UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
***CAMPUS* ARAPIRACA**
QUÍMICA - LICENCIATURA

ANNIELE STERFANY SANTOS LEITE

INVESTIGAÇÃO DO EXTRATO DE SEMENTE DE JAMBO VERMELHO (*SYZYGIUM MALACCENSE*) COMO INIBIDOR DE CORROSÃO EM ESTRUTURAS METÁLICAS DE AÇO CARBONO SAE 1020

ARAPIRACA
2025

Anniele Sterfany Santos Leite

Investigação do extrato de semente de jambo vermelho (*Syzygium malaccense*) como inibidor de corrosão em estruturas metálicas de aço carbono SAE 1020

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Química da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciatura em Química.

Orientador: Prof. Dr. Diógenes Meneses dos Santos.

Coorientador: Prof. Dr. Dilton Gonçalves Teixeira

Arapiraca

2025

Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Campus Arapiraca
Biblioteca Setorial *Campus* Arapiraca - BSCA

L533i Leite, Anniele Sterfany Santos
Investigação do extrato de semente de jambo vermelho (*Syzygium malaccense*) como inibidor de corrosão em estruturas metálicas de aço carbono SAE 1020 [recurso eletrônico] / Anniele Sterfany Santos Leite. – Arapiraca, 2025.
42 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Diógenes Meneses dos Santos.
Coorientador: Prof. Dr. Dilton Gonçalves Teixeira.
Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) – Universidade Federal de Alagoas, *Campus* Arapiraca, Arapiraca, 2025.
Disponível em: Universidade Digital (UD) – UFAL (*Campus* Arapiraca).
Referências: f. 38-42..

1. Inibidores naturais. 2. Corrosão metálica. 3. Sustentabilidade. I. Santos, Diógenes Meneses dos, orient. II. Teixeira, Dilton Gonçalves, coorient. III. Título.

CDU 54

Bibliotecário responsável: Nestor Antonio Alves Junior
CRB - 4 / 1557

Anniele Sterfany Santos Leite

Investigação do extrato de semente de jambo vermelho (*Syzygium malaccense*) como inibidor de corrosão em estruturas metálicas de aço carbono SAE 1020

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Química da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Licenciatura em Química.

Data de aprovação: 28/05/2025.

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
DIOGENES MENESES DOS SANTOS
Data: 02/06/2025 15:47:33-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Diógenes Meneses dos Santos
Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Campus Arapiraca
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
DILTON GONCALVES TEIXEIRA
Data: 03/06/2025 15:11:04-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Dilton Gonçalves Teixeira
Universidade Estadual do Ceará - UECE
Campus Fortaleza/ Itaperi
(Coorientador)

Documento assinado digitalmente
ANA CAROLINA LIMA DE LUCENA
Data: 03/06/2025 06:03:00-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof.ª Ma. Ana Carolina Lima de Lucena
Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Campus Arapiraca
Unidade Educacional Penedo
(Examinadora)

Documento assinado digitalmente
JOSE GUIMARAES FERREIRA DE LIMA JUNIOR
Data: 02/06/2025 17:42:08-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. José Expedito Cavalcante da Silva
Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Campus Arapiraca
(Examinador)

Documento assinado digitalmente
JOSE EXPEDITO CAVALCANTE DA SILVA
Data: 03/06/2025 17:37:16-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. José Guimarães Ferreira de Lima Júnior
Instituto Federal de Alagoas – IFAL
Campus Palmeira do Índios
(Examinador)

AGRADECIMENTOS

A Deus. E todos que passaram pela minha trajetória acadêmica, pois foram os alicerces das minhas conquistas.

Aos meus pais, Gilvanete dos Santos Leite e Amilton dos Santos, a quem devo toda minha a capacitação durante minha vida acadêmica, pelos ensinamentos, incentivos e amor que sempre estiveram presentes na minha vida.

Ao Prof. Dr. Diógenes Meneses dos Santos, pelos ensinamentos que foram além da contribuição e orientação do trabalho, foram incansáveis conhecimentos de analítica e acerca da vida.

Ao meu namorado, Steven William Santos, companheiro de todas as horas, por seu incentivo, sua paciência e seu amor.

Aos meus amigos Tamires, Will, Edyla, Jennifer e Raiane, por me apoiarem, me escutarem e me incentivarem em toda a minha jornada.

Ao Programa de Educação Tutorial (PET) Química, em especial à Profa. Dra. Thaissa Lúcio Silva, por todos os ensinamentos e conselhos ao longo dessa jornada.

À minha amiga Wanessa Kelly Vieira de Almeida por ser minha dupla inseparável nessa jornada pelo mundo da ciência com seus altos e baixos.

“Cada pessoa deve trabalhar para o seu aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo, participar da responsabilidade coletiva por toda a humanidade.”

Marie Curie

RESUMO

A corrosão de estruturas metálicas é um dos principais desafios enfrentados por diversas indústrias, resultando em prejuízos econômicos, riscos operacionais e impactos ambientais. A busca por métodos alternativos e sustentáveis para mitigar esse processo tem crescido significativamente, com destaque para os inibidores de corrosão de origem natural, também conhecidos como inibidores verdes. Este trabalho teve como objetivo principal investigar a eficácia do extrato etanólico da semente de jambo vermelho (Syzygium malaccense) como inibidor de corrosão em aço carbono SAE 1020, quando exposto a uma solução salina de cloreto de sódio a 3,5%. A metodologia empregada envolveu a extração do extrato vegetal, sua caracterização por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e a realização de ensaios experimentais de perda de massa e cálculo da taxa de corrosão dos cupons metálicos. A análise espectroscópica revelou a presença de compostos bioativos contendo grupos funcionais como hidroxilas, amidas e carboidratos, estruturas conhecidas por sua capacidade de interação com superfícies metálicas, formando filmes protetores. Os resultados obtidos demonstraram uma redução significativa na perda de massa e na taxa de corrosão com o aumento da concentração do extrato. A maior eficiência foi observada na concentração de 3000 ppm, que apresentou redução de aproximadamente 37% na taxa de corrosão em relação à amostra controle. Embora todas as amostras tenham sido classificadas como de corrosividade moderada, verificou-se uma tendência clara de ação inibidora proporcional à concentração aplicada. Dessa forma, conclui-se que o extrato de sementes de jambo vermelho apresenta-se como uma alternativa viável, de baixo custo e ambientalmente segura para mitigar a corrosão em estruturas metálicas. Além de valorizar resíduos agroindustriais, o uso desse extrato pode contribuir significativamente para a substituição parcial ou total de inibidores sintéticos, promovendo soluções mais sustentáveis nos processos industriais.

Palavras-chave: Inibidores naturais; sustentabilidade; perda de massa; corrosão metálica.

ABSTRACT

Corrosion of metal structures is one of the main challenges faced by several industries, resulting in economic losses, operational risks and environmental impacts. The search for alternative and sustainable methods to mitigate this process has grown significantly, with emphasis on corrosion inhibitors of natural origin, also known as green inhibitors. The main objective of this study was to investigate the effectiveness of the ethanolic extract of the red rose apple seed (*Syzygium malaccense*) as a corrosion inhibitor in SAE 1020 carbon steel, when exposed to a 3.5% sodium chloride saline solution. The methodology employed involved the extraction of the plant extract, its characterization by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and the performance of experimental tests of mass loss and calculation of the corrosion rate of the metal coupons. The spectroscopic analysis revealed the presence of bioactive compounds containing functional groups such as hydroxyls, amides and carbohydrates, structures known for their ability to interact with metal surfaces, forming protective films. The results obtained demonstrated a significant reduction in mass loss and corrosion rate with increasing extract concentration. The greatest efficiency was observed at a concentration of 3000 ppm, which showed a reduction of approximately 37% in the corrosion rate compared to the control sample. Although all samples were classified as moderately corrosive, a clear tendency of inhibitory action proportional to the applied concentration was observed. Thus, it is concluded that red jambo seed extract presents itself as a viable, low-cost and environmentally safe alternative to mitigate corrosion in metal structures. In addition to valorizing agro-industrial waste, the use of this extract can significantly contribute to the partial or total replacement of synthetic inhibitors, promoting more sustainable solutions in industrial processes.

Keywords: natural inhibitors; sustainability; weight loss; metallic corrosion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fruta Jambo Vermelho……..……13

Figura 2 - Tipos de corrosão.……...……19

Figura 3 - Cupom de aço carbono SAE 1020 após tratamento……....……...29

Figura 4 - Espectros de FTIR da semente de jambo e do extrato da semente..…30

Figura 5 - Perda de massa (g) dos cupons metálicos em solução de NaCl.....32

Figura 6 - (A) Imagens das peças/ cupons metálicos antes da solução com o inibidor e sem. (B) Imagens das peças/ cupons metálicos depois da solução com inibidor e sem …….....33

Figura 7 - Taxa de corrosão uniforme (mm/ano) dos cupons.....34

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Descrição dos tipos de corrosão.....18
Quadro 2 - Classificação da taxa de corrosão do aço carbono…….....…..34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	American Iron and Steel Institute
FTIR	Espectroscopia Infravermelho Por Transformada De Fourier
IBGE	Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística
PIB	Produto Interno Bruto
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
SAE	Society of Automotive Engineers

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....12

2 OBJETIVO..... 15

2.1 Objetivo geral.....15

2.2 Objetivo específico.....15

3 REFERENCIAL TEÓRICO.....16

3.1 Ligas metálicas.....16

3.2 Aço carbono SAE 1020..... 17

3.3 Corrosão em metais.....18

3.4 Formas de proteção contra a corrosão.....20

3.4.1 Revestimentos com pintura..... 20

3.4.2 Revestimentos metálicos.....21

3.4.3 Proteção catódica e anódica..... 21

3.4.4 Inibidores de corrosão..... 21

3.5 Estudos anteriores sobre inibição de corrosão com extratos vegetais.... 22

3.6 Impacto ambiental e sustentabilidade..... 26

4 METODOLOGIA..... 28

4.1 Extrato etanólico de semente de jambo..... 28

4.2 Preparação dos cupons metálicos..... 28

4.3 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier..... 29

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....30

5.1 Espectroscopia no infravermelho por transformada de fourier..... 30

5.2 Perda de massa..... 31

5.3 Taxa de corrosão.....33

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....36

REFERÊNCIAS..... 38

1 INTRODUÇÃO

Embora não presente nos primeiros períodos da pré-história, a corrosão tem sido um desafio constante desde que o ser humano passou a utilizar metais, influenciando o desenvolvimento de tecnologias e estratégias de preservação ao longo das eras. Definida como a deterioração de um material, metálico ou não, esse fenômeno pode ocorrer devido à ação química do meio ambiente agressivo. O processo pode ocorrer devido a fatores físicos, químicos, eletroquímicos ou pela combinação com esforços mecânicos, resultando em diversos problemas e prejuízos ao longo do tempo (Frauches-Santos; Albuquerque; Oliveira; Echevarria, 2014).

