

## Uso sustentável de extratos de origem animal e vegetal como aditivos para prevenção à corrosão da cadeia de fertilizantes

Sustainable use of extracts of animal and vegetable origin as additives to prevent corrosion in the fertilizer chain

Ana Cristina Ammirati<sup>1</sup> , Carmem Célia Francisco do Nascimento<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Departamento de Mecânica e Materiais, Laboratório Multiusuário de Corrosão e Desgaste. Avenida Getúlio Vargas, 04, Monte Castelo, 65030-005, São Luís, MA, Brasil.

e-mail: ammirati.ana@acad.ifma.edu.br, carmemfn@ifma.edu.br

### RESUMO

A indústria de fertilizantes no Brasil vem crescendo de forma acelerada puxada pelo aumento do agronegócio, porém essa cadeia industrial envolve operação contínua em meio agressivo, gerando paradas para manutenção corretiva devido ao desgaste da cadeia industrial por corrosão. Nos últimos anos, o custo da indústria com manutenção chegou a 4% em relação ao faturamento bruto. Com o objetivo de diminuir esse custo e visando à sustentabilidade, têm-se investido em novas técnicas para proteger a planta de produção contra os efeitos severos da corrosão, objetivando o aumento da produção, diminuição das paradas para manutenção, prorrogação da vida útil da planta e diminuição de resíduos tóxicos. Vários estudos com extratos de origem animal e vegetal têm sido realizados como possíveis aditivos de proteção à corrosão de superfícies metálicas, por serem considerados ambientalmente corretos, formando um filme na interface metal-meio corrosivo. Esse trabalho mostra estudos de corrosão por técnicas eletroquímicas em aço 1020 contendo extratos de *Struthio Camelus* (avestruz), *Crotalus Durissus* (cobra cascavel) e de *Elaeis Guineensis* (palma) em solução de Cloreto de Sódio (NaCl) e Ureia 3%. Os resultados indicaram uma diminuição significativa nas taxas de corrosão do aço quando submetido a Ureia 3% na presença de todos os extratos, quando comparado com os resultados obtidos na presença de NaCl 3%. O aço carbono com extrato de *Crotalus Durissus* em Ureia 3% apresentou taxa de corrosão de 0,003 mm/ano, o melhor comportamento nesse meio, seguido do extrato de *Elaeis Guineensis*, 0,009 mm/ano. O aço na presença de *Elaeis Guineensis* com NaCl 3% apresentou uma taxa de corrosão de 0,05 mm/ano, sendo o melhor resultado para esse meio corrosivo.

**Palavras-chave:** Fertilizante; Ureia; Corrosão Eletroquímica; *Struthio Camelus*; *Crotalus Durissus*.

### ABSTRACT

The fertilizer industry in Brazil has been growing at an accelerated pace driven by the increase in The fertilizer industry in Brazil has been growing at an accelerated pace driven by the increase in agribusiness, however this industrial chain involves continuous operation in an aggressive environment, generating stops for corrective maintenance due to the wear and tear of the industrial chain due to corrosion. In recent years, the cost of the industry with maintenance has reached 4% in relation to gross sales. With the objective of reducing this cost and aiming at sustainability, new techniques have been invested to protect the production plant against the severe effects of corrosion, aiming at increasing production, reducing maintenance stops, extending the plant's useful life and decrease in toxic waste. Several studies with extracts of animal and plant origin have been carried out as possible corrosion protection additives for metallic surfaces, as they are considered environmentally correct, forming a film at the corrosive metal-medium interface. This work shows corrosion studies by electrochemical techniques on 1020 steel containing extracts of *Struthio Camelus* (ostrich), *Crotalus Durissus* (rattlesnake) and *Elaeis Guineensis* (palm and palm kernel) in a solution of Sodium Chloride (NaCl) and 3% Urea. The results indicated a significant decrease in the corrosion rates of steel when submitted to 3% Urea in the presence of all extracts, when compared with the results obtained in the presence of 3% NaCl. Carbon steel with *Crotalus Durissus* extract in Urea 3% showed a corrosion rate of 0.003 mm/year, the best behavior in this medium,

followed by *Elaeis Guineensis* extract, 0.009 mm/year. Steel in the presence of *Elaeis Guineensis* with 3% NaCl showed a corrosion rate of 0.05 mm/year, being the best result for the medium.

**Keywords:** Fertilizer; Urea, Electrochemical Corrosion; *Struthio Camelus*; *Crotalus Durissus*.

## 1. INTRODUÇÃO

No mundo, estima-se que 30% das falhas em plantas industriais são geradas por corrosão e que mais de 270 bilhões de dólares por ano sejam gastos em reparos relacionados a essas falhas. No Brasil não é diferente, segundo a revista *Grandes Construções* [1], o custo com manutenção fica em torno 4,5% do PIB nacional, o equivalente a R\$ 236 bilhões. Assim, a corrosão requer atenção na indústria para evitar incidentes de segurança e falhas no processo [2, 3].

As plantas de produção de fertilizantes passam por paradas constantes para manutenção decorrentes do desgaste e corrosão, refazendo parte de suas estruturas metálicas, acarretando perdas econômicas. Em 2013, os custos com manutenção chegaram a 4,69% do faturamento bruto, segundo a Associação Brasileira de Manutenção [4]. Segundo SASTRI [5] e SUNDARAM *et al.* [6], a corrosão na indústria de fertilizantes é gerada pelos produtos fosfatados e nitrogenados que se decompõem ou reagem produzindo substâncias corrosivas, por exemplo a decomposição do nitrato de amônia ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) em monóxido de nitrogênio ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e água [7]. Recomenda-se o uso de medidas protetivas para melhorar a confiabilidade geral das plantas de produção. O estudo de novos produtos visando a proteção de metais contra corrosão e expostos a ambientes agressivos tem sido largamente investigado, principalmente, os produtos de origem naturais, por serem solúveis em água, apresentarem baixa toxicidade e com custo relativamente baixo [8, 9].

Biolubrificante, lubrificante derivado de plantas e animais [10], surgiu da necessidade do uso de produtos menos tóxicos e ecologicamente corretos que não agridam o homem e o meio ambiente, com propriedades físicas favoráveis e aceitáveis ao processo. Uma das vantagens dos biolubrificantes, principalmente de origem vegetal, é a alta lubrificação [11], por apresentam concentração elevada de ácidos graxos saturados, com cadeia variando de 14 a 22 carbonos, com até 5 duplas ligações situadas em diferentes posições da cadeia, em sequências conjugadas ou não conjugadas. A existência de ligações simples entre os carbonos das cadeias favorece a lubrificidade do produto [12].

Segundo SALIMON, SALIH E YOUSIF [13], os extratos vegetais têm capacidade de lubrificação, índices de viscosidade e propriedades anticorrosivas superiores aos outros extratos devido sua maior afinidade com superfícies metálicas. Os óleos extraídos de vegetais podem ser considerados verdes, pois apresentam efeitos toxicológicos inferiores aos de origem mineral comumente utilizados na cadeia industrial, porque são rapidamente biodegradáveis. Os lubrificantes considerados verdes apresentam uma boa estabilidade térmica e química, quando expostos às condições severas, e muitos deles são facilmente reciclados.

Estudos dos extratos de *Elaeis Guineensis* (palma), *Struthio Camelus* (avestruz) e *Crotalus Durissus* (cobra cascavel) têm mostrado uma vasta aplicabilidade em vários segmentos da indústria química e farmacêutica, como por exemplo, na fabricação de cremes, pomadas, hidratantes, dentre outros [14]. No entanto, o uso desses extratos na cadeia industrial tem sido pouco explorado.

Os óleos extraídos do mesocarpo ou da semente da *Elaeis Guineensis* possuem na sua composição, principalmente, Ácido Palmítico, Ácido Oleico, Ácido Láurico e Ácido Oleico, que são ácidos graxos saturados diretamente relacionados ao aumento do efeito da lubrificação e proteção contra oxidação de superfícies metálicas [15].

SALLEH e ABDULLAH [16] estudaram o óleo extraído do *Elaeis Guineensis* para verificar o comportamento anticorrosão no aço carbono em contato com água destilada e água do mar, pelo método de polarização. As curvas de polarização obtidas mostraram que densidade de corrente de corrosão diminui com o aumento da concentração do extrato de palma. Isto se deve à adsorção do óleo na superfície do metal, produzindo um filme de barreira e consequentemente minimizando a dissolução do metal e a evolução do hidrogênio. Os resultados obtidos comprovaram que o extrato de folhas de óleo de palma pode ser usado com medida protetiva do aço carbono em água do mar.

