área (x2) (cm²)	Massa inicial (g)	Massa final (g)
0	-	-	-	-	-
0,25	2,18	3,07	13,3852	12,5982	12,5943
0,5	2	3,05	12,2	11,8165	11,8062
1	2,18	3,07	13,3852	12,618	11,7984
1,5	2,06	3,05	12,566	12,283	12,2658
2	2,07	3,02	12,5028	12,3729	12,3591
2,5	1,962	3,00	11,722	13,5973	11,5767
3	1,972	3,05	12,0292	13,2165	10,1923
4	1,962	3,00	11,772	11,5423	11,518
5	1,972	3,05	12,0292	11,503	11,481

A Tabela 2 mostra os valores de perda de massa, com a perda de massa por área (m/cm²) e a taxa de corrosão (mm/ano).

De acordo com a norma ASTM G1-03 (2011), pode-se calcular a taxa de corrosão (Tc) em milímetros por ano (mm.ano⁻¹), segundo a equação 3 mostrada na seção 2.3:

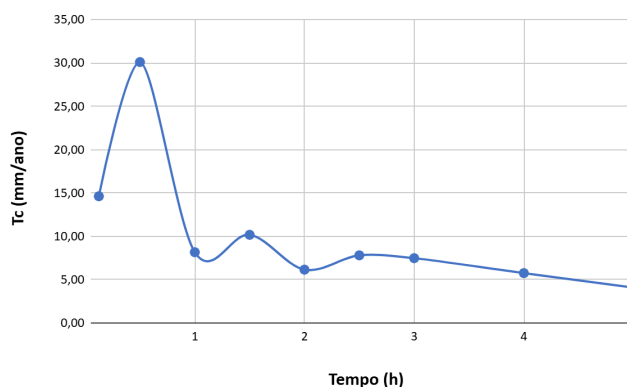
$$Tc = \frac{K \cdot \Delta m}{A \cdot t \cdot \rho}$$

Onde o delta m é dado pela perda de massa em gramas, A é a área em cm², t é o tempo de exposição em horas, ρ é a massa específica do material (7,86 g.cm⁻³), e K é igual a 87600, que é uma constante específica para obtenção da taxa de corrosão na unidade de mm.ano⁻¹. A densidade considerada para o aço-carbono foi de 7,86g/cm³.

Tabela 2 - Perda de massa, perda de massa por área e a taxa de corrosão.

Tempo (h)	$\Delta m(g)$	$\Delta m/A (g.cm^{-2})$	Tc (mm/ano)
0	0,0000	0,0000	0,0000
0,25	0,0039	0,0002	14,62
0,5	0,0181	0,0008	30,31
1	0,0098	0,0007	8,16
1,5	0,0172	0,0014	10,17
2,0	0,0138	0,0011	6,15
2,5	0,0206	0,0017	7,80
3	0,0242	0,0020	7,47
4	0,0243	0,0021	5,75
5	0,0220	0,0018	4,08

Usando os dados da Tabela 2 acima, foi possível construir o gráfico da Figura 16 onde temos a relação da taxa de corrosão por tempo.

**Figura 16** - Estudo cinético de solução HCl 1M sem inibidor.

A curva presente mostrou um comportamento esperado em comparação com outros estudos feitos em ensaios de corrosão com meio ácido em HCl 1M e cupom de aço AISI 1020. O comportamento de crescimento brusco nos primeiros minutos pode ser atribuído à possível formação de óxidos de ferro II e ferro III que não dependem da presença de O_2 no meio para a sua reação. Já a queda acentuada logo perto da primeira hora, mostra um comportamento de proteção dessa camada de óxido perante o meio ácido, uma espécie de passivação. Em meios estagnados

onde há o acúmulo dos íons Fe^{+2} e Fe^{+3} ao redor da superfície é possível observar esse comportamento decrescente com o tempo, até se estabilizar. A formação de gás hidrogênio na superfície do cupom, a partir nas áreas catódicas, podem polarizar o metal, oferecendo uma resistência a locomoção dos íons hidrônios $\text{H}_3\text{O}^+_{(\text{aq})}$ até a superfície, bem como das moléculas de oxigênio até a superfície do metal. É também possível correlacionar ao consumo de oxigênio e a dificuldade de reposição do mesmo via transferência de massa do $\text{O}_{2(\text{g})}$ do ar para o meio aquoso, visto a ausência de agitação do meio.

4.2 ENSAIO DE CORROSÃO COM O USO DE INIBIDOR EM DIFERENTES TEMPOS

Em se tratando de comparação de inibidores de corrosão, foram feitos ensaios em meio ácido HCl 1M com variação do inibidor em diferentes concentrações, usando inicialmente o extrato da *Moringa oleifera* e na sequência ácido ascórbico e a glicerol já conhecidos em estudos anteriores como o de Jacby (2018) com resultado de máxima eficiência de 77,82% para a glicerol em concentração de 2% do inibidor. Já Ferreira et al. (2004) analisaram aço em meio com pH 2 até 6 e encontraram 69% de eficiência de inibição usando ácido ascórbico $1 \times 10^{-3} \text{ mol L}^{-1}$ em pH 4. A Figura 17 mostra as estruturas do ácido cítrico e do glicerol respectivamente.

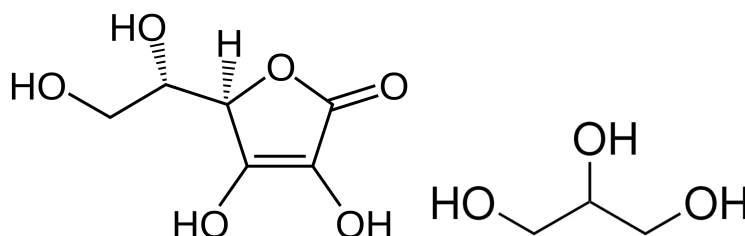


Figura 17 - Estrutura química dos inibidores utilizados como comparação, onde a esquerda tem o ácido ascórbico e a direita o glicerol.

