

INIBIDORES DE CORROSÃO DA LINHA VERDE: ESTADO DA ARTE

Daniel Victor Carlos de Noronha¹, Jardel Dantas da Cunha²

Resumo: Os processos de natureza corrosiva estão presentes nos materiais metálicos em geral e, portanto, ocorrem nas mais diversas áreas. Deste modo, faz-se necessário o estudo e a pesquisa de meios de retardar ou reduzir a atividade corrosiva. A solução mais empregada atualmente, em meios aquosos, é o uso de inibidores de corrosão, que são substâncias que quando aplicadas no meio corrosivo, diminuem a taxa de corrosão do material. Porém, grande parte dos inibidores sintéticos utilizados amplamente na indústria apresentam elevado teor de toxicidade, além de possuírem um custo elevado. Daí surge a necessidade de uma alternativa mais viável para inibir a corrosão. O emprego dos inibidores a base de extratos vegetais, conhecidos também como inibidores da linha “verde”, tem se tornado fonte de pesquisa no mundo, desde então, vários extratos de plantas estão sendo empregadas com eficiência de inibição da ordem de 90%, com baixo custo e baixa toxicidade. O objetivo da presente pesquisa é realizar um levantamento em periódicos acerca dos principais extratos vegetais com potencial aplicação como inibidores de corrosão, onde serão avaliados: partes das plantas, métodos de extração, solventes utilizados na extração, meios corrosivos, técnicas de monitoramento da corrosão, eficiência de inibição da corrosão e isoterms de adsorção. Resultados preliminares indicaram que os extratos vegetais apresentaram excelente performance no critério de inibição da corrosão, onde 69% apresentaram uma eficiência acima de 90%, além de apresentarem diversidade de extratos e baixo custo de extração.

Palavras-chave: Corrosão. Inibidores de corrosão. Extratos vegetais.

1. INTRODUÇÃO

Desde o início da fabricação de utensílios metálicos, o ser humano vem lutando contra os processos de deterioração de seus materiais. Com a evolução dos processos de fabricação e dos materiais, o homem percebeu que as ligas ferrosas possuem as melhores propriedades mecânicas dentre os materiais e seus custos de fabricação são baixos quando comparados a outros materiais, portanto, ele se deparou com um grande problema, pois esses materiais são suscetíveis à corrosão [1]. A corrosão é um processo espontâneo, que pode ser definido como a deterioração de um material, podendo este ser metálico ou não, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente e estando aliada ou não a esforços mecânicos. Portanto, observa-se que os processos corrosivos estão bastante presentes em nosso cotidiano, de forma direta ou indireta, por acontecer nos mais diversos materiais [2].

Como consequência da corrosão, o efeito mais evidente é a aparência da superfície do material, portanto, mesmo que a sua resistência mecânica não seja afetada, faz-se necessária a utilização de ligas metálicas mais resistentes a corrosão ou que sejam aplicados revestimentos anticorrosivos. Entretanto, existem também formas de corrosão que não são aparentes, mas mesmo assim podem gerar falhas nos componentes metálicos [3]. Além da aparência, a corrosão pode causar várias outras consequências, como por exemplo: a manutenção e a parada de plantas industriais, a contaminação de produtos, a perda de materiais, além de afetar a saúde e a segurança de todos os envolvidos. [4].

O processo corrosivo constantemente transforma os materiais metálicos de forma que seu desempenho e durabilidade sejam afetadas, tornando-os incapazes de desempenhar seus papéis. Portanto, a resistência a corrosão é um dos fatores a ser considerado na fase de projeto de instalações industriais, para reduzir os custos associados a corrosão [2].

Os custos relacionados à processos corrosivos podem ocorrer de natureza direta ou indireta. Os custos associados às perdas de materiais, equipamentos e produtos por meio da corrosão, que são atribuídos aos proprietários ou operadores das estruturas, fabricantes de produtos e fornecedores de serviços são conhecidos como custos diretos. Já os custos indiretos estão associados à prevenção dos danos causados pela corrosão às pessoas, meio ambiente e instalações, ou custos relacionados ao desgaste à imagem, multas e indenizações, que muitas vezes são de difícil mensuração [1].

O problema da corrosão, em termos econômicos, é bastante significativo, pois em termos econômicos, foi estimado que aproximadamente 5% do Produto Interno Bruto (PIB) de um país industrializado são gastos na prevenção da corrosão e na manutenção de produtos que foram destruídos, danificados ou contaminados pela corrosão [5]. Além disso, estima-se que cerca de 30% do aço produzido no mundo seja destinado à reposição de equipamentos e instalações [6].

O controle ou a prevenção da corrosão pode ser feita de diferentes formas: a seleção de um material mais

resistente ao meio corrosivo em que será exposto, a modificação do meio corrosivo, o emprego de revestimentos e o uso de inibidores de corrosão [1]. O método de controle da corrosão deve ser selecionado de acordo com alguns aspectos como: o custo da implantação, as características do material a ser protegido e o meio corrosivo, já que os materiais estão expostos a diversos meios corrosivos, como a atmosfera, a água, o solo e os produtos químicos, gerando diferentes mecanismos para esses processos [2].

Uma das principais técnicas adotadas pela indústria para prevenir ou minimizar a corrosão é a utilização de inibidores de corrosão [7]. O inibidor de corrosão é uma substância ou mistura de substâncias, que quando estão presentes em concentrações adequadas, no meio corrosivo, possibilitam a redução da corrosão [2].

Atualmente, há uma grande preocupação com a toxicidade, biodegradabilidade e a bioacumulação de inibidores de corrosão lançados no meio ambiente. Um grande exemplo se dá pelos produtos químicos de campos petrolíferos usados como inibidores descarregados no meio ambiente de plataformas de produção *offshore*. Os inibidores de corrosão de fase aquosa são descarregados no oceano, se tornando um perigo ambiental para a vida marinha. Os inibidores de corrosão “convencionais” indiscutivelmente são satisfatórios em relação à eficiência de inibição, mas suas consequências ao meio ambiente não são totalmente compreendidas [8].

A partir dessa preocupação com a toxicidade dos inibidores de corrosão convencionais, foram impulsionadas pesquisas para uma alternativa que gere um menor impacto ao meio ambiente. Em função disso, uma das alternativas bastante promissoras são os inibidores de corrosão naturais, conhecidos também como inibidores da linha verde, que são oriundos de extratos vegetais [9]. Os inibidores de corrosão da linha verde são biodegradáveis e não contêm metais pesados ou outros compostos tóxicos [10]. Além de possuírem manuseio seguro, os extratos vegetais usados nesse tipo de inibidor costumam apresentar um menor custo e podem ser obtidos por um simples processo de extração [11].