O óleo de avestruz, extraído do tecido adiposo do abdômen do animal, apresenta em sua composição contém, além dos 0,38% de ácidos graxos livres, 28% de ácidos graxos saturados (20% ácido palmítico e 8% ácido esteárico) e 22% ácidos graxos poliinsaturados (20% de ácido linoléico e 2% de ácido oleico alto) [17]. Além disso, possui metais pesados como, Sódio, Fósforo, Potássio, Cálcio, Manganês, Ferro e Selênio. Esse último considerado antioxidante natural. [18]

O óleo extraído da gordura da Cobra Cascavel é rico em Ômega 3, segundo estudo realizado por FERREIRA *et al.* [19], que é uma gordura polissaturada composta basicamente pelos ácidos Graxos alfa-linolênico, eicosapentaenoico e o docosaheptaenoico.

Segundo OKI e ANAWE [20] para evitar efeitos de corrosão prejudiciais às máquinas e equipamentos, uma limpeza adequada e um tratamento na superfície metálica com aplicação de proteção temporária contra a corrosão, deve-se usar óleos e graxas antes do armazenamento. Em função dessa afirmação, esta pesquisa propõe desenvolver uma tecnologia sustentável, com a aplicação de extratos de *Elaeis Guineense* (palma e palmiste), *Struthio Camelus* (avestruz) e *Crotalus Durissus* (cobra cascavel) sobre uma superfície metálica submetido a NaCl 3% e Ureia 3%, de forma a minimizar ou eliminar o processo de corrosão. Para tanto, foram estudadas medidas eletroquímicas, por meio dos ensaios de polarização linear e espectroscopia de impedância eletroquímica.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Preparação das amostras para os ensaios eletroquímicos

Para a realização deste trabalho foram utilizadas amostras em aço-carbono ABNT 1020 usinados com 10 mm de diâmetro e embutidos com resina de poliéster, sendo em seguida lixadas para remover óxidos e impurezas, com lixas de granulometria variando de 120 a 1200 mesh. Foi aplicado uma gota dos óleos de *Elaeis Guineenses* (palma e palmiste), *Struthio Camelus* (avestruz) e *Crotalus Durissus* (cobra cascavel) na superfície dos corpos de prova, de forma a formar uma camada fina, antes de cada ensaio para o levantamento das taxas de corrosão do metal por análises eletroquímicas.

A Tabela 1 mostra a composição química do aço 1020.

O extratos utilizados no estudos foram comprados. O extrato de palma foi adquirido da destilaria Bauru, o de Avestruz (óleo e banha) da empresa Amazon Struthio. O de cobra de um comerciante local, que o produz através do cozimento da carne cobra cascavél.

A Tabela 2 mostra a porcentagem dos principais ácidos graxos encontrados na composição de cada extrato, bem como, a local do onde é extraído e a referencia bibliográfica.

A Figura 1 mostra as estruturas moleculares dos principais ácidos graxos existentes nos extratos em estudos.

### 2.2. Ensaio eletroquímicos

Para os ensaios eletroquímicos, foi utilizado um potenciostato, modelo Autolab - AUT 86425. Uma célula eletroquímica construída por três eletrodos: eletrodo de referência (prata/cloreto de prata saturado), contra eletrodo (platina) e o eletrodo de trabalho, uma amostra de aço 1020, colocados em solução eletrolítica de Cloreto de sódio (NaCl) 3% e de Ureia 3%. Antes de cada experimento, o sistema foi colocado em repouso até o sistema

**Tabela 1:** Composição do aço 1020.

ELEMENTO	COMPOSIÇÃO
Carbono	0,18 a 0,23%
Manganês	0,30 a 0,60%
Enxofre	0,05%
Fósforo	0,014%
Ferro	restante da composição

**Tabela 2:** Composição dos Extratos.

EXTRATO	COMPOSIÇÃO	LOCAL DO EXTRAÇÃO	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA
<b>Óleo de Palma</b>	44% Ácido Palmítico 40% Ácido Oleico	Fruto da palmeira	[12,13,15]
<b>Palmiste</b>	47% Ácido Láurico 16% Ácido Oleico	Amêndoa da palmeira	[12,13,15]
<b>Óleo de Avestruz</b>	23%Ácido Palmítico 40% Ácido Oleico	Tecido adiposo do abdômen	[12,17,18]
<b>Banha de Avestruz</b>	20%Ácido Palmítico 31% Ácido Oleico	Tecido adiposo do abdômen	[12,17,18]
<b>Óleo de Cobra</b>	alfa-linolênico	Carne	[12,13]

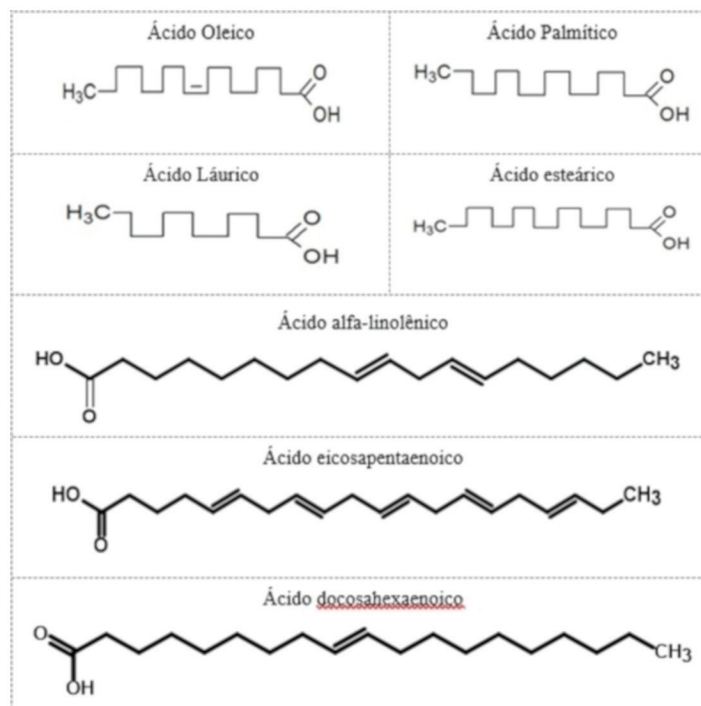


Figura 1: Estruturas Moleculares dos principais ácidos graxos em estudo.

estabilizar o potencial de circuito aberto (OCP). Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente. Nos ensaios de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica, a frequência aplicada variou de  $10^{-2}$  a  $10^5$  Hz, amplitude de perturbação de 10 mV com 8 pontos/década. Os valores obtidos nos experimentos foram transportados para o software Origin® para serem tratados estatisticamente e analisados.

Pelos ensaios de Impedância foi possível extrair as resistências de transferência de carga na presença ( $R_{ct,o}$ ) e na ausência dos extratos ( $R_{ct}$ ) [21, 22, 15].

Nos ensaios de polarização potenciodinâmica foram aplicadas as inclinações de Tafel para determinação dos coeficientes catódicos ( $\beta_c$ ) e anódicos ( $\beta_a$ ), e extração das correntes de corrosão na presença ( $i_{ci}$ ) e na ausência dos extratos ( $i_{si}$ ). A eficiência ( $\eta\%$ ) no meio pode ser calculada pela Equação 1 [22]

$$\eta\% = \frac{i_{si} - i_{ci}}{i_{si}} \times 100 \quad (1)$$

A taxa de varredura aplicada foi de  $1 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$  com sobretensões anódicas e catódicas de +250 e -250 mV, respectivamente, em relação ao potencial de circuito aberto (OCP). O método de Extrapolação de Tafel aplicado para obtenção dos parâmetros segue a metodologia de POORQASEMI [22]. Todos os experimentos foram realizados em duplicidade para maior confiabilidade dos resultados e realizados à temperatura ambiente ( $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ).

### 2.3. Análise estatística dos dados

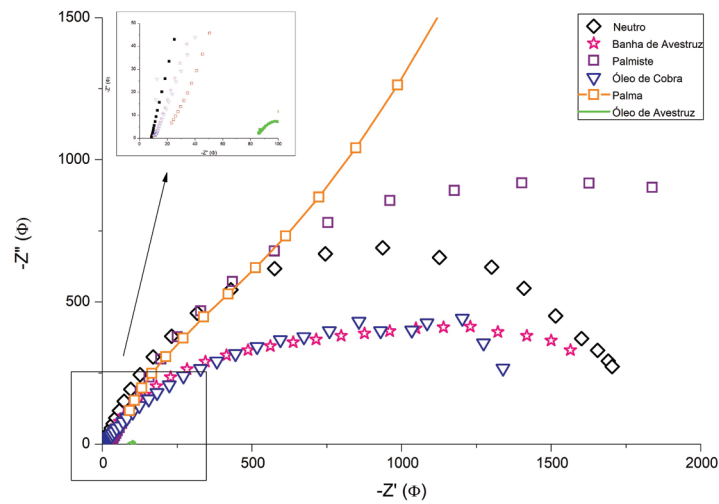
Com os resultados da densidade/taxa de corrosão realizou-se a análise estatística, utilizando o teste estatístico de Tukey para comparação múltipla dos resultados, como forma de validação dos resultados obtidos, com grau de confiança de 95%.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Susceptibilidade à corrosão de um aço 1020 com extratos de origem vegetal e animal em NaCl 3%

#### 3.1.1. Medidas de Impedância Eletroquímica

Espectros de impedância para amostras de aço ABNT 1020 na ausência e presença dos extratos de *Elaeis Guineenses* (palma e palmiste), de *Crotalus Durissus* (cobra cascavel), óleo e banha de *Struthio Camelus* (avestruz), em soluções eletrolíticas de NaCl 3% são mostrados na Figura 2.