Fonte: Wikipedia (2025)

O glicerol e o ácido ascórbico possuem ambos os átomos de nitrogênio ligados a oxigênio na cadeia carbônica. Essa ligação com forte diferença de eletroafinidade possibilita uma maior densidade eletrônica na região dos oxigênios e assim possibilitando uma atração à superfície do metal. Essas características contribuem ativamente para bons inibidores de corrosão, possibilitando a doação de elétrons na superfície do metal e para reduzir o íon $H^+_{(aq)}$.

Estudos recentes que investigam o uso de fármacos como bifonazol e terconazol como inibidores de corrosão em meio de HCl 1 M corroboram esse mecanismo, indicando que os heteroátomos presentes nas moléculas inibidoras são capazes de formar ligações coordenadas com a superfície metálica. Essa adsorção promove uma redução significativa na evolução de hidrogênio (reação catódica) e, simultaneamente, oferece proteção contra a dissolução anódica do aço carbono (AL-JUAID *et al.*, 2016).

No estudo sobre o uso de fármacos como inibidores de corrosão em aço carbono imerso em HCl, autores como Fang e Frauches (2014) destacam que a adsorção segue um modelo de Langmuir, sugerindo que os inibidores se ligam de forma individual a sítios metálicos, tamponando tanto reações anódicas quanto catódicas.

A interação começa com a transferência de elétrons dos heteroátomos do inibidor para o metal (Fe), formando um quelato e criando uma camada protetora e os heteroátomos (N, O, S) atuam como centros nucleofílicos, doadores de par eletrônico, responsáveis pela ligação coordenada ao metal (FANG; LI, 2002 apud FRAUCHES-SANTOS *et al.*, 2014).

Para efetuar o cálculo de eficiência de corrosão foi utilizado a seguinte equação 4 a seguir (apresentada na seção 2.3):

$$Ef = \frac{T_s - T_c}{T_c} \times 100$$

4.3 ENSAIO DE CORROSÃO COM ÁCIDO ASCÓRBICO COMO INIBIDOR EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES

Após realizados os ensaios e efetuadas as etapas conforme a metodologia de ensaio gravimétrico, variando as concentrações conforme Tabela 3 a seguir, é possível construir a curva da Figura 17 com valor de eficiência máxima igual a 72%. Para critério de comparação, foram feitos nos mesmos intervalos de concentração do extrato de *Moringa oleiferae* tempo de ensaio de 30 minutos e temperatura de 30°C. A Figura 18 mostra a eficiência de inibição com a concentração (v/v) do inibidor Ácido ascórbico.

Tabela 3 - Eficiência do ácido ascórbico como inibidor em solução de HCl 1M.

Inibidor % (v/v)	Δm (g)	$\Delta m/A$ (g/cm ²)	Tc (mm/ano)	Eficiência (%)
0	0,0103	0,00080	18,8187	0
1	0,0032	0,00028	6,3416	66,30
5	0,0034	0,00029	6,3420	66,38
10	0,0028	0,00028	5,9687	68,28
15	0,0355	0,00023	5,2226	72,25

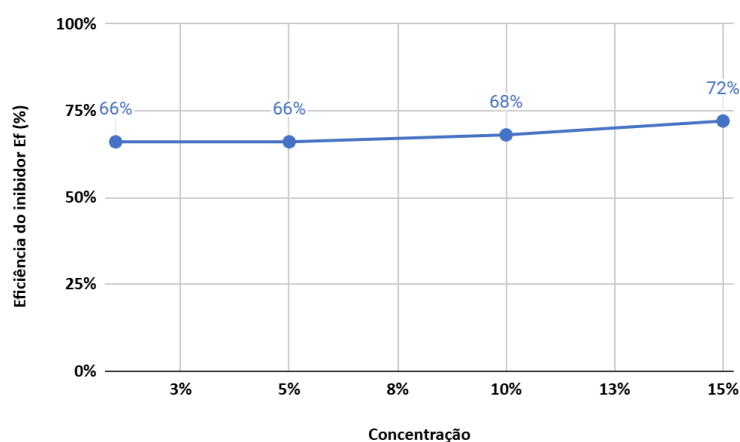


Figura 18 – Variação da eficiência de inibição com a concentração (v/v) do inibidor Ácido ascórbico.

Os resultados de perda de massa evidenciam um leve aumento da eficiência do Ácido ascórbico como inibidor com o aumento da sua concentração. O melhor resultado foi com 15% (v/v) do ácido, apresentando 72,25% de eficiência de inibição. Entretanto, os intervalos estudados apresentaram não ser o ideal para encontrar o máximo de eficiência desse inibidor em específico, indicando que fora desse

intervalo ainda exista valores de eficiência maiores, visto a ausência de decrescimento e crescimento. No entanto, valores de concentração muito elevados do inibidor inviabilizam a utilização do mesmo devido ao alto custo.

4.4 ENSAIO DE CORROSÃO DO GLICEROL COMO INIBIDOR EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES

Após repetir o mesmo procedimento e mesmas condições de temperatura e tempo do ensaio do estudo feito com o ácido ascórbico, foi possível construir a Tabela 4 com valores de eficiência de inibição

o (E_i) do glicerol. A Figura 19 mostra a eficiência de inibição com a concentração do inibidor glicerol.

Tabela 4 - Ensaio com solução de HCl 1M e glicerol como inibidor.

