

O efeito da adição de inibidores de corrosão em filmes a base de monosilanos na ação protetora ao aço carbono

N. F. Daudt*, T. L. Menezes, J. Z. Ferreira

Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais - LACOR – DEMAT/EE/UFRGS

CEP: 91501-970, Porto Alegre, RS

(Recebido em 27/01/2012; revisado em 10/08/2012; aceito em 01/05/2013)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

Este estudo foi proposto com o intuito de investigar o efeito da adição de inibidores de corrosão em filmes de monosilanos na ação protetora ao aço carbono. Para tal, substratos de aço AISI 1010 foram revestidos com filmes de cromato e monosilanos composto por uma camada dupla, sendo a primeira formada pelo silano VS (vinyltriethoxysilane) e a segunda pelo GPTMS (glycidoxypropyltrimethoxysilane) com e sem a adição de inibidores de corrosão. Os inibidores de corrosão utilizados foram: CeCl_3 e CrO_3 . As camadas de silano foram obtidas por imersão na solução do silano. Os resultados de polarização e de espectroscopia de impedância eletroquímica mostraram que a adição de CeCl_3 e a silanização após a cromatização foram eficazes, uma vez que houve uma tendência ao aumento da resistência à corrosão do substrato. Com as análises feitas por microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva e analisou-se a uniformidade do filme e detectou-se a presença de silício na superfície do substrato. Os ensaios de corrosão acelerada em câmara úmida não foram significativos devido à baixa espessura dos filmes e sua afinidade com a água. Os revestimentos a base de silano revelam-se promissores para a substituição de tratamentos convencionais como a fosfatização e a cromatização e adição de inibidores de corrosão tende a melhorar a proteção contra corrosão conferida ao substrato pelo filme de silano.

Palavras-chave: Silanos; inibidores de corrosão; CeCl_3 ; proteção contra a corrosão.

Abstract:

The purpose of this study is to investigate the effect of corrosion inhibitors addition in monosilanes films on corrosion resistance of steel. The steel substrates were coated by a double monosilane layer, with and without corrosion inhibitors and chromated. The silanes used in this study were: VS (vinyltriethoxysilane) and GPTMS (glycidoxypropyltrimethoxysilane). The corrosion inhibitors used were: CeCl_3 and CrO_3 . CeCl_3 was added to VS. CrO_3 was added to GPTMS and before the silanization by immersion in chromated solution. The silane layers were obtained by dip-coating method. The Electrochemical Impedance Spectroscopy and polarization results proved the CeCl_3 addition in the silane layer and the silanization on chromated steel suggested that the corrosion resistance of steel substrate increased. The Energy Dispersive Spectroscopy analysis detected Si presence on the substrates coated by silanes layers. The corrosion measurements obtained into a humid chamber were not significant due to the lower thickness and affinity with water of silane films. The silane coatings are promising alternative in order to replacement the conventional treatments such as phosphate and chromate. The corrosion inhibitors addition tend to improve the corrosion protection of steels coated by silanes films.

Keywords: Silanes; corrosion Inhibitors; CeCl_3 ; corrosion protection.

1. Introdução

Os silanos são muito conhecidos pela sua ampla utilização como agentes de acoplamentos em materiais compostos através da sua interface orgânica – inorgânica.

Os pré-tratamentos a base de silanos têm mostrado resultados promissores atraindo também a atenção da indústria nos últimos anos, pois os silanos melhoram a proteção temporária contra corrosão do substrato e contribuem para a aderência de revestimentos orgânicos

aplicados posteriormente. Além disso, causam um menor impacto ambiental se comparados aos tratamentos convencionais de cromatização e fosfatização [1].

A partir da década de 90, há um crescente número de publicações de trabalhos que utilizam revestimentos protetores contra corrosão a base de silanos. Muitos pesquisadores citam terem obtido bons resultados utilizando organosilanos na proteção contra corrosão de diferentes substratos. Palanivel [2] obteve resultados satisfatórios usando silanos acrescidos de inibidores de corrosão sobre uma liga de

*Email: daudt.natalia@gmail.com (N. F. Daudt)

alumínio e Montemor [3] obteve resultados positivos com filmes de bissilanos acrescidos de sais de cério e nanopartículas de SiO_2 sobre o aço galvanizado. Ainda há bons resultados de silanos revestindo: cobre [4], aço comum [5], zinco [6] e ligas de magnésio [7].

O mecanismo de proteção do silano é relativamente simples, pois não envolve proteção eletroquímica, a proteção ocorre através de uma barreira física. O silano forma um filme denso e aderente ao substrato que retarda a corrosão, impedindo a passagens de íons do meio para o substrato metálico. Assim, o filme age como uma barreira hidrofóbica [8].