O objetivo da presente pesquisa é realizar um levantamento em periódicos acerca dos principais extratos vegetais com potencial aplicação como inibidores de corrosão. Para isso, serão avaliados: partes das plantas, métodos de extração, solventes utilizados na extração, meios corrosivos, técnicas de monitoramento da corrosão, eficiência de inibição da corrosão e isotermas de adsorção.

2. CORROSÃO

Conforme o meio corrosivo e o material, podem acontecer dois mecanismos diferentes, sendo eles o mecanismo químico e o mecanismo eletroquímico. No mecanismo químico, ocorrem reações químicas diretas entre o material e o meio corrosivo, sem ocorrer a geração de corrente elétrica. Esse mecanismo se caracteriza principalmente por ocorrer geralmente em temperaturas elevadas e com ausência de umidade. Já no mecanismo eletroquímico, ocorrem reações químicas envolvendo transferência de carga ou elétrons através de um eletrólito. O mecanismo eletroquímico pode ocorrer por meio de: corrosão em água ou soluções aquosas, corrosão atmosférica, corrosão em solo e corrosão em sais fundidos [2].

2.1. Meios corrosivos

Os principais meios corrosivos são: atmosfera, água e solo. O estudo da corrosão atmosférica é importante, pois sua ocorrência é inevitável, sendo o meio corrosivo mais comum e que apresenta mais falhas do que qualquer outro meio. Ela pode ser influenciada por diversos fatores, como a umidade relativa, a temperatura, o tempo de permanência do filme de eletrólito na superfície metálica e substâncias poluentes, como gases e particulados [4]. Além disso, devem ser considerados fatores climáticos, como a direção e a intensidade dos ventos, chuvas e insolação [2].

O estudo do solo como meio corrosivo é bastante importante, quando se leva em consideração as enormes extensões de tubulações sob o mesmo, como oleodutos, gasodutos, adutoras e minerodutos, além da grande quantidade de tanques de armazenamento de combustíveis enterrados. A intensidade e velocidade da corrosão no solo não é muito influenciada pelas variações na composição do material, sendo mais influenciadas pela natureza do solo. A natureza do solo pode ser influenciada por diversos fatores, como por exemplo: condições operacionais, como condições climáticas e profundidade; condições microbiológicas, como a modificação na resistência de revestimentos; características físico-químicas, como a presença de água, sais e gases, pH e potencial redox; variabilidade, como a concentração de oxigênio, umidade e a heterogeneidade do solo [2].

Materiais metálicos tendem a sofrer processo corrosivo quando em contato com a água. A intensidade da corrosão depende da presença de substâncias que possam estar contidas na água, como impurezas ou agentes contaminantes, que podem ser: matéria orgânica; bactérias, fungos e algas; sólidos suspensos; sais dissolvidos, como cloretos de sódio, ferro e magnésio; gases dissolvidos, como oxigênio, nitrogênio, dióxido de carbono e gás sulfídrico. Também devem ser considerados na análise do caráter corrosivo da água, fatores como temperatura, pH, velocidade do escoamento e ação mecânica [4].

2.2. Morfologia da corrosão

A corrosão pode ocorrer de diferentes formas nos materiais. Portanto, faz-se necessário o conhecimento dessas

formas para um melhor entendimento dos processos corrosivos. As formas da corrosão, de acordo com a morfologia, são divididas em quatro grupos, sendo eles: uniforme, localizada, seletiva e intergranular ou transgranular [1, 2].

A corrosão uniforme ou generalizada corresponde à forma mais comum e ocorre quando a superfície do material, quando está exposta ao meio corrosivo, sofre a deterioração e o desgaste de maneira uniforme. Portanto, a perda de espessura é praticamente constante em toda a região que é exposta ao processo corrosivo, e com o tempo, o desgaste pode provocar falhas e fissuras no material [1, 4].

Quando apenas uma região ou regiões isoladas sofrem corrosão ou apresentam um processo corrosivo com uma forma diferenciada em relação à uma área maior exposta ao meio corrosivo, ela é chamada de localizada. A corrosão localizada pode ser dividida de acordo com a relação entre o diâmetro médio e a profundidade da região corroída entre alveolar e puntiforme [1]. Na alveolar, a corrosão se processa na superfície do material produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos, com um fundo arredondado e a profundidade é geralmente menor que o diâmetro médio [2]. Já na puntiforme, a profundidade dos furos é igual ou maior que seu diâmetro médio. Os metais mais suscetíveis a essa forma de corrosão são aqueles que dependem de uma camada protetora de óxido para a resistência a corrosão, como os aços inoxidáveis [4].

A corrosão seletiva, variante da corrosão galvânica, ocorre quando as próprias fases que constituem as ligas metálicas formam pares galvânicos. Um exemplo comum é a corrosão seletiva do ferro fundido cinzento exposto à água do mar, onde a matriz ferrosa é corroída preferencialmente aos veios de grafita. Outro exemplo é a que ocorre em ligas de cobre, principalmente em latões, onde a corrosão seletiva do zinco, conhecida também por dezinsificação, apresenta zonas avermelhadas ricas em cobre [1].

A corrosão transgranular ou transcristalina é identificada quando a corrosão ocorre por meio de trincas que se propagam no interior dos grãos do material, perdendo resistência mecânica e podendo fraturar à menor solicitação mecânica. Caso ela ocorra entre os grãos da rede cristalina no material metálico, que geralmente são mais reativos que o interior dos grãos, ela é chamada de intergranular ou intercristalina [2].

2.3. Monitoramento da corrosão

O monitoramento da corrosão é realizado por meio de técnicas para detectar alterações no comportamento de materiais e componentes frente à corrosão, e assim facilitar a compreensão do processo corrosivo [2]. Ele pode ser feito essencialmente por três métodos: métodos analíticos, ensaios não destrutivos e métodos corrosionais. Os métodos analíticos normalmente são feitos em laboratório, através de amostras coletadas na unidade industrial, mas alguns deles podem ser adaptados ao campo. Eles baseiam-se na medição de íons ou substâncias que de alguma forma estão relacionadas com a corrosão, como por exemplo as medidas de concentração de íons, de pH, de teor de oxigênio e de atividade microbiológica [1].

