INTERCORR2008_102

Copyright 2008, ABRACO
Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2008, em Recife/PE, no mês de maio de 2008.
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

UTILIZAÇÃO DE UM AMINO BISSILANO COMO PRÉ-TRATAMENTO DE AÇO CARBONO EM SISTEMA DE PINTURA ELETROFORÉTICA

Paulo Renato de Souza[1], Idalina Vieira Aoki[2]

Abstract

The aim of this study is to evaluate the performance of the based silane pre-treatment with Bis-(γ-trimetoxysilylpropyl)amine (BTSPA) for carbon steel in an electrophoretic painting system. Aiming implementing this type of pre-treatment in an industrial scale, comparative corrosion resistance tests were conducted. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) measurements besides adhesion, flexibility and impact tests to compare the performance of the electrophoretic paint applied on the bare, pre-treated with silane or with phosphated substrate were performed. The results show that the based silane pre-treatment, in the early hours of immersion, presents higher corrosion resistance values than the phosphated one, and after eight hours of immersion the total impedance of all samples has markedly decreased. BTSPA pre-treated specimens degraded faster than the phosphate treated ones. Physical tests conducted with pretreated and electrophoretically coated panels could not evidence significant differences between both studied pretreatments.
Key words: Silane, electrophoretic painting, pre-treatment, corrosion, carbon steall

Resumo

O objetivo deste estudo é avaliar o desempenho do pré-tratamento à base do polissilano Bis-(γ-trimetoxysililpropil)amina (BTSPA), para aço carbono em sistema de pintura eletroforética. Tendo em vista a aplicação deste tipo de pré-tratamento em escala industrial, foram realizados ensaios comparativos de resistência à corrosão. Foi utilizada a espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE), testes de aderência, flexibilidade e impacto com fins comparativos de desempenho da camada de tinta eletroforética aplicada sobre os substratos pré-tratados com o silano e com a camada de fosfato. Os resultados obtidos mostram que o pré-tratamento a base de silanos apresenta, nas primeiras horas de imersão, valores de resistência à corrosão maiores quando comparados com o aço fosfatizado, e que depois de oito horas de imersão estes valores diminuem, evidenciando dessa forma a degradação do filme de BTSPA de forma mais rápida do que a camada de fosfatos. Pelos ensaios físicos realizados nos corpos-de-prova (cdp) pré-tratados e submetidos ao processo de pintura eletroforética, pode-se observar que não houve desplacamento da camada de tinta para nenhum dos corpos-de-prova tratados, não sendo possível estabelecer diferenças significativas, com relação à essas propriedades, para nenhum dos pré-tratamentos estudados.

Palavras-chave: Silano, pintura eletroforética, pré-tratamento, corrosão, aço carbono.

1 Doutorando em Engenheira Química, Químico – SENAI-SP
2 Professora Doutora em Engenharia Química – Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica, USP

1 - INTRODUÇÃO

Devido aos impactos ambientais oriundos das indústrias de tratamento superficial, há a necessidade de buscar novas tecnologias visando a substituição da cromatização e da fosfatização em processos de pré-tratamento de laminados de aço carbono, aço galvanizado e alumínio destinados à pintura, sendo que uma alternativa é através da utilização de pré-tratamento a base de polissilanos [1]. Esta nova tecnologia alternativa apresenta certas propriedades semelhantes àquelas fornecidas pelo fosfato e cromato, tais como resistência a corrosão e como agente promotor de aderência de tintas em substratos inorgânicos, sendo ambientalmente aceitáveis. Os silanos e seus derivados têm sido tema de extensivas pesquisas por mais de cinqüenta anos, primeiramente como agentes promotores de adesão entre substratos dissimilares e mais tarde como formadores de filme em metais, tais como aço e alumínio [2], recentemente os derivados de silanos estão sendo utilizados também como inibidores de corrosão promovendo elevados valores de eficiência [3].

Com a finalidade de encontrar condições apropriadas para a substituição do processo de fosfatização pela silanização em processos industriais de pintura automotiva, vêm sendo desenvolvido vários trabalhos relacionados ao assunto, procurando sempre a otimização de certas variáveis no processo. Uma das grandes dificuldades encontradas no processo de silanização é a necessidade de utilização de grandes quantidades de álcool na solução de hidrólise, sendo que em alguns estudos essa quantidade atinge até 92% da solução, outro fator muito importante é o tipo de álcool usado; uma grande quantidade de estudos empregam o metanol [4-14], o que torna o processo inviável em termos de Brasil quando leva-se em consideração que o metanol é um solvente fóssil e também que o Brasil é um grande produtor de etanol, tornando, dessa forma, o uso do etanol mais viável como solvente para o processo. Estudos prévios do nosso grupo foram e vêm sendo desenvolvidos para a diminuição da quantidade de álcool na solução e a quantidade ótima de silano utilizado no processo, para diminuição dos custos operacionais [15-18].