**Figura 2:** Espectros de Nyquist para o aço ABNT 1020 em meio NaCl 3%.

As amostras de aço carbono foram modificadas pela presença de diferentes tipos de extratos aplicados sobre a superfície metálica. Formando curvas semelhantes de *loops* capacitivos, indicando uma diminuição no processo de corrosão. Embora as características eletroquímicas tenham mostrado semelhanças, o extrato de palma mostrou-se ser mais efetivo em relação a adsorção na presença do NaCl. Estudos mostraram que a adsorção da camada orgânica protetora na superfície do metal pode causar heterogeneidade na superfície induzida e modificar suas características de impedância [23, 24].

Esses *loops* não são semicírculos perfeitos e tal desvio é atribuído à dispersão de frequência pela rugosidade ou não homogeneidade da superfície do eletrodo de trabalho causada pelo ataque de corrosão [25].

Verifica-se que a amostra com palma possui a melhor característica capacitiva e por conseguinte menor inclinação ao processo corrosivo, ou seja, apresenta o maior arco no  $Z''$  (Ohm) do eixo imaginário indicando maior capacitância, uma baixa atividade interfacial e alta estabilidade dos filmes passivos com características capacitivas. Segundo Trzaska [26] o diâmetro muito maior do semicírculo no caso de ferro gerado eletroquimicamente mostra alta resistência elétrica no interface metal-solução, que é o resultado da oxidação do ferro e íons  $Fe^{+2}$  passando para a solução.

O óleo de palma difere dos demais extratos, por conter em sua composição, basicamente, ácidos graxos saturados, que são polares, por causa da existência ânion carboxilato. Esses ácidos quando submetido ao meio de NaCl (sal forte) faz com que o  $Na^+$  seja deslocado, favorecendo a troca atômica entre os íons, resultando na formação de um filme de óxido gerado na superfície do metal [15].

A amostra com óleo de avestruz mostrou-se mais susceptível à corrosão apresentando o menor arco capacitivo dentre as amostras em estudo, o que pode ser atribuído a formação de uma película descontínua do filme sob a superfície metálica gerada pela incompatibilidade das moléculas do óleo com a superfície metálica e/ou compatibilidade com o eletrólito contendo NaCl.

A amostra sem a presença de extrato apresentou a formação de um semicírculo, característico, segundo a literatura de um sistema capacitivo e um processo de transferência de carga entre o eletrodo e uma camada a ser oxidada na solução [27].

As amostras tratadas com extratos de origem animal apresentaram um semicírculo achatado no  $Z''$  (Ohm) do eixo imaginário, com valores de índice capacitivo baixos, abaixo da amostra neutra o que pode estar relacionado a não adsorção de espécies químicas na interface eletrodo/eletrólito [22, 28]. As curvas de óleo de cobra e banha de avestruz mostraram comportamento similar com baixa atividade de adsorção na presença do cloreto de sódio.

Na Figura 3 são apresentados os diagramas de (a) Bode módulo e (b) Bode fase das amostras tratadas com os extratos de palma, palmiste, avestruz e cobra, que representam a curva da impedância (módulo) pelo ângulo de fase do sistema eletroquímico de corrosão em função da frequência [27]. Os gráficos de fase de Bode mostram que quanto maior os ângulos de fase, mais elevado o comportamento capacitivo devido ao aumento da polarização [29].

Analisando o diagrama de Bode módulo (Figura 3 a) observa-se que a curva referente a amostra com óleo palma é quase uma reta descendente, o que indica que o metal foi passivado, com uma superfície sem

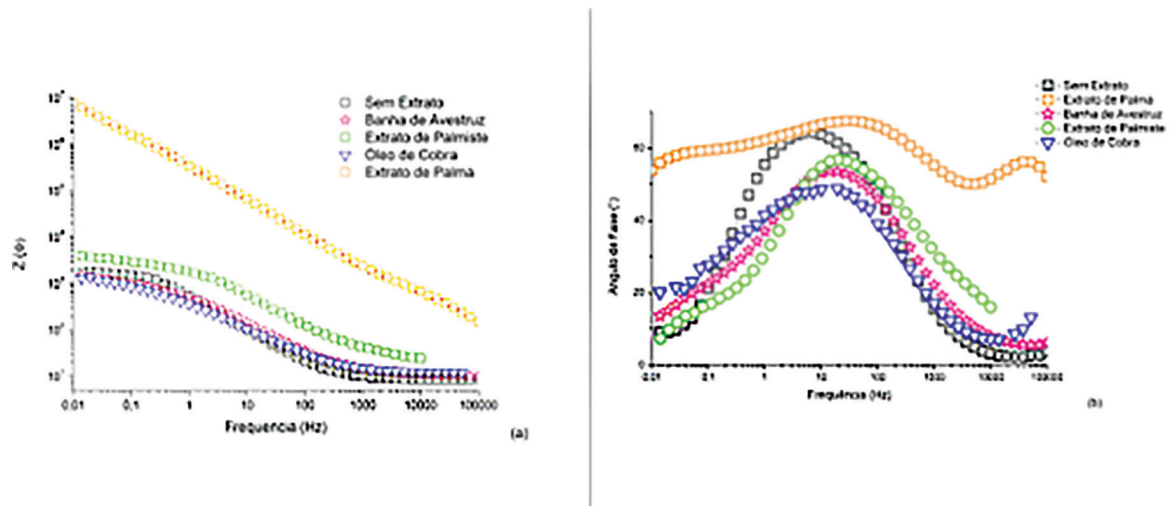


Figura 3: Diagramas de Bode para amostras na presença de NaCl a 3%.

corrosão. A curva com palmiste com valores de log |Z| menores que o da palma e maiores que os demais extratos analisados, e praticamente os mesmos valores em toda a faixa de frequência, o que caracteriza às modificações na interface metal e camada passiva [14].

O diagrama Bode Fase indicou um sistema capacitivo pois os valores máximos de ângulo de fase ( $\theta$ ) encontram-se em torno de  $70^\circ$ , sendo  $90^\circ$  o valor para capacitores ideais. Isto indica uma adsorção mais efetiva dos extratos de palma e palmiste na superfície do metal, aumentando a espessura da dupla camada elétrica e retardando a evolução do processo corrosivo do metal [27]. As curvas, referentes aos extratos de origem animal, apresentaram os ângulos de fase baixos, o que corresponde a um processo de adsorção fraco.

Na Tabela 3 mostra a composição química dos extratos e os valores obtidos para resistência da solução ( $R_s$ ), resistência à transferência de carga ( $R_p$ ), por meio da análise EIE para o aço ABNT 1020 em solução de NaCl 3%, e os valores da capacitância ( $C_{dl}$ ) que foram calculados a partir da Equação (2).

Observa-se que os grupos de cadeias moleculares que fazem parte da composição química de cada extrato, foram determinantes na adsorção do extrato na superfície do metal e compatibilidade com o cloreto de sódio. A resistência a transferência de cargas foi expressiva para o óleo de palma, indicando uma boa homogeneidade da película sob o metal, como também adsorção física na interface.

$$C_{dl} = \frac{1}{R_{cl} 2\pi f_{max}} \quad (2)$$

Ao observar a Tabela 3, verifica-se que a composição do extrato de palma e banha de avestruz possuem os mesmos compostos moleculares, porém na banha de avestruz o ácido oleico aparece em maior porcentagem. O ácido oleico é um ácido monossaturado, com dupla ligação que pode romper, alterando a sua estrutura, o que não ocorre com o ácido palmítico [12]. Quanto maior a concentração de ácido graxos saturados o extrato tiver, maior possibilidade da formação de uma película protetiva em meio a NaCl [15].

Tabela 3: Dados obtidos a partir dos diagramas de impedância eletroquímica.

EXTRATO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	$R_s$ ( $\Omega\text{cm}^2$ )	$R_{CT}$ ( $\Omega\text{cm}^2$ )	$C_{DL}$ ( $\text{F.cm}^{-2}$ )	$X^2$
Sem Extrato	-----	8,84	1.934,21	$1,94 \cdot 10^{-3}$	–
Óleo de Palma	44% Ácido Palmítico 40% Ácido Oleico	35,9	$3,34 \cdot 10^3$	$78,5 \cdot 10^{-9}$	0,013
Palmiste	47% Ácido Láurico 16% Ácido Oleico	14,7	$1.302,5 \cdot 10^3$	$2,84 \cdot 10^{-3}$	0,020
Banha de avestruz	20%Ácido Palmítico 31% Ácido Oleico	10,5	364	$314 \cdot 10^{-6}$	0,069
Óleo de Cobra	alfa-linolênico	12,1	298	$25,1 \cdot 10^{-6}$	0,82

### 3.1.2. Medidas de Polarização Potenciodinâmica

Os testes laboratoriais possibilitaram a obtenção dos potenciais de corrosão e a capacidade de armazenamento de cargas. As informações obtidas sobre as curvas de polarização foram analisadas com a utilização do programa NOVA. As curvas de polarização anódica e catódica do aço 1020 ABNT em NaCl 3% sem e com os extratos estão apresentados na Figura 4.

