

Copyright 2012, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2012, em Salvador/BA no mês de maio de 2012.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Avaliação de revestimentos orgânicos anticorrosivos através da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica.

Luma Regina Rodrigues Barbosa^a, Eduarda Micaella Costa Malafaia^b, Vivaldo Moraes Pinto Júnior^c, Magda Rosângela Santos Vieira^d, Nadège Sophie Bouchonneau da Silva^e, Kleber Gonçalves Bezerra Alves^f, Severino Leopoldino Urtiga Filho^g

Abstract

The overall cost caused by corrosion represents important economic losses; therefore the development of new anticorrosive solutions is a major challenge for many sectors of engineering. There are several attempts to limit the corrosion process, in particular the use of metallic and organic coatings. This research focused on the study of an organic coating system developed in order to inhibit the corrosive action on metallic surfaces exposed to marine environments. The coating system investigated in this study is composed of epoxy zinc phosphate primer paint. The samples have been evaluated using adhesion tests and electrochemical impedance spectroscopy methods. The analysis of electrochemical impedance spectroscopy has been shown to be very sensitive to the permeation of the coatings investigated, in particular to the modification of capacitance and resistance values throughout the tests.

Keywords: corrosion, organic coating, anticorrosive paintings, electrochemical impedance spectroscopy

Resumo

O custo global ocasionado pela corrosão representa uma elevada perda econômica; logo o desenvolvimento de novas soluções anticorrosivas é um grande desafio para os diversos setores da engenharia. Várias são as tentativas de retardar o processo de corrosão, destacando-se o uso de revestimentos metálicos e orgânicos. A pesquisa teve como objetivo apresentar o estudo de um sistema de revestimento orgânico visando inibir a ação corrosiva em superfícies metálicas expostas à corrosão em ambientes marinhos. O revestimento investigado nesse trabalho foi um esquema de pintura composta por tinta de fundo do tipo epóxi fosfato de zinco. Os corpos de prova revestidos foram avaliados através de ensaios de aderência e ensaios eletroquímicos de espectroscopia de impedância eletroquímica. A análise de espectroscopia de impedância eletroquímica mostrou-se bastante sensível à permeação das películas de tinta investigadas pelo eletrólito, sendo notória a modificação nos valores de capacitância e resistência ao longo dos ensaios.

Palavras-chave: corrosão, revestimentos orgânicos, tintas anticorrosivas, espectroscopia de impedância eletroquímica

^a Estudante de graduação em Licenciatura em Química - UFPE

^b Estudante de graduação em Engenharia Química - UFPE

^c Estudante de graduação em Engenharia Mecânica - UFPE

^d Mestre, Bacharel em Química - UFPE

^e PHD, Engenharia Mecânica - UFPE

^f PHD, Engenheiro de Materiais - UFPE

^g PHD, Engenheiro Mecânico - UFPE

Introdução

A corrosão pode ser definida como a deterioração de um substrato, normalmente metálico, pela ação química ou eletroquímica do meio ambiente, podendo ocorrer em situações em que há esforços mecânicos como também na ausência destes (1). Dentre as mais variadas formas de proteção anticorrosiva é muito comum o emprego dos revestimentos orgânicos, no entanto outros métodos também são utilizados como: revestimentos metálicos, inibidores e etc. De forma geral os revestimentos orgânicos, que são representados pelas tintas, podem atuar na proteção anticorrosiva protegendo o substrato através dos mecanismos de proteção por barreira, anódica ou catódica (2).

Técnicas eletroquímicas, como potencial de circuito aberto (OCP) e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) propiciam, com seus resultados, melhor avaliação dos revestimentos orgânicos quando expostos a meios agressivos (3). A EIS é muito útil, pois permite analisar duas possíveis situações que venham a ocorrer em substratos metálicos revestidos: a deterioração de revestimentos orgânicos causados pela exposição a um eletrólito e o aumento da taxa de corrosão do substrato devido à deterioração do revestimento proveniente do ataque do eletrólito (4).

Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento de revestimentos orgânicos industriais através da realização de ensaios de potencial de circuito aberto e de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS). O comportamento dos gráficos de potencial ao longo do tempo, os diagramas de Nyquist, da capacitância e da resistência para os corpos de prova foram avaliados nas seguintes situações: revestimento intacto, revestimento com falha e metal sem revestimento. O esquema de pintura estudado era composto por uma tinta de fundo (*primer*) do tipo epóxi fosfato de zinco de alta espessura.

Metodologia

Preparação dos Corpos-de-prova

- **Corpos de prova para aplicação das tintas**

Foram confeccionados corpos de prova de aço ASTM A36 nas dimensões 200 mm x 100 mm x 3 mm, os quais posteriormente foram submetidos a tratamento superficial.

- **Corpos de prova para ensaios eletroquímicos do metal não revestido**

Para os ensaios eletroquímicos realizados no substrato sem revestimento, foram confeccionados corpos de prova de dimensões 10 mm x 10 mm x 3 mm. Estes foram preparados, soldados em fio de cobre e embutidos em resinas. Foi utilizada uma fita isolante de alta adesividade da marca 3M do Brasil LTDA visando delimitar a área de trabalho no substrato metálico que ficaria exposta ao eletrólito.

