

OCIMUM BASILICUM VAR. CITRIODORUM EXTRACT: A SUSTENTAINABLE APPROACH FOR ANTICORROSIVE PROTECTION OF STEEL IN ACIDIC MEDIA

EXTRATO DE OCIMUM BASILICUM VAR. CITRIODORUM: UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL PARA A PROTEÇÃO ANTICORROSIVA DO AÇO EM MEIO ÁCIDO

MAURO PATRÍCIO DA COSTA

<https://orcid.org/0009-0006-6731-3599/maurofelipe789@gmail.com>
Instituto Federal do Ceará - IFC, Fortaleza, Ceará.

DIANA FERREIRA ALVES

<https://orcid.org/0009-0009-4198-9621/diianafalves@gmail.com>
Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, Ceará.

JOSÉ MILTON FERREIRA

<https://orcid.org/0000-0002-3449-4040/jmiltonferreiraj@gmail.com>
Universidade Estadual do Ceará: Limoeiro do Norte, Ceará.

Recebido em: 17/08/2024

Aprovado em: 7/11/2024

Publicado em: 09/12/2024



RESUMO

Embora a flora brasileira possua uma vasta diversidade genética, apenas uma pequena parte foi explorada para a identificação e aplicação de compostos bioativos. Nesse sentido, os produtos naturais têm sido amplamente aplicados em diversas áreas, sobretudo na área da tecnologia, onde desempenham um papel crucial no desenvolvimento de soluções sustentáveis. Nesse contexto, esta pesquisa teve como objetivo caracterizar e avaliar a eficácia do extrato hidroetanólico de *Ocimum basilicum* var. *citriodorum*, conhecido como manjerição-limão, como uma solução sustentável para a inibição da corrosão do aço carbono SAE 1010 em meio ácido. Para tanto, foram empregadas técnicas como prospecção fitoquímica, análise gravimétrica, teste de potencial de circuito aberto e microscopia óptica. Os resultados obtidos indicaram que a melhor eficiência de inibição foi alcançada com a adição de 20% do extrato hidroetanólico, a uma concentração de 1000 ppm no meio corrosivo, atingindo uma eficiência máxima de 81,71%. Essa eficiência está associada à formação de filmes adsorvidos na superfície do metal. Dessa forma, o manjerição-limão se apresenta como uma potencial alternativa sustentável para a proteção anticorrosiva do aço carbono em meio ácido.

Palavras-chave: manjerição-limão; inibidores de corrosão; produtos naturais; inibidores verdes.

ABSTRACT

Although the Brazilian flora has a vast genetic diversity, only a small part has been explored for the identification and application of bioactive compounds. In this sense, natural products have been widely applied in several areas, especially in the area of technology, where they play a crucial role in the development of

sustainable solutions. In this context, this research aimed to characterize and evaluate the effectiveness of the hydroethanolic extract of *Ocimum basilicum* var. *citriodorum*, known as lemon basil, as a sustainable solution for the inhibition of corrosion of SAE 1010 carbon steel in an acidic medium. For this purpose, techniques such as phytochemical prospecting, gravimetric analysis, open circuit potential test and optical microscopy were used. The results obtained indicated that the best inhibition efficiency was achieved with the addition of 20% of the hydroethanolic extract, at a concentration of 1000 ppm in the corrosive medium, reaching a maximum efficiency of 81.71%. This efficiency is associated with the formation of adsorbed films on the metal surface. Thus, lemon basil presents itself as a potential sustainable alternative for the anticorrosive protection of carbon steel in an acidic environment.

Keywords: lemon basil; corrosion inhibitors; natural products; green inhibitors.

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico e produtivo tem intensificado a demanda por produtos resistentes à corrosão, o que representa um desafio significativo para a indústria moderna. A corrosão compromete não apenas a integridade estrutural dos materiais, mas também eleva consideravelmente os custos de manutenção, substituição e proteção.

Segundo uma estimativa da NACE (*National Association of Corrosion Engineers*), o custo global da corrosão é de aproximadamente US\$ 2,5 trilhões, o que constitui cerca de 3,5% do PIB mundial. Em contrapartida, técnicas eficazes de gerenciamento da corrosão podem reduzir aproximadamente 20% dos custos diretos associados a esses aspectos. Adicionalmente, há uma significativa diminuição dos gastos indiretos decorrentes de paralisações acidentais, perda de eficiência dos equipamentos, contaminação dos produtos, perda total da produção e riscos à segurança pessoal e ambiental (NACE, 2016).

Nesse contexto, os inibidores de corrosão destacam-se como uma das principais estratégias para a proteção anticorrosiva de materiais. Essas substâncias são adicionadas ao meio em quantidades adequadas para reduzir ou eliminar a corrosão em estruturas metálicas, alterando a cinética das reações eletroquímicas (GENTIL, 2022). Para que um inibidor seja eficaz, é crucial considerar as causas específicas da corrosão no sistema, os custos envolvidos na sua utilização e aquisição, além das propriedades e mecanismos de ação do inibidor. Além disso, é fundamental assegurar condições adequadas de adição e controle para evitar efeitos adversos (ibid.).

No entanto, a utilização de inibidores de corrosão enfrenta desafios significativos devido à natureza dos produtos químicos envolvidos, que frequentemente incluem compostos nitrogenados, fosforados, derivados de aminas ou com base de enxofre e metais pesados. Essas substâncias são

conhecidas por serem tóxicas e prejudiciais ao meio ambiente, exigindo cuidados rigorosos na logística de armazenagem, aplicação e descarte. Embora sejam altamente eficazes na proteção contra a corrosão, os riscos associados a esses inibidores não devem ser subestimados (ROBERGE, 2019).

Diante tais desafios, a pesquisa sobre inibidores de corrosão naturais tem se destacado como uma alternativa promissora. A principal vantagem dos "inibidores verdes" reside no fato de serem derivados de recursos naturais renováveis, biodegradáveis, de baixo custo, além de não conterem metais pesados (AL-AMIERY, ISAHAK e AL-AZZAWI, 2024).