Inibidor % (v/v)	Δm (g)	$\Delta m/A$ (g/cm ²)	Tc (mm/ano)	Eficiência (%)
0	0,0103	0,0008	18,8187	0
1	0,00921	0,0008	16,8272	10,58
5	0,0075	0,0006	14,2011	24,54
10	0,0056	0,0004	9,9335	47,21
15	0,0035	0,0003	6,5283	65,31

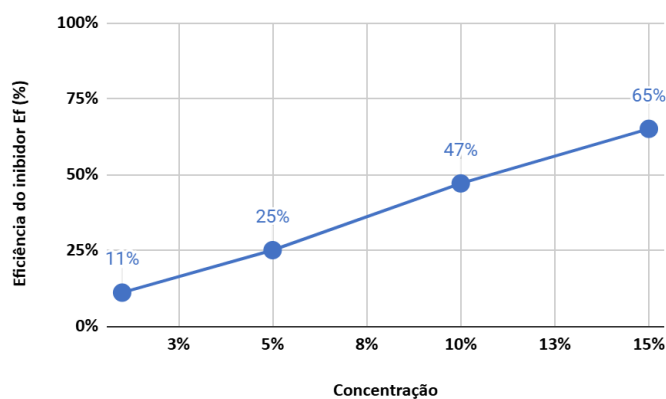


Figura 19 – Variação da eficiência de inibição com a concentração (v/v) do inibidor glicerol.

A variação da eficiência se mostrou mais acentuada na faixa estudada (1%~15%) onde apresentou a maior inclinação de todos os 3 inibidores estudados. O seu valor máximo alcançado foi de 65,31% de eficiência com o uso de 15% (v/v). Entretanto, assim como foi observado no ácido ascórbico, o glicerol também mostrou ausência de decréscimo evidenciando também a impossibilidade de concluir que seja o limite superior de eficiência do inibidor em uma faixa mais ampla.

De acordo com o estudo de Ferreira et al. (2015), observou-se que características como massa molar elevada, maior número de heteroátomos e a presença de sistemas π -conjugados estão diretamente relacionadas ao aumento da eficiência de inibição da corrosão. Segundo os autores, compostos com cadeias alquílicas mais longas e maior número de átomos doadores de elétrons tendem a apresentar desempenho superior, uma vez que favorecem uma melhor cobertura da superfície metálica e proporcionam maior densidade eletrônica nas regiões reativas, o que contribui para a formação de camadas protetoras mais eficazes.

Essa relação propõe justificar um valor de eficiência máxima dentro do intervalo menor do glicerol em relação aos demais, visto a sua ausência de duplas conjugadas e menor quantidade de grupos OH.

4.5 ENSAIO DE CORROSÃO DO EXTRATO DA FOLHA DE MORINGA OLEIFERA COMO INIBIDOR EM DIFERENTES CONCENTRAÇÕES

De acordo com o objetivo do presente trabalho, o uso do extrato das folhas de *Moringa oleifera* como inibidor de corrosão foi escolhido devido ao fato de ser um material natural, oferecendo uma alternativa mais sustentável. Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 5 e Figura 20.

Tabela 5 - Ensaio com solução de HCl 1M com extrato de *Moringa oleifera*.

Inibidor % (v/v)	Δm (g)	$\Delta m/A$ (g/cm ²)	Tc (mm/ano)	Eficiência (%)
0	0,1041	0,0077	17,2479	--
1	0,0261	0,0020	4,5490	70,87
5	0,0218	0,0017	3,8879	87,93
10	0,0238	0,0019	4,3201	83,03

15	0,0329	0,0025	5,4627	68,28
----	--------	--------	--------	-------

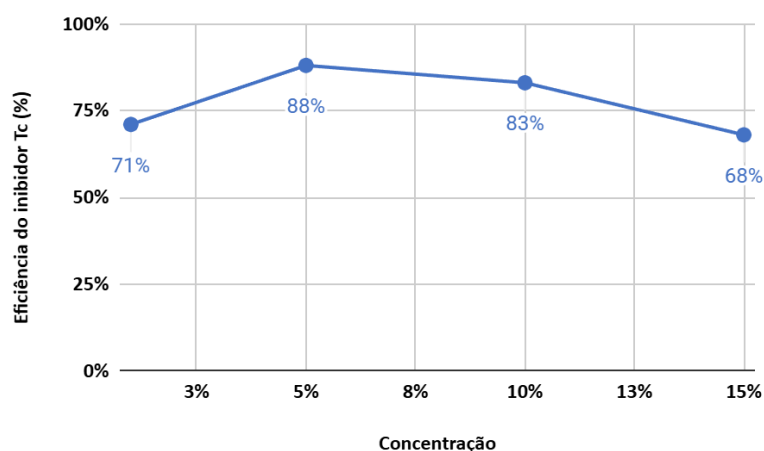


Figura 20 – Variação da eficiência de inibição com a concentração (v/v) do extrato da *Moringa oleifera*.

O efeito da variação da concentração se mostrou o mais diferente de todos os inibidores estudados. Além de apresentar uma variação não estritamente decrescente, ele foi intermediário em relação à inclinação dos intervalos, porém mostrou o maior valor de eficiência de inibição dentro do intervalo de 1% até 15% de concentração em v/v. Inclusive, foi o único que se observou um valor máximo geral, ao observar a presença da mudança de crescimento para decrescimento após os 5% de valor de concentração. Isso mostrou um intervalo de estudo satisfatório e desejado para o extrato, visto que não é necessário ampliação da faixa estudada para aumentar a sua eficiência. Foi também observado que o seu valor máximo alcançado foi encontrado em valores relativamente baixos de concentrações, sugerindo um melhor aproveitamento das misturas de moléculas em formar uma cobertura na superfície metálica com maior densidade eletrônica nas regiões reativas.