Cabral e colaboradores [9] obtiveram um filme de bissilano eficiente na proteção contra a corrosão de aço galvanizado e ligas de alumínio por um maior tempo com a adição de nitrato de cério. Isto é justificado pelo decréscimo na porosidade do filme e pela ação dos íons de Ce^{3+} como inibidores de corrosão. Segundo Palanivel [2], os sais de cério conferem capacidade de auto-cura ao filme de silanos, já que esses atuam como reservatórios do inibidor de corrosão liberando-o quando necessário.

Suegama e colaboradores [10] obtiveram um filme de bissilano dopado com íons de Ce^{4+} sobre o aço carbono, que apresentou uma melhor resistência à corrosão, um melhor acabamento e uma maior espessura se comparado ao filme apenas de bissilano. O mecanismo de proteção envolve a liberação de íons Ce^{3+} .

Neste sentido, o objetivo desse trabalho é estudar a influência da adição de inibidores de corrosão, CeCl_3 e CrO_3 em filmes de monossilanos sobre o aço carbono AISI 1010, avaliando a influência na propriedades anticorrosivas do filme, bem como na sua homogeneidade. Para tal, foram obtidos filmes de cromato e de monossilanos composto por uma camada dupla, sendo a primeira formada pelo silano VS e a segunda pelo GPTMS, e adicionado os inibidores de corrosão as camadas de silano.

2. Materiais e Métodos

Os corpos de prova utilizados foram chapas de aço carbono AISI 1010 com dimensões de 60 x 25 x 1,5 mm. As amostras foram imersas em uma solução ácida para a decapagem e em uma solução de desengraxante alcalino. Elas foram mantidas na solução desengraxante até sua utilização para remover as sujeiras do manuseio e garantir a presença de radicais OH na superfície. Os monossilanos utilizados foram VS - Viniltrióxissilano (Z-6518) – funcional, formador de rede [11] e GPTMS - Glicidoxipropiltrimetoxissilano (Z-6040) – funcional [12]. O VS possui um grupo vinil e o GPTMS possui um grupo epóxi. O VS, segundo o fabricante, é um bom formador de rede, por isso foi utilizado para formar a camada base.

Para elaboração das soluções de silano foi utilizada água deionizada, ácido acético p.a. (Synth) e etanol p.a. (Synth). Primeiramente, foi elaborada a mistura 50% em volume de água e etanol. O pH foi ajustado com ácido acético para 4,0 e 4,5, foi adicionado 2% em volume de silano. A solução de VS foi hidrolizada por 20 minutos e a solução de GPTMS foi

hidrolizada por 30 minutos. As soluções foram hidrolizadas na temperatura ambiente, utilizando agitação magnética.

O cloreto de cério (CeCl_3) e o ácido crômico (CrO_3) foram utilizados como inibidores de corrosão. O CeCl_3 foi adicionado à solução do silano VS antes da hidrólise na proporção de 13g/l de solução. O CrO_3 foi adicionado à solução do silano GPTMS antes da hidrólise na proporção de 0,5g/l. O cloreto de cério foi adicionado ao silano formador de rede, VS, para garantir que este entrasse em contato com o metal, funcionando como inibidor de corrosão.

A solução cromatizante foi preparada utilizando água deionizada, ácido crômico e ácido fosfórico, nas seguintes proporções 0,5 g/l de CrO_3 e 0,5 g/l de H_3PO_4 . A solução passou por 15 minutos de agitação magnética a 80 °C. As chapas de aço foram imersas na solução por alguns segundos. Depois de retiradas da solução foram secas ao ar. Algumas chapas foram silanizadas com dupla camada de monossilanos após a cromatização.

As chapas de aço foram imersas na solução de silano sob agitação por 2 minutos, seguindo o esquema da Figura 1.

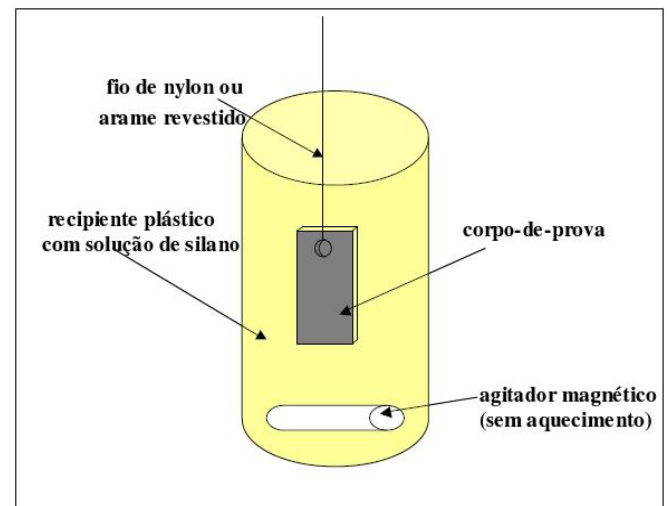


Figura 1. Representação esquemático método de imersão dos corpos-de-prova na solução de silano. Adaptado de Oliveira [13].

As camadas de silano foram curadas em um forno resistivo a 150 °C. A camada do monossilano VS permaneceu no forno por 10 minutos e a camada de GPTMS por 30 minutos.