Dado o exposto, a presente investigação tem como objetivo avaliar a eficiência e aplicabilidade do extrato da espécie *Ocimum basilicum* var. *citriodorum*, comumente conhecido como manjerição-limão, como inibidor de corrosão para o aço carbono em meio de HCl 0,5 mol.L⁻¹. Desta forma, busca-se oferecer uma alternativa sustentável às técnicas convencionais de prevenção da corrosão.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A Corrosão e suas implicações no setor industrial

A corrosão é descrita como a deterioração de materiais, sejam metálicos ou não, acompanhado da degradação de suas propriedades devido à interação química ou eletroquímica com o ambiente em que estão inseridos. Além disso, esse processo pode ser intensificado por meio de mecanismos físicos e mecânicos. (GENTIL, 2022).

Tal fenômeno pode resultar em alterações indesejáveis e prejudiciais, como desgaste, variações químicas e modificações estruturais. Dada a ampla utilização de peças e estruturas de aço, é fundamenta a busca por técnicas que minimizem a degradação desse material de alto valor agregado, assegurando a sua durabilidade e adequação ao uso pretendido.

Nos processos industriais, as perdas de eficiência e os custos associados à manutenção das linhas de produção são grandes preocupações. Setores de exploração e beneficiamento de recursos naturais estão particularmente sujeitos a diferentes mecanismos de corrosão. Nos Estados Unidos, por exemplo, o impacto econômico da corrosão é estimado em aproximadamente US\$ 276 bilhões por ano. Setores como a indústria petroquímica, automotiva, construção civil e marítima são

particularmente afetados, enfrentando prejuízos significativos devido aos custos de manutenção, reparo e substituição de equipamentos degradados (NACE, 2016).

2.2 Inibidores de corrosão: Uma estratégia de proteção

Os inibidores de corrosão emergem como uma das principais estratégias de proteção contra a degradação dos materiais. Essas substâncias são adicionadas ao meio corrosivo em quantidades adequadas, dessa forma, busca-se reduzir ou eliminar a degradação dos substratos metálicos, influenciando a cinética das reações eletroquímicas (GENTIL, 2022).

Dada a natureza prejudicial à saúde humana e aos recursos naturais relacionada aos inibidores químicos convencionais, os inibidores de corrosão à base de produtos naturais têm se destacado como uma alternativa promissora. Sua principal vantagem reside no fato de serem provenientes de recursos renováveis, biodegradáveis e de baixo custo, oferecendo benefícios ambientais e econômicos significativos (AL-AMIERY, ISAHAK E AL-AZZAWI, 2024).

Em sistemas aquosos, estudos envolvendo a utilização de inibidores orgânicos em tintas acrílicas à base de água já receberam amplo destaque, demonstrando a viabilidade e eficácia dessas soluções (AZGHANDI *et al.*, 2013; VERMA *et al.*, 2021).

A atividade dos inibidores de corrosão em muitos extratos vegetais pode ser atribuída à presença de constituintes heterocíclicos, como alcaloides, flavonoides, taninos e outros compostos policíclicos. Por meio de mecanismos de adsorção, esses componentes podem formar um filme sobre a superfície metálica, atuando como inibidores catódicos ou anódicos de um sistema corrosivo, evitando assim a sua degradação (RAJA; SETHURAMAN, 2008).

2.3 *Ocimum basilicum* var. *citriodorum* como inibidor de corrosão: aplicações e mecanismos.

A espécie *Ocimum basilicum*, conhecida como manjeriço, tem demonstrado um grande potencial como inibidor de corrosão. Estudos indicam que os extratos dessa espécie podem formar uma camada protetora sobre superfícies metálicas, reduzindo significativamente a taxa de corrosão (MOURYA; BANERJEE; SINGH, 2014; YARO; KHADOM; AL-AMIERY, 2013; AHAMAD; PRASAD; QURAISHI, 2010).

Sua aplicação pode gerar um impacto considerável na indústria, especialmente em setores que necessitam da proteção de metais, como na fabricação de equipamentos e estruturas metálicas. Além disso, o uso do extrato em destaque oferece uma alternativa sustentável aos inibidores de corrosão tradicionais, contribuindo para soluções mais ecológicas e renováveis.

Vale ressaltar que a variedade *Ocimum basilicum* var. *citriodorum* (manjeriço-limão), objeto deste estudo, não apresenta registros específicos abordando suas propriedades de inibição à corrosão. A maioria dos estudos existentes sobre essa variedade concentra-se em suas características antioxidantes, especialmente em relação à neutralização de radicais livres (MAJDI, *et al.*, 2020; BARBOSA, *et al.*, 2021).

Os extratos de *Ocimum basilicum* var. *citriodorum* contêm uma variedade de compostos orgânicos, incluindo fenóis, polifenóis, terpenoides, flavonoides, taninos e óleos essenciais, que desempenham um papel crucial na inibição da corrosão (DARRAG *et al.*, 2024).

De acordo com Mourya, Banerjee e Singh (2014), os principais mecanismos físico-químicos de proteção contra a corrosão atribuídos ao manjeriço são:

Adsorção na Superfície Metálica: Compostos presentes nos extratos podem adsorver-se na superfície do metal, formando uma barreira protetora que impede o contato direto entre o metal e o ambiente corrosivo. Esta camada adsorvida reduz a taxa de oxidação do metal.

Formação de Complexos: Alguns compostos do manjeriço podem formar complexos estáveis com íons metálicos na superfície, diminuindo a atividade eletroquímica responsável pela corrosão.

Propriedades Antioxidantes: Os compostos antioxidantes encontrados no manjeriço ajudam a neutralizar radicais livres e outros agentes oxidantes que aceleram a corrosão dos metais.