4.6 EFEITO DA TEMPERATURA

As condições escolhidas de concentração e tempo de ensaio de corrosão com efeito da temperatura se basearam nas que obtiveram o maior valor de eficiência de corrosão (E_f), o qual foi 88% para concentração de 5% em v/v, e tempo de 30 minutos para ensaio de corrosão sem inibidor, com taxa de corrosão de 30,31

mm/ano. Para avaliar o efeito da temperatura na eficiência do inibidor foram feitos ensaios utilizando o sistema de aquecimento com temperaturas de 30, 40, 50 e 60°C. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6 e Figura 21.

Tabela 6 - Efeito da temperatura com solução de HCl 1M e extrato a 5%(v/v).

Temperatura (°C)	$\Delta m(g)$	$\Delta m/A$ (g/cm ²)	Tc (mm/ano)
30	0,0046	0,00038	8,40
40	0,0057	0,00047	10,41
50	0,0081	0,00066	14,80
60	0,0116	0,00095	21,19

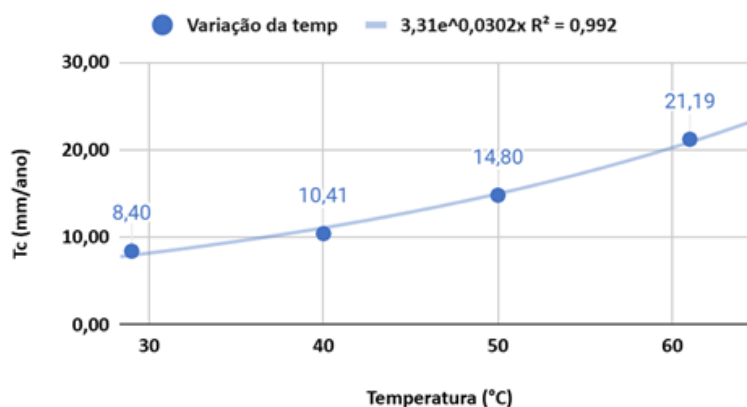


Figura 21 - Efeito da temperatura com extrato de *Moringa oleifera* a 5%(v/v).

Ao observar o gráfico da Figura 21, foi possível confirmar um comportamento esperado com o aumento da taxa de corrosão diretamente proporcional ao aumento da temperatura. O ajuste não linear também mostrou um comportamento de equação exponencial, o qual é explicado pela equação de Arrhenius no tópico da energia de ativação (equação 3). Esse tipo de comportamento indica um tipo de adsorção física, onde o aumento da temperatura promove a dessorção das moléculas na superfície metálica.

Foram feitos ensaios com a solução de HCl 1M sem a presença de inibidor a critério de comparação da perda de eficiência exclusivamente relacionado a temperatura. Ao realizar o ensaio sem o inibidor, percebeu-se uma taxa de corrosão muito próxima de resultados anteriores em que foram construída a curva da taxa de

corrosão com o tempo como na figura 15, mostrando um grau de reprodução confiável. A Tabela 7 e Figura 21 mostram o efeito da temperatura na taxa de corrosão sem inibidor.

Tabela 7 - Efeito da temperatura com solução de HCl 1M sem inibidor.

Temperatura (°C)	Δm (g)	$\Delta m / A$ (g/cm ²)	Tc (mm/ano)
30	0,1038	0,0001	30,31
40	0,017	0,0014	32,19
50	0,0195	0,0017	36,92
60	0,0217	0,0018	41,09

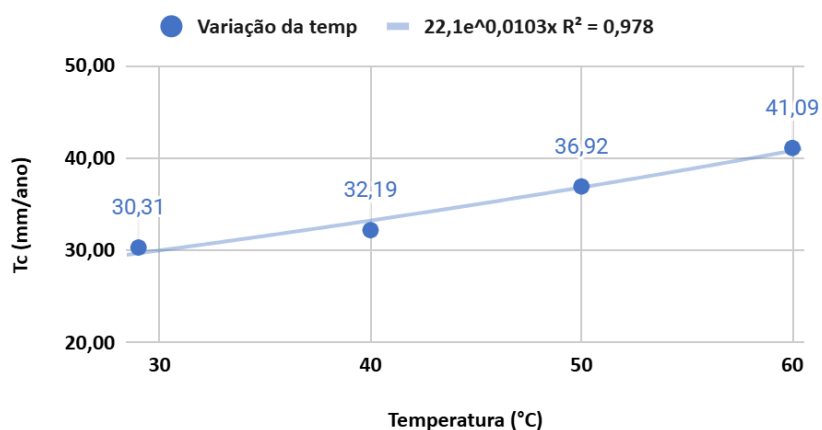


Figura 22 - Efeito da temperatura sem inibidor.

Baseando-se na Equação 4 foi possível então calcular a eficiência do inibidor em temperaturas de 30, 60 e 80°C mostrada na Tabela 8:

Tabela 8 - Eficiência do inibidor com o efeito da temperatura.

Temperatura (°C)	Tc (mm/ano) sem inibidor	Tc (mm/ano) com inibidor	Eficiência (%)
30	30,31	8,40	72,29
40	32,19	10,41	67,66
50	36,92	14,80	59,92

60	41,09	21,90	48,43
----	-------	-------	-------

A variação da eficiência se mostrou dentro da expectativa, visto que a taxa de corrosão estava diminuindo conforme a temperatura ia aumentando, e o R^2 obteve um valor de 0,978 indicando um bom ajuste para um modelo de equação exponencial conforme indica a equação de Arrhenius. Ambos os resultados foram esperados e semelhantes com o que se encontra em outros estudos como em Talensari et al. (2012) que analisaram o extrato de *Curcuma longa*, demonstrando que a eficiência de inibição diminui com o aumento da temperatura, acompanhada por um aumento da energia de ativação e da entalpia do processo.