A degradação dos materiais pode causar danos aos equipamentos e estruturas metálicas em diversas indústrias, como as indústrias de petróleo e gás, petroquímicas, alimentícia, naval, nuclear, construção civil, automobilística, entre outras, provocando assim prejuízo econômico e ambiental (Silva *et al.*, 2018). A criação de novas metodologias que impossibilitem a degradação de materiais tem despertado grande interesse nas indústrias (Santos, 2016).

Os metais possuem características específicas, podendo ser formado por um ou mais elementos, são conhecidos por sua rigidez, resistência, ductilidade e alta condutividade térmica e elétrica, propriedades altamente valorizadas pela indústria (Mesquita, 2022). O desgaste dos metais utilizados em peças e/ou equipamentos, pode gerar paralisações nas indústrias, ocorrendo perdas econômicas proveniente da corrosão. O custo vinculado aos danos de corrosão em um país industrializado encontra-se em torno de 4% do Produto Interno Bruto (PIB). No Brasil cerca de R$ 250 (duzentos e cinquenta) milhões de reais são gastos decorrentes da corrosão (BRASIL..., 2017; Marques; Barbosa; Nascimento, 2023).

Diante desse impacto econômico significativo, torna-se essencial buscar estratégias eficazes de mitigação. Entre essas alternativas, destacam-se os inibidores são substâncias orgânicas ou inorgânicas que, quando presente em soluções agressivas - como regiões litorâneas -, têm o potencial de diminuir ou suprimir a corrosão. Essa proteção pode ser alcançada ao atrasar a atividade da reação oxidante (compostos oxidantes inibidores), redutora (compostos redutores inibidores), ou de ambos (compostos inibidores combinados) (Sharma e Sharma, 2012).

A demanda por inibidores cresce anualmente nas indústrias, pois são

considerados um método altamente eficiente para proteção, porém os riscos de toxicidade de alguns inibidores inorgânicos têm gerado preocupações, pois além de afetar os seres humanos, também agride o meio ambiente, podendo gerar consequência para o ecossistema (Santos, 2016). Assim, a busca por inibidores verdes tem sido altamente requisitada, pois são considerados uma opção sustentável e menos agressiva, além de possuir um baixo custo. Os inibidores desta classe são obtidos, principalmente, a partir de produtos naturais, tais como extratos de plantas. Por serem derivados de fontes renováveis, eles se tornaram uma alternativa viável e acessível para enfrentar o problema da corrosão (Lima *et al.*, 2024).

Figura 1 - Fruta Jambo Vermelho.

Fonte: Nauara (2024).

Muitos produtos de origem vegetal ainda são pouco aproveitados, recebendo pouca atenção comercial e científica. O jambo vermelho, pertencente à família *Syzygium,* é cultivado em regiões tropicais. No Brasil é encontrado nas regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste e nas regiões quentes do Sudeste. Sua colheita ocorre em dois períodos do ano, nos meses de abril a maio, e de agosto a novembro, a qual produz um fruto vermelho, apresentado na Figura 1, podendo ser consumido puro, na produção de sucos ou doces. Sua polpa é utilizada amplamente em indústrias alimentícias, pois é um antioxidante natural e possui compostos fenólicos (Augusta *et al.*, 2010; Munhoz; Ferreira; Gomes, 2018; Zambelli *et al.*, 2006).

A presente pesquisa propõe-se a investigar o uso do extrato etanólico das sementes de jambo vermelho (*Syzygium malaccense*) como inibidor natural de

corrosão para o aço carbono SAE 1020. A escolha desse material vegetal se justifica tanto pelo seu baixo custo e fácil disponibilidade, quanto pelo fato de que suas sementes são normalmente descartadas pela indústria alimentícia. Assim, além de propor uma solução para a mitigação da corrosão, o estudo também promove o reaproveitamento de resíduos.

Além de contribuir para o avanço da área de ciência dos materiais e proteção de superfícies metálicas, este trabalho, alinhando-se à tendência atual de desenvolvimento de inibidores de corrosão verdes, oriundos de fontes renováveis. os resultados deste estudo podem servir de base para futuras aplicações em escala industrial, oferecendo às empresas uma alternativa viável, eficiente e ambientalmente segura para prolongar a vida útil de estruturas metálicas. Ao utilizar um extrato natural, o processo torna-se mais acessível economicamente, especialmente para pequenas e médias empresas que buscam soluções de baixo custo e fácil implementação.

Dessa forma, esta pesquisa se justifica por reunir aspectos de relevância teórica, aplicabilidade prática, responsabilidade ambiental e viabilidade operacional, apresentando-se como uma proposta promissora dentro do campo de estudos sobre proteção contra corrosão.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Investigar se o extrato etanólico da semente de jambo vermelho pode ser considerado um inibidor de corrosão para o aço carbono SAE 020.

2.2 Objetivo específico

- Realizar levantamento bibliográfico e revisão sistemática sobre o uso de inibidores de corrosão de origem natural em aço carbono.
- Preparar o extrato etanólico das sementes de jambo por meio de técnicas padronizadas de extração.
- Caracterizar o extrato etanólico da semente de jambo por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).
- Determinar a taxa de corrosão do aço carbono SAE 1020 em meio salino com e sem a presença do extrato, por meio de ensaio de perda de massa.
- Analisar a classificação da taxa de corrosão do extrato de jambo a partir dos dados obtidos nos ensaios de perda de massa.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Ligas metálicas

Os metais podem ser classificados em diferentes tipos com base em suas propriedades químicas, físicas e estruturais, possuem alta condutividade elétrica e térmica, são brilhosos e geralmente sólidos à temperatura ambiente (Lopes, 2019). Uma liga metálica, por exemplo, é formada pela combinação de dois ou mais elementos químicos, sendo que pelo menos um deles é um metal. São exemplos de ligas o latão, feito de cobre e zinco; o bronze, sendo uma mistura de cobre e estanho; e o aço carbono, que é composto de ferro e carbono (Pannoni, 2021).

O aço, por sua vez, é uma liga mais complexa, assim como sua definição. Apesar de seus principais componentes serem o ferro e o carbono, ele também contém outros elementos secundários, que surgem como consequência dos processos de fabricação. De forma geral, o aço pode ser definido como uma liga ferro-carbono que apresenta entre 0,008% e 2,11% de carbono, além de traços de outros elementos, como silício, manganês, fósforo e enxofre, que influenciam suas propriedades e aplicações. Essa composição torna o aço extremamente versátil e fundamental em diversas indústrias (Pannoni, 2021).

O aço pode ser encontrado em duas formas principais: aço carbono e aço inoxidável. A diferença fundamental entre eles está na composição química. No aço carbono, o elemento predominante é o carbono, enquanto no aço inoxidável, o cromo é o componente essencial (Callister; Rethwisch, 2016).

O aço carbono é classificado em três categorias: baixo carbono, médio carbono e alto carbono. O teor de carbono presente nessas ligas influencia diretamente suas propriedades mecânicas, como dureza, ductilidade e usinabilidade. O aço de baixo carbono possui a menor quantidade de carbono, o que resulta em um material de menor dureza e resistência mecânica, porém com alta ductilidade e tenacidade. Essa característica torna esse tipo de aço amplamente utilizado devido à sua facilidade de usinagem, soldagem e ao seu baixo custo de produção. Já o aço de médio carbono apresenta um teor intermediário de carbono, conferindo-lhe maior dureza e resistência em comparação ao aço de baixo carbono, porém com menor ductilidade e tenacidade. Por fim, o aço alto carbono contém uma porcentagem significativamente maior de carbono, o que o torna mais duro e resistente, mas também mais frágil e menos dúctil

(Callister; Rethwisch, 2016).

O aço inoxidável, também chamado de aço inox, é uma liga metálica altamente resistente à corrosão, abrasão e impactos, além de apresentar alta durabilidade. Sua composição química inclui cromo como elemento principal, sendo necessário um teor mínimo de 11% desse elemento para garantir sua resistência à corrosão (Ferraz, 2005).

3.2 Aço carbono SAE 1020

Os aços desempenham um papel fundamental em diversos setores da indústria, sendo amplamente utilizados em meios de transporte, processos energéticos e equipamentos voltados para a indústria petrolífera, entre outras aplicações (Silva; Mei, 2010). Dentre os diversos tipos disponíveis, um dos mais utilizados é o aço carbono SAE 1020. Esse material se destaca por sua baixa temperabilidade, além de possuir boa soldabilidade e forjabilidade, características que o tornam ideal para a fabricação de componentes mecânicos em máquinas, veículos, dutos e diversas outras estruturas (Moreira *et al.*, 2020).

O aço carbono é composto majoritariamente por ferro, embora possa conter pequenas quantidades de elementos residuais. No entanto, a presença do ferro é determinante no processo de corrosão, pois ele é responsável pela reação anódica, que ocorre simultaneamente à reação catódica em diferentes regiões da superfície metálica. Esse fenômeno confere ao material uma condição termodinamicamente instável, tornando-o suscetível à degradação quando exposto ao ambiente. Com o tempo, esse processo leva à formação de óxido de ferro, um composto mais estável que o próprio aço, resultando na corrosão do material (Moreira *et al.*, 2020).

A classificação mais amplamente utilizada para os aços é a designada pelo sistema SAE-AISI (Society of Automotive Engineers – American Iron and Steel Institute), sendo que os dois primeiros algarismos designam a classe do aço, e os dois últimos indicam a média do teor de carbono. No aço 1020, os dois últimos algarismos representam o percentual médio de carbono de 0,20%, podendo ter uma variação de 0,05%. Já os dois primeiros representam a classe do aço, sendo, nesse caso, um aço carbono (Lopes, 2019). Esse material pode ser aplicado em transformadores, chapas e placas para fabricação de tubos, construção civil, pontes e latas de folha de flandres, entre outros. Além disso, pode ser utilizado em itens mecânicos, como engrenagens,

eixos, virabrequins, eixos-comando, pinos-guia, anéis de engrenagem, colunas, catracas e capas. Também é indicado para parafusos, trefilados duros, chassis, discos de roda e peças para máquinas e veículos sujeitos a trabalhos de baixa e média intensidade (Rodrigues *et al.*, 2017).