Dado o exposto, a aplicação de *Ocimum basilicum* var. *citriodorum* como inibidor de corrosão apresenta-se como um produto promissor, capaz de combinar a eficácia na

proteção de metais com a sustentabilidade ambiental. Dessa forma, os extratos do manjeriço-limão têm o potencial de substituir inibidores de corrosão sintéticos, oferecendo uma solução ecológica e eficiente para a proteção contra a corrosão em diversos segmentos da indústria.

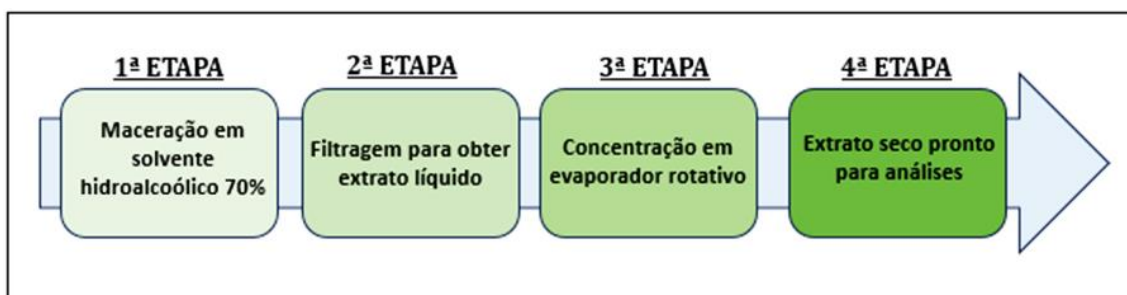
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Preparação do extrato hidroetanólico das folhas de *Ocimum basilicum* var. *citriodorum*.

Para a obtenção do extrato hidroetanólico, inicialmente realizou-se a maceração das folhas da planta em solvente hidroalcoólico a 70%, seguida de filtração para a obtenção do extrato líquido. Esse procedimento é fundamental para a extração de uma variedade de compostos bioativos presentes na espécie a ser investigada.

Posteriormente, o extrato passou por etapas de concentração e liofilização. A concentração foi realizada utilizando-se um evaporador rotativo de bancada, permitindo a remoção eficiente e controlada do excesso de solvente. Em seguida, o extrato concentrado foi liofilizado, com o objetivo de preservar os compostos sensíveis à umidade, mantendo sua integridade para as avaliações qualitativas e quantitativas posteriores. A Figura 1 representa graficamente a sequência de execução do processo descrito.

Figura 1 - Sequência de etapas para obtenção do extrato de *Ocimum basilicum* var. *citriodorum*



Fonte: Autor (2024)

A seguir, são descritos os detalhes experimentais relacionados à condução da presente investigação após a obtenção do extrato das folhas de *Ocimum basilicum* var. *citriodorum*.

3.2. Prospecção fitoquímica

Para se analisar qualitativamente os componentes químicos presentes no extrato, foram utilizados os métodos de prospecção fitoquímica descritos por Matos (1997) e Honda (1990). Esses métodos são reconhecidos por sua eficácia na identificação de grupos de compostos como alcaloides, flavonoides, taninos, saponinas e glicosídeos, que são característicos de plantas medicinais como o manjeriço.

3.3. Quantificação de Fenóis Totais

A quantificação dos fenóis totais nas amostras foi realizada a partir do método de Folin-Ciocalteu, com análise espectroscópica na região do visível. Esse método baseia-se na reação de redução do reagente de Folin-Ciocalteu, que contém fosfomolibdato e fosfotungstato, pelos fenóis presentes na amostra. A reação resulta na formação de um complexo azul, cuja intensidade pode ser medida a partir de um espectrofotômetro (SINGLETON; ROSSI, 1965). Para as análises descritas, as absorbâncias das amostras foram obtidas em comprimento de onda de 750 nm.

3.4. Quantificação de Flavonoides

Para a quantificação de flavonoides, utilizou-se a metodologia descrita por Funari e Ferro (2006), conhecida por sua eficácia na análise desses compostos bioativos. O princípio da técnica baseia-se na capacidade dos flavonoides de formar complexos coloridos com o reagente utilizado, permitindo a quantificação pela intensidade da cor gerada, que é proporcional à concentração dos flavonoides na amostra. Para tanto, foi utilizado um espectrofotômetro ajustado em um comprimento de onda a 425 nm.

3.5. Ensaios de corrosão

Os corpos de prova utilizados foram obtidos a partir de arruelas de aço galvanizado, com uma área superficial de aproximadamente 2,1 cm². A Figura 2 ilustra as peças utilizadas durante os ensaios de corrosão.

Figura 2 – Arruelas de aço galvanizados utilizadas nos ensaios de corrosão



Fonte: Autor (2024)

Para o preparo das peças, inicialmente foi removido o zinco proveniente da galvanização a partir de um procedimento de decapagem em ácido clorídrico a 1 mol/L. Na sequência, as arruelas foram lixadas utilizando-se uma politriz de bancada com lixas de carbeto de silício de granulação decrescente. Por fim, as peças tiveram suas massas calculadas em uma balança analítica com precisão de microgramas.

3.6. Análises gravimétricas

Para a análise gravimétrica, foram preparadas três soluções diferentes: uma solução ácida de 0,5 mol/L de HCl como controle (branco) e duas soluções contendo 20% de extrato hidroetanólico em HCl 0,5 mol/L, nas concentrações de 500 ppm e 1000 ppm do extrato inibidor. Em cada uma dessas condições experimentais, foram imersas três arruelas para avaliação.

Durante o período de análise, que durou um total de quatro dias, as amostras foram mantidas imersas nessas soluções. Ao final de cada período, os corpos de prova foram cuidadosamente lavados com água destilada, secos adequadamente e pesados em balança analítica para a determinação de suas variações de massa.