Os valores obtidos no seu estudo confirmam a predominância da físico-adsorção, obedecendo à isoterma de Langmuir, o que ressalta a fragilidade da camada protetora em condições térmicas mais severas (TALENSARI et al., 2012). Similarmente, Anggita Gusniardi et al. (2023) investigaram o extrato de *Excoecaria cochinchinensis* ("Sambang Darah") em aço AISI 1020 imerso em HCl 1 M, observando que sua eficiência de inibição atinge cerca de 88 % em $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, mas declina significativamente com o aumento da temperatura. A análise indicou adsorção via modelo de Langmuir e comprovou a formação de filme protetor por meio de espectroscopia de FT-IR (Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier) e imagens de SEM (Microscopia Eletrônica de Varredura).

Outros estudos, como os compilados por Sheydaei et al. (2024), corroboram esse comportamento universal de extratos vegetais onde a eficiência tende a diminuir conforme aumenta a temperatura, evidenciando uma adsorção predominantemente física, e melhora com maior concentração do extrato, sendo muitas vezes expressiva em curvas comparativas com e sem inibidor.

4.7 ENERGIA DE ATIVAÇÃO

Existem diversos modelos que relacionam a variável temperatura com a velocidade ou taxa de reação de diversas reações através de diferentes mecanismos.

A análise dos parâmetros de ativação por meio da equação de Arrhenius (Equação 5) é amplamente empregada em estudos que investigam a eficiência de

inibidores orgânicos no aço AISI 1020 em meio ácido. No trabalho de Schmitz et al. (2023), três derivados de bis-Schiff (BS2, BS4 e BS8) foram avaliados nesse sistema corrosivo, sendo obtidos valores de **energia de ativação (Ea)** significativamente maiores na presença dos inibidores, em comparação ao ensaio sem inibidor (*blank*). A relação da taxa de corrosão com a variável temperatura pode ser dada pela seguinte equação abaixo:

$$k = A \cdot e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} \quad (5)$$

Onde:

- k = constante da taxa de reação (ou taxa de corrosão),
- A = fator pré-exponencial (frequência de colisões),
- E_a = energia de ativação (J/mol),
- R = constante dos gases ideais (8,314 J/mol·K),
- T = temperatura absoluta (K),
- e = número de Euler ($\approx 2,718$).

A partir da equação 5, foi possível fazer uma linearização através de uma transformação matemática nos dois lados das equações, resultando na equação 6 logo abaixo:

$$\ln k = - \left[\frac{E_a}{RT} \right] + \ln A \quad (6)$$

Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 9 e Figura 23.

Tabela 9 - Valores para construção do gráfico da equação linearizada.

Temperatura (°C)	Temperatura (K)	1/T (K ⁻¹)	k [$\Delta m/A \cdot h$] (g cm ⁻² h ⁻¹)	Ln k
30	302,15	0,0033	0,0008	-7,18
40	313,15	0,0032	0,0009	-6,97
50	323,15	0,0031	0,0013	-6,63
61	334,15	0,0030	0,0019	-6,27

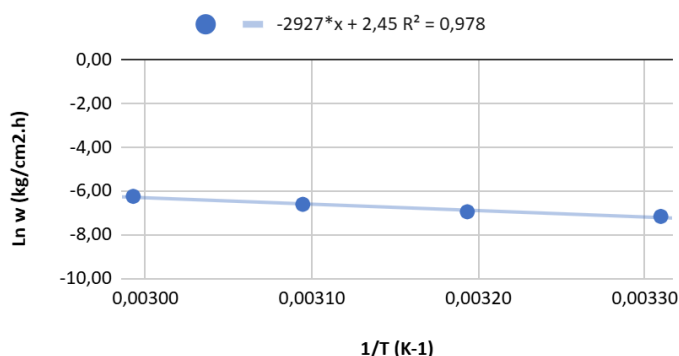


Figura 23 - Curva de Arrhenius com extrato em 5% (v/v) em solução de HCl 1M.

Como observado no gráfico da Figura 23, o ajuste linear foi satisfatório com R^2 de 0,978. Após êxito no ajuste, foi possível determinar a energia de ativação aparente (E_a) associada ao processo de corrosão dos cupons em solução de ácido clorídrico 1 M na presença do extrato de moringa a 5% a partir da relação expressa pela equação 6.

Do gráfico apresentado na Figura 23, com uma linha de tendência linear, tem-se que:

$$y = -2927 x + 2,45.$$

Comparando-se com a equação de Arrhenius linearizada temos:

$$\frac{E_a}{R} = 2.927,00$$

onde $R = 8,314 \text{ J/Kmol}$, tem-se que E_a é de **24,3235 kJ/mol**.

A reação é moderadamente influenciada, devido ao valor de energia de ativação apresentado em relação a outros estudos presentes na literatura.

Esse resultado indica que a reação de corrosão com o inibidor em solução de HCl $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ apresenta uma barreira energética moderada, consistente com um mecanismo de adsorção predominantemente físico, típico de extratos vegetais (FRAUCHES-SANTOS et al., 2014).

A partir da análise comparativa, observa-se que os valores de E_a determinados para extratos vegetais como *Stevia rebaudiana* e *Spirogyra* superam

60 kJ·mol⁻¹, indicando mecanismos de proteção robustos envolvendo adsorção química ou mista (VERMA; KHAN, 2012; TALENSARI et al., 2016). No presente trabalho, o valor de **Ea = 24,32 kJ·mol⁻¹** sugere que a proteção ocorre via **adsorção física**, com menor barreira energética. Essa diferença implica que, sob temperaturas elevadas, o inibidor testado tende a perder eficiência mais rapidamente, tornando-se menos adequado para aplicações em ambientes termicamente agressivos."

Após calculado a energia de ativação, repetiu-se o procedimento com os dados do ensaio de corrosão com variação de temperatura em ausência do inibidor a critério de comparação. Foi possível observar a partir da figura 24, um comportamento semelhante ao experimento com a presença do inibidor, porém com valores absolutos menores e inclinação menor. Esse é um resultado esperado visto que o inibidor aumenta a energia de ativação da reação de corrosão.

