

APLICAÇÃO DO FILME DE SILANOS VS/GPTMS MODIFICADOS COM A CASCA DO ALHO PARA A PROTEÇÃO CONTRA A CORROSÃO DO AÇO GALVANIZADO

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 08/03/2021

Iago Magella Fernandes Costa Rossi e Silva

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – BA
<http://lattes.cnpq.br/4394828099106755>

Lhaira Souza Barreto

Universidade Federal de Pernambuco
Recife – PE
<http://lattes.cnpq.br/6181792853510077>

Mirian Sanae Tokumoto

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus - BA
<http://lattes.cnpq.br/1369361529712124>

Fernando Cotting

Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte - MG
<http://lattes.cnpq.br/3373558974232568>

Franco Dani Rico Amado

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus – BA
<http://lattes.cnpq.br/3437088948218191>

Vera Rosa Capelossi

Universidade Estadual de Santa Cruz
Ilhéus - BA
<http://lattes.cnpq.br/0713486577039303>

RESUMO: O aço galvanizado é uma liga metálica revestida com zinco que possui diversas aplicações industriais, usualmente

passa por processos de pré-tratamento à base de cromatos ou fosfatos visando uma proteção contra corrosão. Apesar das camadas de conversão obtidas através da cromatização serem conhecidas por sua eficiência, os íons Cr^{+6} possuem alta toxicidade e geram efluentes prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. A partir disso, surge a necessidade de pesquisar métodos alternativos de pré-tratamentos com materiais menos agressivos, naturais e amigáveis ambientalmente. Os silanos organofuncionais são moléculas híbridas e conferem boa resistência à corrosão. Pesquisas indicam que a adição de inibidores verdes nas soluções de silano aumenta o poder inibitório dos filmes. O objetivo dessa pesquisa é avaliar o comportamento do filme de silano obtido por viniltrióxissilano (VS) com γ -glicidoxipropiltrimetoxissilano (GPTMS) modificado com o pó da casca de alho como inibidor de corrosão. A investigação foi realizada utilizando espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) e curvas de polarização potenciodinâmicas, como técnicas de caracterização química e eletroquímica, respectivamente. A análise de FTIR indicou que o espectro do silano (VS+GPTMS) é muito similar ao do silano (VS+GPTMS) modificado com a casca do alho. Os resultados dos ensaios eletroquímicos mostraram que, na presença do modificador, as amostras impediram melhor a penetração do eletrólito. Com isso, conclui-se que a modificação do filme de silano com a casca do alho é promissora, entretanto tempos de contato com o eletrólito maiores devem ser estudados.

PALAVRAS - CHAVE: Aço galvanizado; Pré-tratamento; Silano; Inibidor verde; Casca de alho.

APPLICATION OF SILANE FILM VS/GPTMS MODIFIED WITH GARLIC PEEL FOR PROTECTION AGAINST CORROSION OF GALVANIZED STEEL

ABSTRACT: Galvanized steel is a zinc coated alloy that has several industrial applications, pretreatment processes are required to improve the properties of galvanized steel. Although the conversion layers obtained through chromatization are known for their efficiency, Cr⁺⁶ ions are highly toxic and generate effluents that are harmful to human health and the environment. Therefore, it is necessary to research alternative pretreatment methods with less aggressive, natural, and environmentally friendly materials. The organofunctional silanes are hybrid molecules and provide good resistance to corrosion. Research indicates that the addition of corrosion green inhibitors to silane solutions increases the inhibitory power of films. The objective of this research is to evaluate the behavior of silane film obtained by vinyltriethoxysilane (VS) with γ -glycidoxypropyltrimethoxysilane (GPTMS) modified with the garlic peel powder as a corrosion inhibitor. The investigation was carried out using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and potentiodynamic polarization curves, as chemical and electrochemical characterization techniques, respectively. The FTIR analysis indicated that the spectrum of silane (VS+GPTMS) is like that of silane (VS+GPTMS) modified with garlic peel. The results of the electrochemical tests showed in the presence of the modifier, the samples better prevents the penetration of the electrolyte. It is concluded that the modification of the silane film with the garlic peel is promising, however longer electrolyte contact times should be studied.