3.7. Teste de Potencial de Circuito Aberto (E_{CA})

No teste de Potencial de Circuito Aberto (E_{CA}), foi utilizado um multímetro digital ajustado na faixa de medição de 200 mV a 20 V. O princípio da técnica do E_{CA} baseia-se na medição do potencial elétrico de uma superfície metálica em relação a um eletrodo de referência, enquanto a amostra está exposta a um ambiente corrosivo. O eletrodo de referência de Ag/AgCl foi utilizado em conjunto com o corpo de prova, que atuou como contra eletrodo. Essa abordagem permite a avaliação da tendência do metal a sofrer corrosão sob condições específicas, fornecendo informações valiosas sobre sua resistência à corrosão. A Figura 3 apresenta o sistema utilizado para o teste descrito.

Figura 3 – Sistema para medição de potencial de corrosão



Fonte: Autor (2024)

3.8. Análises micrográficas

Para uma análise microestrutural detalhada, foram investigados, por meio de microscopia óptica, os depósitos superficiais e os produtos de corrosão formados. Para tanto, os substratos foram examinados com auxílio de um microscópio metalográfico polarizado, modelo LAB-MT 2000, da marca Laborama. Este equipamento possui aplicações específicas para a análise de superfícies metálicas e oferece uma ampliação que varia de 50x a 800x, permitindo uma avaliação detalhada das características morfológicas e estruturais das amostras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Estudo fitoquímico

Os ensaios de triagem fitoquímica revelaram a presença de várias classes de compostos polifenólicos, por exemplo, flavonoides e taninos. A importância desses compostos na proteção das plantas contra fatores bióticos adversos é amplamente reconhecida, desempenhando um papel crucial na sobrevivência de diversas espécies. Além disso, muitos desses compostos possuem a capacidade de combater radicais livres, não apenas por sua habilidade em doar hidrogênio ou elétrons, mas também por formarem radicais intermediários estáveis, o que ajuda a impedir a oxidação de vários componentes dos alimentos, especialmente os lipídios (MORAES *et al.*, 2022).

Os compostos com expressiva presença foram qualitativamente identificados conforme demonstra a Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Constituintes presentes no extrato das folhas de *Ocimum basilicum* var. *citriodorum*

Constituintes	Indicativo
Taninos	+
Antocianidinas	-
Flavonas	-
Flavonóis	+
Xantonas	+
Esteróides Livres	+
Saponinas	+
Alcaloides	-

*(+) Presença (-) Ausência

Fonte: Autor (2024)

Com base na avaliação dos metabólitos secundários, foi realizado um levantamento quantitativo dos principais compostos fenólicos com múltiplas cadeias de anéis aromáticos, expresso em mg de EAG (equivalentes de ácido gálico) por g de extrato. Entre os compostos identificados com resultados positivos, destacam-se os flavonóis, que pertencem ao subgrupo dos flavonoides. Além disso, os taninos e as xantonas também foram identificados como compostos fenólicos e expressos em equivalente por miligrama (EQ/mg), sendo estes quantificados em termos de fenóis totais, conforme descrito na Tabela 2.

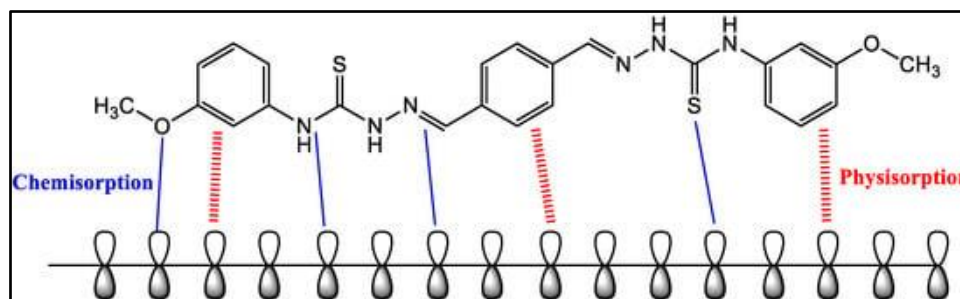
Tabela 2: Teor de flavonoides e fenóis totais encontrados no extrato de folhas de manjeriço

Teor de flavonoides (EAG/mg)	Teor de fenóis totais (EQ/mg)
0,00783 mg ± 0,00071	0,0861 mg ± 0,0051

Fonte: Autor (2024)

De acordo com a literatura, estruturas de anéis aromáticos, como estes acima mencionados, permitem a formação de interações π - π com as superfícies metálicas. Esses compostos podem adsorver-se na superfície do metal, formando uma camada protetora que impede o contato direto entre o metal e o ambiente corrosivo. Essa adsorção reduz a taxa de corrosão à medida que diminui a reatividade do metal (MAHDI *et al.*, 2022).

Figura 4 - Mecanismo sugerido de inibição de corrosão de aço em HCl 1M com a adição de inibidor um inibidor orgânico



Fonte: Mahdi *et al.* (2022)

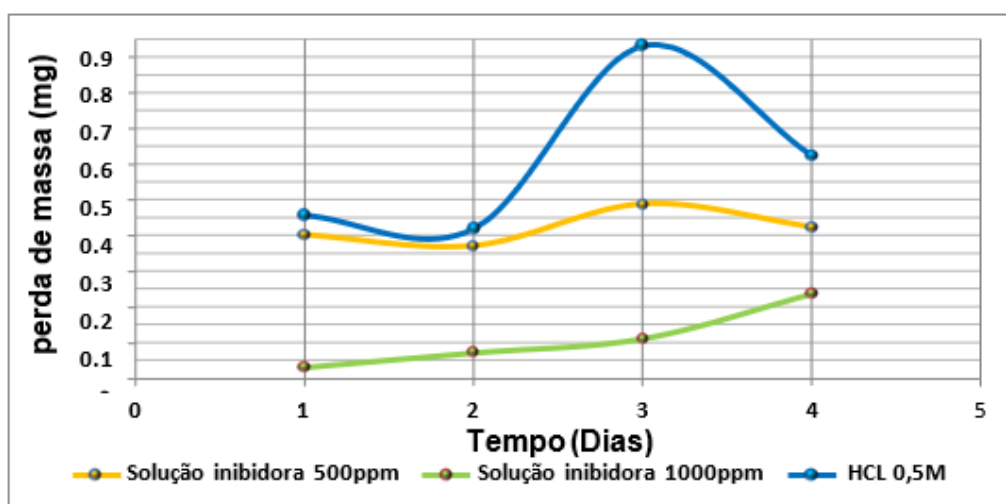
Segundo Mahdi *et al.* (2022), compostos como o 2,2'-(1,4-fenilenobis (metanilideno)) bis(N-(3-metoxifenil) hidrazinacarbotoamida), descrito na Figura 4, a presença de grupos funcionais doadores de elétrons, como os grupos amina, tiona, imina e anéis aromáticos, melhoram a capacidade das moléculas inibidoras de transferir elétrons para os orbitais d desocupados do ferro, retardando assim o processo de corrosão.