Existem também os métodos não destrutivos, que são métodos valiosos para monitorar a corrosão, já que eles são indispensáveis para indicar a presença de ataque, fissuras, trincas, reduções de espessura, defeitos internos, vazamentos, porosidades e outras formas de dano ao material [2]. São exemplos de métodos não destrutivos: ultrassom, correntes parasitas, radiografia, partículas magnéticas e termografia [1].

Os métodos corrosionais, conhecidos também como “métodos de engenharia de corrosão”, são divididos em eletroquímicos e não eletroquímicos. Os não eletroquímicos são baseados na perda de massa de uma amostra, e tem como principais tipos: os cupões, os sensores de resistência elétrica e sentinelas. Os cupões são amostras com material idêntico ao que deseja estudar o processo corrosivo. Eles são expostos ao meio corrosivo, e periodicamente é realizada a sua medição e pesagem, para o cálculo da taxa corrosiva. Os sensores de resistência elétrica consistem na medição da variação da resistência de uma amostra devido à sua perda de espessura por corrosão. Por último, as sentinelas, que são pequenos furos que deixam passar produtos, de forma controlada, quando a corrosão atinge certa magnitude. Atualmente, os sensores de resistência elétrica e as sentinelas são pouco utilizados, o único que é amplamente utilizado é o método de perda de massa com os cupões, devido à sua facilidade de aplicação e praticidade [1].

Além disso, há também os eletroquímicos, que se baseiam em medidas eletroquímicas tomadas diretamente no fluido de processo, aproveitando-se da natureza eletroquímica dos processos corrosivos. Existem diversos métodos eletroquímicos, mas os principais são: medições de potencial, resistência de polarização linear e impedância eletroquímica. As medições de potencial são realizadas por meio de eletrodos e voltímetros, para se verificar o potencial de eletrodo do metal no meio. A resistência de polarização linear é derivada da extrapolação das curvas de Tafel, que utiliza técnicas de proteção anódica e catódica, desenvolvendo um gráfico que permite o cálculo da corrente de corrosão. Por fim, a impedância eletroquímica, que em geral é medida através da aplicação de um pequeno sinal de excitação, de modo que o sistema eletrolítico responda pseudolinearmente [1].

A monitoração é a parte principal de qualquer programa de controle de corrosão, já que essa etapa é responsável por ceder conhecimento das variações operacionais e suas consequências na integridade dos equipamentos. Além disso, é importante que se use mais de uma técnica de monitoramento, já que as técnicas podem se complementar [1].

2.4. Prevenção da corrosão

A corrosão pode ser extremamente danosa em diversas situações, sendo elas domésticas ou industriais, e pode provocar diversos problemas econômicos e ambientais. Portanto, após tomar conhecimento sobre as variáveis envolvidas no processo corrosivo, como o meio corrosivo, a forma e a causa da corrosão, faz-se necessário determinar a melhor maneira de proteger o material contra a corrosão [4].

O método mais comum de prevenção da corrosão é a seleção de materiais, porém é importante ressaltar que para cada situação ocorrem inúmeros materiais adequados que podem ser indicados. Dentre os critérios de seleção de materiais, podemos citar: financeiro, disponibilidade, conformação e compatibilidade com o processo [4].

Em alguns casos, faz-se necessária a modificação de propriedades dos metais, pois há certos metais, como o alumínio, que possuem boa resistência à corrosão, porém suas propriedades mecânicas não o tornam vantajoso para o uso industrial. Por outro lado, existem também metais que são muito vulneráveis à corrosão, mas possuem boas propriedades mecânicas. Portanto, é necessária a preparação de ligas metálicas visando melhores propriedades mecânicas, como o aço inoxidável [2]. A modificação do metal também pode ser realizada por meio do aumento da pureza, adição de elementos e o tratamento térmico [4].

Existem também algumas medidas que podem ser consideradas na fase de projeto, como por exemplo a sobreesspessura da corrosão, em diferentes partes do componente, onde o cálculo é realizado com fatores de segurança, a partir do conhecimento prévio do tipo e intensidade da corrosão que são esperadas durante a utilização do equipamento. Além disso, podem ser tomados cuidados, como no acabamento das soldas, que devem ser contínuas e aliviadas de tensões; ou em áreas onde há a drenagem de líquidos, que deve ser facilitada para evitar áreas de estagnação de fluidos [2].

Outro método para o controle da corrosão é a aplicação de revestimentos, podendo estes serem orgânicos ou inorgânicos. Os revestimentos orgânicos formam uma barreira entre o material a ser protegido e o meio. Ela pode ser feita por meio de tintas, que podem proteger o material tanto externa, na corrosão generalizada, como internamente, na corrosão por erosão. As principais tintas utilizadas para proteção são: tintas de fundo, conhecidas também como *primer*; tintas intermediárias e tintas de acabamento. Em casos onde o meio é altamente corrosivo, podem ser utilizados polímeros, como: silicones, elastômeros, plásticos, policloreto de vinila e polipropileno [4].

Em ocasiões onde os revestimentos orgânicos possam não trazer resultados satisfatórios e provocar danos ao material, utilizam-se os revestimentos inorgânicos, que são divididos em metálicos e não metálicos. Os metálicos possuem uma aplicação diversificada, podendo ser utilizados para resistência ao atrito, à oxidação e à corrosão; o endurecimento superficial e a recuperação de peças desgastadas. Normalmente, eles são aplicados em para-choques e o acabamento de automóveis, eletrodomésticos, luminárias e talheres. Os não metálicos são feitos por compostos inorgânicos depositados diretamente na superfície do material ou formados sobre ela. São exemplos de revestimentos não metálicos inorgânicos: porcelanas, esmalte vidroso, vidros, carbetos e nitretos [4].

Além disso, podem ser feitas alterações no meio corrosivo, alterando-se o pH, desaerando-se o meio e a adicionando-se os inibidores de corrosão. O pH da solução tem um papel importante na corrosão porque influencia tanto as reações eletroquímicas que levam à dissolução do ferro quanto à precipitação das camadas protetoras que governam os fenômenos de transporte associados a estas reações. Os íons H^+ , quando em solução, promovem aumento na taxa corrosiva, como visto na Equação 1 [12]:



O pH possui relação direta com o grau de dissociação de alguns gases como o sulfeto de hidrogênio (H_2S), onde em pH ácido a espécie predominante é o HS^- , conforme a Equação 2, enquanto em pH básico é o S^{2-} , visto na Equação 3 [12].