Tabela 10 - Valores para construção do gráfico sem inibidor.

Temperatura (°C)	Temperatura (K)	1/T (K ⁻¹)	w [Δm/A.h] (g cm ⁻² h ⁻¹)	Ln w
29	302,15	0,0033	0,0018	-6,32
40	313,15	0,0032	0,0029	-5,85
50	323,15	0,0031	0,0033	-5,71
60	333,15	0,0030	0,0037	-5,60

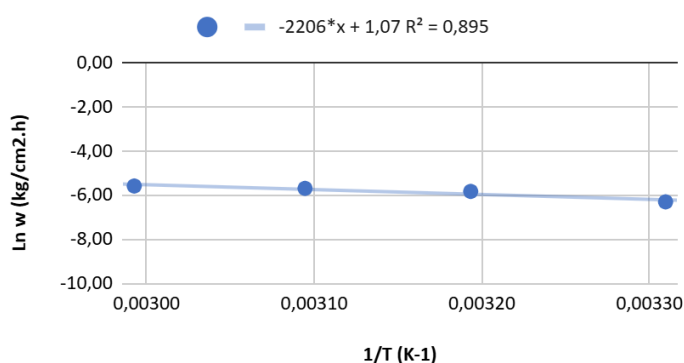


Figura 24 - Curva de Arrhenius na ausência do inibidor.

Do gráfico apresentado na Figura 24, com uma linha de tendência linear, tem-se que:

$$y = -2206 x + 1,07.$$

Comparando-se com a equação de Arrhenius linearizada temos:

$$\frac{E_a}{R} = 2.206,00$$

onde $R = 8,314 \text{ J/Kmol}$, tem-se que E_a é de **18,3407 kJ/mol**.

A energia de ativação aparente teve um aumento de 60,88% com o uso do inibidor extrato da *Moringa oleifera* 5% (v/v).

A Figura 25 mostra a comparação das curvas de Arrhenius para sistema com e sem inibidor.

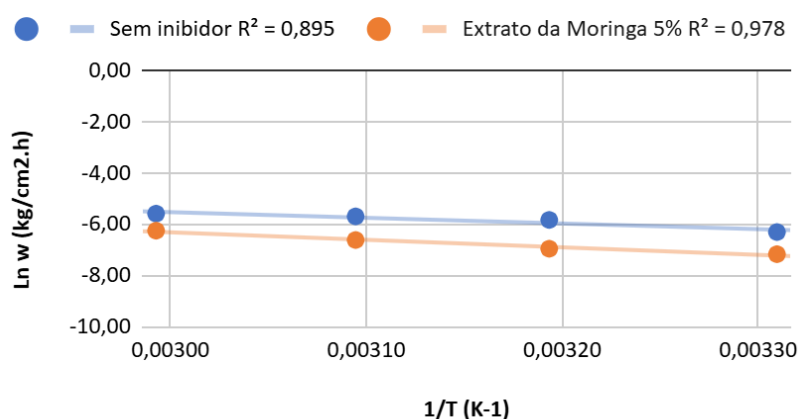


Figura 25 - Comparação das curvas de Arrhenius com e na ausência do inibidor.

A partir da Figura 25, foi observado um aumento na energia de ativação aparente associada ao processo de corrosão de 18,34 kJ/mol, para 24,32 kJ/mol com o inibidor a 5%. Mesmo que não tenha sido um aumento alto, ele pode ser considerado moderado e significativo, e está dentro do que se espera de um inibidor onde proporciona uma maior polarização e um aumento da energia de ativação. Aumentar a E_a implica diretamente em tornar as reações que constituem o fenômeno de corrosão mais difíceis de acontecer, ao mesmo tempo que o torna mais dependente da temperatura do meio.

Verma e Khan (2012) investigaram o efeito do extrato de *Stevia rebaudiana* em aço carbono em 1 M HCl e observaram um aumento significativo da energia de ativação com o uso do extrato. Na solução sem inibidor, E_a foi de $65,9 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, enquanto com o inibidor ($0,1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) esse valor aumentou para $77,5 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$,

correspondendo a um incremento de aproximadamente **17,6 %** (VERMA; KHAN, 2012).

Cang et al. (2012), avaliando o extrato de *Stevia rebaudiana*, relataram aumento de E_a de 29,53 para 52,54 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ com adição de $0,06 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ do extrato, indicando um acréscimo expressivo de **78,0 %** (CANG et al., 2012).

Outro exemplo é o estudo com extrato de *Spirogyra* (alga), que mostrou a energia de ativação variando de cerca de 38,5 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ (blank) para 84,0 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ com o inibidor ($0,5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$), indicando um aumento de **118 %**, evidenciando forte adsorção e bloqueio térmico da superfície metálica (SHARMORADI et al., 2022).

Tabela 11 - Aumento percentual da E_a em diferentes estudos e inibidores.

Estudo / Extrato	E_a sem inibidor ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	E_a com inibidor ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	Aumento percentual (%)
Estudo atual	18,34	24,32	32,6 %
Verma & Khan (Stevia)	65,9	24,32	17,6 %
Cang et al. (Stevia)	29,5	52,5	78,0 %
Shahmoradi et al. (Spirogyra)	38,5	84,0	118 %

Possíveis meios de purificação do extrato e melhor acondicionamento poderiam aumentar esse incremento através de uma maior estabilidade do produto perante o meio agressivo com pH baixo e temperaturas elevadas. Outros métodos de extração também poderiam ser avaliados em estudos futuros em comparação com o atual para um melhor rendimento e consequentemente, maior valor de E_f na mesma concentração do estudo (5% em v/v).

5. CONCLUSÕES

A partir das análises dos resultados obtidos no presente estudo, conclui-se que os parâmetros (Temperatura, concentração e tempo) usados para estudo dos ensaios de corrosão foram satisfatórios, visto que alcançaram tanto valor de T_c máximo, quanto de E_f máximo.