3.3 Corrosão em metais

O processo de deterioração dos metais ocorre através da reação de oxidação e redução, na qual o ferro (Fe) se oxida, atuando como agente redutor, e cede elétrons, que são recebidos pelo meio agressivo, atuando como agente oxidante, conforme representado na Equação 1 (Seniski, 2020).

$$2Fe + 2H_2O + O_2 \rightarrow 2Fe^{2+}{+}4OH^{-}{\rightarrow}2Fe(OH)_2 \qquad \text{Equação 1.}$$

A corrosão dos metais pode ser identificada por suas formas, causas e mecanismos, sendo classificada de acordo com a maneira como se apresenta no metal. Os tipos de corrosão, segundo Luiz (2018), são os seguintes: Corrosão uniforme, por placas, alveolar, galvânica e puntiforme, sendo essas descritas no Quadro 1, com ilustrações na Figura 2.

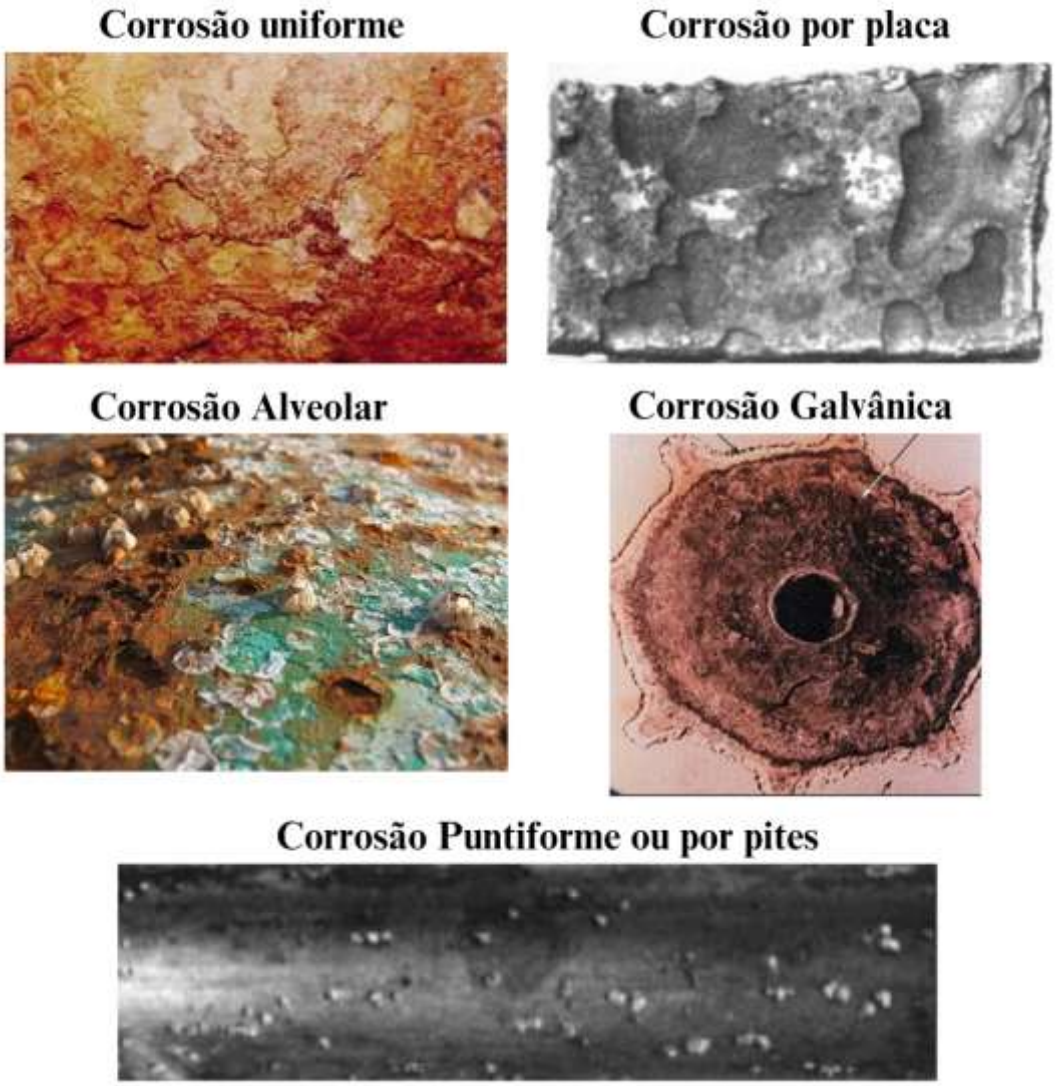
Quadro 1 - Descrição dos tipos de corrosão

TIPO DE CORROSÃO	DESCRIÇÃO
Corrosão uniforme	Forma de corrosão eletroquímica que ocorre em toda a superfície do material sendo uniformemente danificada
Corrosão por placas	Corrosão localizada que forma irregularidades, formando relevos.
Corrosão alveolar	Ocorre em áreas específicas, produzindo sulcos ou escavações nas superfícies metálicas semelhantes a alvéolos, apresentando características de fungos arredondados em uma profundidade geral menor do que seu diâmetro.

Corrosão galvânica	Acontece quando dois metais com composições diferentes são acoplados eletricamente enquanto são expostos a um eletrólito. Assim, o metal menos nobre corrói, enquanto o mais nobre (cátodo) é protegido.
Corrosão puntiforme ou por pite	Decorre de pequenos pontos ou furos, sendo altamente destrutiva, por conta da dificuldade em identificar onde está ocorrendo. Geralmente, ocorre abaixo da corrosão generalizada.

Fonte: Luiz (2018).

Figura 2 - Tipos de corrosão.



Fonte: Adaptado de Luz (2018).

A compreensão dos diferentes tipos de corrosão é essencial para a escolha adequada de estratégias de prevenção e controle, sobretudo em ambientes industriais e estruturais onde a integridade dos materiais metálicos é crítica. Cada tipo de corrosão apresenta mecanismos distintos, impactos variados sobre a durabilidade dos componentes e exige abordagens específicas de monitoramento. Desde formas mais previsíveis, como a corrosão uniforme, até ataques localizados e severos, como a corrosão por pite ou galvânica, o conhecimento detalhado desses processos permite não apenas prolongar a vida útil dos materiais, mas também reduzir custos associados à manutenção corretiva e falhas inesperadas.

3.4 Formas de proteção contra a corrosão

Existem diversos métodos para proteger os metais contra a corrosão, cada um adequado a diferentes situações e tipos de materiais. Abaixo estão os principais tipos de proteção:

3.4.1 Revestimentos com pintura

Aplicação de tintas anticorrosivas criam uma barreira física entre o metal e o ambiente, impedindo o contato com agentes corrosivos, através de aplicação de esmaltes, vernizes, tintas e plásticos. As tintas são suspensões homogêneas que se aglomeram pela resina após secagem formando uma camada uniforme sobre o substrato. Assim, quando mais camadas forem aplicadas mais espesso é o revestimento, aumentando a proteção. Para se obter um mínimo de garantia, são necessárias quatro camadas: duas camadas primárias; uma subcamada e uma camada final (Bandeira, 2021).

Na proteção com pinturas é necessário preparar a superfície do metal, pois permite obter uma melhor limpeza e rugosidade. Assim, eliminando os materiais estranhos e aumentando a superfície de contato, também ajudando a melhorar a aderência do material. Realizando a preparação da superfície são removidas gorduras, óleos, combustíveis, graxas, ferrugem, carepa de laminação, resíduos de tintas, etc. Dessa forma, é possível selecionar as proteções mais adequadas para superfícies devidamente preparadas, garantindo maior durabilidade e eficiência (Correa; Souza Neto; Correa, 2016).

3.4.2 Revestimentos metálicos

Nos revestimentos metálicos são utilizados técnicas voltadas para modificar a superfície com aplicação de outros metais, para evitar a degradação do sistema. Os materiais utilizados apresentam maior resistência, a temperatura elevada e melhora as propriedades mecânicas. Para a preparação da superfície são utilizadas técnicas de cladeamento, difusão de alumínio, nitretação, cromagem, boretação, pré-oxidação, revestimento por soldagem. Com diversos métodos de proteção a utilização de revestimento metálico adequado pode aumentar a vida útil do metal, assim, mantendo suas propriedades mecânicas e protegendo contra a corrosão (Lacerda, 2020).

3.4.3 Proteção catódica e anódica

Os protetores catódicos são substâncias que possuem íons metálicos capazes de reagir com a alcalinidade catódica, resultando na formação de compostos insolúveis. Os compostos se envolvem em toda a área catódica, impedindo a difusão do oxigênio e dos elétrons, inibindo o processo catódico. Já os protetores anódicos são aqueles que atuam nas reações anódicas, ou seja, migram para a superfície do ânodo e promovem a passivação na presença de oxigênio dissolvido. Esse tipo de protetor reage com o produto de corrosão que se forma inicialmente, gerando um filme aderente e altamente insolúvel na superfície, proporcionando sua proteção da superfície (Frauches-Santos; Albuquerque; Oliveira; Echevarria, 2014).

3.4.4 Inibidores de corrosão

Os inibidores de corrosão são substâncias ou misturas que se adicionadas ao meio corrosivo impedem as reações de corrosão, sendo capazes de reduzir a taxa de corrosão do metal ao serem adicionados no meio corrosivo. Diversos fatores influenciam na escolha de um inibidor de corrosão, entre eles a agressividade do meio, a concentração do inibidor, a temperatura do sistema, a velocidade de fluxo do fluido e a natureza do metal a ser protegido. Além disso, a eficiência do inibidor está diretamente relacionada à compatibilidade química entre o meio corrosivo e o substrato metálico, bem como à sua viabilidade técnica e econômica para aplicação em escala prática. Essas substâncias têm a vantagem de serem de fácil aplicação e sem a necessidade de interrupção do processo (Marques, 2021).

Com o avanço nas pesquisas, os inibidores se tornaram um método de proteção mais favorável, pois possui um bom rendimento e baixo custo comparado a outros métodos, podendo ser adicionados ou retirados a qualquer momento do sistema (Dantas; Cardoso, 2022). Porém, a utilização de alguns inibidores adquire um alto custo pelo seu valor e quantidade utilizada, além de apresentarem toxicidade pois possuem cromatos, fosfatos e nitratos resulta na liberação de gases tóxicos, afetando assim o meio ambiente (Dantas; Cardoso, 2022; D'Oliveira; Guarda; Guarda; Sidel, 2022).

Uma alternativa promissora para a formulação de inibidores de corrosão é o uso de extratos vegetais. Esses são derivados de recursos renováveis, biodegradáveis e apresentam baixa ou nenhuma toxicidade ambiental. Isso reduz os custos econômicos e os impactos ambientais normalmente associados aos inibidores comerciais. Conhecidos como inibidores naturais, verdes ou ecológicos, são obtidos de diferentes partes das plantas, como folhas, flores, cascas do caule e frutos. Eles contêm uma variedade de substâncias orgânicas com propriedades anticorrosivas, incluindo taninos, flavonoides, saponinas, alcaloides, ácidos orgânicos e aminoácidos, tornando-os uma alternativa sustentável e eficiente (Dantas; Cardoso, 2022).