O objetivo deste estudo é avaliar o desempenho do pré-tratamento a base do polissilano Bis-(γ-trimetoxisililpropil)amina, (BTSPA), para proteção contra a corrosão do aço carbono em sistema de pintura eletroforética.

2 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram confeccionados corpos-de-prova (cdp) de aço carbono, cuja sua composição encontra-se na Tabela 1, sendo que suas características são similares aos aços empregados pelas indústrias automotivas. As chapas de aço, juntamente com a sua respectiva composição química, foram cedidas pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). Os corpos-de-prova (cdp's) foram cortados a partir de chapas nas dimensões de (10x15x0,5) cm^3. A limpeza dos cdp consistiu na retirada do excesso de óleo com papel absorvente seguida da imersão em banho com solução desengraxante com concentração de 10% ($^m/_m$) por 10 minutos à temperatura de 85ºC. O desengraxante utilizado foi a solução alcalina comercial SALO CLEAN®, fornecido pela Klintex Insumos Industriais Ltda.

O polissilano utilizado foi o Bis-(γ-trimetoxisililpropil)amina (BTSPA) cedido pela Momentive, cuja estrutura química é apresentada na Figura 1. A solução de hidrólise do silano foi preparada obedecendo as seguintes proporções: 50,24% de água, 48,26% de etanol e 1,5% de BTSPA (em massa), em pH 4, acertado com ácido acético. A proporção de água é bastante grande e diferente do que é encontrado na literatura, onde se utiliza apenas de 2 a 8% de água e o restante de álcool, principalmente o metanol. A nossa formulação é mais adequada para a

prática industrial, pois apresenta flash point maior. O tempo de hidrólise foi de sessenta minutos e o tempo de imersão dos cdp's na solução contendo o silano foi de dois minutos. O tempo de cura do filme de silano foi de 40 minutos em estufa à 150ºC. Após o processo de silanização, os cdp's foram submetidos ao processo de pintura eletroforética (e-coat) com resina a base epóxi. Foram realizados ensaios comparativos em cdp's fosfatizados com banho á base de fosfato de zinco e estes não foram submetidos ao processo de passivação pós fosfatização. Tanto a fosfatização quanto a pintura eletroforética dos cdp's foram realizados na empresa Vagly Paint.

Nos ensaios eletroquímicos em cpd's apenas pré-tratados, foi utilizada uma célula convencional para amostras planas da EG&G/PAR para três eletrodos (flat cell). O eletrodo de $Ag|AgCl|KCl_{sat}$ foi usado como eletrodo de referência, como eletrodo auxiliar foi utilizada uma folha de platina de 15 cm^2 de área exposta e o aço carbono pré-tratado ou não como eletrodo de trabalho. Foi usada uma solução de NaCl 0,1M como eletrólito, naturalmente aerada e não agitada à temperatura ambiente (23±2ºC).

Para os ensaios realizados na avaliação do pré-tratamento sem a camada de tinta, as medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) foram obtidas após crescentes tempos de imersão: 2 horas, 8 horas e 24 horas. O intervalo de freqüências foi de 40 kHz a 5 mHz com amplitude de perturbação do potencial de 10 mV rms e 10 medidas por década de freqüência.

Para o estudo nos cdp's pré-tratados e pintados, foram realizadas medidas após 2h, 8h, 24h, 48h, 72h, 96h, 120h, 240 h e 480h. A célula eletroquímica utilizada foi composta dos mesmos eletrodos de referência e auxiliar o eletrodo de trabalho foi o aço revestido, sendo que sua área exposta foi de 20,3 cm^2. A solução utilizada como eletrólito foi NaCl 3,5% em massa, naturalmente aerada e não agitada, à temperatura ambiente. O intervalo de freqüência usado foi de 100 kHz a 10 mHz, com amplitude de perturbação de 20 mV rms com 10 medidas por década de freqüência. Todas as medidas foram realizadas em um potenciostato-galvanostato EG&G/PAR, modelo 273 em conjunto com um analisador de freqüências da Solartron modelo SI 1255B.

Os testes de aderência foram realizados segundo as especificações da ASTM D3359 para o método B, de corte em grade e puxamento com fita adesiva(pull off test).

Os testes de flexibilidade foram feitos segundo a norma ASTM D522. No ensaio utilizou-se um mandril cônico dotado de um cone truncado, sendo o menor diâmetro 3 mm e o maior 38 mm com o comprimento de 200 mm.