Para o levantamento das curvas de polarização foi utilizada uma solução de NaCl 0,1 M na temperatura ambiente. As medidas foram obtidas em um potenciostato PGSTAT302[®] da AUTOLAB[®], com velocidade de varredura de 0,001V/s. A célula eletroquímica foi composta por três eletrodos: um fio de platina como contra-eletrodo, como eletrodo de referência foi utilizado um eletrodo de calomelano saturado com KCl (ECS) e o corpo de prova com área delimitada em 1 cm^2 foi utilizado como eletrodo de trabalho.

As medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica foram obtidas no potencial de circuito aberto na faixa de frequências de 40 MHz – 10 mHz com dez pontos

por década logarítmica utilizando um PGSTAT302[®] da AUTOLAB[®]. A amplitude do potencial de perturbação utilizado foi de 10 mV_{rms}. A célula eletroquímica, composta por três eletrodos foi a mesma utilizada para os ensaios de polarização. Os espectros foram obtidos em uma solução de NaCl 0,1 M na temperatura ambiente, após 5 minutos, 1 hora, 24 horas, 48 horas, 72 horas e 144 horas de imersão da amostra na solução. Os dados foram coletados através do software Frequency Response Analyser (FRA) também da AUTOLAB[®]. Os gráficos foram plotados na forma de diagrama de Nyquist.

O ensaio de câmara úmida saturada simula uma atmosfera com altíssima umidade e alta temperatura. O ensaio foi conduzido de acordo com as normas NBR 10443 e ASTM 2247. Segundo a qual os resultados são classificados em V0 (amostra sem corrosão), V1 (amostra com corrosão em pontos em áreas localizadas), V2 (amostra com corrosão em pontos em geral), V3 (amostra com corrosão em áreas localizadas), V4 (amostra com corrosão parcial) e V5 (amostra com corrosão total). As amostras ficaram expostas por 48h.

As amostras silanizadas foram metalizadas com platina e submetidas à análise pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise elementar por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura JEOL - JSM 5800.

Para a descrição dos resultados foi utilizada a seguinte nomenclatura: VS + GPTMS para aço revestido com VS como primeira camada e GPTMS como segunda; VS + CeCl₃ + GPTMS para o aço revestido com VS dopado com CeCl₃ como primeira camada e GPTMS como segunda; VS + GPTMS + CrO₃ para o aço revestido com VS como primeira camada e GPTMS dopado com CrO₃ como segunda; *cromatizado* para o aço apenas cromatizado; e *cromatizado* + VS + GPTMS para o aço cromatizado e depois silanizado com VS como primeira camada e GPTMS como segunda camada.

3. Resultados e Discussão

3.1. Curvas de Polarização

A Figura 2 apresenta as curvas de polarização anódica e catódica para os sistemas estudados. Dentre as quais destacam-se as curvas do aço revestido com VS + CeCl₃ + GPTMS, e a do aço cromatizado + VS + GPTMS.

A curva obtida para o aço revestido com a camada de VS + CeCl₃ + GPTMS sugere um potencial de corrosão mais ativo. Há uma mudança, no potencial na direção catódica e uma redução na densidade de corrente catódica. Um comportamento similar foi observado por Palanivel [2]. Segundo ele, este efeito eletroquímico ocorre devido a um bloqueio nas áreas catódicas do material pelos sais de cério e uma consequente redução na taxa geral de corrosão.

Ao comparar as curvas de VS + CeCl₃ + GPTMS com VS + GPTMS observa-se que, apesar de o potencial ter se deslocado na direção catódica na presença de cério, após a transição catódico/anódico a densidade de corrente evolui de forma diferente para ambas as amostras, com uma leve

redução na densidade de corrente em potenciais em torno de -600mV, o que sugere uma maior resistência à corrosão.

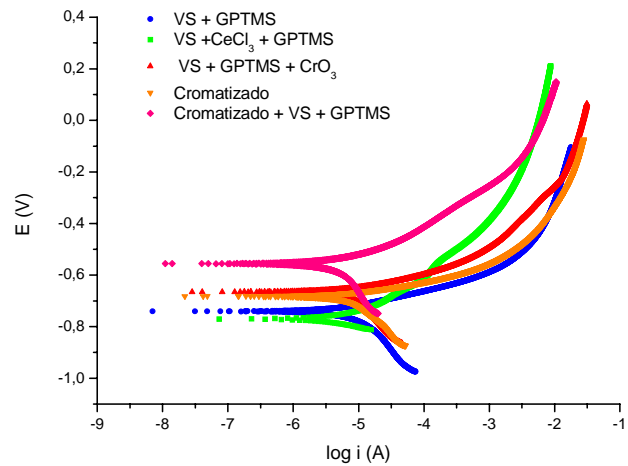


Figura 2. Curva de Polarização catódica e anódica em NaCl 0,1M para as diferentes combinações de camadas de silanos e inibidores de corrosão: 0,001V/s.