3.5 Estudos anteriores sobre inibição de corrosão com extratos vegetais

Diversos estudos têm explorado o uso de extratos vegetais como inibidores de corrosão, buscando alternativas sustentáveis e menos agressivas ao meio ambiente. Um exemplo relevante é o trabalho de Oliveira e Cardoso (2019), que investigaram os impactos do extrato alcoólico da planta Camellia sinensis sobre a corrosão do aço carbono P110 em meio ácido, especificamente em solução de ácido clorídrico (HCl) 1 $mol \cdot L^{-1}$. Na literatura, a Camellia sinensis é frequentemente analisada por meio do extrato aquoso do chá verde, demonstrando, em solução diluída de HCl, uma eficiência inibitória de até 94%.

A forma de obtenção dos diferentes tipos de chá a partir dessa planta também influencia na composição química do extrato. O chá branco, por exemplo, é produzido com folhas e flores mais jovens, submetidas a um processamento mínimo — o que preserva compostos bioativos com potencial inibidor. Ao contrário do chá verde, cujas folhas são cozidas após a murcha e depois secas à sombra, o chá branco é pouco estudado no contexto da corrosão, apesar de conter substâncias como catequinas,

flavonoides, antocianinas e ácido fenólico, amplamente reconhecidas por suas propriedades antioxidantes e inibidoras de corrosão.

O extrato foi obtido de folhas e talos secos do chá branco, extraídos em um aparelho Soxhlet com solventes de polaridade crescente (hexano, acetato de etila e etanol). Nos ensaios de perda de massa, polarização e impedância eletroquímica, a eficiência de inibição foi calculada com base na redução da taxa de corrosão e nos resultados de impedância, mostrando uma redução significativa na corrosão e adsorção do extrato nas áreas ativas do metal. A pesquisa demonstrou alta eficiência, variando de 85,6% a 95%, dependendo da concentração utilizada, com redução significativa na taxa de corrosão e nas densidades de corrente anódica e catódica. O extrato também obteve resultados positivos nos ensaios de impedância eletroquímica, indicando adsorção nas áreas ativas do metal e consequente redução do processo corrosivo (Oliveira; Cardoso, 2019).

Além da Camellia sinensis, outras fontes naturais têm sido estudadas como alternativas promissoras aos inibidores sintéticos convencionais. Fontana, Smaniotto e Villanova (2023), por exemplo, investigaram o potencial inibidor do extrato natural das cascas de bergamota (Citrus reticulata) frente à corrosão do aço carbono ASTM A36 em meio ácido. O objetivo central do estudo foi avaliar a eficácia do extrato como solução ecologicamente viável, visando à substituição de compostos químicos sintéticos tradicionalmente utilizados na mitigação da corrosão.

A metodologia experimental baseou-se em ensaios gravimétricos, nos quais corpos de prova de aço carbono ASTM A36 (40 × 20 × 2 mm) foram submetidos à imersão em solução corrosiva, com e sem adição do extrato de bergamota. A eficiência inibitória foi determinada a partir da análise da perda de massa dos espécimes metálicos ao longo do tempo de exposição. Os resultados reforçam o potencial do uso de subprodutos agrícolas, como cascas de frutas cítricas, no desenvolvimento de estratégias sustentáveis e de baixo custo para proteção contra corrosão

As amostras foram previamente preparadas por abrasão com lixas d’água (600 e 1200) e submetidas ao desengraxe para garantir uniformidade na superfície metálica antes dos testes. O extrato foi obtido por meio da secagem e trituração das cascas de bergamota, seguido da extração com etanol como solvente. Após a evaporação do solvente, obteve-se um extrato concentrado, que foi utilizado nas concentrações de 2 g/L, 8 g/L, 16 g/L, 24 g/L e 40 g/L. As amostras foram submetidas a diferentes

temperaturas (0 ºC, 30 ºC, 45 ºC e 60 ºC) para avaliar a influência térmica na eficiência inibidora. Para a determinação da taxa de corrosão, foram comparadas as massas iniciais e finais das amostras após a imersão no meio corrosivo. Além dos ensaios de perda de massa, foram analisadas as isotermas de adsorção para compreender o mecanismo de interação do extrato com a superfície metálica (Fontana; Smaniotto; Villanova, 2023).

Os resultados indicaram que o extrato de bergamota apresentou um efeito inibidor considerável sobre a corrosão do aço carbono ASTM A36. A eficiência variou conforme a concentração do extrato e a temperatura do meio. A eficiência máxima, de 86 ± 2%, foi observada à temperatura de 30 ºC e concentração de 40 g/L, demonstrando que a adsorção do inibidor na superfície metálica foi mais efetiva nessas condições. Para temperaturas mais baixas (0 ºC), observou-se uma taxa de corrosão menor, o que pode ser atribuído à redução da atividade eletroquímica do meio corrosivo, resultando em eficiências de até 88%. Entretanto, para temperaturas acima de 45 ºC, a eficiência do inibidor diminuiu significativamente, caindo para 38% - 26%, dependendo da concentração do extrato. Esse comportamento sugere que temperaturas elevadas comprometem a estabilidade do inibidor, possivelmente acelerando seu processo de dessorção da superfície do metal. A análise das isotermas de adsorção revelou que o melhor ajuste foi obtido para o modelo de Langmuir, com coeficiente de correlação de 0,998, indicando que o extrato forma uma monocamada protetora na superfície do metal. Esse resultado sugere que a interação entre as moléculas do extrato e o aço carbono ocorre por meio de adsorção química, formando uma barreira eficaz contra a corrosão (Fontana; Smaniotto; Villanova, 2023).

Um estudo conduzido por Morais *et al.* (2023) se destacou ao avaliar o uso do extrato de *Paullinia cupana*, popularmente conhecido como guaraná, como inibidor de corrosão de origem vegetal. O estudo avaliou a eficiência do extrato sobre a corrosão de aço-carbono em meio ácido, mais especificamente em solução de ácido clorídrico (HCl) 1 $mol \cdot L^{-1}$. A escolha do guaraná como fonte de inibidor vegetal se justifica pela sua composição rica em compostos bioativos, como taninos, alcaloides, catequinas e flavonoides, os quais possuem átomos doadores de elétrons (como oxigênio e nitrogênio) capazes de interagir com a superfície metálica e formar uma camada protetora contra agentes corrosivos.

O extrato aquoso de *Paullinia cupana* foi obtido por meio da infusão de sementes secas e moídas da planta. Para a avaliação de sua eficácia como inibidor

de corrosão, foram realizados ensaios eletroquímicos utilizando eletrodos de aço-carbono imersos em soluções de ácido clorídrico (HCl) contendo diferentes concentrações do extrato vegetal. A eficiência inibitória e o tipo de inibição promovida pelo extrato foram determinados por meio da análise das curvas de polarização e dos espectros de impedância eletroquímica (Morais *et al.,* 2023).

Durante os ensaios, foi observado que a eficiência inibitória do extrato aumentava proporcionalmente à sua concentração, atingindo valores superiores a 80% de inibição, o que é considerado altamente satisfatório. A atuação inibidora se deu, principalmente, por meio da adsorção física e química das moléculas do extrato sobre a superfície do aço, promovendo a formação de um filme protetor que reduziu a taxa de dissolução do metal. A análise por espectroscopia de impedância eletroquímica demonstrou um aumento na resistência de transferência de carga e uma redução na capacitância da dupla camada, indicando uma barreira mais espessa e eficaz à penetração de íons agressivos da solução ácida. Os dados eletroquímicos foram complementados com a aplicação do modelo de adsorção de Langmuir, o qual descreveu adequadamente o comportamento de adsorção do extrato, sugerindo que as moléculas do inibidor formam uma monocamada sobre a superfície metálica e que o processo ocorre de forma espontânea (Morais *et al.,* 2023).

O estudo conduzido por Untari *et al.* (2020) teve como objetivo investigar o efeito sinergético entre o extrato de folhas de jambu (*Syzygium malaccense*) e o iodeto de potássio na inibição da corrosão do aço-carbono em meio ácido (HCl 1 $mol \cdot L^{-1}$). Trata-se de uma proposta alinhada com a tendência atual de pesquisa por inibidores de corrosão verdes, mais seguros, renováveis e ambientalmente sustentáveis. O extrato vegetal foi escolhido devido à presença de compostos bioativos como flavonoides e miricetina, com estruturas químicas contendo átomos doadores de elétrons (N, O e S), capazes de se adsorver na superfície do metal, formando uma camada protetora.

Foram aplicadas diferentes técnicas para avaliar o desempenho inibitório: ensaios de perda de massa, medidas de polarização potenciodinâmica, espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier, difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura. Os testes foram realizados com diferentes concentrações de iodeto (0,01 a 0,08 g/L), a uma concentração fixa de 5 g/L de extrato, e sob temperaturas variando entre 30 °C e 60 °C (Untari *et al.*,2020) .

Os resultados indicaram que a eficiência inibitória do extrato de *Syzygium*

malaccense aumentou com a concentração de iodeto e a temperatura, atingindo 92,05% com 0,08 g/L de iodeto a 60 °C. Esse desempenho foi atribuído ao efeito sinérgico entre o extrato e o haleto, confirmado por valores do parâmetro sinergético superiores a 1. A adsorção do inibidor seguiu a isoterma de Langmuir, caracterizando formação de monocamada e natureza predominantemente química, conforme os valores de energia livre de Gibbs. Os dados eletroquímicos mostraram que o sistema atua como inibidor misto, reduzindo reações anódicas e catódicas. As análises por FTIR, XRD e SEM comprovaram a formação de uma camada protetora sobre o metal e ausência de produtos de corrosão nas amostras tratadas. A termodinâmica indicou adsorção endotérmica e quimissorção. O estudo conclui que a combinação entre o extrato vegetal e iodeto representa uma alternativa eficiente e sustentável aos inibidores sintéticos (Untari *et al.*,2020).

3.6 Impacto ambiental e sustentabilidade

Nas últimas décadas, a busca por alternativas sustentáveis na mitigação da corrosão tem se intensificado, impulsionada pela crescente preocupação ambiental e pela necessidade de soluções menos agressivas ao meio ambiente e à saúde humana (Mainier; Silva, 2004). A corrosão representa um desafio tecnológico e econômico significativo, sendo tradicionalmente combatida por meio do uso de inibidores sintéticos — compostos orgânicos ou inorgânicos — cuja eficácia é amplamente reconhecida, mas cujos efeitos colaterais negativos não podem ser ignorados (Mainier; Silva, 2004; Medupin; Ukoba; Yoro; Jen, 2023). Esses inibidores, muitas vezes tóxicos e não biodegradáveis, representam riscos tanto para os ecossistemas quanto para os operadores envolvidos em sua aplicação (Naderi *et al.*, 2021).