Nos ensaios de impacto seguiram-se as recomendações da norma ASTM D2794. Foi utilizado o equipamento para impacto Erichsen GMBH® modelo 226 formado por um êmbolo com massa de 2,0 Kg e uma guia rígida graduada com intervalos de 5 cm cuja altura máxima é 80 cm, apresentando um pino de impacto com ponta esférica de 20 mm de diâmetro.

Todos os ensaios físicos foram realizados na DuPont do Brasil S.A., divisão de revestimentos de alto desempenho em Guarulhos.

Os corpos-de-prova foram fotografados com uma câmera digital Sony Cybershot 7,2 MP acoplado em um Estereomicroscópio Opton.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 apresenta os diagramas de impedância (Nyquist e Bode) para o aço carbono sem e com pré-tratamento com 1,5% do bis-aminosilano BTSPA e também para o aço carbono fosfatizado, com diferentes tempos de imersão em solução de NaCl 0,1M. Observam-se elevados valores de módulo de impedância à baixas frequências e altos valores de ângulos de fase para duas horas de imersão, evidenciando que a resistência à corrosão para o cdp pré-

tratado com o BTSPA é superior ao fosfatizado, e que para maiores tempos de imersão ocorre a diminuição dessa resistência, evidenciado por menores valores do módulo de impedância e dos ângulos de fase, para a menor frequência e consequentemente a diminuição do diâmetro dos arcos capacitivos. Para 8h e 24h de imersão, os valores de impedância para o aço fosfatizado são superiores, porem da mesma ordem de grandeza aos encontrados para o aço carbono pré-tratado com o silano BTSPA mostrando, dessa forma, a possibilidade da utilização do pré-tratamento com o silano BTSPA em sistemas de pintura. Os diagramas mostram uma só constante de tempo provavelmente devido à existência de defeitos nos filmes

As Figuras 3 e 4 apresentam os diagramas de impedância obtidos para os corpos-de-prova pintados após 48h e após 480h de imersão em solução de cloreto de sódio 3,5%. Observa-se que os valores do módulo de impedância à baixas frequências, após 48h de imersão (Fig. 3) para o aço fosfatizado pintado são superiores aos valores encontrados para o aço pré-tratado com o BTSPA pintado, sendo os valores deste último superiores aos encontrados para o aço carbono pintado, sem pré-tratamento. Os diagramas de Bode (ângulo de fase x f) mostram apenas uma constante de tempo Após 480h de imersão (Fig. 4), os valores de resistência do filme diminuem gradativamente com o tempo, conferindo a proteção ao substrato na mesma ordem de proteção verificada após 8h de imersão. Aparecem duas constantes de tempo nos diagramas de Bode, uma a altas frequências, associada com o filme de tinta e outra a menores frequências, associada com os processos de troca de carga na interface metal/eletrólito, mostrando que a água percolou através do filme e chegou ao substrato. Esta diferença entre os valores obtidos para o aço carbono pintado, sem pré-tratamento e pré-tratado com fosfatização e com o silano, provavelmente está associada à passagem de espécies agressivas como água, íons e oxigênio, através da camada de tinta até à interface metal/tinta, sendo esta passagem mais intensa para os cdp's sem pré-tratamento seguida dos pré-tratados com o BTSPA e menos intensa para os cpd's fosfatizados. Quanto maior a quantidade de espécies que atravessam o filme, e alcançam as ligações Fe-O-Si fazendo com que estas se rompam e facilitem o ataque ao substrato, maior é a taxa de corrosão do metal.

Este comportamento esta provavelmente associado ao fato de que a resistência à corrosão do metal esteja intimamente relacionada à formação da ligação de Fe-O-Si, sendo que esta não é totalmente estável. Quando exposta a uma grande quantidade de água, as ligações de Fe-O-Si se hidrolisam novamente formando grupos hidrofílicos Fe-OH e Si-OH. Esta rehidrólise destrói a hidrofobicidade superficial do metal, imposta anteriormente pelo filme de silano, sendo a supressão à passagem de água através da película de silano essencial para que se mantenha boa adesão entre o filme de silano e o substrato. Uma possível explicação para este comportamento é que os grupos amino secundários (-NH-), presentes nos aminosilanos, tendem a se protonarem na presença de água. Essa protonação pode ser expressa da seguinte forma:

$$-NH- + H_2O \Leftrightarrow -NH_2^+- + OH^-$$

Onde juntamente com a formação dos íons $-NH_2^+-$ são liberados para o sistema grupos hidroxilas (OH^-) como subprodutos da reação. Portanto, quando um metal é pré-tratado com uma solução de água/álcool contendo aminosilanos, este torna-se carregado positivamente devido aos aminosilanos se adsorverem na superfície do metal através dos grupamentos silanóis, sendo que os grupamentos $-NH_2^+-$ formados dispõe-se voltados para a solução, podendo tornar a superfície do filme carregada positivamente. Então, quando este substrato é exposto a uma solução contendo íons cloreto, a superfície do filme de aminosilano carregada positivamente atrai eletrostaticamente estes ânions, além da própria molécula de água, para o interior do filme, como pode ser ilustrado na Figura 5, sendo que este processo é mais intenso para os amino silanos de aminas primárias [19].