Os parâmetros eletroquímicos, como potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) e densidade de corrente de corrosão ( $I_{corr}$ ) foram obtidos a partir da interseção de anódica e catódica Tafel Slopes das curvas de polarização e estes valores são mostrados na Tabela 3. As curvas de polarização revelaram que os valores do potencial de corrosão de equilíbrio ( $E_{corr}$ ) e os valores de densidade de corrente de corrosão ( $I_{corr}$ ) variaram em função do extrato aplicado. Na Figura 4 e observa-se o maior deslocamento à esquerda da curva contendo o extrato de palma com menor densidade de corrente e menor taxa de corrosão dentre os extratos estudados. Além disso, observa-se que as curvas catódicas e anódicas mostraram menores densidades de corrente na presença dos extratos de origem vegetal. Isso sugere que ambos os extratos reduziram a taxa de dissolução da superfície anódica, bem como a redução catódica de íons de hidrogênio.

O valor de taxa de corrosão (mm/ano) obtido para a amostra tratada com palma indica boa resistência à corrosão. Conforme literatura, taxas de corrosão na faixa de  $4,8 \cdot 10^{-3}$  estão relacionadas a materiais com excelente resistência à corrosão [25].

Para o aço ABNT 1020 em solução de NaCl 3% com a aplicação de extratos, segundo MACIOSK *et al.* [30], analisando a  $i_{corr}$  (Tabela 4), o extrato de palma apresenta um estado de passivação (10% de ocorrência de corrosão), o palmiste comportou-se de forma intermediária, fazendo-se necessários mais testes. Os demais extratos usados como biolubrificantes apresentam uma baixa tendência à formação de corrosão.

Ao analisar as inclinações  $\beta_a$  e  $\beta_c$ , para os extratos de Palma, Banha de Avestruz, conforme mostrado na Tabela 4, o que indica que há adsorção dos extratos, modificando o mecanismo de dissolução anódica, e uma evolução de formação de hidrogênio, ou seja, o catodo é mais polarizado. As ligações químicas formadas entre o metal e as moléculas do extrato favorece a formação de um filme protetor sobre o metal.

## 3.2. Susceptibilidade à corrosão de um aço 1020 com extratos de origem vegetal e animal em Ureia 3%

### 3.2.1. Medidas de Impedância Eletroquímica

Os dados relativos à impedância obtidos no ensaio eletroquímico foram analisados utilizando o programa NOVA e as imagens das curvas de impedância plotadas com auxílio do software Origin®. A Figura 5 exhibe o diagrama de Nyquist relativo ao extrato aplicado sobre a metal e em solução de Ureia 3%.

Os gráficos de Nyquist mostram semicírculos devido ao comportamento ideal na interface eletroquímica do aço ABNT 1020 no eletrólito agressivo, indicando a natureza da reação controlada por ativação com um único processo de transferência de carga [31].

Os diagramas de impedância obtidos nas amostras com extratos apresentaram arcos capacitivos maiores do que a amostra sem a aplicação de extrato, indicando que há presença de moléculas inibidoras que fortale-

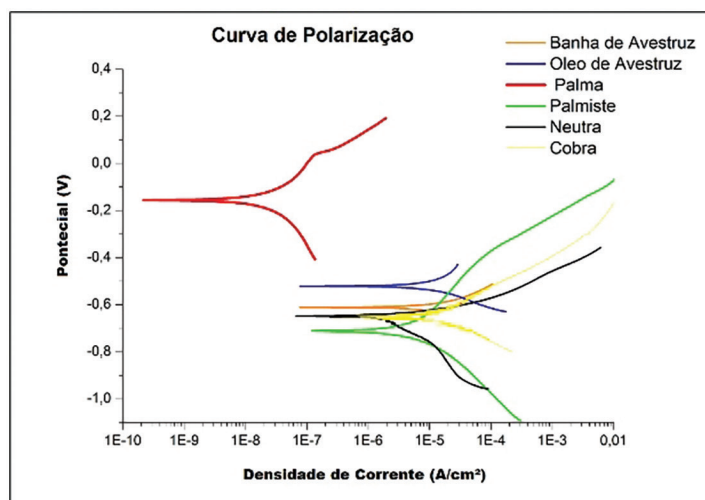
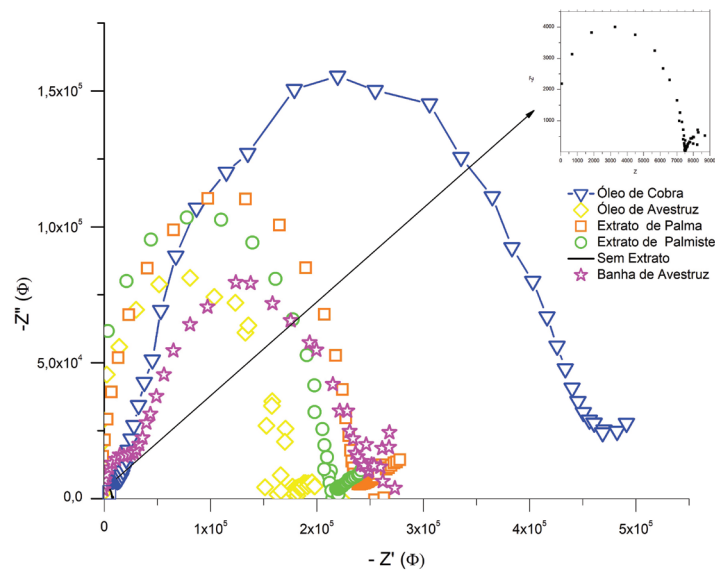


Figura 4: Curvas de Polarização para os extratos em NaCl 3%.

**Tabela 4:** Parâmetros eletroquímicos obtidos nos ensaios de polarização em NaCl 3%.

EXTRATO	$\beta_a$ (V/dec)	$\beta_c$ (V/dec)	$ E_{corr} $ (V)	$i_{corr}$ (A)	TC (mm/ano)	$R_p$ ( $\Omega$ )
Sem Extrato	0,482	0,069	0,654	0,076	0,0882	3.447,8
Óleo de Avestruz	0,170	12,491	0,522	0,329	0,3825	1.977,7
Banha de Avestruz	0,200	0,086	0,611	0,179	0,2081	1.461,2
Óleo de Cobra	0,103	0,145	0,648	0,128	0,1487	2.041,0
Palmiste	0,269	0,439	0,695	0,108	0,1259	6.686,5
Palma	10,699	1,5418	0,155	$3,48 \cdot 10^{-7}$	0,0048	$1,68 \cdot 10^{+6}$

\*  $\beta_a$  = inclinação de Tafel anódica,  $\beta_c$  = inclinação de Tafel catódica,  $E_{corr}$  =Potencial de corrosão,  $i_{corr}$  = corrente de corrosão, TC= taxa de corrosão e  $R_p$  = existência à polarização.



**Figura 5:** Espectros de Nyquist para o aço ABNT 1020 em Ureia 3%.

cem o filme inibidor. Segundo STAROSTIN et al [32], a passivação ocorre no metal na solução de Ureia, em função da presença de ácidos carboxílicos (R-COOH), ao qual é atribuído à função de adsorção das moléculas dos extratos por meio do grupo carboxilato na superfície do metal. A Ureia é um composto orgânico, derivado do ácido carbônico e pertencente ao grupo funcional das amidas, e que possui dois grupos  $NH_2$  ligados a um radical acila.

A amostra com óleo de cobra ( $CH_3CH_2CH=CH(CH_2)_nCOOH$ ) apresentou o maior pico de curvatura (curva vermelha), indicando uma menor compatibilidade dos grupos funcionais com o eletrólito a base de ureia, gerando uma baixa interação com o meio e formação de um filme mais homogêneo sob a superfície da amostra. Os demais extratos também apresentaram semicírculos capacitivos superiores a amostra neutra, indicando a formação de um filme compatível com o aço 1020 resistente à corrosão.

A Figura 6 mostra os diagramas de (a) Bode módulo e (c) Bode fase das amostras tratadas com os extratos (óleo de palma, palmiste, óleo e banha de avestruz e óleo de cobra).

Observando os diagramas Bode módulo (Figura 6 a) verifica-se a existência de três regiões, uma região plana das curvas (praticamente paralela ao eixo x) nas frequências menores 10 kHz onde ocorre apenas a resistência do eletrólito. Na etapa seguinte é da transição, para algumas amostras ocorreu uma variação da impedância na frequência de  $10^4$  KHz.