Os resultados obtidos para o aço cromatizado + VS + GPTMS tendem há maiores potenciais de corrosão na direção anódica. A comparação entre as curvas do aço cromatizado e cromatizado + VS + GPTMS e VS + GPTMS + CrO₃ sugere o efeito protetor do silano sobre a cromatização (cromatizado + VS + GPTMS). A amostra apenas cromatizada apresenta comportamento eletroquímico similar à amostra silanizada com VS + GPTMS e com VS + GPTMS + CrO₃. A amostra cromatizada + VS + GPTMS tende a um menor potencial de corrosão o que pode ser associado a uma melhor proteção contra corrosão, justificado pela passivação do substrato através do contato com o inibidor de corrosão. A camada de silano pode auxiliar na proteção contra a corrosão do aço cromatizado, impedindo que o cromo hexavalente seja liberado ao meio ambiente. Logo, esses resultados são um bom indicativo que houve uma melhora na proteção contra corrosão do substrato para o aço revestido com a camada de VS + CeCl₃ + GPTMS, devido a diminuição do potencial de corrosão catódico e no aço cromatizado + VS + GPTMS devido ao aumento no potencial de corrosão anódico.

3.2. Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)

Os resultados de EIE são apresentados na forma de diagramas de Nyquist nas Figuras 3 e 4 para os sistemas estudados nos diferentes tempos de análise.

A camada dupla de VS + GPTMS, mostrado na Figura 3a, seguiu a mesmo comportamento observado por Ramos [5], obteve uma maior resistência à corrosão com menor tempo de permanência na solução para os tempos de 24 e 48 horas. Após esses tempos há um aumento na resistência a passagem de corrente devido à oxidação na superfície do metal.

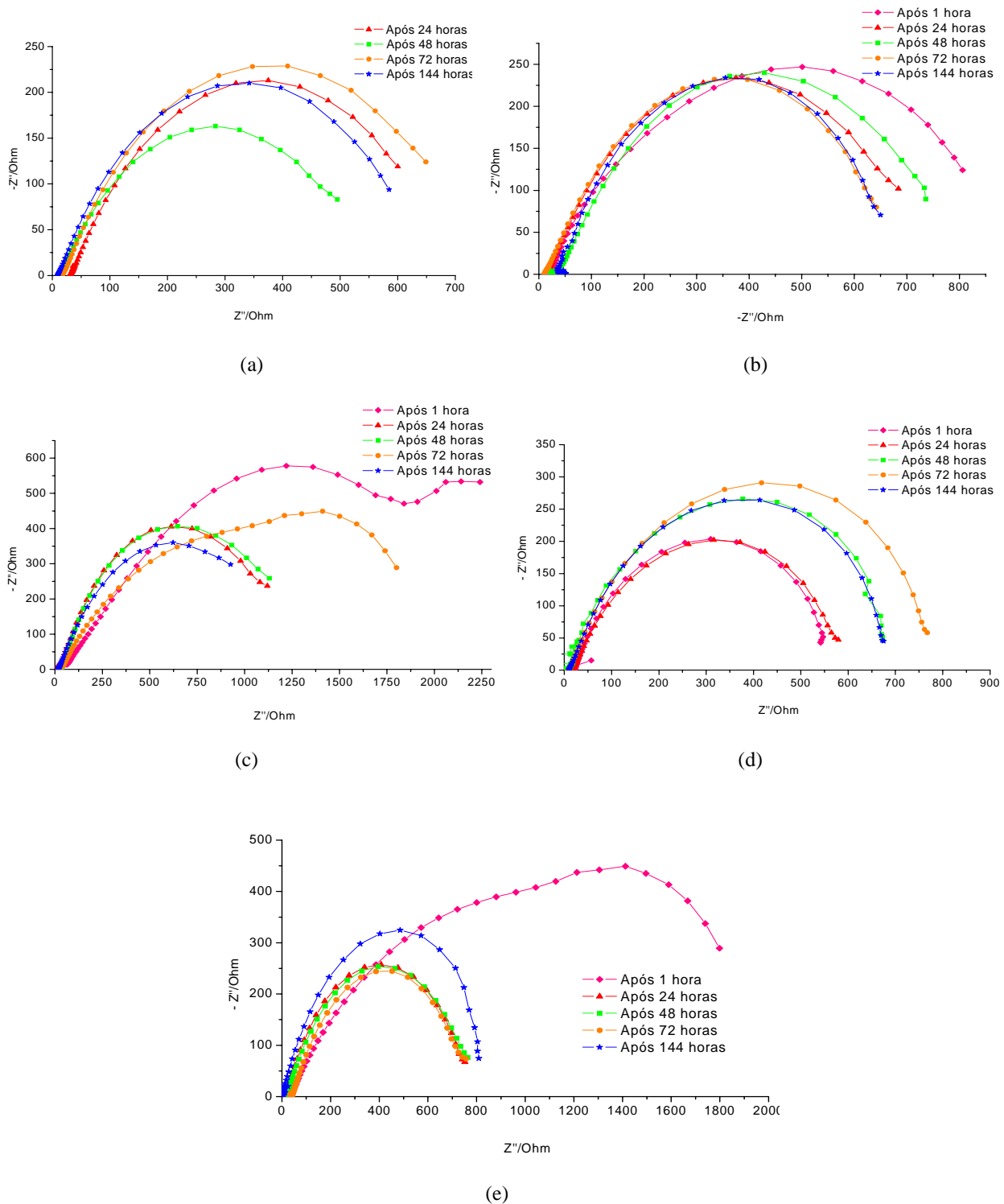
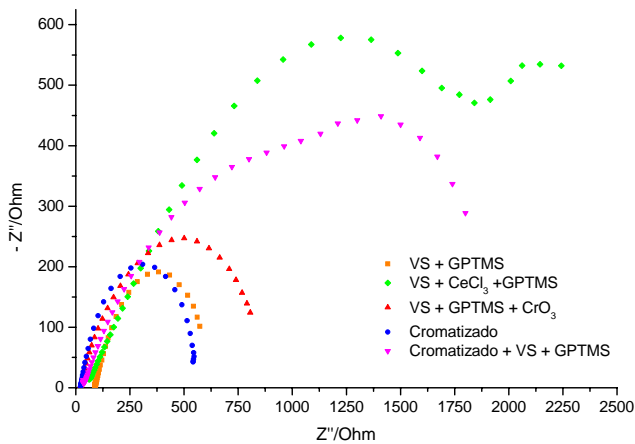
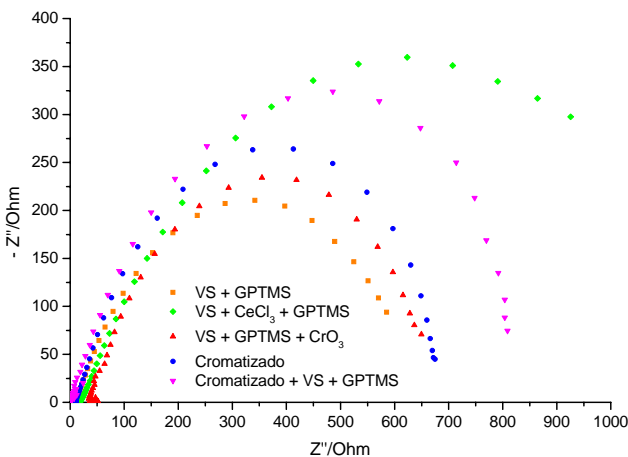