Através da análise dos diagramas de impedância obtidos, foram sugeridos circuitos elétricos equivalentes, que são apresentados na Figura 6 para fazer o ajuste dos dados experimentais e chegar aos valores dos elementos do circuito. A Figura 6(a) apresenta o circuito equivalente utilizado para o ajuste dos dados para os cdp's pintados imersos por 48 horas e a Figura 6(b) o circuito equivalente utilizado para os dados obtidos após 480 horas de imersão, onde R1 é a resistência do eletrólito, R2 é a resistência do filme, R3 a resistência à transferência de carga, CPE1 a capacitância do filme e CPE2 a capacitância da dupla camada, sendo que estes dois últimos são os chamados elementos de fase constante, elemento de circuito usado para superfícies heterogêneas que não se comportam como capacitores ideais. Os valores das resistências do filme de acordo com o tempo de imersão dos cdp's são apresentados na Tabela 2 e também na Figura 7, onde observa-se claramente que os valores de resistência do filme para o aço pré-tratado com o BTSPA e pintado são superiores aos valores obtidos para o aço pintado sem pré-tratamento e inferiores aos encontrados para o aço fosfatizado pintado e que estes valores diminuem para tempos maiores de imersão, sendo a diminuição mais acentuada para o aço sem pré-tratamento. Esta diminuição esta associada à passagem do eletrólito pelo filme, mostrando que a camada de tinta se torna menos protetora para maiores tempos de imersão. Os maiores valores de resistência foram encontrados para o aço fosfatizado pintado, onde este atuou de forma mais efetiva contra a passagem de espécies pela camada de tinta aplicada sobre o metal, proporcionando um caráter mais protetor contra a corrosão do que o pré-tratado com o BTSPA.

Nas Figuras 8, 9 e 10 são apresentadas as imagens feitas dos cdp's em estudo após os testes de aderência, impacto e flexibilidade, respectivamente. Pode-se observar que não houve desplacamento da camada de tinta para os cdp's analisados, tendo todos eles apresentando desempenho semelhante para os diferentes pré-tratamentos estudados.

4 - CONCLUSÕES

A partir dos resultados de espectroscopia de impedância eletroquímica com o tempo de imersão, obtidos neste estudo, conclui-se que o pré-tratamento a base do silano BTSPA aumenta a resistência à corrosão do aço carbono e apresenta resistência à entrada de água, íons e oxigênio inferior à encontrada para os cdp's fosfatizados e pintados.

Nos cpd's utilizados nos ensaios de aderência, flexibilidade e impacto pode-se observar que não houve desplacamento da camada de tinta para nenhum dos cps tratados, não sendo possível estabelecer diferenças com relação à essa propriedade para nenhum dos pré-tratamentos estudados.

A utilização do processo de silanização como pré-tratamento em sistemas de pintura eletroforética se mostra promissor, mas para sua utilização em larga escala, fazem-se necessários estudos visando a otimização do processo a partir de novas formulações que apresentem desempenho superior aos encontrados para aço fosfatizados.

Agradecimentos

Ao CNPq e SENAI-SP

Referências bibliográficas

[1] OLIVEIRA, M. F. **Estudo da influência de organo-silanos na resistência à corrosão de aço carbono por meio de técnicas eletroquímicas**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006

[2] van OOIJ W. J., ZHU D., STACY M., SETH A., MUGADO T., GANDHI J., PUOMI P., **Corrosion Protection of Organofuntional Silane – An Overview**, *Tsinghua Science and Tecnology* 10(6): 639-665, 2005.

[3] SOUZA, P. R., **Estudo do Comportamento de Tensoativos a Base de Organo-Silanos como Inibidores de Corrosão para o Aço ABNT 1005 em Meio de HCl 2 M**. 2005. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2005.

[4] MONTEMOR, M. F.; SIMÕES, A. M.; FERREIRA, M. G. S.; WILLIAMS, B.; EDWARDS, H.. **The corrosion performance of organosilane based pre-treatments for coatings on galvanised steel**. *Progress in Organic Coatings*, 2000. 38. 17.