4.2. Perda de massa

A análise gravimétrica revelou uma redução na perda de massa dos corpos de prova imersos em solução ácida quando se utilizou um inibidor vegetal na concentração de 1000 ppm. Em

contrapartida, ao empregar uma concentração menor do inibidor (500 ppm), foi observada uma proteção reduzida da superfície metálica durante o processo corrosivo. A Figura 5 a seguir ilustra a relação entre a perda de massa e o tempo de exposição do substrato ao meio agressivo.

Figura 5 – Variação da perda de massa ao longo do tempo para o aço imerso em solução de 0,5 mol/L de HCl com diferentes concentrações de extrato de *Ocimum Basilicum var. citriodorum*



Fonte: Autor (2024)

Os constituintes do extrato de folhas de manjeriço demonstraram um grau significativo de inibição da corrosão eletroquímica, cuja eficácia é sensível à concentração, característica comum aos inibidores de corrosão. Conforme descrito por Rezzoug *et al.* (2019), esse desempenho pode ser atribuído à presença de compostos fenólicos identificados na espécie, como o kaempferol (flavonoide), além de ácido tânico, catequina e ácido clorogênico (taninos).

Estudos anteriores (OKAFOR, 2007; LOTO, 2003) mostraram que essas classes de compostos, especialmente os taninos, são amplamente reconhecidas por sua eficácia na proteção anticorrosiva do aço carbono em soluções como H_2SO_4 e $NaCl$.

Além disso, o efeito inibidor pode estar associada com a combinação sinérgica com outros constituintes, como óleos essenciais (eugenol, linalol, estragol, cineol e geraniol) e ácidos fenólicos (rosmarínico, caféico e clorogênico), também presentes no extrato de *Ocimum basilicum* (REZZOUG *et al.*, 2019).

De acordo com os dados coletados nos testes de perda de massa, foi possível calcular a velocidade de corrosão em milímetros por ano (mm.y^{-1}) e a eficiência de inibição ($\eta\%$), conforme mostrado na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3: Perda de massa, velocidade de corrosão e eficiência de inibição

Solução de estudo	Σ Perda de Massa (g)	V_{corr} (mm.y^{-1})	$\eta\%$
HCL 0,5M	0,6058 \pm 0,2327	5,3975 \pm 2,5124	-
HCl + Extrato 500ppm	0,4192 \pm 0,0492	4,0763 \pm 2,4550	30,80
HCl + Extrato 1000ppm	0,1108 \pm 0,0873	0,7798 \pm 0,2366	81,71

Fonte: Autor (2024)

As eficiências de inibição para os testes de perda de peso foram avaliadas utilizando-se a seguinte fórmula:

$$\eta\% = \frac{W - W_i}{W} \times 100 \quad (1)$$

Onde W é a perda de massa na ausência de um inibidor e W_i é a perda de massa na presença de um inibidor.

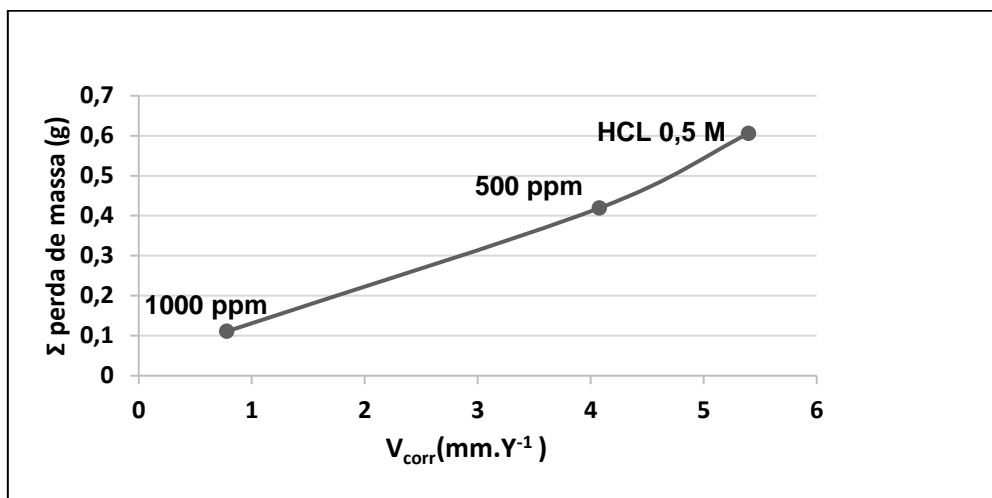
A taxa de corrosão (V_{corr}) em milímetros por ano para amostras de aço carbono foi obtida de acordo com a *American Society for Testing and Materials* (ASTMG1(1990)), dada pela seguinte equação:

$$V_{\text{corr}} = \frac{3,65 \times \Delta m}{S \times t \times \rho} \quad (2)$$

Onde Δm é a perda de massa, em mg; S é a área exposta, em cm^2 ; t é o tempo de exposição, em dias; e ρ é a massa específica do material, em g/cm^3 .

A fim de dar suporte aos dados apresentados na Tabela 6, construiu-se um gráfico que ilustra a relação entre a velocidade de corrosão, medida em milímetros por ano (mm.y^{-1}), e a perda de massa, em gramas, do substrato metálico, conforme representado na Figura 6 a seguir.