Os extratos vegetais oferecem benefícios ao meio ambiente, sendo as plantas encontradas em todos os lugares a preparação dos extratos é considerada mais econômica e comercialmente disponível. Esses benefícios são relatados no trabalho de Mofidabadi, Dehghani e Ramezanzadeh (2022) que investigou os extratos de melancia e destacou que o processo de extração não foi complicado, tornando-se, assim, uma opção econômica. Pesquisas mostram que as partes das plantas usadas para produzir extratos inibidores de corrosão geralmente não geram custos adicionais. Isso representa uma vantagem em relação aos inibidores inorgânicos, tornando a alternativa vegetal mais econômica (Verma; Ebenso Bahadur; Quraishi, 2018).

Popoola (2019) analisou os principais fatores de custo relacionados à corrosão e destacou que, ao adotar inibidores de origem vegetal, os gastos com o projeto e sua implementação tendem a ser menores.

Os inibidores de corrosão provenientes de extratos vegetais são extremamente confiáveis e baratos, tendo como desafio a identificação dos constituintes bioativos exatos, mecanismo de inibição e outros componentes anti-inibitório em extratos vegetais. Com investimentos no estudo desses compostos, será possível promover a sustentabilidade e a economia, assim como, a diminuição da utilização de inibidores sintéticos em países que estão ativamente envolvidos no desenvolvimento de inibidores verdes, bem como atrairá outros para adotar a tendência atual (Medupin; Ukoba; Yoro; Jen, 2023).

Neste sentido, os autores Verma, Ebenso, Bahadur, Quraishi (2018) recomendam o uso de extratos vegetais, entre outros inibidores orgânicos, devido à presença de uma variedade de fitoquímicos complexos nesses extratos, assim garantindo a segurança humana e ambiental. Esses compostos atuam como sítios de adsorção nas interfaces metal/inibidor, tornando-os inibidores de corrosão metálica viáveis para diversas aplicações biológicas e industriais (Centobelli *et al.*, 2020). Além disso, uma razão significativa para a preferência por inibidores de corrosão ambientalmente amigáveis é o fato de que, apesar de sua complexidade, eles são facilmente solúveis em eletrólitos polares. Isso ocorre devido à presença de grupos funcionais polares em suas estruturas, que conferem alta funcionalidade periférica (Verma; Ebenso; Bahadur; Quraishi, 2018).

Essa característica, sem dúvida, incentiva os pesquisadores que estão atualmente dedicando esforços para aprimorar a produção desses inibidores, além de atrair mais investimentos na prevenção da corrosão por meio do uso de extratos vegetais. Essa abordagem promove a redução da poluição ambiental causada pelo uso de inibidores inorgânicos, alinhando-se a práticas mais sustentáveis e seguras (Medupin; Ukoba; Yoro; Jen, 2023).

4 METODOLOGIA

4.1 Extrato etanólico de semente de jambo

Os extratos de *Syzygium malaccense* foram obtidos a partir das sementes - colhidas no estado do Ceará -, conforme a metodologia descrita por Cavalcante (2022). Inicialmente, as sementes foram limpas e submetidas à secagem em estufa a 80 °C por 30 minutos. Em seguida, foram trituradas e maceradas, posteriomente imersas em álcool etílico 95%, na proporção de 1:2 (massa de semente:volume de álcool), permanecendo em imersão por sete dias. Após esse período, a solução foi filtrada e concentrada utilizando um rotaevaporador. O extrato obtido foi submetido a tratamento térmico em estufa, sendo aquecido inicialmente a 50 °C por 24 horas, posteriormente a 100 °C por 1 hora e, por fim, a 150 °C por mais 1 hora. Após o resfriamento à temperatura ambiente, o extrato foi triturado com auxílio de almofariz e pistilo, e armazenado em tubo Falcon para posterior utilização

4.2 Preparação dos cupons metálicos

Os cupons de aço carbono 1020 foram confeccionados a partir de uma barra chata e cortados com dimensões aproximadas de 24 mm de comprimento, 20 mm de largura e 5 mm de espessura, conforme ilustrado na Figura 3. Em seguida, os cupons foram lixados com lixas d'água de granulometrias 300, 400, 600 e 1200 mesh, aplicadas sempre no mesmo sentido para cada etapa, alternando-se a direção em 90° a cada troca de lixa, a fim de garantir um acabamento superficial uniforme.

Após o preparo, as amostras foram limpas e imersas em soluções de cloreto de sódio (NaCl) a 3,5%. Para cada ensaio, 20 mL da solução salina foram transferidos para um tubo Falcon com auxílio de uma pipeta volumétrica, onde o cupom metálico foi então inserido. O procedimento foi realizado em triplicata, tanto na ausência quanto na presença de inibidor de corrosão, em diferentes concentrações: 300 ppm, 500 ppm, 1000 ppm e 3000 ppm.

Após 21 dias de exposição, os cupons foram removidos, limpos, pesados em balança analítica e medidos com paquímetro manual. A limpeza seguiu o procedimento mecânico descrito pela American Society for Testing and Materials (1999), utilizando-se escova, água destilada, álcool etílico e acetona, nesta ordem.

Esse procedimento também foi aplicado aos cupons que não passaram pelo lixamento inicial.

Figura 3 - Cupom de aço carbono SAE 1020 após tratamento.

Fonte: A autora (2025).

4.3 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier

Após a trituração, uma amostra do extrato de sementes de jambo foi coletada para análise por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). A análise foi conduzida no Núcleo de Ciências Exatas, no laboratório da Central Analítica da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), campus Arapiraca.

As medições foram realizadas em um espectrômetro FTIR modelo Cary 660, da marca Agilent, equipado com acessório de reflectância total atenuada (ATR), utilizando cristal de seleneto de zinco (ZnSe). As leituras foram efetuadas com 32 varreduras, na faixa espectral de 650 a 4000 cm^{-1}, com resolução de 4 cm^{-1}.

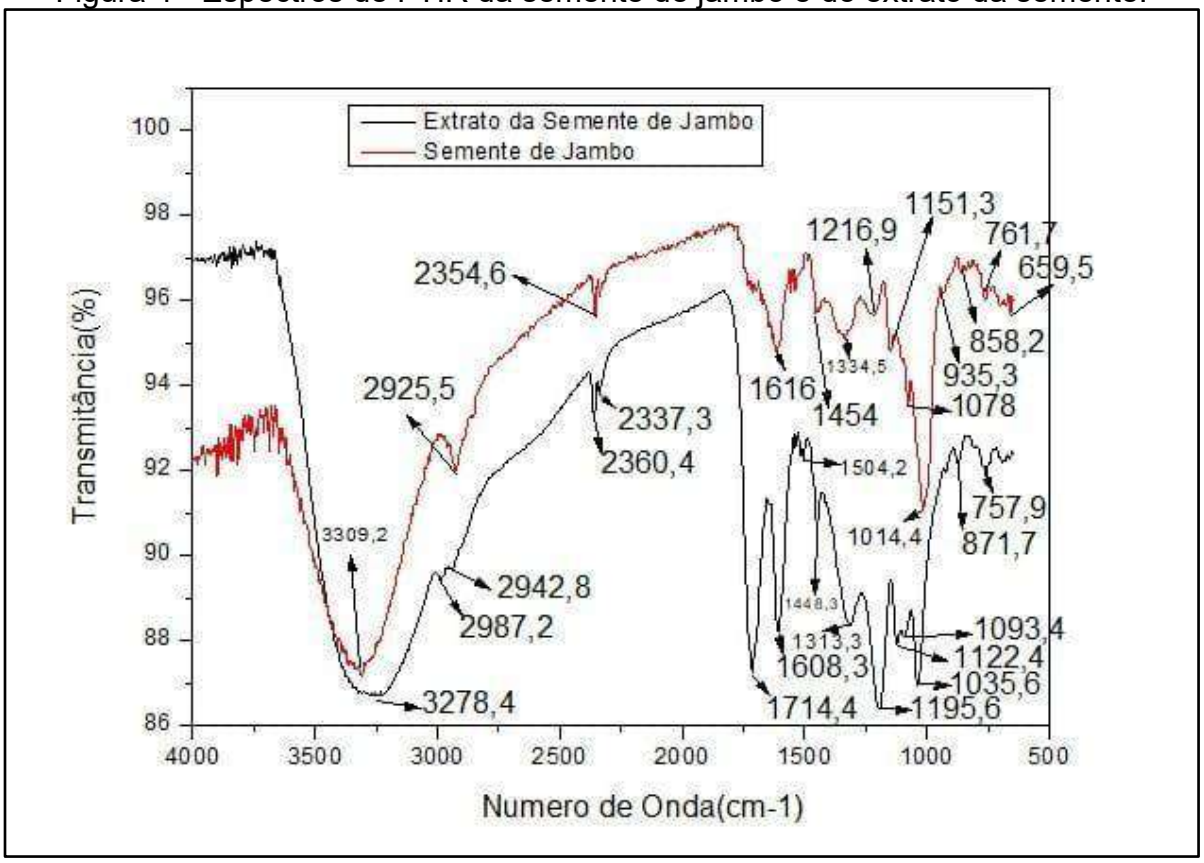
Essa análise permitiu identificar os principais grupos funcionais presentes no extrato, fornecendo informações relevantes sobre os compostos químicos que podem estar associados à atividade inibitória da corrosão. Os dados obtidos por FTIR serviram como base para a caracterização preliminar do extrato e auxiliaram na compreensão dos possíveis mecanismos de interação entre os constituintes do extrato e a superfície metálica

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Espectroscopia no infravermelho por transformada de fourier

Foi realizada a caracterização do extrato de semente de jambo e da semente de jambo por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), sendo apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Espectros de FTIR da semente de jambo e do extrato da semente.



Fonte: A autora (2025).

Os espectros de infravermelho das sementes e do extrato (Figura 4) apresentaram similaridade entre as bandas. Como mostrado na figura 4 os picos de 3309,2 e 2925,5 cm^{-1} da semente de jambo e 3278,4, 2987,2 e 2942,8 cm^{-1} dos extratos, são atribuídos ao grupo OH, indicado a presença de grupos hidroxila. Os comprimentos de onda situados em 3400 - 3200 cm^{-1} para ligação de hidrogênio e 3400 - 2400 cm^{-1} dos ácidos carboxílicos (Pavia *et al.*, 2013). A presença de heteroátomos como O e N, anéis conjugados e grupos -OH garantem o requisito básico na composição de um inibidor de corrosão (Morais *et al.*, 2023).