KEYWORDS: Galvanized steel; Pretreatment; Silane; Green inhibitor; Garlic peel.

1 | INTRODUÇÃO

A galvanização é uma técnica secular para proteção dos produtos siderúrgicos da corrosão atmosférica de forma eficaz e econômica, ocorre a partir de um banho de imersão a quente zinco fundido ou eletro galvanização para obter um material revestido com uma camada protetora de zinco, resultando no aço galvanizado. Possui um amplo uso na construção civil, na indústria automobilística e de linha branca, bem como em materiais expostos à atmosfera terrestre, como torres de transmissão de energia elétrica. Por sua vasta aplicação, diversas pesquisas estão sendo realizadas para aperfeiçoar as propriedades mecânicas e prolongar a vida útil desse material (SERÉ, P. R. et al., 2018; ZHAOHUA, L. et al., 2018).

Para reduzir a reatividade das superfícies zincadas e aumentar a vida útil desses materiais são usualmente utilizados pré-tratamentos. Os processos mais comuns de pré-tratamentos são o da cromatização e da fosfatização, porém possuem alta toxicidade e geram efluentes prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana. Dessa forma, torna-se necessário o estudo de métodos sustentáveis de pré-tratamentos (AN et al., 2017; LONG;

LIU; PENG, 2021).

Como alternativa para os pré-tratamentos surgiram estudos com silanos, que são moléculas híbridas, funcionais e organofuncionais que atuam como agentes de acoplamento entre materiais orgânicos e inorgânicos, além disso conferem boa resistência à corrosão atuando como uma proteção de barreira física, dificultando a penetração do eletrólito e a difusão do oxigênio na interface do substrato metálico. Muitos estudos citam bons resultados com o uso de silanos na proteção contra a corrosão (FOROOZAN; NADERI, 2015; TAHERI; NADERI, 2018; GARCIA; CASAS; MORALES, 2020).

Na literatura é possível verificar exemplos de trabalhos reportados na área de filmes de silanos modificados com a adição de inibidores de corrosão. Por exemplo, Li et al. (2020) relataram um método para formação de uma superfície hidrofóbica resistente a corrosão na superfície do aço galvanizado a partir do silano viniltrimetoxisilano (VTMS) acrescidos de nitrito de prata e nitrato de cério (III) hexahidratado. Nikpour et al. (2018) avaliaram o desempenho do filme formado a partir da mistura dos silanos metiltriethoxisilano (MTES), γ -glicidoxipropyltrimethoxysilane (GPTMS) e tetraetilortosilano (TEOS) com *Mentha longifolia* na superfície do aço carbono. Hamidon e Hussin (2020) estudaram a resistência à corrosão no aço carbono revestido com filme de silano TEOS e 3-aminopropiltriethoxisilano (APTES) modificado com a cafeína extraída de folhas de chá.

O extrato de casca de alho (*Allium sativum*. L.) foi estudado para possível substituição do benzotriazol (BTAH) na inibição da corrosão do aço carbono ASTM 1020 (CS-1020) em 0,5 mol. L⁻¹ meio de ácido clorídrico. O estudo concluiu que a eficiência de inibição do extrato da casca de alho foi apenas ligeiramente inferior ao BTAH, mostrando que o primeiro inibidor pode ser uma opção ambientalmente correta para inibidores tóxicos (BARRETO et al., 2017).

Em direção a um novo campo de pré-tratamento sustentável a atual pesquisa objetiva avaliar a casca de alho como modificador na obtenção do filme de silano VS com GPTMS na superfície do aço galvanizado em meio salino de cloreto de sódio a 0,1 mol.L⁻¹, para diferentes concentrações do inibidor, por meio das técnicas químicas e eletroquímicas. Apesar da casca de alho ter sua eficiência estabelecida em meio ácido (BARRETO et al., 2017), o presente trabalho estudou um eletrólito neutro, pois pretende-se proteger o substrato de ambientes confinados contendo cloretos.