[5] TRABELSI, W.; TRIKI, E.; DHOUIBI, L.; FERREIRA, M. G. S.; ZHELUDKEVICH, M. L.; MONTEMOR, M. F. **The use of pre-treatments based on doped silane solutions for improved corrosion resistance of galvanised steel substrates**. *Surface and Coatings Technology. 2006*, 200. 4240-4250.

[6] TRABELSI, W.; CECILIO, P.; FERREIRA, M. G. S.; MONTEMOR, M. F. **Electrochemical assessment of the self-healing properties of Ce-doped silane solutions for the pre-treatment of galvanised steel substrates**. *Progress in Organic Coatings*, 2005. 54. 276-284.

[7] 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 0.5 M NaCl solution**. *Progress in Organic Coatings*, 2005. 53 . 153-168.

[8] PALANIVEL, V. M. Modified Silane **Thin Films as an Alternative to Chromates for Corrosion Protection of AA2024-T3 Alloy**. University of Cincinnati, Master Thesis. Engineering: Materials Science, 2003. 153p.

[9] YUAN, W.; VAN OOIJ, W. J.; **Characterization of Organofunctional Silane Films on Zinc Substrates**. *Jounal of Colloid and Interface Science*, 1997. 185. 197-209.

[10] ZHU, D.; VAN OOIJ, W. J. **Corrosion protection of AA 2024-T3 by bis-[3-(triethoxysilyl)propyl]tetrasulfide in neutral sodium chloride solution. Part 1: corrosion of AA 2024-T3**. Corrosion Science, 2003. 45. 2163-2175.

[11] TRABELSI, W.; DHOUIBI, L.; TRIKI, E.; FERREIRA, M. G. S.; MONTEMOR, M. F. **An electrochemical and analytical assessment on the early corrosion behaviour of galvanised steel pretreated with aminosilanes**. Surface and Coatings Technology. 2005. 192. 284-290.

[12] CABRAL, A.; DUARTE, R. G.; MONTEMOR, M. F.; ZHEDKEVICH, M. L.; FERREIRA, M. G. S. **Analytical characterisation and corrosion behaviour of bis-[triethoxysilylpropyl]tetrasulphide pre-treated AA2024-T3**. *Corrosion Science*. 2005. 47. 869-881.

[13] MONTEMOR, M. F.; CABRAL, A. M.; ZHELUDKEVICH, M. L.; FERREIRA, M. G. S. **The corrosion resistance of hot dip galvanized steel pretreated with Bis-functional silanes modified with microsilica**. *Surface and Coatings Technology*. 2006. 200. 2875-2885.

[14] CABRAL, A. M.;TRABELSI, W.; SERRA, R.; MONTEMOR, M. F.; ZHELUDKEVICH, M. L.; FERREIRA, M. G. S. The corrosion resistance of hot dip galvanised steel and AA2024-T3 pre-treated with bis-[triethoxysilylpropyl] tetrasulfide solutions doped with $Ce(NO_3)_3$. Corrosion Science. 2006. 48. 3740-3758.

[15] AQUINO, I. P. **Caracterização química e eletroquímica das camadas de silanos aplicadas sobre aço carbono**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006.

[16] CAPIOTTO, N. **Uso do silano BTSE como protetivo contra a corrosão de laminados de aço carbono**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006

[17] SUEGAMA, P. H.; RECCO, A. A. C.; TSCHIPTSCHIN, A. P.; AOKI, I. V. **Influence of the silica nanoparticles added to an organosilane film on carbon steel electrochemical and tribological behaviour**. *Progress in Organic Coatings*. , v.60, p.90 - 98, 2007.

[18] PALOMINO, L. E. M.; SUEGAMA, P. H.; AOKI, I. V.; PÁSZTI, Z.; DE MELO, H. G. **Investigation of the corrosion behaviour of bilayercerium-silane pre-treatment on Al 2024-T3 in 0.1M NaCl**. *Electrochimica Acta* , v.52, p.7496 - 7505, 2007.

[19] ZHU, D.; van OOIJ, W. J. **Enhanced corrosion resistance of AA 2024-T3 and hot-dip galvanized steel using a mixture of bis-[trietoxysilylpropyl]tetrasulfide and bis-[trimethoxysilylpropyl]amine**. *Electrochimica Acta*. v. 49. p. 1113 – 1125. 2004.