Figura 3. Diagrama de Nyquist para o aço revestido com (a) camada dupla de VS + GPTMS; (b) camada dupla de VS + GPTMS + CrO₃; (c) camada dupla de VS + CeCl₃ + GPTMS; (d) o aço cromatizado e (e) o aço cromatizado + VS + GPTMS em diferentes tempos de imersão na solução de NaCl 0,1 M.

Os resultados de EIE para aço revestido com dupla camada de VS + GPTMS + CrO₃, mostrados na Figura 3b, são similares aos da Figura 3a. O cromato foi adicionado na segunda camada, sendo improvável que ele entre em contato com o substrato e o passivo, o que explica os baixos valores de EIE obtidos.



(a)



(b)

Figura 4. Diagrama de Nyquist para os aços revestidos com diferentes camadas após (a) 1 hora de imersão e (b) após 144 horas na solução de NaCl 0,1 M.

A Figura 3c mostra os resultados de EIE para aço revestido com de VS + CeCl₃ + GPTMS. Os melhores resultados de EIE foram obtidos com este revestimento. É provável que a adição do inibidor de corrosão, cloreto de cério ao filme de silano aumenta a resistência elétrica, resultando em uma melhor proteção contra a corrosão do substrato, agindo de forma similar ao nitrato de cério descrito por Palanivel [2]. Mesmo em tempos longos este revestimento apresentou resultados superiores, sugerindo a ação do cloreto de cério como inibidor de corrosão.

A Figura 3d apresenta os resultados de EIE para o aço cromatizado. Os resultados de EIE foram similares ao do aço revestido com VS + GPTMS.

Os resultados de EIE para aço cromatizado + VS + GPTMS são mostrados na Figura 3e. Os bons resultados deste revestimento podem ser justificados pela presença de duas camadas protetoras uma formada pelo cromato e outra pela dupla camada de VS + GPTMS. Assim há um aumento na barreira entre o substrato e o meio e quando uma camada falha a outra age.

A Figura 4a apresenta uma comparação entre os diferentes revestimentos obtidos em uma hora de imersão na solução de NaCl 0,1 M. Há um forte indicativo de uma melhor proteção contra corrosão, associada a maior resistência elétrica para o aço revestido com VS + CeCl₃ + GPTMS seguido pelo o aço cromatizado + VS + GPTMS, concordando com os resultados de polarização.