2 | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

2.1 Obtenção do inibidor

Inicialmente, as cascas de alho foram lavadas em água corrente e secas em estufa na temperatura de 60 °C até obter massa constante. Para reduzir a granulometria, o material seco foi triturado em um moinho de facas e tiveram suas partículas separadas através do sistema de peneiras Tyler, o pó utilizado como inibidor foi o retido na peneira de

fundo após a peneira de 170 mesh.

2.2 Preparação do substrato

As placas de aço galvanizado obtidos por imersão a quente, fornecidas pela USIMINAS (Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais S.A), foram cortados por uma guilhotina em corpos de prova (CP) de 15 mm x 20 mm x 0,9 mm. Depois disso, os CPs foram limpos com algodão e álcool etílico, secos com soprador térmico e levados para melhor limpeza de sua superfície irregular em banho ultrassônico por 10 min, e secos novamente. Em seguida, os CPs foram levados para remoção de gorduras e óleos sendo imersos em uma solução desengraxante alcalina Saloclean N667 na concentração de 50 g.L⁻¹, a 55°C e sob agitação durante 10 min. Após o desengraxe, os CPs foram lavados com água destilada para remoção da solução desengraxante e secos com soprador térmico.

2.3 Formação do filme

Os filmes foram preparados a partir da adição de 4% da mistura 1:1 (m/m) dos silanos VS e GPTMS na solução solvente de água/etanol (50 % m/m). Essa solução alcoólica teve seu pH ajustado para 4 com ácido acético glacial, em seguida adicionou-se o inibidor em diferentes concentrações (1,44 g.L⁻¹; 1,77 g.L⁻¹; 2,11 g.L⁻¹) para encaminhar ao banho ultrassônico por 10 min, depois disso foram adicionados os silanos e levada à hidrólise sob agitação magnética por 60 min. Após o tempo de hidrólise os CPs foram imersos por 2 min na solução de silanos na ausência e presença de inibidor em diferentes concentrações, e depois levados para cura em estufa à temperatura de 150 °C por 120 min.

2.4 FTIR

As análises por espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) foram obtidas na faixa média de comprimento de onda de 4000 a 400 cm⁻¹ a uma resolução de 4 cm⁻¹, utilizando um espectrômetro Thermo Scientific TM Nicolet TM is10. As amostras foram preparadas em lâminas de vidro, o filme formado foi raspado e utilizado em pastilhas de KBr.

2.5 Ensaios eletroquímicos

Os ensaios eletroquímicos foram realizados em uma célula eletroquímica de três eletrodos com NaCl 0,1 mol.L⁻¹ como eletrólito, sendo: o eletrodo de trabalho o CP com 1 cm² de área exposta, Ag|AgCl|KCl sat como eletrodo de referência e contra eletrodo de titânio revestido com ródio. Os ensaios foram feitos em triplicatas a temperatura ambiente de 25 °C.

As medidas eletroquímicas das amostras sem inibidor e com inibidor nas concentrações estudadas foram realizadas por um potenciostato/galvanostato Metrohm Autolab modelo PGSTAT302N com software NOVA 2.1.4. Primeiramente ocorreu o ensaio de monitoramento de potencial de circuito aberto (OCP) durante 90 minutos, tempo necessário para estabilização do potencial de eletrodo. Logo após, obteve-se as medidas

de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE), em um intervalo de frequência de 100 kHz a 10 mHz com 10 pontos/década e amplitude de perturbação de 10 mV (rms). Depois disso, as curvas de polarização potenciodinâmicas foram obtidas no intervalo de sobretensão de -250 mV a +250 mV em relação ao OCP, com velocidade de varredura em $0,5 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$. Os dados foram tratados e ajustados com auxílio do software Origin 8.0.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Estudos espectrais do FTIR foram realizados para determinar os grupos funcionais presentes na casca do alho, no filme de silano (VS+GPTMS) e no filme de silano (VS+GPTMS) modificado com o pó da casca do alho.