Lista de Figuras

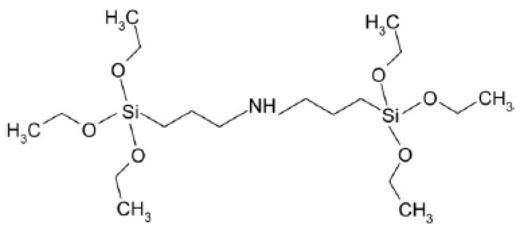
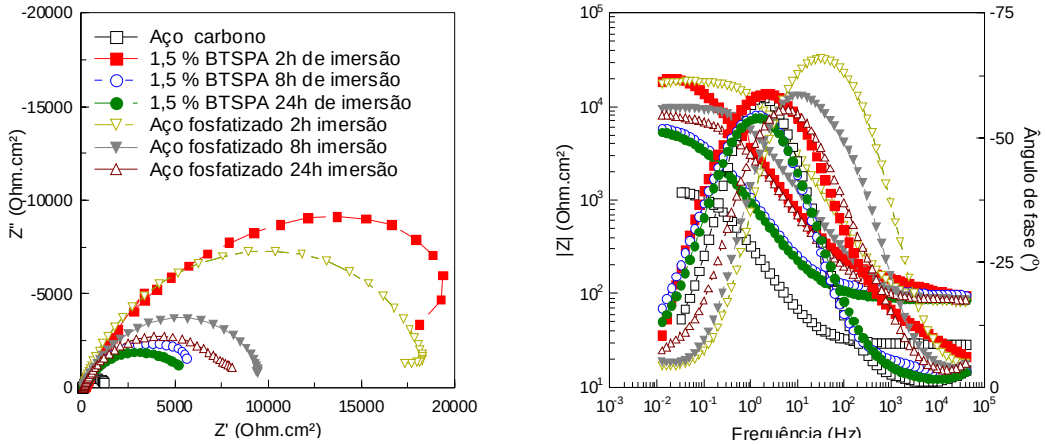
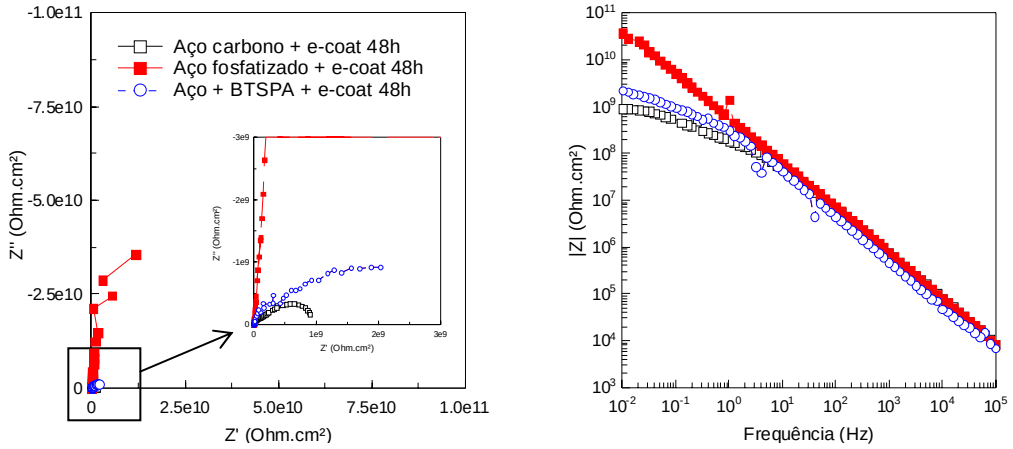


Figura 1. Estrutura molecular do Bis-(γ-trimetoxisililpropil)amina (BTSPA).



(a) (b)

Figura 2. Diagramas de impedância de Nyquist (a) e Bode (b) para o aço carbono sem pré-tratamento e tratado com silano BTSPA e com fosfatização, após 2h, 8h e 24h de imersão em solução de NaCl 0,1M.



(a) (b)

Figura 3. Diagramas de impedância de Nyquist (a) e Bode (b) para o aço carbono pintado sem e com os diferentes pré-tratamentos após 48h de imersão em solução de NaCl 3,5% m/m.