O dióxido de carbono (CO_2) de forma similar apresenta comportamento semelhante do sulfeto de hidrogênio onde o pH modifica o tipo das espécies dissociadas do meio, conforme Equações 4 e 5 [12]:



Os gases dissolvidos promovem a modificação das superfícies metálicas em virtude da formação de produtos insolúveis de corrosão, entre os principais gases podemos citar o oxigênio dissolvido (O_2), o dióxido de carbono (CO_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S). Sabe-se que a camada de produto de corrosão tem papel fundamental no mecanismo, na cinética e no tipo de corrosão. Quando existe uma camada protetora, a transferência de massa para a superfície metálica se torna o fator de controle da taxa de corrosão, antes da evolução da corrente catódica [13].

2.4.1. Inibidores de corrosão

O uso de inibidores de corrosão vem sendo estudado desde o início do século XX, onde foram utilizadas substâncias inócuas, como: misturas de melaços, amidos e óleos vegetais na proteção de superfícies metálicas após a decapagem ácida. Porém, com o passar dos anos, surge uma necessidade maior relacionada à eficiência de proteção anticorrosiva, que fez com que fosse utilizada a síntese de produtos mais complexos e, consequentemente, mais tóxicos [14]. Com a preocupação ambiental presente na atualidade, surge então a necessidade de criar tecnologias limpas direcionadas aos inibidores de corrosão, já que eles vêm sendo usados como um dos métodos eficazes para a proteção anticorrosiva [2].

As plantas vêm sendo reconhecidas como fontes de compostos naturais, conhecidos como compostos “verdes”, alguns com estruturas moleculares bastante complexas e com uma variedade de propriedades físicas, químicas e biológicas. Vários desses compostos estão sendo utilizados em produtos farmacêuticos e biocombustíveis [15]. Os compostos orgânicos que possuem heteroátomos como nitrogênio, enxofre ou oxigênio, grupos eletronegativos, ligações duplas conjugadas e anéis aromáticos exercem efeitos significativos na extensão da adsorção na superfície do metal e, portanto, podem ser aplicados com segurança como inibidores de corrosão [16]. Dessa forma, na tentativa de encontrar inibidores de corrosão que sejam seguros ao meio ambiente, tem havido uma tendência crescente no uso de produtos naturais, como o extrato de plantas como inibidores de corrosão para metais no processo de decapagem ácida [17].

O desempenho de um inibidor pode ser estudado a partir da sua eficiência em reduzir a taxa corrosiva. Ela pode ser expressa como penetração por tempo de exposição (mm/a, milímetro por ano ou mpy, milésimo de polegada por ano) ou pela massa perdida por unidade de área (mdd, ou seja, mg/dm²/dia). Assim sendo, a eficiência do inibidor, em porcentagem pode ser calculada conforme a Equação 6 [2]:

$$E = \frac{T_0 - T_i}{T_0} \times (100\%) \quad (6)$$

Onde: E é eficiência do inibidor em porcentagem; T_0 é a taxa de corrosão sem inibidor; e T_i é a taxa de corrosão com inibidor.

2.5. Isotermas de adsorção

Isotermas de adsorção são equações matemáticas utilizadas para descrever, em termos quantitativos, as relações entre a quantidade de determinado elemento químico adsorvido e sua quantidade remanescente na solução de equilíbrio [18]. Em sua essência, a técnica usada para gerar os dados de adsorção é bastante simples, pois há apenas a adição de uma quantidade conhecida de soluto ao sistema contendo uma quantidade conhecida de adsorvente [19]. Diversas equações de isotermas foram propostas com dois ou mais parâmetros para ajustar os dados experimentais sobre os valores, dentre elas podemos citar as equações de Langmuir, Freundlich, Temkin e Frumkin.

3. METODOLOGIA

Foram utilizados na pesquisa levantamento de artigos, onde foram empregados inibidores de corrosão oriundos de extratos vegetais. Foram avaliados: a partes das plantas, métodos de extração, solventes utilizados na extração, meios corrosivos, técnicas de monitoramento da corrosão, eficiência de inibição da corrosão e isotermas de adsorção [20–47].

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Partes das plantas

A Figura 1 apresenta o percentual das partes de plantas utilizadas na extração dos inibidores de corrosão. O maior percentual de uso é encontrado nas folhas, com 47%, em virtude da localização do princípio ativo de interesse. Além disso, é possível observar uma grande variedade de princípios ativos localizados em demais partes das plantas, que podem ser utilizadas como potenciais inibidores de corrosão.

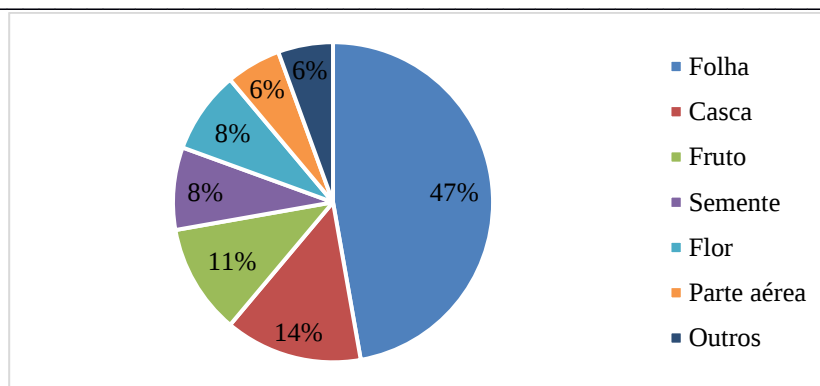


Figura 1. Partes das plantas utilizadas na extração dos inibidores de corrosão. (Autoria Própria)

4.2. Métodos de extração e solvente utilizado

A Figura 2 apresenta os principais métodos de extração utilizados nos artigos pesquisados. O tipo de solvente associado à moagem das amostras permite um aumento da área de superfície de contato entre a amostra e o solvente, permitindo uma maior extração dos analitos de interesse. Uma mesma planta extraída com métodos de extração e solventes distintos, pode apresentar um perfil de metabólitos desiguais, resultando em eficiências de inibição da corrosão diferentes, como por exemplo no estudo realizado por Oliveira [47], onde no ácido sulfúrico, ao utilizar a maceração com etanol, obteve uma eficiência de inibição de 96,80%, já ao utilizar a extração a quente com água destilada, obteve uma eficiência de 70,98%. Já a Figura 3, apresenta os solventes utilizados na extração. É possível perceber a água é o solvente que apresenta o maior percentual de uso, com 47%, em decorrência de ser um solvente de uso universal, além de possuir uma facilidade de obtenção e baixo custo, seguido do etanol, com 31% de utilização.