3.1.1 FTIR da casca do alho

A figura 1 apresenta o espectro FTIR da casca do alho, em 3421 cm^{-1} , o estiramento característico de ligação O-H e/ou NH como as existentes em grupos fenólicos (ALANEME et al., 2015). Outras bandas importantes neste espectro são a de 1734 cm^{-1} (C = O), e aquelas entre 1325 cm^{-1} e 1636 cm^{-1} , correspondendo a compostos orgânicos contendo nitrogênio e enxofre. Outras bandas específicas atribuídas a compostos contendo enxofre também foram detectadas em 720 cm^{-1} (CS), 1061 cm^{-1} (S = O) e em 1235 cm^{-1} (SS).

O espectro do FTIR do pó da casca do alho evidenciou a presença de alguns compostos com propriedades antioxidantes, a saber: enxofre e nitrogênio. A presença desses átomos pode favorecer a adsorção de moléculas orgânicas às superfícies metálicas potencializando suas propriedades inibidoras (ZUCCHI et al., 1985; RAJAM; RAJENDRAN; SARANYA, 2013; BARRETO et al., 2017).

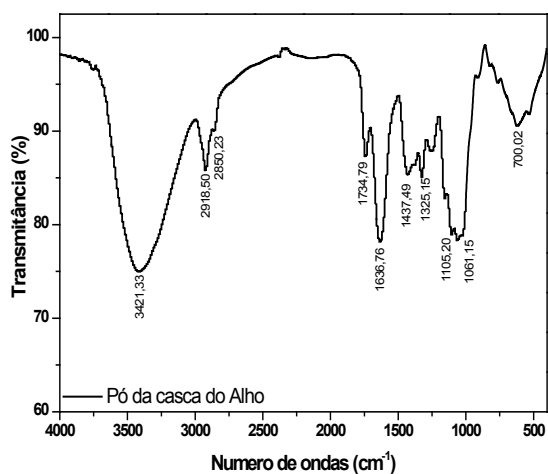


Figura 1 – Espectro FTIR do pó da casca do alho.

3.1.2 FTIR do filme de silano (VS+GPTMS) e Espectro FTIR do no filme de silano (VS+GPTMS) modificado com o pó da casca do alho.

A figura 2 apresenta os espectros no infravermelho para os filmes de silano VS+GPTMS, e também para os filmes modificados com 1,44 g.L⁻¹ do pó da casca do alho. Avaliando os espectros do infravermelho (Figura 2) nota-se que as amostras modificadas ou não com o pó da casca do alho, apresentam bandas de absorção no mesmo número de onda, indicando que os filmes obtidos possuem estrutura química semelhantes.

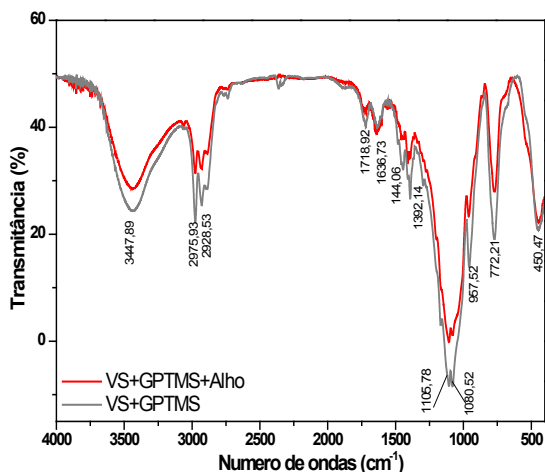


Figura 2 – Espectro FTIR do filme de silano (VS+GPTMS) e Espectro FTIR do no filme de silano (VS+GPTMS) modificado com o pó da casca do alho.