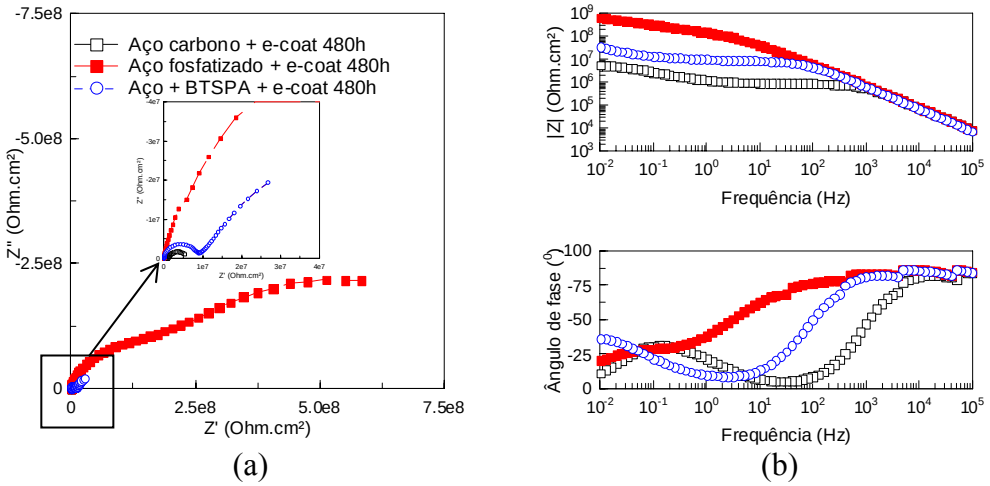


Figura 4. Diagramas de impedância Nyquist (a) e Bode (b) para o aço carbono pintado sem e com pré-tratamento após 480h de imersão em solução de NaCl 3,5% m/m.

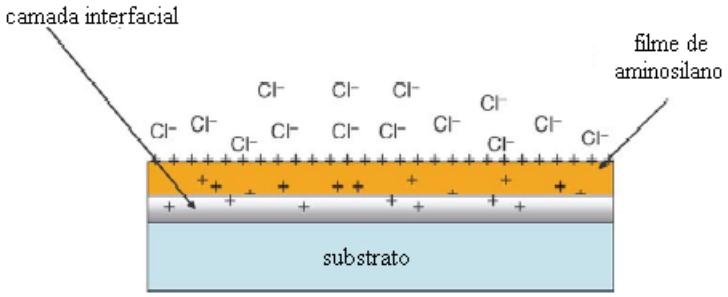


Figura 5. Atração de íons Cl^- presentes no eletrólito para a superfície do metal carregada positivamente pelo filme de aminosilano (Adaptado de ZHU, 2004).

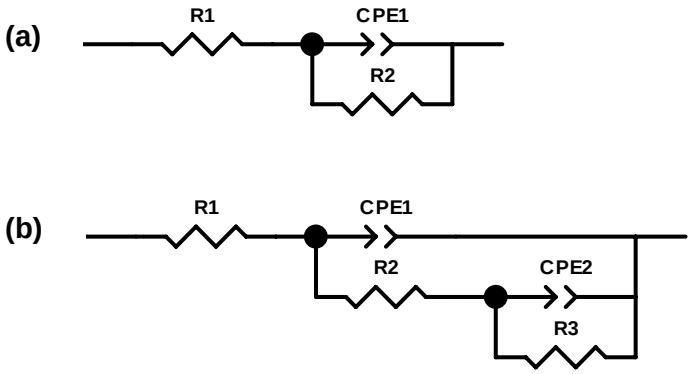


Figura 6. Circuitos elétricos equivalentes para os cp's pintados. a) após 48 horas de imersão; b) após 480 horas de imersão.

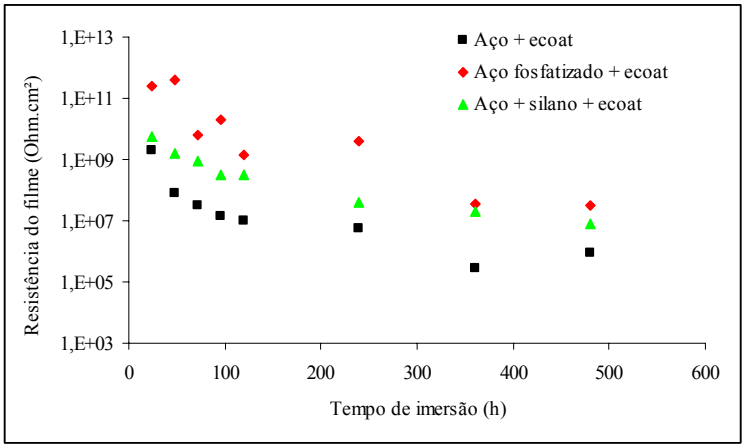
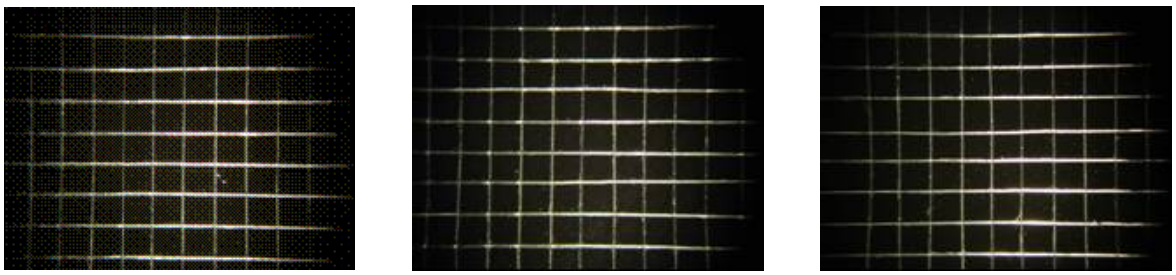


Figura 7. Evolução dos valores de resistência do filme para o aço carbono pintado por ecoat pré-tratado com fosfatização, com o BTSPA e não tratado para tempos crescentes de imersão.