Na Figura 6b, verifica-se que as curvas para as amostras com óleo de Cobra e banha de Avestruz apresentam o mesmo comportamento, diferente das demais amostras, segundo o estudo de WOLYNEC [33] ocorreu um processo corrosivo e uma adsorção.

O ângulo de fase permanece próximo a  $100^\circ$ , nas frequências altas, indicando que ocorreu a formação de um filme passivo formado na superfície do metal [32, 34].



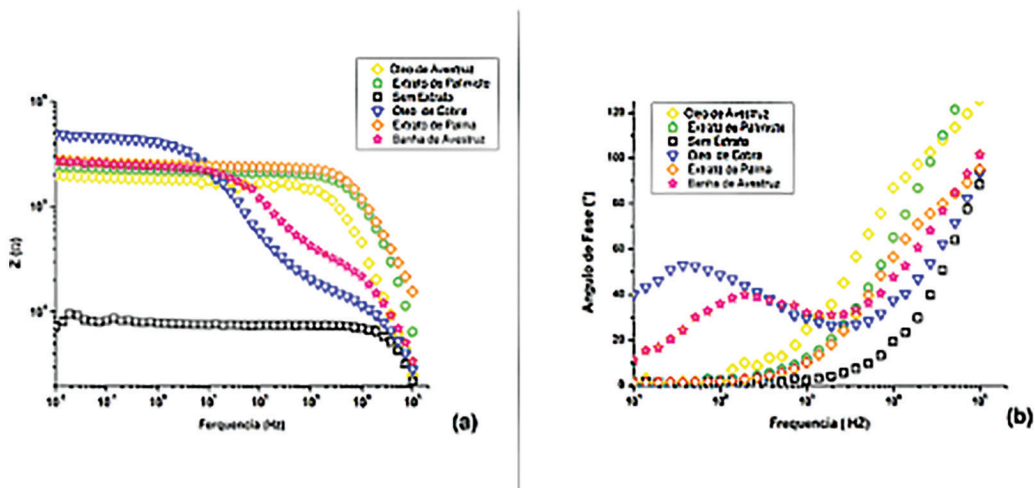


Figura 6: Diagramas de Bode para amostras na presença de Ureia a 3%.

Tabela 5: Dados obtidos das análises de impedância eletroquímica.

EXTRATO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	Rs (Ωcm <sup>2</sup> )	Rct (Ωcm <sup>2</sup> )	fmax (Hz)	Cdl (F.cm <sup>-2</sup> )
Sem Extrato	-----	2.190,41	7.527,85	37.276	6,98
Óleo de Avestruz	23%Ácido Palmítico 40% Ácido Oleico	33.326,72	1,98. 10 <sup>5</sup>	138,95	8,44.10 <sup>-4</sup>
Banha de Avestruz	20%Ácido Palmítico 31% Ácido Oleico	5.661,91	2,78. 10 <sup>5</sup>	71,96	2,64.10 <sup>-4</sup>
Palmiste	47% Ácido Láurico 16% Ácido Oleico	55.723,82	2,41.10 <sup>5</sup>	7.196,96	3,87.10 <sup>-2</sup>
Óleo de Palma	44% Ácido Palmítico 40% Ácido Oleico	20.582,61	2,78.10 <sup>5</sup>	7.196,96	2,79.10 <sup>-2</sup>
Óleo de Cobra	alfa-linolênico	5,70	4,91.10 <sup>5</sup>	7,96	1,62.10 <sup>-5</sup>

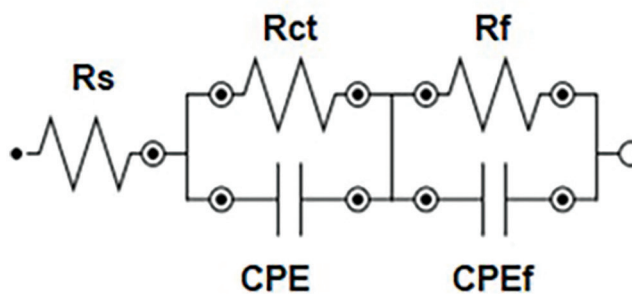


Figura 7: Circuito Elétrico Correspondente aos extratos estudados em Ureia 3%.

Na Tabela 5. são apresentados os parâmetros determinados por EIE para o aço ABNT 1020 em solução de Ureia 3% na ausência e presença dos extratos em estudo. O valor da carga de resistência de transferência (Rct) é maior na presença do óleo de cobra e com os demais extratos há uma tendência ao mesmo comportamento. A diminuição em Cdl pode surgir de uma diminuição em constante dielétrica local e / ou um aumento do valor elétrico espessura de camada dupla que pode surgir da substituição de moléculas de água pré-adsorvidas na interface metal / eletrólito por constituintes orgânicos adsorvidos dos extratos, sugerindo que as moléculas funcionam por adsorção na interface de metal / solução.

A Figura 7 apresenta o circuito elétrico equivalente empregado para investigar os espectros de impedância da análise dos biolubrificantes em estudo na presença da Ureia 3%. Ao analisar o circuito nota-se o surgimento de um filme, que pode ser o próprio extrato aplicado sobre a superfície metálica. Nesse caso a interface

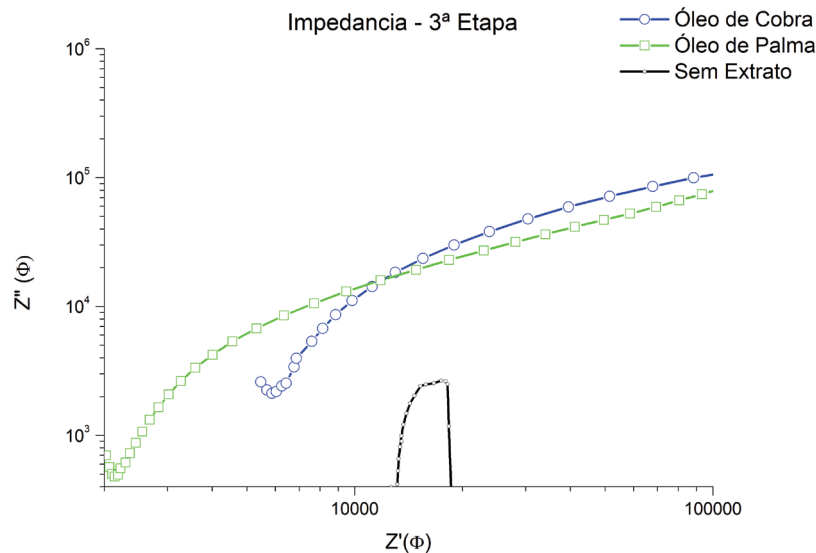


Figura 8: Curvas de Polarização Potenciodinâmica com vários extratos em Ureia 3%.

Tabela 6: Parâmetros eletroquímicos obtidos nos ensaios de polarização com os extratos e Ureia 3%.

EXTRATO	$\beta_a$ (V/dec.)	$\beta_c$ (V/dec.)	$ E_{corr} $ (V)	$i_{corr}$ (A)	TC (mm/ano)	RP ( $\Omega$ )
Sem Extrato	68,39	1,77	0,507	0,639	0,742	11.752
Banha de Avestruz	1,03	12,67	0,135	0,008	0,010	301.010
Óleo de Avestruz	1,59	21,90	0,158	0,019	0,023	206.120
Palmiste	13,32	15,40	0,144	0,012	0,014	253.490
Palma	12,00	12,87	0,123	0,009	0,011	297.890
Cobra	0,59	0,67	0,109	0,003	0,003	546.760

\*  $\beta_a$  = inclinação de Tafel anódica,  $\beta_c$  = inclinação de Tafel catódica,  $E_{corr}$  =Potencial de corrosão,  $i_{corr}$  = corrente de corrosão, TC= taxa de corrosão e RP = existência à polarização. densidades.

eletrodo/solução será representada pelo circuito R(QR)(QR), onde  $R_s$  é a resistência do eletrólito, CPE são os elementos de fase constante e a resistência total  $R_p$  é a soma entre a resistência de transferência de carga  $R_{ct}$  e da resistência do filme  $R_{film}$ . O  $R_{ct}$  representa a interface entre a superfície do aço ABNT1020 e o filme passivo, enquanto  $R_{film}$  a interface entre o filme passivo e a solução de Ureia [27].

### 3.2.2. Medidas de Polarização Potenciodinâmica

As informações obtidas sobre as curvas de polarização foram analisadas com a utilização do programa NOVA. As curvas de polarização anódica e catódica do aço ABNT 1020 em Ureia a 3% sem e com os extratos são apresentado na Figura 8.

As curvas de polarização (Figura 8) com os extratos, mostram uma diminuição considerável das densidades de corrente, bem como das taxas de corrosão. O aumento do potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) indicou que estes compostos levam à formação de um filme protetor passivo na superfície do metal. Esse comportamento segundo STAROSTIN et al. [32] pode ser resultado da adsorção dos inibidores nas regiões catódicas.