A presença da banda em torno de 1080 cm^{-1} corresponde ao estiramento Si-O das ligações siloxano (Si-O-Si), e caracterizam a presença das redes siloxanos nos filmes (OOIJ *et al.*, 2005). Em 957 cm^{-1} indica a presença de grupo Si-OH devido à presença de silanóis produzidos na hidrólise do silano e não condensação de todos eles. Em 1392 cm^{-1} encontra-se a banda característica dos dobramentos CH_2 e CH_3 e em 2975 cm^{-1} uma banda de estiramento C-H. A banda em 1603 cm^{-1} é característica do grupo vinil (C=C), ou seja, corresponde a deformação axial do C=C-H (OOIJ *et al.*, 2005; SANTOS *et al.*, 2020). A banda larga em 3440 cm^{-1} é característica da deformação axial OH das ligações Si-OH que de grupos que não foram reticuladas no processo de obtenção do filme (AQUINO, 2006).

Nota-se que o espectro do silano é muito parecido com o espectro do silano modificado com a casca do alho, o que indica que o sinal do silano foi mais forte, possivelmente por ele ser mais absorvente que o pó da casca do alho ou por estar em quantidade maior na proporção silano – alho, além das ligações entre os elementos no silano e no alho serem parecidas. No espectro do silano modificado com a casca do alho nota-se uma pequena diminuição de intensidade nas bandas referentes as ligações siloxano (Si-O-Si), como o revestimento de silano oferece proteção por barreira e essas ligações devem garantir uma reticulação adequada do filme para a formação de uma densa camada, a eficiência do revestimento diminuída, com o aumento da concentração, nos resultados do EIE pode ser justificada.

3.2 Espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE)

A Figura 1 apresenta os diagramas de impedância para o aço galvanizado pré-tratado com VS e GPTMS (VS+GPTMS) e para a mistura de silano na presença das diferentes concentrações de pó da casca de alho: $1,44\text{ g.L}^{-1}$; $1,77\text{ g.L}^{-1}$; $2,11\text{ g.L}^{-1}$.