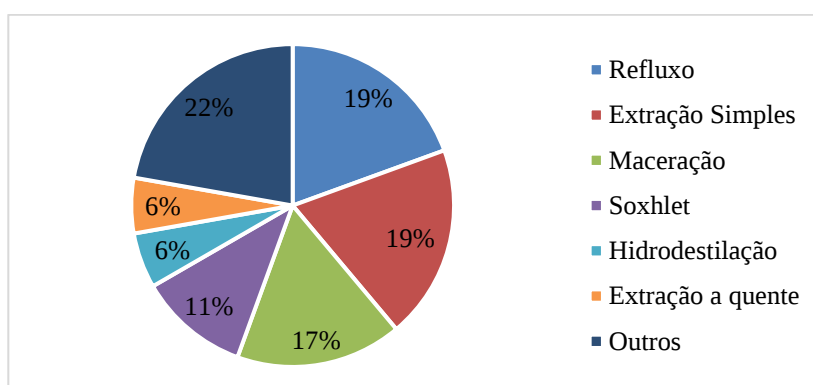


Figura 2. Métodos de extração utilizados nos experimentos. (Autoria Própria)

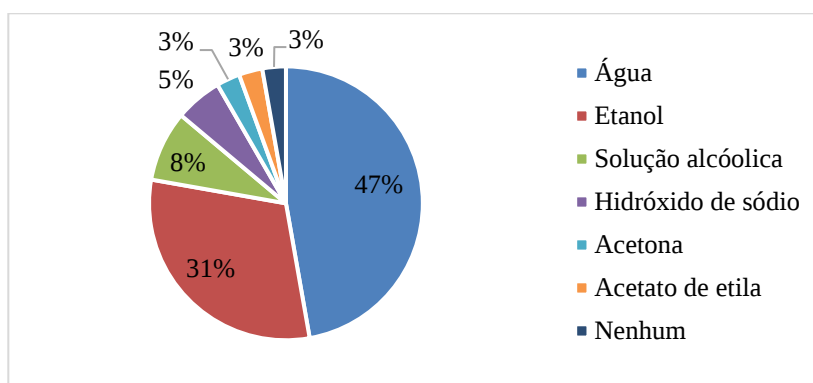


Figura 3. Solventes utilizados na extração nos experimentos. (Autoria Própria)

4.3. Meio corrosivo

A Figura 4 apresenta os principais meios corrosivos utilizados nos testes de monitoramento de corrosão estudados. Os meios corrosivos analisados apresentam o meio ácido como o principal meio de estudo, com um

percentual de 75%, em virtude de ele apresentar alta taxa corrosiva, em função da quantidade de íons H^+ presentes no mesmo. Assim, o inibidor que apresentar eficiência de inibição satisfatória para um meio ácido, mais agressivo, provavelmente será adequado a meios com taxa de corrosividade inferior, com maior quantidade de íons OH^- [48].

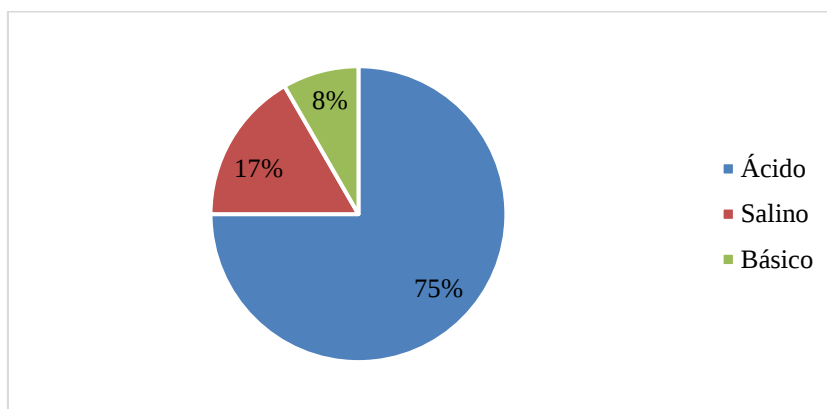


Figura 4. Principais meios corrosivos utilizados nos testes de monitoramento da corrosão. (Autoria Própria)

4.4. Técnicas de monitoramento da corrosão

Os processos corrosivos são influenciados por diversos fatores que modificam o ataque químico e eletroquímico. Portanto, faz-se necessária a utilização de mais de uma técnica de monitoramento, para que se possa caracterizar a agressividade de um determinado meio corrosivo, além de fornecer os fundamentos básicos para o controle da corrosão [2]. Dos artigos analisados, 58,33% utilizaram mais de uma técnica de monitoramento da corrosão, com o objetivo de estudar melhor a interação entre a superfície do eletrodo e o meio.

A Figura 5 apresenta as principais técnicas de monitoramento da corrosão utilizadas: Perda de Massa (PDM), com 63,89%; Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE), com 58,33%; Curvas de Polarização Potenciodinâmica (PP), com 58,33%; Medidas de Potencial de Corrosão (MPC), com 11,11% de utilização.

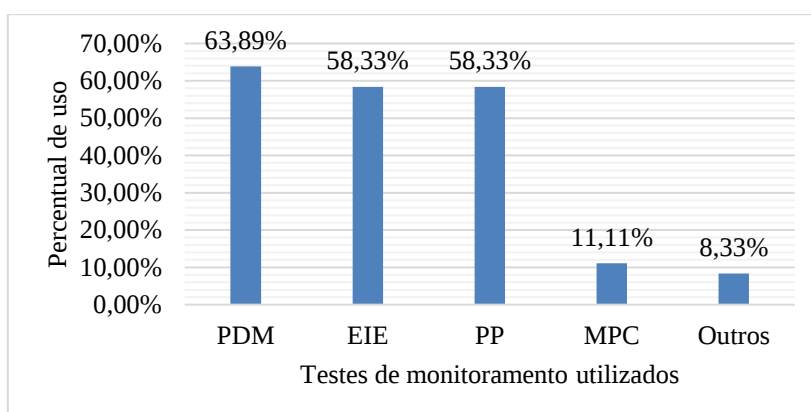


Figura 5. Técnicas de monitoramento. (Autoria Própria)

A técnica de perda de massa apresenta maior frequência de uso entre as técnicas de caracterização, em virtude de a mesma apresentar inúmeras vantagens: baixo custo, identificação da morfologia de corrosão e dados acerca da taxa corrosiva para longos períodos a qual está sendo exposto. Porém a mesma também possui desvantagens, como por exemplo: a perda de massa só é válida para a medição da taxa de corrosão se a mesma for uniforme; há a formação de produtos de corrosão aderentes [1].