Os parâmetros eletroquímicos, como potencial de corrosão ( $E_{corr}$ ) e densidade de corrente de corrosão ( $i_{corr}$ ) foram obtidos pelo Método de Extrapolação de Tafel, a partir da interseção de anódica e catódica das curvas de polarização e estes valores são mostrados na Tabela 6.

Na Tabela 6 observa-se a variação do  $E_{corr}$  e as de corrente do aço 1020 ABNT com os extratos são , respectivamente, 0,1V e 0,01 A, isso, segundo MACIOSK [30], significa um estado de passivação com 10% de ocorrência de corrosão. Ainda, verifica-se que a variação de  $\beta_a$  e  $\beta_c$ , mostra uma adsorção dos extratos em estudos, demonstrando que ocorreu uma modificação no mecanismo de dissolução anódica, uma evolução do hidrogênio catódico, resultando em um cátodo mais polarizado, formando um filme protetor sobre o metal em função das ligações químicas entre o metal e as moléculas orgânicas [34].

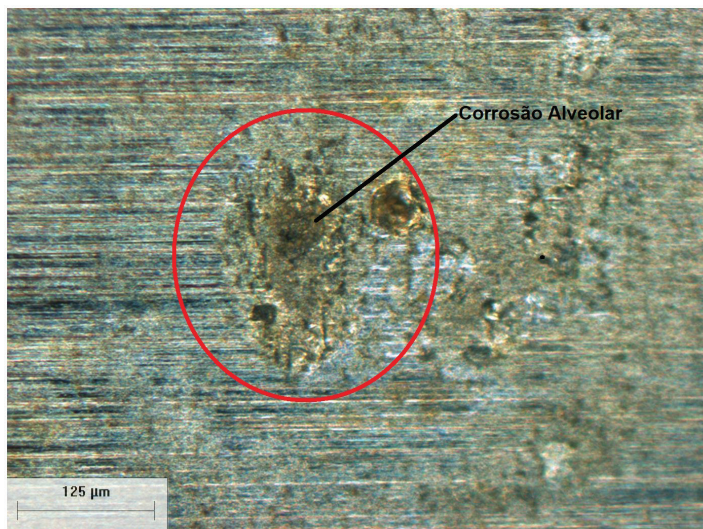


Figura 9: Foto da micrografia do aço sem extrato em ureia 3%.

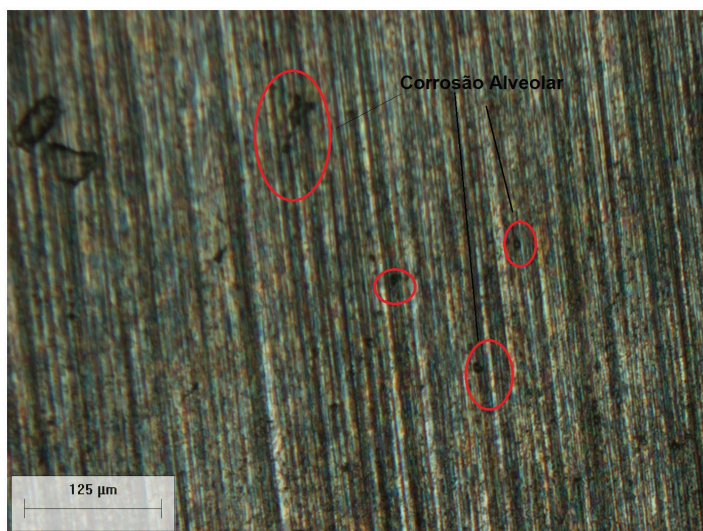


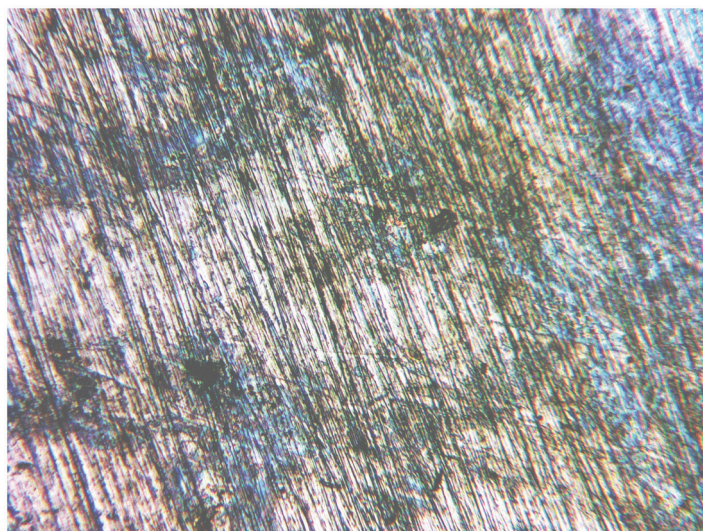
Figura 10: Foto da micrografia do aço com extrato de palma em ureia 3%.

Correlacionando os resultados da corrosão superficial das amostras obtidos a partir das análises micrográficas, é possível verificar o comportamento dos extratos quando aplicado na superfície de um metal submetido a Ureia a 3%, chegou-se a mesma conclusão de que há a formação de um filme protetivo a corrosão.

A Figura 9 mostra a deterioração da superfície do aço ABNT 1020 após os ensaios na ausência de extratos, e as Figuras 10 e 11 indica a formação de um filme pelos extratos de cobra e palma na interface do metal submetido a Ureia 3%.

O comportamento protetivo dos extratos pode estar relacionado a reação dos radicais Carboxila com a ureia, ou seja, a ureia em meio aquoso (3) se decompõe liberando hidroxilas que reagem com  $Fe^{+}$ , provocando corrosão (4). Quando há a presença de extratos, esse se decompõe formando hidroxilas ou cation  $H^{+}$ (5 e 6)





**Figura 11:** Foto da micrografia do aço com óleo de cobra em ureia 3%.

**Tabela 7:** Resultado de Probabilidade de Corrosão do Aço ABNT 1020 em NaCl.

METAL	ELETRÓLITO	EXTRATOS	TAXA DE CORROSÃO	ECORR	ICORR
			(MM/ANO)	(V)	(A)
Aço 1020	NaCl a 3%	Sem	0,088	0,654	0,076
Aço 1020	NaCl a 3%	óleo de Avestruz	0,383	0,522	0,329
Aço 1020	NaCl a 3%	Banha de Avestruz	0,208	0,611	0,179
Aço 1020	NaCl a 3%	Palma	0,005	0,155	0,04
Aço 1020	NaCl a 3%	Palmiste	0,126	0,695	0,108
Aço 1020	NaCl a 3%	Cobra	0,149	0,648	0,128

Como há evolução do hidrogênio catódico, a tendência é ocorrer as reações (7,8 e 9), com formação de uma camada de adsorção do extrato na superfície metálica.



### 3.3. Análise estatística dos resultados

Os resultados do potencial de corrosão para aço ABNT 1020 na presença de eletrólito de NaCl a 3% com e sem aplicação de extratos estão na Tabela 7 e classificados com base na probabilidade de corrosão segundo CAHOON [31], sendo usados para fazer os gráficos das Figuras 12 e 13. Dentre as amostras, a que recebeu o óleo de palma apresenta, estatisticamente, probabilidade de não ocorrer corrosão por apresentar o potencial de corrosão inferior a 0,2 V. Na amostra com palmiste apresentou o potencial de corrosão superior a 0,4 V (corrosiva) e uma densidade de corrosão em torno de 0,1 A (não corrosiva) o que gera uma incerteza e as demais amostras, nessa condição apresentam uma tendência à corrosão.

As Figuras 14 e 15 apresentam os resultados do potencial de corrosão para aço ABNT 1020 na presença do eletrólito de Ureia 3% com e sem aplicação dos extratos em estudo. Os dados foram classificados com base na probabilidade de corrosão apresentada na Tabela 8.

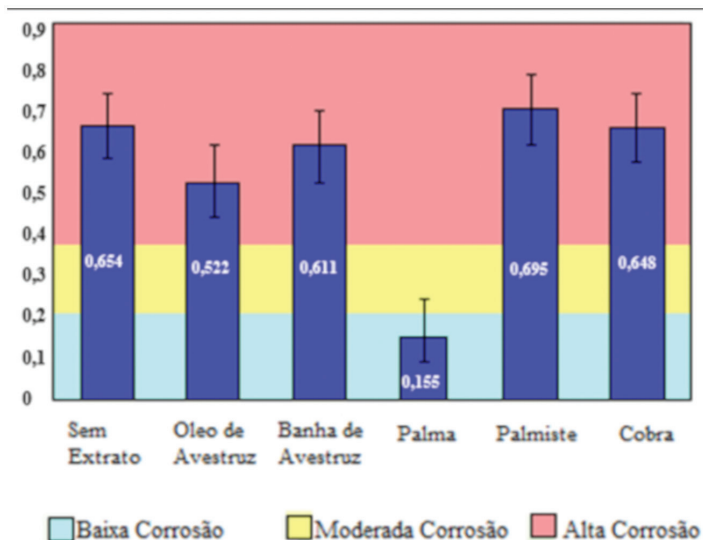


Figura 12: Potencial de Corrosão do Aço ABNT em NaCl 3%.