As bandas em 1636 cm^{-1} e 1616 cm^{-1} observadas no extrato e semente de jambo, respectivamente, podem ser atribuídas aos grupos amida I e amida II, que estão associados às proteínas. Essas bandas costumam aparecer na faixa de 1740 a 1600 cm^{-1}, conforme indicado por Leão *et al.* (2017).

Para o extrato, também foram identificadas bandas entre 1448 cm^{-1} - 1035,6 cm^{-1}, enquanto que para as sementes, as bandas ficaram entre 1454 - 935,3 cm^{-1}. Essas regiões espectrais são características dos carboidratos, conforme descrito por Cavalet; Menezes Filho; Castro e Ventura (2023).

As bandas situadas entre 1200 cm^{-1} e 800 cm^{-1} estão associadas ao amido e correspondem a vibrações de deformação axial de C–O em álcoois, vibrações de O–C–O, além do alongamento das ligações C–C, C–OH e C–H (Chen *et al.*, 2017). A presença de uma banda em 1195; 1093,4; 1122,4 cm^{-1} no extrato e outra em 1216,9; 1151,3; 1078; 1014,4; 935,3 cm^{-1} na semente está relacionada às estruturas ordenadas e amorfas do amido nativo (Cavalet; Menezes Filho; Castro e Ventura, 2023).

Por fim, as bandas em 757,9 cm^{-1} para o extrato e 761,7 cm^{-1} para a semente podem estar associadas à deformação axial do grupo C=O de lactamas. Além disso, a deformação angular do grupo N–H das lactamas, quando deslocada para fora do plano de simetria, pode resultar em uma absorção larga na faixa de 800 cm^{-1} a 700 cm^{-1} (Cavalet; Menezes Filho; Castro e Ventura, 2023).

5.2 Perda de massa

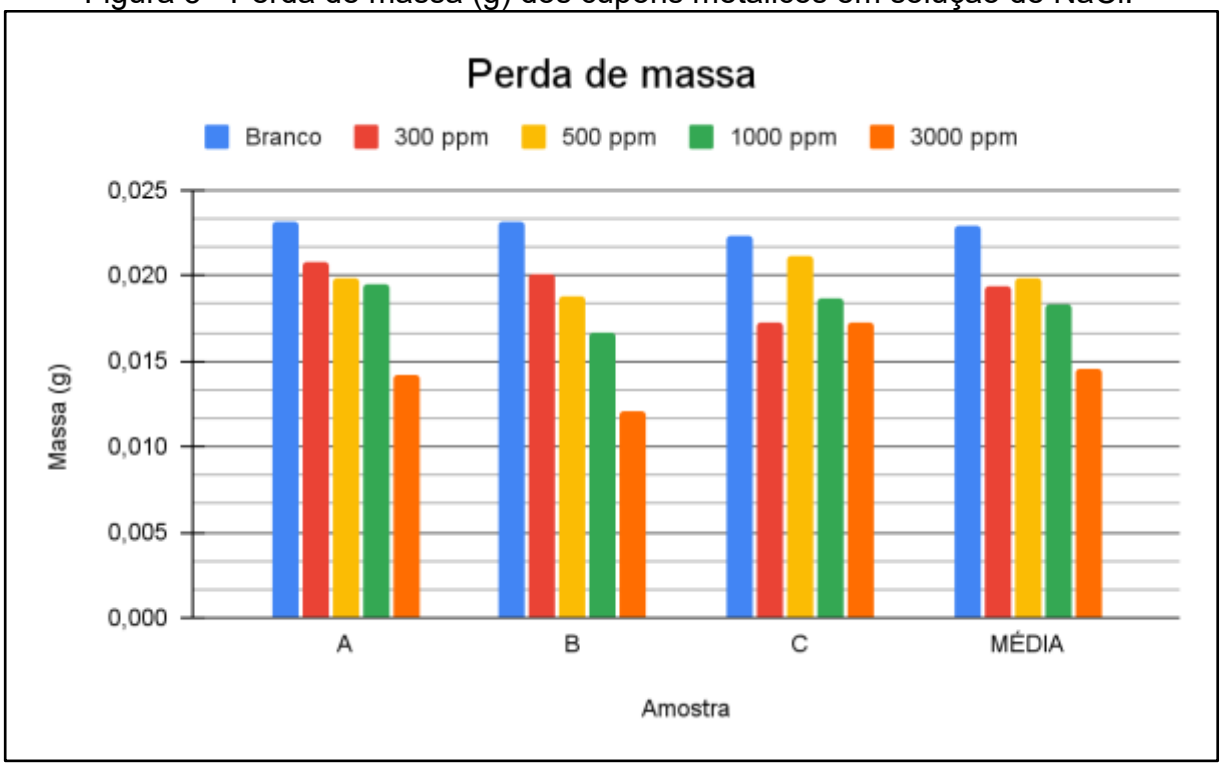
A perda de massa dos cupons metálicos foi monitorada durante um período de 21 dias, conforme ilustrado na Figura 6. A determinação foi realizada por meio da diferença entre a massa inicial e a massa final de cada amostra, e os resultados estão organizados na Figura 5.

Os resultados apresentados na Figura 5 demonstram uma tendência clara de redução na perda de massa dos cupons metálicos com o aumento da concentração do inibidor. A amostra controle (sem inibidor) apresentou a maior média de perda de massa (0,0229 g), enquanto a menor perda foi observada com a adição de 3000 ppm do inibidor, resultando em uma média de 0,0145 g — uma redução de aproximadamente 36,7% em relação ao branco.

Essa redução progressiva sugere que o extrato de *Syzygium malaccense* atuou efetivamente como inibidor de corrosão, formando possivelmente uma barreira protetora sobre a superfície do metal. A eficácia crescente com a elevação da concentração indica um comportamento dependente da dose, o que reforça o potencial do extrato como alternativa sustentável para proteção contra a corrosão em ambientes salinos. No entanto, em concentrações intermediárias (500 ppm e 1000 ppm), observam-se pequenas variações, possivelmente atribuídas à dispersão experimental ou à interação não homogênea do inibidor com a superfície metálica.

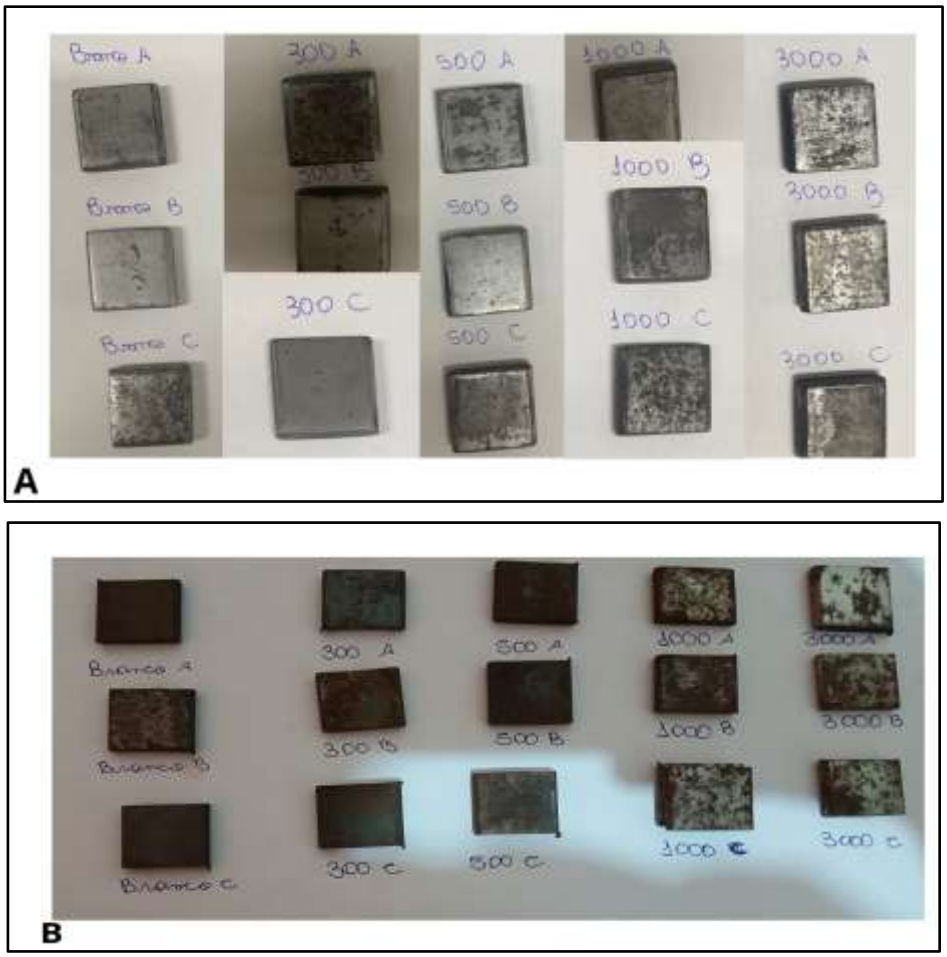
Esses dados corroboram a hipótese de que a presença de compostos ativos no extrato contribui significativamente para a mitigação do processo corrosivo, sendo a concentração de 3000 ppm a mais eficiente dentro das condições testadas.

Figura 5 - Perda de massa (g) dos cupons metálicos em solução de NaCl.



Fonte: A autora (2025).

Figura 6 - (A) Imagens das peças/ cupons metálicos antes da solução com o inibidor e sem. (B) Imagens das peças/ cupons metálicos depois da solução com inibidor e sem.



Fonte: A autora (2025).