Figura 6 – Relação entre a perda de massa e a velocidade de corrosão



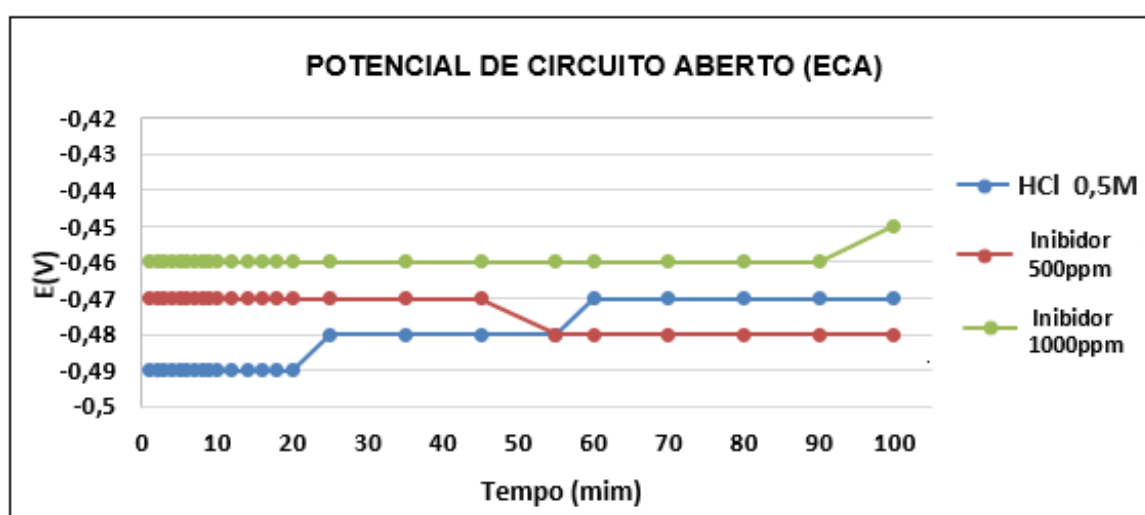
Fonte: Autor (2024)

Uma característica a ser destacada é que, conforme a eficiência de inibição diminui, a solução ácida consegue penetrar nas camadas internas do material metálico. Esse contato promove a formação de gás hidrogênio, o qual é capaz de remover alguns compostos que estejam adsorvido nas peças metálicas (GENTIL, 2022).

4.3. Avaliação do potencial de corrosão (E_{corr})

Os testes de potencial de circuito aberto demonstraram uma relação direta entre o aumento da concentração do extrato vegetal em solução ácida e a eficácia na inibição da corrosão. A Figura 7 a seguir ilustra os valores de potencial de circuito aberto (E_{CA}), que foram utilizados para a análise do potencial de corrosão (E_{corr}).

Figura 7 – Ensaio de potencial de circuito aberto



Fonte: Autor (2024)

Com base nos dados acima apresentados, percebe-se que a adsorção do inibidor na superfície do metal possivelmente cria uma barreira que impede o acesso do meio corrosivo à superfície metálica. Dessa forma, o filme adsorvido pode bloquear os locais ativos de corrosão, reduzindo assim a taxa de oxidação do metal.

Nesse sentido, a maior concentração de inibidor (1000 ppm) apresenta uma cobertura mais completa e densa da superfície metálica, formando um filme adsorvido mais estável e contínuo. Isso explica o potencial mais positivo e estável ao longo do tempo, indicando uma proteção anticorrosiva eficaz.

Com uma concentração menor de inibidor (500 ppm), a cobertura deste na superfície do metal pode ser menos completa, resultando em algumas áreas do metal expostas ao meio corrosivo. Isso pode explicar a variação observada no potencial de corrosão ao longo do tempo, sugerindo que o filme protetor é menos estável e pode ser degradado ou removido parcialmente durante a exposição.

Os inibidores orgânicos, como os extratos vegetais mencionados, geralmente contêm moléculas com grupos funcionais que podem se adsorver na superfície do metal. Conforme já mencionado, essa adsorção pode ocorrer por meio de várias interações, como ligações covalentes, ligações iônicas, forças de Van der Waals, ou até mesmo por quimissorção, dependendo da natureza do inibidor e da superfície metálica (ROMUALDO, 2012).

Nesse sentido, a eficácia da adsorção dos inibidores orgânicos também pode ser discutida em termos das isotermas de adsorção, como a de Langmuir ou Freundlich.

Em termos de isotermas de Langmuir, pressupõe-se que a adsorção ocorre em sítios específicos na superfície, formando uma monocamada de inibidores. A adsorção segue uma relação linear entre a concentração do inibidor e a fração da superfície coberta. Isso se alinha com a observação de que o aumento da concentração de inibidor melhora a eficiência da proteção (SCHNEIDER, 2008).

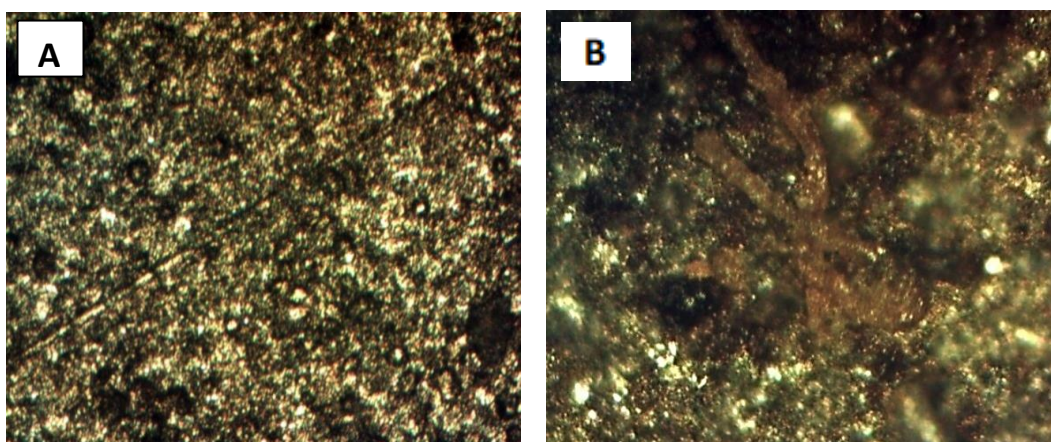
Em relação às Isotermas de Freundlich, considera-se que a adsorção em superfícies heterogêneas pode não ser uniforme. Isso pode explicar a instabilidade observada em concentrações mais baixas, em que a adsorção pode não ser suficientemente coesa para formar uma barreira contínua (SCHNEIDER, 2008).