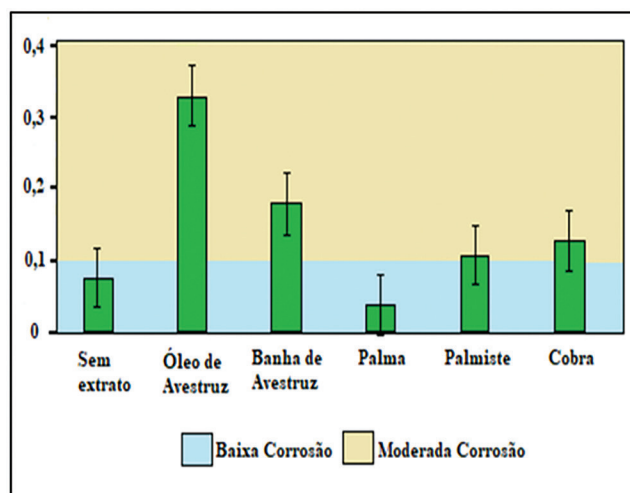


Figura 13: Densidade de Corrosão do Aço ABNT em NaCl 3%.

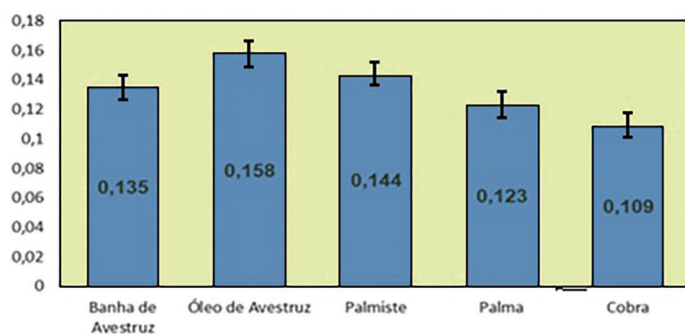


Figura 14: Potencial de Corrosão do Aço ABNT em Ureia 3%.

Todas as amostras que foram submetidas ao eletrólito de Ureia apresentam estatisticamente probabilidade da não ocorrência significativa de corrosão, por apresentarem potencial e densidade de corrosão, inferiores a 0,2 V e 0,1 A, respectivamente, em conformidade aos estudos de Maciosk [30]. A amostras com óleo de cobra e palma apresentam as melhores condições de proteção à corrosão, de acordo com as Figuras 14 e 15. A Figura 16 apresenta

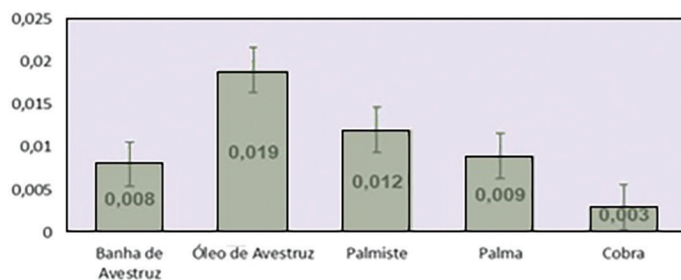


Figura 15: Densidade de Corrosão do Aço ABNT em Ureia 3%.

Tabela 8: Resultado de Probabilidade de Corrosão do Aço ABNT 1020 em Ureia com extratos.

EXTRATO	TAXA DE CORROSÃO	ECORR	ICORR
	(MM/ANO)	(V)	(A)
Banha de Avestruz	0,010	0,135	0,008
Óleo de Avestruz	0,023	0,158	0,019
Palmiste	0,014	0,144	0,012
Palma	0,011	0,123	0,009
Cobra	0,003	0,109	0,003

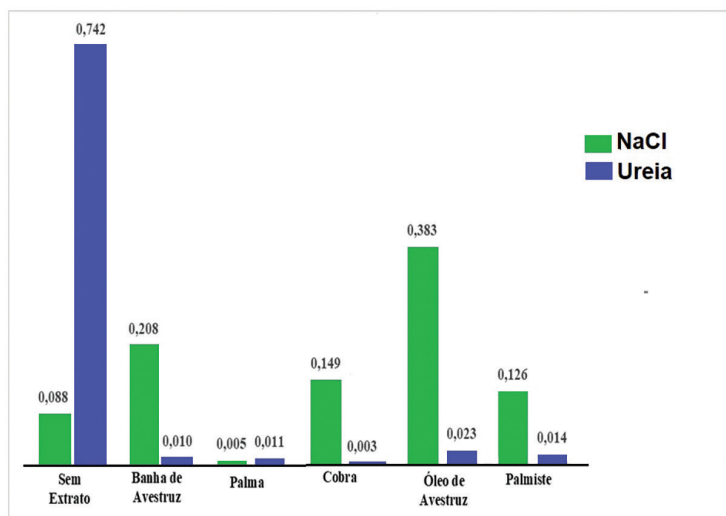


Figura 16: Taxa de Corrosão do aço ABNT 1020 em solução a 3% de NaCl e de Ureia.

uma visão geral do comportamento das taxas de corrosão em todas as situações analisadas nesse trabalho, o que permite, de forma rápida, observar e comparar esses resultados.

Os extratos de origem animal aplicado no aço ABNT 1020 na presença do eletrólito de NaCl a 3% favoreceram o processo corrosivo, mas quando aplicados na superfície metálica em meio a Ureia 3% apresentaram situações de controle do processo corrosivo. A Ureia libera hidroxilas que reagem com os extratos, favorecendo a formação de tensoativos que são adsorvidos na superfície metálica, protegendo-a.

A fim de validar os resultados obtidos, foi realizada a análise estatística pelo Teste de Tukey mostrada na Figura 17. No teste, os intervalos de confiança representam a interação entre duas amostras, caso haja a intersecção entre o intervalo do limite inferior e superior das amostras com o eixo vertical zero, pode-se afirmar que as diferenças entre elas não são significativas.

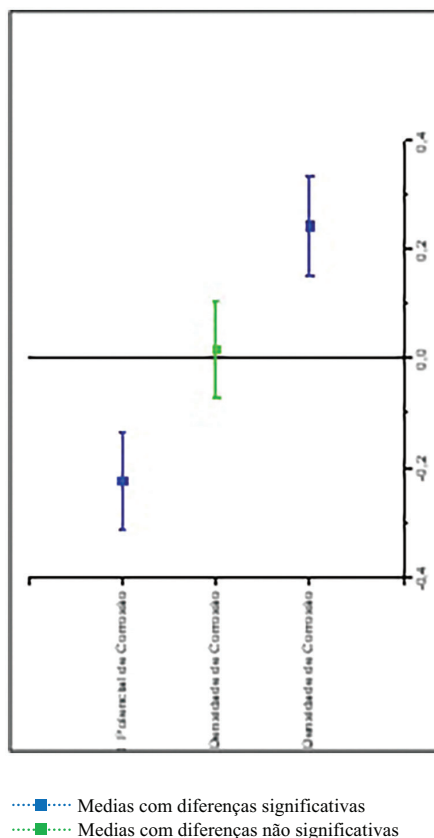


Figura 17: Resultado do Teste de Tukey.

#### 4. CONCLUSÃO

Os extratos de *Struthio Camelus* (avestruz), *Crotalus Durissus* (cobra cascavel) e de *Elaeis Guineensis* (palma e palmiste) em aço carbono retardaram o processo de corrosão em soluções ureia a 3%. Os resultados mostraram a máxima proteção a corrosão com os extratos de *Crotalus Durissus* (cobra cascavel) e de *Elaeis Guineensis* (palma). Por outro lado, dentre as amostras estudadas, o extrato *Elaeis Guineensis* (palma) mostrou o melhor resultado em comparação aos demais em solução de NaCl.

As curvas de polarização Potenciodinâmica para os ensaios com a solução de Ureia, provaram que os extratos em estudo apresentam uma proteção a corrosão do aço carbono através da redução do aço carbono por dissolução anódica.

No teste de impedância, as amostras com extratos apresentaram arcos capacitivos maiores do que a amostra sem a aplicação de extrato, indicando que há presença de moléculas inibidoras que fortalecem o filme inibidor, proveniente da adsorção dos extratos na superfície de aço.

A análise estatística comprova a ocorrência de variação das taxas de corrosão no ensaio com eletrólito de NaCl 3% entre os extratos, e com Ureia essa variação não ocorre.