A Figura 4b mostra uma comparação entre os resultados de impedância obtidos em 144 horas de imersão na solução de NaCl 0,1M para as diferentes revestimentos estudados. Observa-se uma redução na resistência elétrica se comparado com a Figura 8. Os melhores resultados continuam sendo para o aço revestido com VS + CeCl₃ + GPTMS e para o aço cromatizado + VS + GPTMS.

3.3. Câmara Úmida

Os resultados de câmara úmida estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados de câmara úmida

Amostra	24h	48h
Aço	V3	V4
VS + GPTMS	V3	V4
Cromato	V4	V5
Cromato + VS + GPTMS	V3	V4
VS + GPTMS + CrO ₃	V4	V4
VS + CeCl ₃ + GPTMS	V5	V5

Os resultados obtidos no ensaio de câmara úmida não são significativos, pois a camada de silano é muito fina e sensível à água. Estima-se que as camadas silanizadas são hidrolisadas na presença do vapor de água saturado.

3.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

A Figura 5 mostra as imagens de MEV obtidas para o aço revestido com VS + GPTMS. Nota-se a presença de regiões claras e escuras, indicando que o filme não é homogêneo. Além disso, detectou-se por EDS (Tabela 2) a presença de silício, carbono e oxigênio que são os principais constituintes do silano e que há uma maior presença de silício nas regiões escuras. Ramos [5] reporta um fato similar a este. A formação dessas zonas mais escuras deve ter ocorrido durante a etapa de secagem, na qual as gotas da solução de silano tornam-se menores com o tempo, criando regiões distintas com alta quantidade de silício Outra explicação possível é a ocorrência

da reação de condensação do silano, que pode levar a polimerização e a criação de aglomerados de sílcio.

Tabela 2. Resultados de EDS para o aço revestido com VS + GPTMS.

	C(%)	O(%)	Si(%)	Fe(%)
VS + GPTMS_pt1	74,29	6,94	8,47	10,30
VS + GPTMS_pt2	78,23	7,22	8,44	6,10
VS + GPTMS_pt3	63,06		2,01	34,93

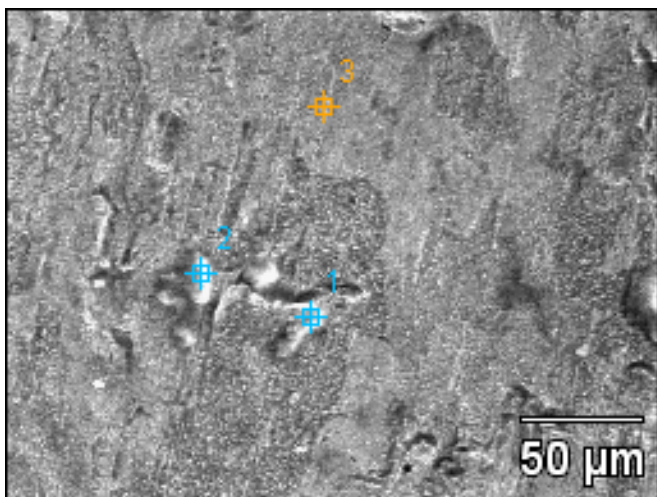


Figura 5. Imagens de MEV para o aço revestido com VS + GPTMS. Ponto azul: pt_1; Ponto azul: pt_2. Ponto laranja: pt_3.

A Figura 6 apresenta as imagens de MEV para o aço revestido com VS + CeCl₃ + GPTMS. É notável a influência do cério na formação do filme de silano. O cério aumenta a reticulação a homogeneidade do filme. Podendo, assim, explicar o aumento nas propriedades anticorrosivas do material. Com os resultados de EDS, mostrados na Tabela 3 não foi possível confirmar a presença de cério, provavelmente devido à pequena quantidade.

Tabela 3. Resultados de EDS para o aço revestido com VS + CeCl₃ + GPTMS.

	C(%)	O(%)	Si(%)	Fe(%)
VS + CeCl ₃ + GPTMS_pt1	37,18	21,03		57,78
VS + CeCl ₃ + GPTMS_pt2	50,08	24,55		17,13
VS + CeCl ₃ + GPTMS_pt3	49,21	21,03	0,83	13,45

A Figura 7 apresenta as imagens de MEV para o aço revestido com VS + GPTMS + CrO₃ e a Tabela 4 mostra os resultados de EDS. A imagem obtida por MEV é similar a imagem da Figura 5. Há regiões claras e escuras que indicam a não homogeneidade do filme.