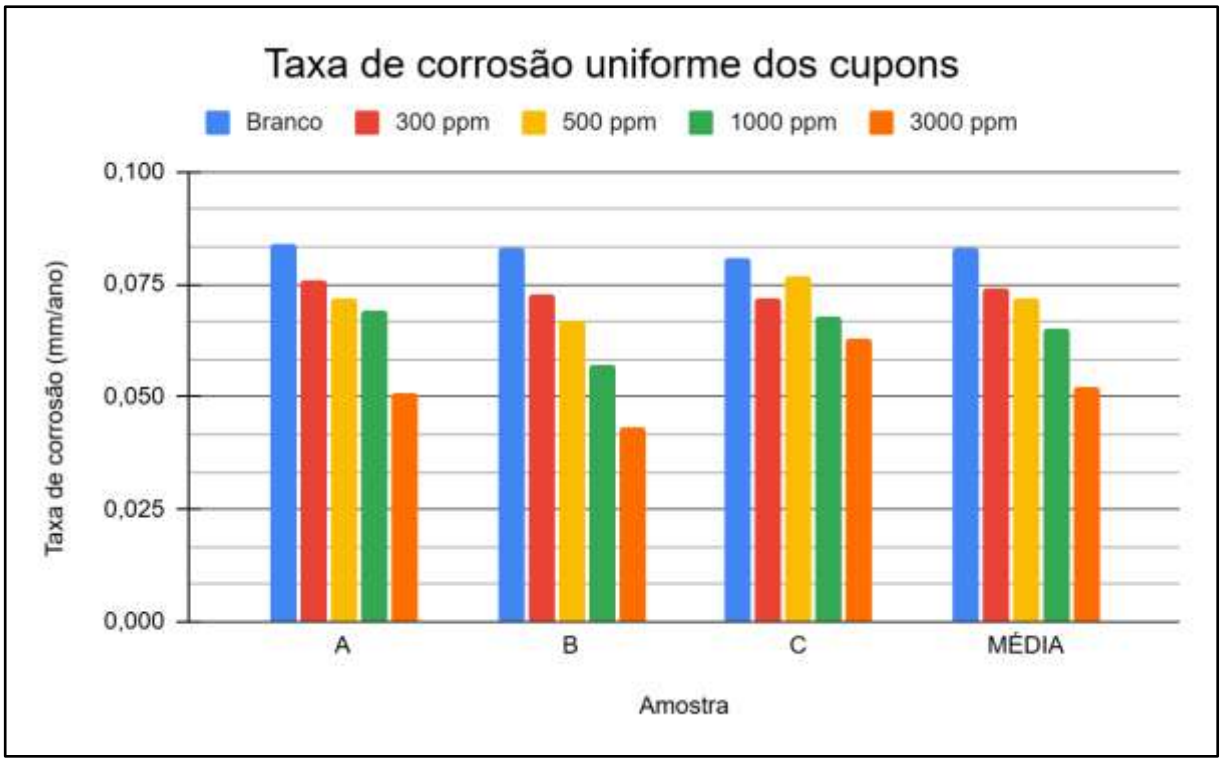
5.3 Taxa de corrosão

A partir dos dados de perda de massa, foi possível calcular a taxa de corrosão dos cupons metálicos expostos à solução agressiva de NaCl, utilizando a metodologia descrita na norma NACE RP-07-75. A taxa de corrosão (em mm/ano) foi determinada conforme expressa a Equação 2:

$$Taxadecorrosão = \frac{MédiadaPerdademassa(g)\times 365(\frac{dias}{ano})\times 1000(\frac{mm^3}{cm^3})}{Densidadedoaço(\frac{g}{cm^3})\times Área(cm^2)\times Tempo(dias)} \qquad \text{Equação 2}$$

Para o estudo foi considerada a densidade do aço 1020 como sendo 7,86 $g.cm^{-3}$. Para determinar a intensidade do processo corrosivo, foi adotada a Norma NACE RP-07-75, o Quadro 2 apresenta a classificação da corrosão conforme a taxa de corrosão.

Figura 7 - Taxa de corrosão uniforme (mm/ano) dos cupons.



Fonte: A autora (2025).

Quadro 2 - Classificação da taxa de corrosão do aço carbono.

Corrosividade	Taxa de corrosão uniforme (mm/ano)
Baixa	< 0,025
Moderada	0,025 a 0,120
Alta	0,130 a 0,250
Severa	> 0,250

Fonte: NACE Internacional (2005).

As peças metálicas imersas na solução agressiva sem adição de inibidor (amostras branco) apresentaram uma média de perda de massa de 0,0229 g e uma taxa de corrosão de 0,083 mm/ano. Esses valores se enquadram na faixa de corrosividade moderada, conforme os critérios estabelecidos no Quadro 2 da Norma NACE RP-07-75. Esse comportamento é característico de sistemas expostos a soluções salinas neutras, como o NaCl a 3,5%, amplamente utilizado como meio de ensaio por simular ambientes marinhos.

Com a introdução do inibidor à base de extrato de sementes de *Syzygium malaccense* em concentrações crescentes (300, 500, 1000 e 3000 ppm), observou-se uma redução progressiva e consistente da taxa de corrosão, indicando a eficácia do extrato como agente inibidor. O melhor desempenho foi obtido na concentração de 3000 ppm, com taxa média de 0,052 mm/ano, representando uma redução de aproximadamente 37% em relação ao branco. Apesar de todos os valores permanecerem na faixa de corrosividade moderada, a tendência de queda reflete um efeito inibitório.

Durante os ensaios, foi observada uma alteração na coloração da solução de NaCl, que passou de incolor para alaranjada, sinalizando a formação de cloreto férrico ($FeCl_3$). Esse composto é resultante da reação entre os íons Fe^{2+}/Fe^{3+} liberados da superfície metálica e os íons cloreto presentes na solução, fenômeno já relatado na literatura (Bezerra, 2022). A coloração intensa foi mais evidente nas amostras sem inibidor, sugerindo maior atividade corrosiva e consequente liberação de ferro.

A presença do inibidor, especialmente na concentração de 3000 ppm, não apenas reduziu significativamente a perda de massa, como também pareceu atuar na passivação parcial da superfície do metal, dificultando a ação dos íons cloreto e limitando a formação de produtos de corrosão visíveis. Os resultados médios para as taxas de corrosão com inibidor — 0,074 mm/ano (300 ppm), 0,072 mm/ano (500 ppm), 0,065 mm/ano (1000 ppm), e 0,052 mm/ano (3000 ppm) — reforçam esse efeito protetor incremental.

Embora todos os valores se mantenham dentro da classificação "moderada" pela norma NACE, a expressiva redução nos valores numéricos evidencia o potencial do extrato vegetal como uma alternativa ambientalmente amigável aos inibidores sintéticos, com aplicação viável em sistemas onde se busca prolongar a vida útil de componentes metálicos expostos a ambientes salinos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como propósito investigar o uso do extrato etanólico das sementes de jambo vermelho (*Syzygium malaccense*) como inibidor natural de corrosão em aço carbono SAE 1020, exposto a uma solução de cloreto de sódio a 3,5%. A pesquisa foi motivada pela crescente demanda por alternativas sustentáveis aos inibidores sintéticos, que muitas vezes apresentam toxicidade elevada e impactos negativos ao meio ambiente.

O objetivo geral proposto — verificar se o extrato possui ação inibitória eficaz — foi alcançado. Os objetivos específicos, como a preparação e caracterização do extrato, a realização dos ensaios experimentais de corrosão e a análise da eficiência em diferentes concentrações, também foram devidamente cumpridos ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Os resultados da caracterização por FTIR evidenciaram a presença de grupos funcionais como hidroxilas, amidas e carboidratos, estruturas orgânicas conhecidas por atuarem como agentes inibidores de corrosão, por meio da formação de filmes protetores sobre superfícies metálicas. A análise espectroscópica confirmou a presença de compostos bioativos com potencial de interação com o aço.

Nos ensaios de perda de massa e taxa de corrosão, o extrato demonstrou ação inibitória em todas as concentrações testadas, com desempenho mais expressivo na concentração de 3000 ppm, que apresentou redução de cerca de 37% na taxa de corrosão em relação à amostra sem inibidor. Embora todos os valores estejam enquadrados na faixa de corrosividade moderada, observou-se uma tendência clara de redução da corrosão com o aumento da concentração do extrato.

O estudo aponta uma viabilidade da aplicação de um subproduto vegetal como inibidor de corrosão, reforçando a sustentabilidade da proposta. Assim como, a ampliação do conhecimento sobre o uso de extratos naturais como inibidores verdes, incentivando novos estudos sobre plantas com potencial bioativo semelhante.

Contudo, a pesquisa apresenta algumas limitações, como a ausência de ensaios eletroquímicos mais detalhados, como impedância eletroquímica e curvas de polarização. Além disso, a estabilidade do extrato em ambientes com variações de temperatura e pH não foi explorada, o que pode influenciar seu desempenho em condições industriais reais.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação dos testes para diferentes ligas metálicas, condições ambientais variadas (como pH ácido e temperaturas elevadas), bem como a análise da cinética de adsorção dos compostos presentes no extrato. Estudos cromatográficos que identifiquem e isolem os principais compostos ativos também podem oferecer melhor compreensão dos mecanismos de inibição.

Dessa forma, conclui-se que o extrato de sementes de jambo vermelho apresenta-se como uma alternativa promissora, econômica e ambientalmente segura para mitigação da corrosão em metais, contribuindo tanto para a inovação científica quanto para práticas mais sustentáveis na indústria.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens.** West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials, 1999.

AUGUSTA, Ivanilda Maria. Caracterização física e química da casca e polpa de jambo vermelho (Syzygium malaccensis,(L.) Merryl & Perry). **Food Science and Technology**, v. 30, p. 928-932, 2010.

BANDEIRA, Tiago Teixeira. **Patologia do aço**: estudo de caso da corrosão em pilares treliçados de aço na cidade de Iguatu-CE. 2021. Monografia (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) - Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, RN, 2021

BEZERRA, Sara Rizia Nunes. **Estudo e avaliação da casca da laranja como inibidor verde no combate à corrosão em estruturas metálicas de aço carbono**. 2022. Monografia (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) - Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, RN, 2022.

BRASIL perde 4% do PIB com corrosão. **Revista Grandes Construções**, v.79, maio 2007. Disponível em:https://grandesconstrucoes.com.br/Materias/Exibir/brasil-perde-4-do-pib-com-corrosao. Acesso em: 13 jan. 2025.

CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais:** uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CAVALCANTE, Luara Jessika Celestino. Estudo químico e biológico de frutos e sementes de jambo (syzygim jambos) com o intuito de desenvolver um biofármaco. *In*: SEMANA UNIVERSITARIA UECE, 37., 2022, Fortaleza, CE. **Anais** [...]. Fortaleza, CE: UECE, 2022.

CAVALET, Matheus Chavaglia; MENEZES FILHO, Antonio Carlos Pereira de; CASTRO, Carlos Frederico de Souza; VENTURA, Matheus Vinicius Abadia. Avaliação anatômica do fruto de jambo amarelo (Syzygium jambos (L.) Alston) e análise físico-química farinácea da casca e polpa e semente. **Brazilian Journal of Science**, v. 2, n. 7, p. 48-61, 2023.

CENTOBELLI, Piera; CERCHIONE, Roberto; CHIARONI, Davide; VECCHIO, Pasquale Del; URBINATI, Andrea. Designing business models in circular economy: a systematic literature review and research agenda. **Business Strategy and the Environment**, v. 29, n. 4, p. 1734-1749, 2020.

CHEN, Xuetao; LI, Xia; MAO, Xinhui; HUANG, Hanhan; WANG, Tingting; QU, Zhuo; MIAO, Jing; GAO, Wenyuan. Effects of drying processes on starch-related physicochemical properties, bioactive components and antioxidant properties of yam flours. **Food Chemistry**, v. 224, p. 224-232, 2017.