Vale destacar que o método de polarização linear para medidas da taxa de corrosão se mostrou eficiente e preciso em suas determinações, com boa correlação entre as medidas realizadas do potencial de corrosão e da densidade de corrente. Além disso, pode-se afirmar a importância de realização de mais estudos focados em entender as variáveis que influenciam os processos de corrosão, permitindo, assim, uma melhor previsão da vida útil das estruturas da indústria de fertilizantes.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] SANTO, E.S., “Aço na construção”, *Revista Grandes Construções*, n.79, pp. 16–18, 2017.
- [2] OBOT, I.B., OBI-EGBEDI, N.O., UMOREN, S.A., “Antifungal drugs as corrosion inhibitors for aluminium in 0.1 M HCl”, *Corrosion Science*, v. 51, n. 8, pp.1868–1875, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.05.017>.
- [3] THOMPSON, N.G., YUNOVICH, M., DUNMIRE, D., “Cost of Corrosion and Corrosion Maintenance Strategies”, *Corrosion Reviews*, v. 25, n. 3–4, pp. 247–261, 2007. <https://doi.org/10.1515/CORR-REV.2007.25.3-4.247>.

- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MANUTENÇÃO E GESTÃO DE ATIVOS, *Documento Nacional 2013*. Salvador: ABRAMAN, 2017.
- [5] SASTRI, V., *Green Corrosion Inhibitors: Theory and Practice*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- [6] SUNDARAM, P.K, MANI, I., PARRAY, R.A., “Effect of Urea Ammonium Nitrogen fertilizer on corrosion of different metals”, *International Journal of Chemical Studies*, v. 7, n. 5, pp. 2256–2259, 2019.
- [7] EKER, B., YUKSEL, E., “Solutions to Corrosion Caused by Agricultural Chemicals”, *Trakia Journal of Sciences*, v. 3, n. 7, pp 1–6, 2005.
- [8] BART, J.C.J., GUCCIARDI, E., CAVALLARO, S., *Biolubricants - Science and Technology*. 1 ed. Philadelphia: Woodhead Publishing Series in Energy, 2013.
- [9] PRASANTH, P.K., GOPALA, K.A.G., “Physico-chemical characteristics and nutraceutical distribution of crude palm oil and its fractions”, *Grasas y Aceites*, v. 65, n. 2, e018, 2014. 2014.
- [10] SYAHIR, A.Z., ZULKIFLI N.W.M., MASJUKI, H.H., *et al*, “A review on bio-based lubricants and their applications”, v. 168, pp. 997–1016, 2017. <https://10.1016/j.jclepro.2017.09.106>.
- [11] OCHOLI, O., MENKITI, M., AUTA M., *et al*, “Optimization of the operating parameters for the extractive synthesis of biolubricant from sesame seed oil via response surface methodology”, *Egyptian Journal of Petroleum*, v.27, n.3, pp. 265–275, 2018.
- [12] BELGACEM, M.N., GANDINI, A. *Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources*, Amsterdam: Elsevier, 2008.
- [13] SALIMON, J., SALIH, N., YOUSIF, E., “Biolubricants: Raw materials, chemical modifications and environmental benefits”, *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, v.112, n.5, pp. 519–530, 2010. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200900205>
- [14] PIRES, L., GRISOTTO, M., GRISOTTO, R., “O uso de plantas da Amazônia na produção de bioprodutos para tratamentos de pele”, *Revista de Investigação Biomédica*, v. 9, n.1, pp. 78–88, 2017. <https://doi.org/10.24863/rib.v9i1.91>
- [15] FAYOMI, O.S.I., POPOOLA, A.P.I., “The Inhibitory Effect and Adsorption Mechanism of Roasted *Elaeis guineensis* as Green Inhibitor on the Corrosion Process of Extruded AA6063 Al-Mg-Si Alloy in Simulated Solution”, *Silicon*, v. 6, pp. 137–143, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12633-014-9177-3>
- [16] SALLEH, N.I.H., ABDULLAH, A., “Corrosion Inhibition of Carbon Steel Using Palm Oil Leaves Extract”, *Indonesian Journal of Chemistry*, v. 19, n. 3, pp. 747–752, 2019. <https://doi.org/10.22146/ijc.39707>
- [17] PONPHAIBOON J., LIMMATVAPIRAT, S, CHAIDEDGUMJORN, A., *et al*, “Physicochemical property, fatty acid composition, and antioxidant activity of ostrich oils using different rendering methods”, *Food Science and Technology*, v. 93, pp. 45–50, 2018.
- [18] BASUNY, A.M.M., ARAFAT, S.M., NASEF, S.L., “Utilization of ostrich oil in foods”, *International Research Journal of Biochemistry and Bioinformatics*, v. 2, n. 8, pp. 199–208, 2011.
- [19] FERREIRA, L.S., SANTOS, M.R.P., FIGUEIRA, L.C., *et al*, “Caracterização de óleos vegetais da Amazônia por espectroscopia de absorção” *Scientia Plena*, v. 13, n. 1, 012704, 2017, pp. 1–8. <http://dx.doi.org/10.14808/10.14808/sci.plena.2017.012704>
- [20] OKI, M., ANAWE, P.A.L., “A Review of Corrosion in Agricultural Industries”, *Review Article Physical Science International Journal*, v. 5, n. 4, pp. 216–222, 2015. <https://doi.org/10.9734/PSIJ/2015/14847>
- [21] MOZHEIKO, F.F., POTKINA, T.N., GONCHARIK, I.I., “Effect of inhibitors on corrosion resistance of carbon steel in suspended liquid combined fertilizer”, *Russian Journal of Applied Chemistry*, v. 81, pp. 1705–1709, 2008. <https://doi.org/10.1134/S1070427208090437>
- [22] POORQASEMI, E., ABOOTALEBI, O., PEIKARI, M., *et al*, “Investigating accuracy of the Tafel extrapolation method in HCl solutions”, *Corrosion Science*, v. 51, n. 5, pp. 1043–1054, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.03.001>
- [23] AL-OTAIBI, M.S., AL-MAYOUF, A.M., KHAN, M., *et al*, “Corrosion inhibitory action of some plant extracts on the corrosion of mild steel in acidic media”, *Arabian Journal of Chemistry*, v. 7, n. 3, pp. 340–346, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2012.01.015>
- [24] HUSSIN B., HAZWAN M., Extraction, modification and characterization of lignin from oil palm fronds as corrosion inhibitors for mild steel in acidic solution. Food and Nutrition. These (Docteur Sciences du Bois et des Fibres), Université de Lorraine, Nancy, 2014. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01750984/document>



- [25] DARIVA, C.G., GALIO, A.F., “Corrosion inhibitors—principles, mechanisms and applications”. In: ALIO-FKHAZRAEI, M. (org), *Developments in corrosion protection*, London: IntechOpen, 2014.
- [26] TRZASKA, M., “Studies of Resistance to Corrosion of Selected Metallic Materials Using electrochemical Methods”, In: SHIH, H. (org), *Corrosion Resistance*, London: IntechOpen, 2012.
- [27] SILVA, J. *Principais Métodos de Prevenção de Corrosão*, 2014. <https://pt.slideshare.net/jwps/71601130-principaismetodosdeprevencaodecorrosao>
- [28] CARVALHO, L.A., ANDRADE, A.R., BUENO, P.R., “Espectroscopia de impedância eletroquímica aplicada ao estudo das reações heterogêneas em ânodos dimensionalmente estáveis”, *Química Nova*, v. 29, n. 4, pp. 796–804, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422006000400029>
- [29] MAKHLOUF, A.S.H., “Electrochemical Impedance Spectroscopy Study of the Corrosion Behavior of Some Niobium Bearing Stainless Steels in 3.5% NaCl”, *International Journal of Electrochemical Science*, v. 1, pp. 171–180, 2006.
- [30] MACIOSKI G., SOUZA D.J., BRANDÃO A.P.C., *et al.*, “Análise da corrosão de barras de aço em função da variação do pH do meio”, *Revista ALCONPAT*, v. 6, n. 3, pp. 223–234, 2016.
- [31] CAHOON, J., “Corrosion Characteristics of Mild Steel in Urea Ammonium Nitrate Fertilizer Solutions”, *Corrosion*. v. 58, n. 2, pp. 166–174, 2002. <https://doi.org/10.5006/1.3277317>
- [32] STAROSTIN, M., SHTER, G.E., GRADER, G.S., “Corrosion inhibition of carbon steel in aqueous solution of ammonium nitrate and urea”, *Materials and Corrosion*, v. 65, n. 6, pp. 626–636, 2012. <https://doi.org/10.1002/maco.201206786>
- [33] WOLYNEC, S., *Técnicas Eletroquímicas em Corrosão*, São Paulo: Edusp, 2013.
- [34] AMER, B.A., ABDEL-AZIZ, M.H., EL-ASHTOUKHYA, ES. Z., *et al.*, “Galvanic Corrosion of Steel in Agitated Vessels Used in Fertilizer Industry”, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, v. 53, n. 2, pp. 280–291. 2019. <https://doi.org/10.1134/S0040579519020015>