De acordo com Rameshkumar, Rashvandavei e Vijayan (2020), um gráfico de E_{CA} que mostra uma estabilização mais pronunciada do potencial em concentrações mais altas do inibidor pode indicar uma cobertura mais uniforme da superfície metálica. Esse comportamento é consistente com a isoterma de Langmuir, bastante evidente em concentrações maiores do inibidor.

4.4. Análises microestrutural

As imagens obtidas na avaliação microestrutural dos corpos de prova revelaram resultados significativos nas amostras sujeitas ao ataque ácido com maior concentração de inibidor no meio, conforme demonstrado na Figura 8.

Figura 8 – Micrografias de amostras expostas a análise gravimétrica: (A) na presença de inibidor e (B) na ausência de inibidor



Fonte: Autor (2024)

A eficácia dos inibidores de corrosão naturais é evidenciada pela comparação entre amostras com e sem inibidor. Nas amostras com o inibidor, observa-se a preservação dos contornos de grãos e da estrutura original do metal, indicando que o inibidor forma uma camada protetora uniforme e contínua. Esta camada impede a interação direta entre o ácido e o metal, reduzindo assim a taxa de corrosão (FERREIRA JUNIOR, *et al.*, 2016).

Os estudos de Singh *et al.* (2021) e Ndukwe (2024) corroboram com esses resultados, demonstrando que os extratos vegetais de *Adhatoda vasica*, uma espécie nativa do continente asiático, e de *Eucalyptus globulus*, conhecido como eucalipto, oferecem proteção eficaz ao aço carbono ao formar filmes adsorvidos em sua superfície.

Em contraste, as amostras sem proteção apresentaram sinais claros de degradação, como sulcos profundos e produtos de corrosão, devido à exposição direta ao meio ácido. A falta de uma camada protetora permitiu que o ácido atacasse diretamente o metal, acelerando o processo de corrosão, o que é consistente com os resultados obtidos nos ensaios eletroquímicos (E_{CA}).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos dados obtidos na triagem fitoquímica do extrato das folhas de *Ocimum basilicum* var. *citriodorum*, confirmou-se a presença de taninos e compostos fenólicos, metabólitos

secundários amplamente reconhecidos na literatura por suas propriedades de inibição à corrosão metálica.

Os ensaios de imersão mostraram uma redução significativa na taxa de corrosão ($\text{mm}\cdot\text{Y}^{-1}$) quando o extrato inibidor foi utilizado em concentrações mais altas. Além disso, as análises de E_{CA} indicaram que a elevação das curvas nos gráficos sugere uma influência acentuada nas reações anódicas na superfície do metal. Essa elevação pode ser atribuída ao efeito protetor do inibidor, que interfere nas reações eletroquímicas, possivelmente devido ao processo adsorptivo dos compostos orgânicos presentes no extrato.

Em complemento, as análises microestruturais demonstraram a preservação relativa da superfície dos substratos imersos na solução contendo o extrato inibidor, corroborando com as análises anteriores.

Assim, constata-se que a redução na velocidade do processo corrosivo está vinculada a maiores concentrações do inibidor, embora se saiba que essas substâncias possuem uma concentração ideal para uso, na qual a máxima eficiência para cada composto deve ser avaliada. Dessa forma, os resultados deste estudo indicam uma eficiência máxima de 81,71% na inibição de corrosão para o extrato das folhas de *Ocimum basilicum* var. *citriodorum*.

Por fim, vale-se salientar que o emprego de diferentes técnicas de extração com o uso de solventes de polaridade crescente pode exercer melhor influência na extração de compostos bioativos. Assim, reforça-se a importância da busca por inibidores de baixa toxicidade, que sejam ecologicamente viáveis, sustentáveis e apresentem eficiência significativa.

REFERÊNCIAS

AHAMAD, I.; PRASAD, R.; QURASHI, M. A. Inhibition of mild steel corrosion in acid solution using *Mentha piperita* (peppermint) as a green inhibitor. *Corrosion Science*, v. 52, n. 9, p. 3033-3041, 2010.

AL-AMIERY, A.; ISAHAK, W. N. R. W.; AL-AZZAWI, W. K. Sustainable corrosion inhibitors: A key step towards environmentally responsible corrosion control. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 15, n. 5, 2024.

ASTM G1-90. *Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens*. ASTM International, 1990.

AZGHANDI, M. V.; DAVOODI, A.; FARZI, G. A.; KOSARI, A. Corrosion Inhibitive Evaluation of an Environmentally Friendly Water-Base Acrylic Terpolymer on Mild Steel in Hydrochloric Acid Media. *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 44, p. 5493-5504, 2013.

BARBOSA, C. O.; MORAIS, S. M.; SOUSA, H. A.; MARTINS, V. C.; CÂMARA NETO, J. F.; VIEIRA, I. G. P.; PEREIRA, R. C. A.; RODRIGUES, A. L. M.; CARIOCA, J. O. B. Chemical composition and antioxidant potential of essential oils from different *Ocimum* species (Basil). *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 7, n. 3, p. 24422-24442, 2021.