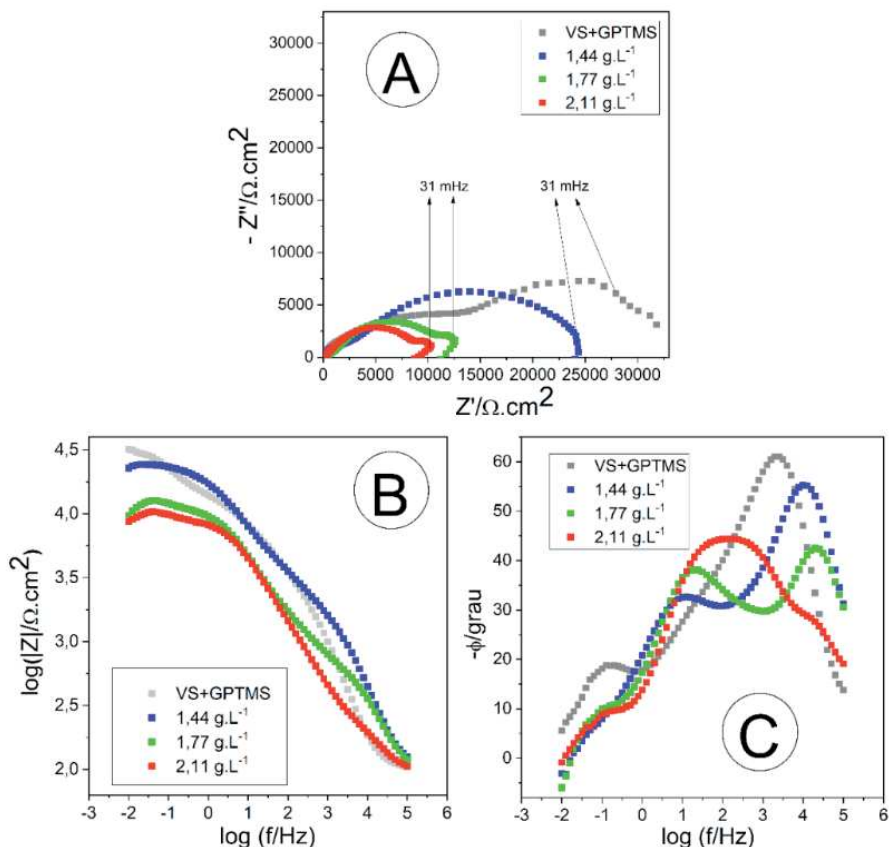


Figura 3 – Diagramas de Nyquist (A), Bode módulo de impedância (B) e Bode ângulo de fase (C), para amostras na ausência e presença das diferentes concentrações de pó da casca de alho no filme de silano VS+GPTMS.

Na Figura 3A, observa-se que o maior valor de impedância real (Z') obtida foi para a amostra na ausência de pó da casca de alho, conforme aumentou a concentração do pó a impedância diminuiu. No entanto, na Figura 3B, nota-se que o valor do módulo de impedância das amostras VS+GPTM e $1,44 \text{ g.L}^{-1}$ são muito próximos em toda faixa de frequências analisada, indicando que o comportamento eletroquímico das duas amostras é muito similar.

Pelos diagramas ângulo de fase x log frequência (Figura 3C), pode-se visualizar que todas as amostras contendo o inibidor de corrosão não apresentaram a constante de tempo relativa aos fenômenos interfaciais metal/eletrólito na região de baixas frequências ($< 10\text{Hz}$). Por outro lado, a constante de tempo relacionada aos fenômenos interfaciais metal/eletrólito da amostra VS+GPTMS pode ser identificada, revelando que o eletrólito permeou o filme no tempo de imersão do ensaio. Este contato do eletrólito com o substrato de zinco formou o carbonato básico de zinco, que modifica o comportamento eletroquímico do sistema e

aumenta a impedância total do mesmo, assim como observado no trabalho de Paswan et al., (2020) e Kaleva et al., (2020). Esse efeito pode ser comprovado pelos maiores valores de impedância da amostra VS+GPTMS nas regiões de média a baixas frequências, porém em altas frequências (região de resposta do filme) possui valores inferiores de impedância do que as amostras 1,44 g.L⁻¹ e 1,77 g.L⁻¹. A partir dessas observações, pode-se dizer que todos os sistemas contendo o inibidor de corrosão apresentaram um resultado satisfatório, pois não permitiram o contato do eletrólito com o substrato no tempo estudado.

3.3 Curvas de Polarização

As curvas de polarização potenciodinâmicas estão apresentadas na Figura 5.

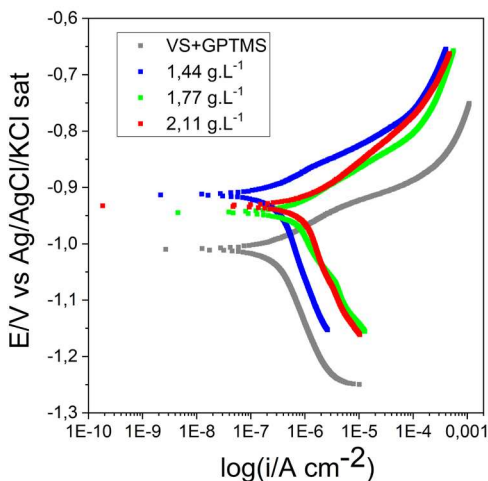


Figura 5 – Curvas de polarização potenciodinâmicas (Tafel) obtidas para as amostras com filme de silano na ausência do pó da casca de alho e para as diferentes concentrações adicionadas no filme.

Observa-se na Figura 5 que a amostra que não foi modificada com o pó da casca de alho apresenta correntes de corrosão anódicas maiores do que os sistemas contendo o inibidor de corrosão. Esse resultado pode ser relacionado com o que foi observado nos ensaios de EIE, pois quando há o contato entre o eletrólito e o substrato metálico, a corrente anódica resultante é maior do que a corrente resultante da interface eletrólito/filme, já que a resistência à transferência de carga do filme é superior. Por outro lado, a formação do produto de corrosão do zinco, resultou em correntes catódicas menores para a amostra VS+GPTMS, pois o carbonato de zinco é capaz de bloquear os sítios catódicos da superfície, enquanto o oxigênio é reduzido livremente nas amostras em que o filme está intacto.