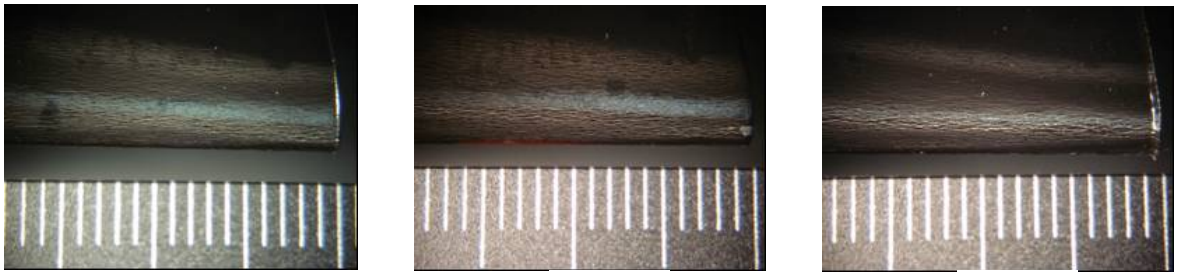


(a) **(b)** **(c)**

Figura 8. Resultados dos ensaios de aderência segundo norma ASTM D3359, em cdp's com diferentes pré-tratamentos e submetidos a pintura eletroforética. (a) aço carbono. (b) aço carbono fosfatizado. (c) Aço carbono com filme de silano

(a) **(b)** **(c)**

Figura 9. Imagens dos resultados dos ensaios de impacto, segundo norma ASTM D2794, em cdp's com diferentes pré-tratamentos e submetidos a pintura eletroforética. (a) aço carbono. (b) aço carbono fosfatizado. (c) Aço carbono com filme de silano



(a) (b) (c)

Figura 10. Imagens dos resultado dos ensaios de flexibilidade, segundo norma ASTM D522, em cdp's com diferentes pré-tratamentos e submetidos a pintura eletroforética. (a) aço carbono. (b) aço carbono fosfatizado. (c) Aço carbono com filme de silano

Lista de Tabelas

Tabela 1. Composição química do aço carbono empregado (CSN).

C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Al (%)	Ti (%)	N (%)	Fe (%)
0,003	0,230	0,008	0,009	0,050	0,029	0,012	0,002	bal

Tabela 2. Valores de resistência do eletrólito (R1), resistência do filme (R2) e capacitância do filme (CPE1) obtidos para o aço pintado sem pré-tratamento para diferentes tempos de imersão a partir dos circuitos equivalentes propostos.

Tempo de imersão (h)	R1 ($\Omega.cm^2$)	R2 ($\Omega.cm^2$)
24	733	$1,9.10^9$
48	725	$7,5.10^7$
72	699	$3,1.10^7$
96	699	$1,4.10^7$
120	697	$1,0.10^7$
240	732	$3,4.10^6$
360	732	$2,8.10^5$
480	878	$8,5.10^5$

Tabela 3. Valores de resistência do eletrólito (R1), resistência do filme (R2) e capacitância do filme (CPE1) obtidos para o aço fosfatizado e pintado para diferentes tempos de imersão a partir dos circuitos equivalentes propostos.

Tempo de imersão (h)	R1 ($\Omega.cm^2$)	R2 ($\Omega.cm^2$)
24	732	$2,5.10^{11}$
48	722	$3,9.10^{11}$
72	722	$2,1.10^{10}$
96	722	$6,5.10^{9}$
120	695	$1,5.10^{9}$
240	695	$3,9.10^{9}$
360	736	$3,4.10^{7}$
480	730	$3,0.10^{7}$

Tabela 4. Valores de resistência do eletrólito (R1), resistência do filme (R2) e capacitância do filme (CPE1) obtidos para o aço pré-tratado com o BTSPA e pintado para diferentes tempos de imersão a partir dos circuitos equivalentes propostos.

Tempo de imersão (h)	R1 ($\Omega.cm^2$)	R2 ($\Omega.cm^2$)
24	660	$5,7.10^{9}$
48	661	$1,7.10^{9}$
72	665	$8,5.10^{8}$
96	649	$3,2.10^{8}$
120	666	$3,2.10^{8}$
240	655	$4,2.10^{7}$
360	694	$2,0.10^{7}$
480	729	$8,1.10^{6}$