Em virtude das desvantagens da técnica de perda de massa, o emprego das técnicas eletroquímicas vem se tornando presente em estudos de corrosão. A técnica de polarização potenciodinâmica permite determinar o comportamento anódico/catódico dos materiais, através das curvas de polarização, por meio das correntes resultantes sobre a superfície do material. Ela apresenta vantagens como: cálculo do efeito da velocidade e da passivação do material em tempo real. A técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica permite analisar a interface entre a dupla camada elétrica e a molécula adsorvida na superfície, auxiliando na explicação de fenômenos eletroquímicos [1, 2]. As medidas de potencial de corrosão permitiram avaliar de forma qualitativa a velocidade da corrosão, pela diferença entre o potencial do eletrodo em circuito aberto e o eletrodo de referência [49].

4.5. Eficiência de inibição da corrosão

Na Figura 6 é apresentado o percentual dos testes que obtiveram eficiência maior e menor do que 90%, onde é possível observar que 69% dos extratos apresentaram uma eficiência de inibição acima de 90%. Com isso é possível verificar o uso dos extratos vegetais como potenciais inibidores de corrosão em substituição aos inibidores comerciais. Como por exemplo nos extratos das folhas de *Melissa officinalis* [40] e *Phyllanthus amarus* [39], que em meio ao ácido clorídrico, apresentaram uma eficiência de inibição de corrosão acima de 90% no aço de médio carbono, portanto, são potenciais inibidores de corrosão da linha “verde”.

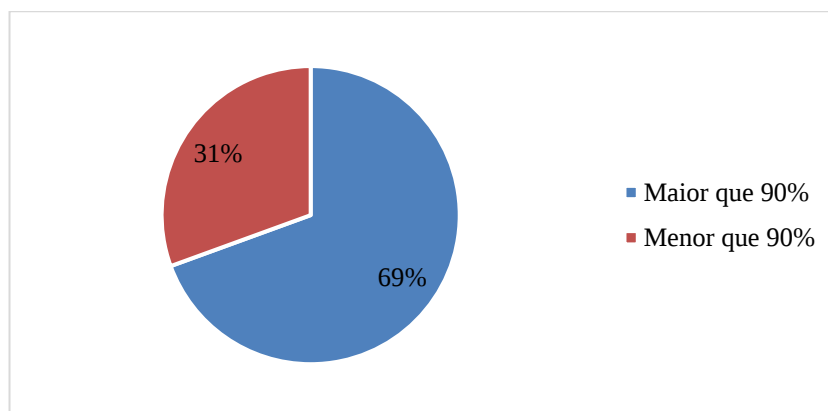


Figura 6. Eficiências de inibição da corrosão. (Autoria Própria)

Foi utilizado um corte de 90%, pois quanto mais rápida a adsorção do inibidor na superfície metálica e a sua capacidade de reduzir a taxa corrosiva em pelo menos 90%, melhor o seu desempenho [13]. Os inibidores de corrosão que possuem uma eficiência inferior a 90% não devem ser descartados para todas as ocasiões, pois com técnicas de extração ou solventes diferentes, eles podem obter uma eficiência ainda maior. Além de que, eles podem ser apropriados para outros meios menos agressivos do que aqueles em que foram testados.

4.6. Isotermas de adsorção

Através das isotermas de adsorção é possível calcular: a constante de adsorção e o valor da energia livre de adsorção. A energia livre de adsorção irá determinar a melhor interação elétrica entre a dupla camada e as moléculas adsorvidas [50]. A Figura 7 apresenta as principais isotermas de adsorção empregadas na caracterização dos inibidores da linha “verde”. Observa-se que 33,33% fizeram uso de uma ou mais isotermas de adsorção para explicar os fenômenos de adsorção. Mesmo com sua devida importância, 66,67% dos testes não fizeram o uso das isotermas de adsorção.

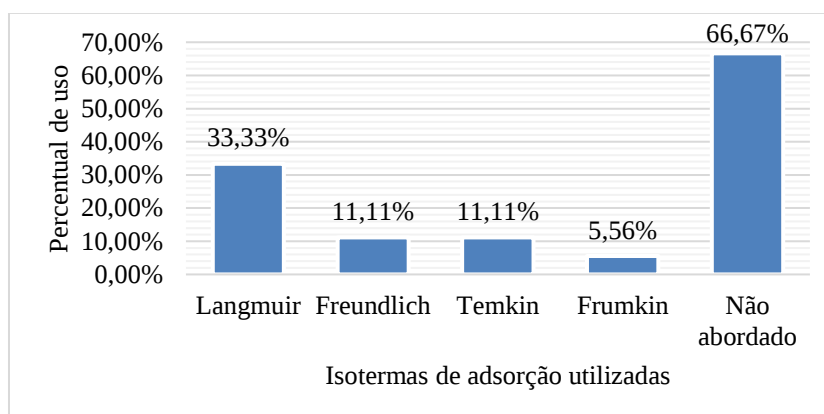


Figura 7. Isotermas de adsorção. (Autoria Própria)

De acordo com a literatura, as isotermas mais comumente utilizadas são as de Langmuir e Freundlich, com seus respectivos percentuais de 33,33% e 11,11%, devido ao fato de se prever a capacidade máxima de adsorção na superfície do material, no modelo de Langmuir, e a capacidade de descrever o comportamento de dados experimentais. Além disso, o fato de que ambas possuem apenas dois parâmetros facilita bastante a sua utilização. Equações que envolvem três ou mais parâmetros são dificilmente usadas, pois elas requerem o desenvolvimento a partir de métodos não lineares [51].

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Existe uma tendência natural no emprego do uso de extratos vegetais como inibidores de corrosão da linha verde, devido ao seu baixo custo e variedade de utilização. A diversidade de plantas ou partes das plantas promovem uma grande variedade de extratos com aplicações diversas, em meios corrosivos diversos, dando destinos a materiais que em muitos casos seriam descartados. A obtenção dos extratos pode ser realizada por meio de métodos simples de extração, empregando ainda solventes de baixo custo como a água, que permitem a extração dos analitos de interesse.