Observando as curvas de polarização, pode-se afirmar que os filmes de silano contendo inibidor possuem uma resistência à polarização anódica superior ao filme sem

inibidor em toda faixa de potencial aplicado (RAJAM; RAJENDRAN; SARANYA, 2013).

4 | CONCLUSÕES

O estudo indica que para a metodologia apresentada de adição do pó da casca de alho na formação do filme de silano há melhoria na atividade anticorrosiva, uma vez que o desempenho eletroquímico das amostras com inibidor é superior ao da amostra sem inibidor. No entanto, um tempo maior de imersão deve ser estudado, para que o comportamento cinético desses filmes possa ser avaliado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESB (PET0015/2016) pelo financiamento do projeto, CAPES, CNPq e FAPESB pelas bolsas de Mestrado e Iniciação Científica, UESC (Universidade Estadual de Santa Cruz) e LAMMA (Laboratório de Materiais e Meio Ambiente) pela infraestrutura, BIOMA (Bioenergia e Meio Ambiente) pelas análises de FTIR.

REFERÊNCIAS

ALANEME, K. K.; DARAMOLA, Y. S.; OLUSEGUN, S. J.; AFOLABI, A. S. Corrosion Inhibition and Adsorption Characteristics of Rice Husk Extracts on Mild Steel Immersed in 1M H₂SO₄ and HCl Solutions. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 10, p. 3553-3567, 2015.

AN, K. et al. Effect of Phosphating and Post-sealing on the Corrosion Resistance of Electro - galvanized steel. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 12, p. 2102–2111, 2017.

AQUINO, I. P. **Caracterização da superfície do aço-carbono ABNT 1008 revestida com organossilanos por meio de técnicas eletroquímicas e físico-químicas**. Dissertação Mestrado em Engenharia. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2006.

BARRETO, L. S.; TOKUMOTO, M. S.; GUEDES, I. C.; DE MELO, H. G.; AMADO, F. D. R.; CAPELOSSI, V. R. Evaluation of the anticorrosion performance of peel garlic extract as corrosion inhibitor for ASTM 1020 carbon steel in acidic solution. **Revista Matéria**, vol. 22, p. 11852, 2017.

BERA, S. et al. Water-based & eco-friendly epoxy-silane hybrid coating for enhanced corrosion protection & adhesion on galvanized steel. **Progress in Organic Coatings**, v. 101, p. 24-44, 2016.

CAPELOSSI, V. R.; AOKI, I. V. Influence of sonication on anticorrosion properties of a sulfursilane film doped with Ce (IV) on galvanized steel. **Progress in Organic Coatings**, v. 76, n. 5, p. 812–820, 2013.

COSTA, J. G. R.; SILVA, K. G.; AMADO, F. D. R.; CAPELOSSI, V. R.; COTTING, F.; AOKI, I. V. (2019). Avaliação da resistência à corrosão do filme de silanoviniltrimetoxissilano modificado com íons Ce (III) e Ce (IV) como pré-tratamento do aço carbono. **Revista Matéria (Rio de Janeiro)**, vol. 24, p. 12457, 2019.