O comportamento da curva de variação da taxa de corrosão com o tempo mostrou uma certa resistência à corrosão em meio ácido com o passar do tempo, devido a formação de camadas de óxidos protetoras na superfície do metal.

Os resultados das eficiências encontrados para o ácido ascórbico e glicerol mostraram um melhor aproveitamento do inibidor em pequenas concentrações como 1% e 5% (v/v) a 29°C.

O estudo dos ensaios de corrosão com variação da temperatura mostrou uma maior estabilidade térmica em relação aos demais extratos usados como inibidores, com um valor de E_f de 48,43% em 60°C.

As energias de ativação aparente associadas ao processo de corrosão foi maior com a presença do extrato a 5% com 24,32 kJ/mol, em reação a 18,34 kJ/mol sem o inibidor. Um aumento percentual de 32,6%

Em comparação com demais estudos, o extrato avaliado neste trabalho exerceu uma eficácia moderada sob efeito térmico (17,6%, 78,0% e 118,0%), provavelmente caracterizando um mecanismo predominantemente de adsorção física.

Possíveis meios de purificação do extrato e melhor acondicionamento poderiam aumentar o incremento através de uma maior estabilidade do produto perante o meio agressivo com pH baixo e temperaturas elevadas. Outros métodos de extração também poderiam ser avaliados em estudos futuros, em comparação com o atual para um melhor rendimento e consequentemente, maior valor de E_f na mesma concentração do estudo (5% em v/v).

Certas melhorias também relacionadas aos materiais como cupons de ensaio novos com superfícies mais preservadas, poderiam afetar e contribuir para um aumento da eficiência, visto que o E_a sem inibidor obteve valores significativamente baixos em relação a demais estudos.

REFERÊNCIAS

BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente**. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Brasília, DF, 2005

ANDRADE, M. M. de. **Introdução à metodologia do trabalho científico**. São Paulo: Atlas, 1994.

BADARÓ, Geicy Kelly Pires Barboza. **Extrato da Justicia brandegeana como inibidor eco amigável de corrosão do aço carbono AISI 1020 em ácido sulfúrico**. 2022. 80 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Química). Instituto de Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. 2022.

Nadkarni, K.M. **Indian material medica**. Bombay Popular Prakashan, 811–816, 2009.

Arabshahi, D.S., Devi, D.V., Urooj, A. **Evaluation of antioxidant activity of some plant extracts and their heat, pH and storage stability**. Food Chem. 100, 1100–1105, 2007.

JALAJAA, D., JYOTHI1, S., MURUGANANTHAM, V.R., MALLIK, J. **Moringa oleifera gum exudate as corrosion inhibitor on mild steel in acidic medium**, Rasayan, Chem, 12(2), 545–548, 2019.

ALLAOUI, M., RAHIM, O., SEKHRI, L. **Electrochemical study on corrosion inhibition of iron in acidic medium by Moringa oleífera extract**. Oriental J. Chem. 33 (2), 637–646, 2017.

AIGBOGUN, J. A.; ADEBAYO, M. A. **Green inhibitor from Thaumatooccus daniellii Benn for corrosion mitigation of mild steel in 1M HCl**. Current Research in Green and Sustainable Chemistry, v. 4, p. 100201, 2021.

AL-MOUBARAKI, A. H.; OBOT, I. B. **Corrosion challenges in petroleum refinery operations: Sources, mechanisms, mitigation, and future outlook**. Journal of Saudi Chemical Society, v. 25, n. 12, p. 101370, 2021

AZIZ, I. A. A.; ABDULKAREEM, I. A.; ANOON, I. A.; HANOON, M.; ALKAABI, M. H.; SHAKER, L. M.; ALAMIERY, A. A.; KADHUM, A. A. H. **Corrosion inhibition potential of a new corrosion inhibitor for mild steel in 1 M hydrochloric studies and DFT calculations**. International Journal of Corrosion and Scale Inhibition, v. 11, n. 1, p. 64-81, 2022

SINGH, A.; AHAMAD, I.; SINGH, V. K.; QURAISHI, M. A. J. **Solid State Electrochem.** 2010, 15, 1087.

ALMEIDA, FERNANDA NAIARA CAMPOS DE. **Estudo do processo de extração do óleo da semente de Moringa oleifera LAM, visando a produção de biodiesel**. Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química Maringá, 2015.

EL-ETRE, A. Y. **Inhibition of C-steel corrosion in acidic solution using the aqueous extract of zallouh root**. Materials Chemistry and Physics, ,2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.09.037>. Acesso em: 13 jul. 2025.

FONTANA, M. G.; GREENE, N. D. **Corrosion Engineering**. 1. ed. Nova York: McGraw-Hill, 1967.

VERMA, C.; KHAN, A. A. **Effect of Stevia rebaudiana extract as corrosion inhibitor for mild steel in 1 M HCl**. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine, v. 2, n. 6, p. 453–456, 2012.

OLIVEIRA, INESSA STEFFANY TORRES DE. **Extratos aquosos de folhas secas e frescas de moringa sob parâmetros de fermentação ruminal in vitro**.

Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Faculdade de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2020.

ASTM G1-03. **Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens**, 2011.

FANG, J.; LI, J. **Quantum chemistry study on the relationship between molecular structure and corrosion inhibition efficiency of amides**. Journal of Molecular Structure: Theochem, 179, 2002.

FOGAÇA, J. **Tipos de corrosão**. Brasil Escola. Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/quimica/tipos-corrosao.htm>>. Acesso em: 20 jan. 2025.

FOGAÇA, R. V. **Reações de Simples Troca**. Mundo Educação. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/reacoes-simples-troca.htm>>. Acesso em: 20 jan. 2025.