DARRAG, H. M.; GHAZZAWY, H. S.; ALZAID, M. N.; HAKAMI, E. H.; ALMUHANNA, H. T.; ALQAHTANI, N. K. Exploring *Ocimum basilicum*'s Secondary Metabolites: Inhibition and Molecular Docking against *Rhynchophorus ferrugineus* for Optimal Action. *Plants*, v. 13, n. 1, p. 1-31, 2024.

FERREIRA JÚNIOR, J. M.; SILVA, M. G. de V.; MONTEIRO, J. A.; BARROS, A. de S.; FALCÃO, M. J. C.; MORAIS, S. M. Evaluation of antioxidant activity and inhibition of corrosion by Brazilian plant extracts and constituents. *International Journal of Electrochemical Science*, v. 11, p. 3862-3875, 2016.

FUNARI, C. S.; FERRO, V. O. Análise de própolis. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 26, n. 1, p. 171-178, 2006.

GENTIL, V.; CARVALHO, L. J. *Corrosão*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022. 408 p.

HONDA, N. K. *et al. Estudo químico de plantas de Mato Grosso do Sul: triagem fitoquímica*. Campo Grande: EUFMS, 1990.

HUANG, H.; YU, X.; HAN, X.; SUN, Y.; ZHUANG, Y. Antioxidant activity and phenolic profile of medicinal plants. *Journal of Food and Drug Analysis*, v. 30, n. 2, p. 251-260, 2022.

LOTO, C. A. The effect of bitter leaf extract on the inhibition of mild steel in HCl and H₂SO₄. *Corrosion Prevention & Control*, v. 50, n. 1, p. 43-49, 2003.

MAHDI, B. S.; ABBASS, M. K.; MOHSIN, M. K.; AL-AZZAWI, W. K.; HANOON, M. M.; AL-KAABI, M. H. H.; SHAKER, L. M.; AL-AMIERY, A. A.; ISAHAK, W. N. R. W.; KADHUM, A. A. H.; TAKRIFF, M. S. Corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid environment using terephthaldehyde based on Schiff base: Gravimetric, thermodynamic, and computational studies. *Molecules*, v. 27, n. 15, 2022.

MAJDI, C.; PEREIRA, C.; DIAS, M. I.; CALHELHA, R. C.; ALVES, M. J.; RHOORRI-FRIH, B.; CHARROUF, Z.; BARROS, L.; AMARAL, J. S.; FERREIRA, I. C. F. R. Phytochemical Characterization and Bioactive Properties of Cinnamon Basil (*Ocimum basilicum* cv. 'Cinnamon') and Lemon Basil (*Ocimum x citriodorum*). *Antioxidants*, v. 9, n. 5, 2020.

MORAES, G. V.; JORGE, G. M.; GONZAGA, R. V.; SANTOS, D. A. Potencial antioxidante dos flavonoides e aplicações terapêuticas. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 14, p. 1-12, 2022.

MOURYA, P.; BANERJEE, S.; SINGH, M. M. Corrosion inhibition of mild steel in acidic solution by *Tagetes erecta* (Marigold flower) extract as a green inhibitor. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 20, n. 6, p. 4276-4285, 2014.

NACE. *Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States*. Houston: NACE International, 2016. Disponível em: <http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2024.

NDUKWE, A. I. Corrosion inhibition of carbon steel by eucalyptus leaves in acidic media: An overview. *Zaštita Materijala*, v. 65, n. 1, p. 11-21, 2024.

OKAFOR, P. C. Eco-friendly corrosion inhibitors: inhibitive action of ethanol extracts of *Garcinia kola* for the corrosion of mild steel in H₂SO₄ solutions. *Pigment & Resin Technology*, v. 36, p. 5, 2007.

RAJA, P. B.; SETHURAMAN, M. G. Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media—a review. *Materials Letters*, v. 62, n. 1, p. 113-116, 2008.

RAMESHKUMAR, S.; RASHVANDAVEI, M.; VIJAYAN, M. Estudos eletroquímicos e químicos quânticos sobre o desempenho de inibição de corrosão de 2,2'-(2-hidroxietilimina)bis[N-(α,α -dimetilfenetil)-N-metilacetamida] na corrosão de aço carbono em solução de HCl 1M. *Materiais Research*, v. 23, n. 2, p. 215-224, 2020.

REZZOUG, M.; BAKCHICHE, B.; GHERIB, A.; ASCRIZZI, R.; FLAMINI, G.; KILINÇARSLAN, Ö.; MAMMADOV, R.; BARDAWEEL, S. K. Chemical composition and bioactivity of essential oils and ethanolic extracts of *Ocimum basilicum* L. and *Thymus algeriensis* Boiss. & Reut. from the Algerian Saharan Atlas. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, v. 19, p. 1-10, 2019.

ROBERGE, P. R. *Handbook of Corrosion Engineering*. 3. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019.

ROMUALDO, M. V. S. *Estudo de inibidores sintéticos de corrosão para o aço carbono 1020 em meios altamente corrosivos*. 2012. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Instituto de Química, Departamento de Química Inorgânica, Rio de Janeiro, 2012.

SCHNEIDER, E. L. *Adsorção de compostos fenólicos sobre carvão ativado*. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, CECE – Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Cascavel, 2008.

SINGH, M.; SINGH, S. P.; SHARMA, P.; RAWAT, S. Evaluation of *Adhatoda vasica*, espécie nativa da Índia como um inibidor de corrosão verde para aço carbono em meio ácido. *Journal of Molecular Liquids*, v. 329, p. 115090, 2021.

SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, Davis, v. 16, n. 3, p. 144-158, 1965

VERMA, C.; EBENSO, E. E.; QURAISHI, M. A.; HUSSAIN, C. M. Recent developments in sustainable corrosion inhibitors: design, performance, and industrial scale applications. *Material Advances*, v. 2, p. 3806-3850, 2021.

YARO, A. S.; KHADOM, A. A.; AL-AMIERY, A. A. Basillus subtilis extract as eco-friendly corrosion inhibitor of mild steel in hydrochloric acid medium. *South African Journal of Chemical Engineering*, v. 18, n. 1, p. 14-23, 2013.