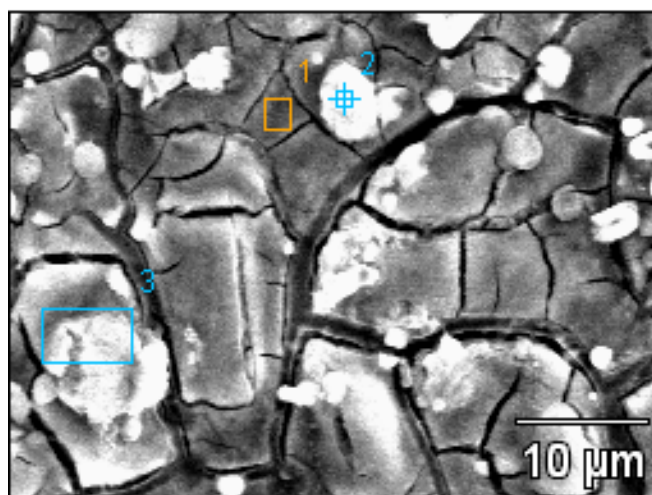


Figura 6. Imagens de MEV para o aço revestido com VS + CeCl₃ + GPTMS. Ponto laranja: pt_1; Ponto azul: pt_2. Retângulo azul: pt_3.

Tabela 4. Resultados de EDS para o aço revestido com VS + GPTMS + CrO₃

	C(%)	Al(%)	Si(%)	Fe(%)
VS + GPTMS + CrO ₃ _pt1	45,24		1,74	53,02
VS + GPTMS + CrO ₃ _pt2	54,17	3,08	3,01	39,74

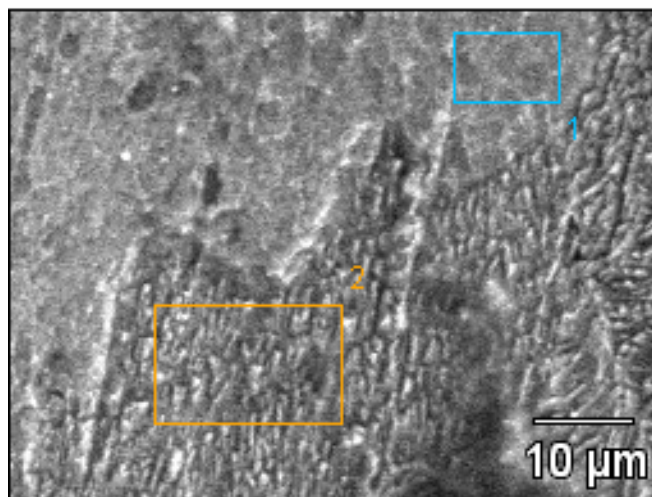


Figura 6. Imagens de MEV para o aço revestido com VS + GPTMS + CrO₃. Retângulo azul: pt_1; Retângulo laranja: pt_2.

A Figura 7 apresenta a imagem de MEV para o aço cromatizado. Através dos resultados de EDS (Tabela 5) não foi possível observar a presença de cromo, o que pode ser justificado pela baixa espessura do filme e pela falta de homogeneidade.

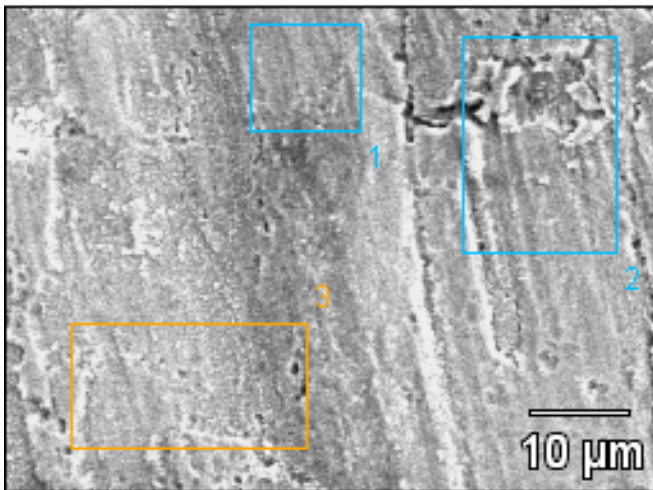


Figura 7. Imagens de MEV para o aço cromatizado. Ponto azul: pt_1; Retângulo azul: pt_2. Retângulo laranja: pt_3.

Tabela 5. Resultados de EDS para o aço cromatizado.

	C(%)	Fe (%)
Cromatizado_pt1		100,00
Cromatizado_pt2	36,01	63,99
Cromatizado_pt3		100,00

A Figura 8 mostra a imagem de MEV para aço cromatizado + VS + GPTMS. Observa-se que esse filme apresenta áreas claras e escuras em menor quantidade que a Figura 5, indicando que o filme apesar de não ser homogêneo, é mais homogêneo que o filme de VS + GPTMS. Os resultados de EDS apresentados na Tabela 6 indicam a presença de silício e carbono provando que o filme de silano aderiu ao aço cromatizado.