- FOROOZAN, E. A.; NADERI, R. Effect of coating composition on the anticorrosion performance of a silane sol-gel layer on mild steel. **Royal Society of Chemistry Advances**, v. 5, n. 129, p. 106485–106491, 2015.
- GARCIA, A. A.; CASAS, A. G.; MORALES, A. J. The effect of the organosilane content on the barrier features of sol-gel anticorrosive coatings applied on carbon steel. **Progress in Organic Coatings**, v. 139, 2020.
- HAMIDON, T. S.; HUSSIN, M. H. Susceptibility of hybrid sol-gel (TEOS-APTES) doped with caffeine as potent corrosion protective coatings for mild steel in 3.5 wt .% NaCl. **Progress in Organic Coatings**, v. 140, p. 105478, 2020.
- KALEVA, A. et al. Formation of corrosion products on zinc in wet supercritical and subcritical CO₂: In-situ spectroscopic study. **Corrosion Science**, v. 174, p. 108850, 2020.
- LI, C. et al. Superhydrophobic surface containing cerium salt and organosilane for corrosion protection of galvanized steel. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 825, 2020.
- LONG, Y.; LIU, C.; PENG, S. Enhanced performance of a green inorganic-based passive film on the batch hot-dip galvanized steel by organic additives. **International Journal of Electrochemical Science**, v15, p. 2568-2580, 2020.
- NIKPOUR, S.; NADERI, R.; MAHDAVIAN, M. Fabrication of silane coating with improved protection performance using Mentha longifolia extract. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 88, p. 261–276, 2018.
- PASWAN, S.; SINGH, J. K.; SINGH, D. D. N. Effect of lead alloying on corrosion characteristics of galvanized coatings exposed in atmosphere, simulated laboratory and a service environment. **Surfaces and Interfaces**, v. 21, p. 100752, 2020.
- RAJAM, K., RAJENDRAN, S., SARANYA, R. Allium Sativum (Garlic) Extract as Nontoxic Corrosion Inhibitor. **Journal of Chemistry**, p. 743-807, 2013.
- RAMEZANZADEH, B.; ALIBAKHSHI, E.; GHASEMI, E.; MAHDAVIAN, M. A comparative study on corrosion inhibitive effect of nitrate and phosphate intercalated Zn-Al-layered double hydroxides (LDHs) nanocontainers incorporated into a hybrid silane layer and their effect on cathodic delamination of epoxy topcoat. **Corrosion Science**, v. 115, p. 159-174, 2017.
- SANTOS, T. S. dos; COTTING, F.; CAPELOSSI, V. R. Estudo das condições de obtenção do filme viniltrióxido de silano na proteção contra a corrosão do aço galvanizado. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro , v. 25, n. 2, e-12652, 2020 .
- SERÉ, P. R. et al. Preparation and Characterization of Silanes Films to Protect Electroplated Steel. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 27, p. 1194-1202, 2018.
- SOUZA, K. G. DA S. et al. Study of the wettability and the corrosion protection of the hybrid silane (3-aminopropyl) triethoxysilane (aptes) and (3-glycidioxypropyl) trimethoxysilane (gptms) film on galvanized steel. **Revista Materia**, v. 25, n. 2, p. 1–18, 2020.

SUEGAMA, P. H.; MELO, H. G.; BENEDETTI, I. V.; AOKIA, I. V. Influence of cerium (IV) ions on the mechanism of organosilane polymerization and on the improvement of its barrier properties. **Electrochimica Acta**, 2009.

TAHERI, M.; NADERI, R. Enhancement of corrosion resistance of mild steel in NaCl solution with an eco-friendly silane coating containing nanoclay and zinc acetylacetonate. **Pigment & Resin Technology**, v. 47, n.5, p. 424-430, 2018.

VAN OOIJ, W. J.; ZHU, D.; STACY, M.; SETH, A.; MUGADA, T.; GANDHI, J.; PUOMI, P. Corrosion Protection Properties of Organofunctional Silanes - An Overview. **Tsinghua science and technology**. v.10, n 6, p. 639-664, 2005.

ZHAOHUA, L. et al. Electrochemical Corrosion Behavior of Chromium-Free Composite Passivation Film on Galvanized Steel. **International Journal of Electrochemical Science**, v.13, p. 6473-6483, 2018.

ZUCCHI, F., OMAR, IH, "Estudos sobre o efeito inibidor do extrato de *Occimum viridis* na corrosão ácida do aço macio», **Surface Technology**, v.24, n. 4, p. 391, 1985.