FONTANA, M. G.; GREENE, N. D.; Corrosion Engineering, McGraw-Hill Book Company, New York, 1967.

FONTINHA, I. R.; SALTA, M. M. **DESEMPENHO DE COMPONENTES METÁLICOS EM EDIFÍCIOS**. Corros. Prot. Mater., 26, n. 3, 2007.

KODAMA, ARTHUR LUCAS; HOTSUMI, TATIANE NODA. **Investigação e caracterização de produtos naturais como inibidores de corrosão atóxicos para Aço Carbono em meio de ácido Clorídrico**. Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade São Paulo. São Paulo, 2011.

OLIVEIRA, A. R. D. **Corrosão e tratamento de superfície**. Santa Maria: IFPA, 2012. 104 p.

OLIVEIRA, T. M. D.; CARDOSO, S. P. **EXTRATO DE *Camellia sinensis* (L.) Kuntze (THEACEAE) COMO INIBIDOR DE CORROSÃO DE ORIGEM VEGETAL.** *Perspectivas da Ciência e Tecnologia*, 6, 2014.

PEREIRA, S. S. A. A. *et al.* **Inhibitory action of aqueous garlic peel extract on the corrosion of carbon steel in HCl solution.** *Corros. Sci.*, 360, 2012.

TORRES, V. V. *et al.* **AÇÃO INIBIDORA DE EXTRATOS DA SEMENTE DO MAMÃO PAPAIA NA CORROSÃO DO AÇO-CARBONO 1020 EM HCl 1 MOL L.** *Quim. Nova*, Rio de Janeiro, XY, 2016

UCHOA, S. B. B. **Inibição de corrosão em concreto armado: eficiência e comportamento do sistema tiouréia/molibdato de sódio.** 2007. (Doutorado) Química, Universidade Federal de Alagoas, 2007.

ANGGITA GUSNIARDI, V. *et al.* **Corrosion Inhibitor from Sambang Darah Leaves Extract for Mild Steel in HCl Medium.** *Chempublish Journal*, v. 7, n. 2, p. 64–72, 2023.

CANG, H. C. *et al.* **Green corrosion inhibitor of mild steel in hydrochloric acid by the extract of *Stevia rebaudiana* leaves.** *Asian Journal of Chemistry*, v. 24, n. 12, p. 5625–5628, 2012.

FANG, J.; LI, J. **Green corrosion inhibitors: progress and challenges.** *Corrosion Science*, v. 45, n. 5, p. 1143–1161, 2002.

FERREIRA, E. S. *et al.* **Molecular structural aspects of organic corrosion inhibitors: a review.** *Corrosion Science*, v. 47, n. 8, p. 1980–1991, 2015.

FRAUCHES-SANTOS, L. *et al.* **Ação de inibidores naturais na corrosão do aço carbono.** *Revista Matéria*, v. 19, n. 4, p. 1004–1013, 2014.

JACBY, B. C. **Inibidores de corrosão para aço-carbono 1020 avaliados em meio ácido**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

SCHMITZ, A. et al. **The Corrosion Inhibition Performance of Eco-Friendly bis-Schiff Bases on AISI 1020 Carbon Steel in 1 mol L⁻¹ HCl Solution**. *Surfaces*, v. 6, 34, 2023.

SHARMORADI, A. R. et al. **Molecular–MD/atomic-DFT theoretical and experimental studies on the quince seed extract corrosion inhibition performance on the acidic-solution attack of mild-steel**. *Journal of Molecular Liquids*, v. 346, 117921, 2022.

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

TALENSARI, S. A. et al. **The Effect of Temperature on the Corrosion Inhibition of Mild Steel in 1 M HCl Solution by Curcuma longa Extract**. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2012.

WEI, C. et al. **Ascorbic acid as corrosion inhibitor for Q235 mild steel in acidic environments**. *International Journal of Electrochemical Science*, v. 10, p. 3087–3098, 2015.

Xiang, Y.; Wang, Z.; Xu, C.; Zhou, C.; Li, Z.; Ni, W. **Impact of SO₂ concentration on the corrosion rate of X70 steel and iron in water-saturated supercritical CO₂ mixed with SO₂**. *The Journal of Supercritical Fluids*, v. 58, n. 2, p. 286–294, 2011. DOI:10.1016/j.supflu.2011.06.007

FINAMORE, Dilhermando José. **Avaliação da corrosão uniforme e puntiforme em meio aquoso aerado utilizando a técnica de cupons de perda de massa**. 2016. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ.

AHMED, Mahmoud A.; AMIN, Sherif; MOHAMED, Ashraf A. **Current and emerging trends of inorganic, organic and eco-friendly corrosion inhibitors.** RSC Advances, [s.l.], v. 14, p. 146–150, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1039/d3ra07304a>.

AL-AMIERY, Ahmed A.; ISAHAK, Wan N. R. W.; AL-AZZAWI, Waleed K. **Corrosion inhibitors: Natural and synthetic organic inhibitors.** Lubricants, Basel, v. 11, n. 4, p. 174, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants11040174>.

BRYCKI, Bogumił; KOWALCZYK, Iwona H.; SZULC, Adrianna; KOLBINSKA, Katarzyna. **Organic corrosion inhibitors.** In: ALIOFKHAZRAEI, Mehran (ed.). Developments in corrosion protection. Rijeka: IntechOpen, 2018. cap. 6. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.72943>.

NISHIKAWA, Kohei et al. **Molecular dynamics analysis of adsorption process of anti-copper-corrosion additives to the copper surface.** arXiv preprint, [s.l.], 2018. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1812.10647>. Acesso em: 12 jul. 2025.

SHEYDAEI, Milad. **The Use of Plant Extracts as Green Corrosion Inhibitors: A Review.** Surfaces, [S.l.], v.7, n.2, p.380–403, 2024.