CORREA, Jose Rodrigues Pereira; SOUZA NETO Antonio Machado de; CORREA,

Erick Rodrigues Pereira. Processo de proteção anticorrosiva aplicado na fabricação de torres eólicas. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 36., 2016, João Pessoa, PB. **Anais** [...]. João Pessoa, PB: ABEPRO, 3 a 6 out. 2016. p. 1-21.

DANTAS, Maria Clara Nascimento; CARDOSO, Sheila Pressentin. Inibidor de corrosão de origem vegetal: revisão em artigos publicados no brasil. **Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia**, v. 14, p. 1-20, 2022.

D'OLIVEIRA, Maria Carolina de Paula Estevam; GUARDA, Emerson Adriano; GUARDA, Patrícia Martins; SIDEL, Salmo Moreira. Recent studies on carbohydrate compounds for corrosion inhibition: a systematic review. **Research, Society and Development,** *[S. l.]*, v. 11, n. 9, p. e41811932021, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i9.32021. Disponível em: https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/32021. Acesso em: 22 feb. 2025.

FERRAZ, Henrique. O aço na construção civil. **Revista Eletrônica de Ciências**, São Carlos, SP, n. 22, out./ dez. 2005.

FRAUCHES-SANTOS, Cristiane; ALBUQUERQUE, Mariana A.; OLIVEIRA, Márcia C. C.; ECHEVARRIA, Aurea Echevarria. A corrosão e os agentes anticorrosivos. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 2, p. 293-309, 2014.

LACERDA, Frederico Garcia de. **Avaliação de defeitos e resistência à corrosão de revestimentos metálicos aspergidos termicamente por arco elétrico**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

LEÃO, Daniela P.; FRANCA, Adriana S.; OLIVEIRA, Leandro S.; BASTOS, Rita; COIMBRA, Manuel A. Physicochemical characterization, antioxidant capacity, total phenolic and proanthocyanidin content of flours prepared from pequi (Caryocar brasilense Camb.) fruit by-products. **Food Chemistry**, v. 225, p. 146-153, 2017.

LIMA;Jakson Fernandes, PARENTE; Marcelo Monteiro Valente; PASCOAL; Victor Pereira, MOURA; Luiz F. W. Gonçalves. Inibidores de corrosão verdes de glicerina: revisão e perspectivas futuras. **Revista Sociedade Científica**, v.7, n.1, p.1528-1544, 2024. DOI: https://doi.org/10.61411/rsc202440117

LOPES, Pamella Hayana Lima. **Desempenho de tintas anticorrosivas em revestimento de aço-carbono SAE 1020**. 2019. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2019.

LUZ, Ederson Gean da. **Monitoramento da corrosão no aço carbono 1020, aço galvanizado, alumínio e cobre, considerando as condições climáticas serranas e litorâneas de Santa Catarina**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Centro Universitário UNIFACVEST, Lages, SC, 2018.

MAINIER, Fernando Benedicto; SILVA, Rosenir Rita de Cassia Moreira da. As formulações inibidoras de corrosão e o meio ambiente. **Engevista**, v. 6, n.3, p. 106-

112, dez. 2004.

MARQUES, Camily Rodrigues; BARBOSA, Giovanna Vitória Dias; NASCIMENTO, Mariana Vitória do. **Viabilidade econômica no uso da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) para avaliação da resistência à corrosão em comparação como o Cass test utilizado pela indústria automobilística.** 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico em Administração) - Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, Escola Técnica Estadual Trajano Camargo, Limeira, SP, 2023.

MARQUES, Eric Gripa. **Levantamento do estado da arte do uso de inibidores verdes à base de plantas para proteção contra a corrosão**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

MEDUPIN, Rasaq O.; UKOBA, Kingsley O.; YORO, Kelvin O.; JEN, Tien-Chien. Sustainable approach for corrosion control in mild steel using plant-based inhibitors: A review. **Materials Today Sustainability**, v. 22, p. 100373, 2023.

MESQUITA, Gerson Gabriel Oliveira. **Estudo de caso sobre a corrosão em uma planta de extração de ouro.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Russas, CE, 2022.

MOFIDABADI, Amir Hossein Jafari; DEHGHANI, Ali; RAMEZANZADEH, Bahram. Investigating the effectiveness of Watermelon extract-zinc ions for steel alloy corrosion mitigation in sodium chloride solution. **Journal of Molecular Liquids**, v. 346, p. 117086, 2022.

MORAIS, Williams Raphael de S.; SILVA, Jaceguai S. da; FREITAS, Johnnatan D. de; NASCIMENTO, Ticiano G. do; ZANTA, Carmem Lúcia de P. e S.; RIBEIRO, Adriana S.; TONHOLO, Josealdo. Avaliação da paullinia cupana como inibidor verde de corrosão em aço carbono com a aplicação de técnicas eletroquímicas. **Revista de Educação, Ciência e Tecnologia do Ifam**, [*S. l*], v. 17, n. 2, p. 270-304, dez. 2023.

MOREIRA, Leonardo Finoti; GOMES, Lumena Costa; MAGALHÃES, Maria de Lourdes; ABREU, Cícero V. Abreu. Avaliação de inibidor natural de corrosão em ensaios de tração do aço carbono 1020. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL, 20., 2020, Brasília, DF. **Anais** [...]. Brasília, DF: Even3, 2020. p. 1-11. Disponível em: https//www.even3.com.br/anais/conemi/262855-AVALIACAO-DE-INIBIDOR-NATURAL-DE-CORROSAO-EM-ENSAIOS-DE-TRACAO-DO-ACO-CARBONO-1020. Acesso em: 31 jan. 2025.

MUNHOZ, Cláudia Leite; FERREIRA, Thales Henrique Barreto; GOMES, Miriam Cristina da Silva. Caracterização física de frutos de jambo vermelho. **Cadernos de Agroecologia**, v. 13, n. 2, p. 7-7, 2018.

NACE INTERNACIONAL. **Standard recommended practice:** preparation, installation, analysis, and interpretation of corrosion coupons in oilfield operations**.** Houston, TX: NACE Internacional, 2005. NACE Standard RP-07-75.

NADERI, R.; BAUTISTA, A.; VELASCO, F.; SOLEIMANI, M.; POURFATH, M.. Use of licorice plant extract for controlling corrosion of steel rebar in chloride-polluted concrete pore solution. **Journal of Molecular Liquids**, v. 346, p. 117856, 2022.

NAUARA, Thaís. Época do jambo: conheça a origem da fruta exótica e seus benefícios para a saúde. **G1**, Porto Velho, RO, 14 mar. 2024. Disponível em: https://g1.globo.com/ro/rondonia/rondonia-rural/noticia/2024/03/14/epoca-do-jambo-conheca-a-origem-da-fruta-exotica-e-seus-beneficios-para-a-saude.ghtml. Acesso em: 02 dez 2024.

OLIVEIRA, Thamires Matos de; CARDOSO, Sheila Pressentin. Avaliação do chá branco como potencial inibidor de corrosão. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 1, p. 1-9, 2019.

PANNONI, Fabio Domingos. Aços estruturais. **Scribd**. 2021. Disponível em: https://pt.scribd.com/doc/210368326/Fabio-Domingos-Pannoni-Acos-Estruturais. Acesso em: 3 fev. 2025.

PAVIA, D. L.; LAMPMAN, G. M.; KRIZ, G. S.; VYVYAN, J. R. **Introdução à espectroscopia**. São Paulo: Cengagem Learning, 2013.

POPOOLA, Lekan Taofeek. Progress on pharmaceutical drugs, plant extracts and ionic liquids as corrosion inhibitors. **Heliyon**, v. 5, n. 2, 2019.

RODRIGUES, Luciano Monteiro; SANTOS, Carlos Henrique Reis dos; VELOSO, Rodrigo Ribeiro; LEMOS, Marianne Vieira; SANTOS, Claudinei dos; CABRAL, Ricardo de Freitas. Estudo da microestrutura e da microdureza dos aços 1020 e 1060. **Cadernos UniFOA**, Volta Redonda, RJ, v. 9, n. 2 esp, p. 39–44, 2017. DOI: 10.47385/cadunifoa.v9.n2 esp.1182. Disponível em: https://revistas.unifoa.edu.br/cadernos/article/view/1182. Acesso em: 3 fev. 2025.

SANTOS, Jorge Edson Pinheiro dos. Estudo da inibição de corrosão do aço carbono em ácido clorídricona presença de mangiferina. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 21, p. 1045-1053, 2016.

SENISKI, Anelize; OLIVEIRA, Tassiane Apolinário de; PORTELLA, Kleber Franke; CARRERA, Gilberto; BRAGANÇA, Mariana d'Orey Gaivão Portella. Estudo do desempenho do aço carbono AISI 1010 sob o efeito de barreira de revestimento epóxi/HDL-Zn-Al-NO 2-como inibidor de corrosão, via espectroscopia de impedância eletroquímica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, p. e-12660, 2020.

SHARMA, S. K.; SHARMA A. **Green corrosion chemistry and engineering, opportunities and challenges**. Jaipur: WILEY-VCH, 2012. 401 p.

SILVA, André Luiz V. da Costa; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais.** 3. ed. rev. e ampl. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.

SILVA, K. A. da; VASCONCELLOS, M. D. S.; TAPANES, N. D. L. C. O.; PINTO, W. C. L.; SOUZA, F. D. M.; SANTANA, A. I. C. Aplicação da trietilamina como inibidor de corrosão do aço API em meio de cloreto. **Acta Scientiae et Technicae**, v. 6, n. 1, p. 63-73, 2018.

UNTARI, Putri. Efek sinergetik ekstrak daun Jambu Bol (Syzygium malaccense) dan Iodida terhadap Korosi Baja dalam Larutan Asam. **Chempublish Journal**, v. 5, n. 2, p. 179-193, 2020.

VERMA, Chandrabhan; EBENSO, Eno E.; BAHADUR, Indra; QURAISHI, M. A. An overview on plant extracts as environmental sustainable and green corrosion inhibitors for metals and alloys in aggressive corrosive media. **Journal of Molecular Liquids**, v. 266, p. 577-590, 2018.

ZAMBELLI, Ariadna Ribeiro; AGUIAR, Liza Araújo; CUNHA, Arcelina Pacheco; VIEIRA, Mariano George Sousa; CAVALCANTI, Eveline Solon Barreira; MORAIS, Selene Maia de. Avaliação do potencial antioxidante e análise do teor de taninos totais de Syzygium malaccense. *In*: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 58., 2006, Florianópolis, SC. **Anais** [...]. Florianópolis, SC: SBPC, 2006.