Os extratos vegetais apresentaram excelente performance no critério de inibição da corrosão, onde, por meio do levantamento realizado, mais de 69% dos extratos apresentaram eficiência de inibição da corrosão acima de 90%.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JAMBO, H. C. M.; FÓFANO, S. **Corrosão: Fundamentos, Monitoração e Controle**. Ciência Moderna, Rio de Janeiro.
- [2] GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. LTC, Rio de Janeiro.
- [3] SERRA, E. T. **Corrosão e proteção anticorrosiva dos metais no solo**. Interciência, Rio de Janeiro.
- [4] LATTMANN, B. H.; ALVES, K. M. P. **Corrosão: princípios, análises e soluções**. Intersaberes, Curitiba.
- [5] CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 9. ed. John Wiley and Sons, [s.l.] .
- [6] NUNES, L. DE P.; LOBO, A. C. O. **Pintura industrial na proteção anticorrosiva**. 5. ed. Editora Interciência, Rio de Janeiro.
- [7] FRAUCHES-SANTOS, C. et al. A corrosão e os agentes anticorrosivos. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 2, p. 293–309, 2014.
- [8] SASTRI, V. S. **Green corrosion inhibitors: Theory and practice**. 1. ed. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
- [9] FELIPE, M. B. M. C. et al. Aspectos gerais sobre corrosão e inibidores vegetais. **Revista Virtual de Química**, v. 5, n. 4, 2013.
- [10] RANI, B. E. A.; BASU, B. B. J. Green inhibitors for corrosion protection of metals and alloys: An overview. **International Journal of Corrosion**, v. 2012, n. i, 2012.
- [11] EL-ETRE, A. Y. Inhibition of C-steel corrosion in acidic solution using the aqueous extract of zallouh root. **Materials Chemistry and Physics**, v. 108, p. 278–282, 2008.
- [12] KERMANI, M. B.; MORSHED, A. Carbon dioxide corrosion in oil and gas production - A compendium. **Corrosion**, v. 59, n. 8, p. 659–683, 2003.
- [13] CUNHA, J. D. **Avaliação de heterociclo do tipo mesoiônico solubilizado em sistema microemulsinado para aplicação em dutos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- [14] MAINIER, F. B.; SILVA, R. R. DE C. M. DA. As formulações inibidoras de corrosão e o meio ambiente. **Engvista**, v. 6, n. 3, p. 106–112, 2004.
- [15] ACHARYA, M. et al. Green Inhibitors for Prevention of Metal and Alloys Corrosion : An Overview. v. 3, n. 6, p. 16–24, 2013.
- [16] QIANG, Y. et al. Evaluation of Ginkgo leaf extract as an eco-friendly corrosion inhibitor of X70 steel in HCl solution. **Corrosion Science**, v. 133, p. 6–16, abr. 2018.
- [17] ORUBITE, K. O.; OFORKA, N. C. Inhibition of the corrosion of mild steel in hydrochloric acid solutions by the extracts of leaves of *Nypa fruticans* Wurm. **Materials Letters**, v. 58, n. 11, p. 1768–1772, 2004.
- [18] DIAS, N. M. P. et al. Isotermas de adsorção de cádmio em solos ácidos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 229–234, 2001.
- [19] ALLEONI, L. R. F. et al. Isotermas de langmuir e de freundlich na descrição da adsorção de boro em solos altamente intemperizados. **Scientia Agrícola**, v. 55, n. 3, p. 379–387, 1998.
- [20] VALBON, A. et al. Extrato de hibisco-colibri como inibidor verde de corrosão do aço-carbono em ácido sulfúrico. **Química Nova**, v. 42, n. 7, p. 797–802, 2019.
- [21] FERNANDES, L. D. et al. Extratos de folhas e flores como inibidores de corrosão de origem vegetal. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 1, 1 jan. 2019.
- [22] ABIOLA, O. K. et al. Gossipium hirsutum L. extracts as green corrosion inhibitor for aluminum in NaOH solution. **Corrosion Science**, v. 51, n. 8, p. 1879–1881, 2009.
- [23] JI, G. et al. Musa paradisica peel extract as green corrosion inhibitor for mild steel in HCl solution. **Corrosion Science**, v. 90, p. 107–117, 2015.
- [24] OKAFOR, P. C. et al. Eco-friendly corrosion inhibitors: Inhibitive action of ethanol extracts of *Garcinia kola* for the corrosion of mild steel in H₂SO₄ solutions. **Pigment and Resin Technology**, v. 36, n. 5, p. 299–305, 2007.