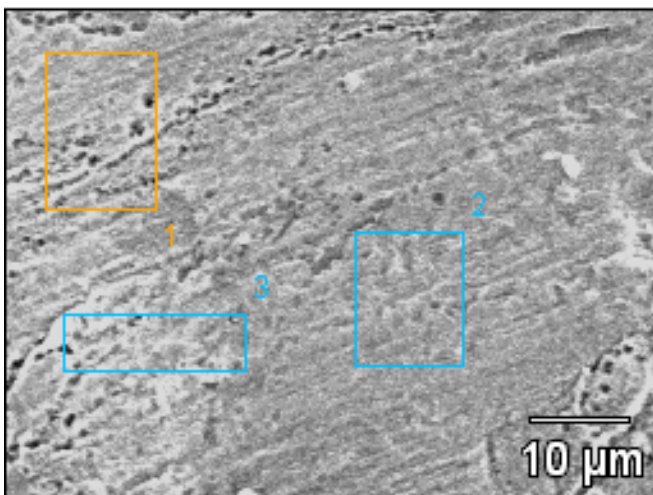


Figura 8. Imagens de MEV para o aço cromatizado + VS + GPTMS. Retângulo laranja: pt_1; Retângulo azul: pt_2. Retângulo azul: pt_3.

Tabela 6. Resultados de EDS para o aço cromatizado + VS + GPTMS.

	C(%)	Al(%)	Si(%)	Fe(%)
Passivante + GPTMS_pt1	39,21		0,67	60,12
Passivante + GPTMS_pt2	33,96	0,65		65,39
Passivante + GPTMS_pt3	35,49			64,51

4. Conclusões

O resultados obtidos sugerem que a adição de inibidores de corrosão como o $CeCl_3$ aumenta a proteção à corrosão conferida ao substrato pela dupla camada de monossilano.

O aço revestido com VS + $CeCl_3$ + GPTMS apresentou indícios de maior resistência a corrosão. Logo, é a camada mais indicada para revestir peças de aço carbono.

A silanização sobre a cromatização (aço cromatizado + VS + GPTMS) também é um método eficaz na proteção contra corrosão. O silano sobre o cromato poderá além de aumentar a resistência contra corrosão do substrato, garantir a menor lixiviação do cromo para o meio.

Como os silanos formam uma camada muito fina e sensível a água, ficou evidente, a necessidade da utilização de um revestimento posterior sobre a camada de silano..

Referências

- [1] Bossardi, K., Zoppas-Ferreira, J. Nanotecnologia aplicada a tratamentos superficiais para o aço carbono 1020 como alternativa ao fosfato de zinco. In: Tratamento de Superfícies, São Paulo, p. 42-48. 2009.
- [2] Palanivel, V., Huang, Y., Van Ooij, W. J. Effects of addition of corrosion inhibitors to silane films on the performance of AA2024-T3 in a 0,5M NaCl solution. Progress in Organic Coatings, v. 53, p. 153-168, 2005.
- [3] Montemor, M. F., Ferreira, M. G. S. Cerium salt activated nanoparticles as fillers for silane films: Evaluation of the corrosion inhibition performance on galvanized steel substrates. Electrochimica Acta, v. 52, p. 6976–6987, 2007.
- [4] Zucchi, F., et al. Inhibition of copper corrosion by silane coatings. Corrosion Science, v. 43, p. 2853-2865, 2004.
- [5] Ramos, J. T. Obtenção e caracterização de revestimentos protetores a base de silanos e sua ação combinada com tintas na proteção ao aço carbono. Dissertação de Mestrado, PPGEM/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2009.
- [6] Yuan, W., Van Ooij, W. Characterization of organofunctional silane films on zinc substrate. Journal of colloid and interface science, v. 185, p. 197-209, 1997.
- [7] Grassi, V. et al. Influence of silane treatment on the corrosion of a WE43 magnesium alloy. Surface and coatings technology, v. 200, p. 4136-4143, 2006.
- [8] Zhu, D., Van Ooij, W. J. Corrosion protection of

- AA2024-T3 by bis-[3-(triethoxysilyl)propyl]tetrasulfide in sodium chloride solution. Part 2: mechanism for corrosion protection. *Corrosion Science*, v. 45, p. 2177-2197, 2003.
- [9] Cabral, A. M., et al. The corrosion resistance of hot dip galvanized steel and AA2024-T3 pre-treated with bis-[triethoxysilylpropyl] tetrasulfide solutions doped with Ce(NO₃)₃. *Corrosion Science*, v. 48, p. 3740-3758, 2006.
- [10] Suegama, P. H., Melo, H. G. De., Beneditti, A. V., Aoki, I. V. Influence of cerium (IV) ions on the mechanism of organosilane polymerization and on the improvement of its barrier properties. *Electrochimica Acta*, v. 54, p. 2655-2662, 2009.
- [11] Dow Corning – Product Information – Organofunctional Silanes – Z-6518 Silane. Disponível em: <http://www.dowcorning.com>. Acessado em 7 de agosto de 2006.
- [12] Dow Corning – Product Information – Organofunctional Silanes – Z-6040 Silane. Disponível em: <http://www.dowcorning.com>. Acessado em 7 de agosto de 2006.
- [13] Oliveira, M. F. de. Estudo da influência de organossilanos na resistência à corrosão de aço-carbono por meio de técnicas eletroquímicas. Tese de Doutorado - Escola Politécnica/USP, São Paulo, SP, Brasil, 2006.