-
- [25] FADHIL, A. A. et al. Portulaca grandiflora as new green corrosion inhibitor for mild steel protection in hydrochloric acid: Quantitative, electrochemical, surface and spectroscopic investigations. **Surfaces and Interfaces**, v. 20, n. July, p. 100595, 2020.
- [26] SAHOO, S. et al. Corrosion inhibition behavior of dual phase steel in 3.5 wt % NaCl solution by carica papaya peel extracts. **Materials Today: Proceedings**, v. 18, p. 2642–2648, 2019.
- [27] REFAIT, P. et al. Corrosion inhibition of copper in 0.5 M NaCl solutions by aqueous and hydrolysis acid extracts of olive leaf. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 859, p. 113834, 2020.
- [28] BARBOUCHI, M. et al. Theoretical modeling and experimental studies of Terebinth extracts as green corrosion inhibitor for iron in 3% NaCl medium. **Journal of King Saud University - Science**, v. 32, n. 7, p. 2995–3004, 2020.
- [29] DEHGHANI, A. et al. A combined experimental and theoretical study of green corrosion inhibition of mild steel in HCl solution by aqueous Citrullus lanatus fruit (CLF) extract. **Journal of Molecular Liquids**, v. 279, p. 603–624, 2019.
- [30] DEVIKALA, S. et al. Green corrosion inhibition of mild steel by aqueous Allium sativum extract in 3.5% NaCl. **Materials Today: Proceedings**, v. 14, p. 580–589, 2019.
- [31] DEVIKALA, S. et al. Green corrosion inhibition of mild steel by asafoetida extract extract in 3.5% NaCl. **Materials Today: Proceedings**, v. 14, p. 590–601, 2019.
- [32] KODAMA, A. L.; HOTSUMI, T. N. **Investigação e caracterização de produtos naturais como inibidores de corrosão atóxicos para aço carbono em meio de ácido clorídrico** Escola Politécnica Da Universidade São Paulo Investigação São Paulo, 2011.
- [33] BOUDALIA, M. et al. Green approach to corrosion inhibition of stainless steel in phosphoric acid of Artemesia herba albamedium using plant extract. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 6, p. 5763–5773, 2019.
- [34] MARY ANBARASI, C.; DIVYA, G. A Green Approach to Corrosion Inhibition of Aluminium in Acid Medium Using Azwain Seed Extract. **Materials Today: Proceedings**, v. 4, n. 4, p. 5190–5200, 2017.
- [35] DEHGHANI, A. et al. Potential role of a novel green eco-friendly inhibitor in corrosion inhibition of mild steel in HCl solution: Detailed macro/micro-scale experimental and computational explorations. **Construction and Building Materials**, v. 245, p. 118464, 2020.
- [36] GHADERI, S. et al. Application of sustainable saffron purple petals as an eco-friendly green additive for drilling fluids: A rheological, filtration, morphological, and corrosion inhibition study. **Journal of Molecular Liquids**, v. 315, p. 113707, out. 2020.
- [37] CASALETTO, M. P. et al. Inhibition of Cor-Ten steel corrosion by “green” extracts of Brassica campestris. **Corrosion Science**, v. 136, n. February, p. 91–105, 2018.
- [38] OGUNLEYE, O. O. et al. Green corrosion inhibition and adsorption characteristics of Luffa cylindrica leaf extract on mild steel in hydrochloric acid environment. **Heliyon**, v. 6, n. 1, p. e03205, jan. 2020.
- [39] ANUPAMA, K. K. et al. Electrochemical and computational aspects of surface interaction and corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid by Phyllanthus amarus leaf extract (PAE). **Journal of Molecular Liquids**, v. 216, p. 146–155, 2016.
- [40] ASADI, N. et al. Utilizing Lemon Balm extract as an effective green corrosion inhibitor for mild steel in 1M HCl solution: A detailed experimental, molecular dynamics, Monte Carlo and quantum mechanics study. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 95, p. 252–272, 2019.
- [41] DE ALBUQUERQUE, M. A. et al. Avaliação da atividade anticorrosiva de formulações com extrato vegetal por técnicas eletroquímicas e gravimétrica. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 5, p. 1841–1853, 2015.
- [42] DE ASSIS, B. V. R. et al. Efeito inibitório do extrato de Piper Nigrum L. sobre a corrosão do aço carbono em meio ácido. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 5, p. 1830–1840, 2015.
- [43] PERES DE SOUSA, J. et al. Estudo da eficiência do Orbignya oleifera como inibidor verde de corrosão para aço com baixo teor de carbono comparado com inibidor comercial em solução HCl 1M. **Revista Materia**, v. 24, n. 3, 2019.
- [44] OLIVEIRA, T. M.; CARDOSO, S. P. Avaliação do chá branco como potencial inibidor de corrosão. **Revista Materia**, v. 24, n. 1, 2019.
- [45] EURIDES, A. L. G. et al. Extrato de casca de banana (Musa AAB subgrupo Prata) como inibidor verde de corrosão do aço carbono 1020 em ácido clorídrico 1M. **INTERCORR**, p. 11, 2018.
- [46] TEIXEIRA, V. M. et al. Estudo da ação inibidora do extrato de Camellia sinensis na corrosão do aço-carbono 1020 em HCl 1 mol L⁻¹. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 5, p. 1780–1794, 2015.
- [47] OLIVEIRA, D. F. et al. Inibidor de corrosão ambientalmente seguro: avaliando extratos de Plectranthus barbatus Andrews. **Research, Society and Development**, v. 7, n. 12, p. 1–20, 2018.
- [48] VAZ, E. L. S. et al. Uma experiência de corrosão metálica em meio ácido. **Revista Virtual de Química**, v. 5, n. 4, 2013.
- [49] WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. 1. ed. EDUSP, São Paulo.
- [50] MOURA, J. I. P. **Efeitos de um inibidor comercial na inibição à corrosão do aço API5LX Gr X42 em meio de cloreto e oxigênio**. 2006. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
-

[51] NASCIMENTO, R. F. et al. **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Imprensa Universitária, Fortaleza.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA
Centro de Ciências Exatas e Naturais – CCEN

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Às 09:00 horas do dia dez de dezembro de dois mil e vinte, empregando a Plataforma Google Meet, meet.google.com/mmt-kvdj-qcq, reuniu-se a Banca Examinadora de defesa de trabalho de conclusão de curso de autoria do aluno **DANIEL VICTOR CARLOS DE NORONHA**, aluno do curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia desta universidade, N° de matrícula 2017010926, com o título **“INIBIDORES DE CORROSÃO DA LINHA VERDE: ESTADO DA ARTE”**. A Banca Examinadora ficou assim constituída por três membros: Prof. Dr. JARDEL DANTAS DA CUNHA, presidente da banca e orientador do Trabalho de Conclusão de Curso; Prof. Dr. ANTONIO ROBSON GURGEL e Prof. Dr. RICARDO HENRIQUE DE CARVALHO, como membros. Concluída a defesa, procedeu-se o julgamento pelos membros da banca examinadora, tendo o aluno obtido as seguintes notas: **9,5; 9,5; 9,5**. Apuradas as notas verificou-se que o aluno foi **APROVADO** com média geral **9,5**. E para constar, eu, JARDEL DANTAS DA CUNHA, lavrei a presente ata que, após lida e aprovada pelos membros da banca examinadora, será assinada por todos.

Mossoró, 10 de dezembro de 2020.

Assinatura dos membros da Banca Examinadora.

JARDEL DANTAS DA
CUNHA:01063473497

Assinado de forma digital por JARDEL
DANTAS DA CUNHA:01063473497
Dados: 2020.12.11 18:31:01 -03'00'

Prof. Dr. JARDEL DANTA DA CUNHA – UFERSA
Presidente e orientador

Ricardo Henrique Rocha
de Carvalho

Assinado de forma digital por Ricardo
Henrique Rocha de Carvalho
Dados: 2020.12.12 01:26:01 -03'00'

Prof. Dr. RICARDO HENRIQUE DE CARVALHO – UFERSA
Primeiro Membro

ANTONIO ROBSON
GURGEL:03510725433

Assinado de forma digital por ANTONIO ROBSON
GURGEL:03510725433
Dados: 2020.12.11 18:39:45 -03'00'

Prof. Dr. ANTONIO ROBSON GURGEL - UFERSA
Segundo Membro