- **Tratamento superficial dos corpos de prova**

Os corpos de prova sem revestimentos foram submetidos ao processo de lixamento, utilizando uma politriz com circulação de água e rotação 250 rpm, e sequência de lixas de granulometrias 220, 320, 400, 600 e 1200. Após lixamento foi realizado o polimento das amostras com auxílio de uma pasta diamantada de 1 µm.

Os corpos de prova a serem revestidos com a tinta industrial foram submetidos à preparação de superfície, através do processo de jateamento abrasivo ao metal branco, padrão visual Sa 3, utilizando como abrasivo, escória de cobre a uma pressão média entre 5,5 Kgf/cm² a 6,0 Kgf/cm². Após o procedimento de jateamento foi avaliado o perfil de rugosidade das peças utilizando um rugosímetro analógico da marca MEDITEC e modelo MED-321A, a uma faixa de medição de 0 µm a 1000 µm.

Aplicação das tintas

Investigou-se uma tinta de fundo (*primer*) industrial à base de epóxi fosfato de zinco de alta espessura. A tinta foi aplicada por profissionais técnicos da empresa Galvanisa (Carpina-PE) com uso de pistola convencional, de acordo com as especificações da tinta.

Ensaio de controle da aplicação das tintas

- **Testes de aderência**

A aderência dos revestimentos aplicados foi avaliada de acordo com a norma ABNT NBR D-11003 (5) que descreve o teste de aderência do corte em X.

- **Medidas de espessura de película seca**

Para esse teste foi utilizado um medidor de espessura de película seca da marca Mitutoyo da versão Digi-derm. Foram realizadas 12 medidas em cada corpo-de-prova.

Medidas eletroquímicas

- **Potencial de Circuito Aberto**

Nas análises eletroquímicas foram utilizadas células eletroquímicas de três eletrodos: um eletrodo auxiliar de platina, um eletrodo de referência Ag/AgCl, KCl (saturado) e um eletrodo de trabalho (WE), e como eletrólito uma solução aquosa de NaCl 30 g/L.

Foram realizadas medidas em três condições diferentes: substrato não revestido, substrato com revestimento intacto, e substrato com revestimento apresentando falha com (aproximadamente 2 cm de comprimento e 0,1 cm de espessura, com área aproximadamente de 0,2 cm²) ao longo de um intervalo de 24 h, tempo necessário para que o potencial de corrosão pudesse ser determinado, a partir da estabilização do potencial de circuito aberto.

As diferentes condições dos corpos de prova investigados são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Eletrodos de trabalho utilizados nos ensaios eletroquímicos

Tipo de Eletrodo de trabalho	Área de exposição ao eletrólito (cm²)
Metal não revestido	0,32
Metal revestido	11,22
Metal revestido com falha	11,22

- **Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS)**

Para análise de EIS, utilizou-se a célula de três eletrodos descrita anteriormente. O equipamento utilizado para a realização das medidas eletroquímicas foi um potenciostato AUTOLAB PGSTAT 302N acoplado a um computador e controlado pela interface NOVA para aquisição e tratamento dos dados.

Na Figura 1, são apresentadas fotografias de ensaios realizados com corpos-de-prova sem revestimento, com e sem Gaiola de Faraday, respectivamente.



Figura 1 - Fotografias das células eletroquímicas (a) sem Gaiola de Faraday e (b) com a Gaiola de Faraday, respectivamente.

A Gaiola de Faraday foi utilizada com o objetivo de minimizar os ruídos produzidos por equipamentos externos que pudessem afetar as medidas.

As medidas foram realizadas a uma faixa de varredura de frequência 6 mHz a 40 kHz, para os tempos de 0 h, 4 h, 8 h, 12 h, 16 h, 20 h, 24 h, 48 h e 72 h de imersão contínua no eletrólito. Para os corpos de prova sem revestimento foram realizadas medidas de impedância apenas para o instante 0 h.

Resultados e discussão

Neste tópico serão abordados e discutidos os resultados obtidos através de testes realizados como mencionado na metodologia para o metal revestido com e sem introdução de defeitos e para o metal não revestido.

Avaliação do perfil de rugosidade do substrato

O perfil de rugosidade atingido por um substrato após o tratamento de superfície é de fundamental importância para o sucesso do esquema de pintura, pois este é o principal responsável pela aderência do revestimento ao substrato. O perfil de rugosidade indicado pelos especialistas nessa área é de 1/4 a 1/3 da espessura total da camada de tinta somadas todas as demãos. A rugosidade média obtida para um total de 40 medições, em quatro peças distintas foi de $(75,3 \pm 15,1) \mu\text{m}$.

Medição de espessura de película seca

Para avaliação da espessura da camada de película seca da tinta foram realizadas 12 medições em cada corpo de prova totalizando 48 medições. A Tabela 2 apresenta os valores da média e do desvio padrão das espessuras obtidas.

Tabela 2 – Média dos valores das espessuras de película seca do revestimento e o seu respectivo desvio padrão.

Revestimento	Especificação de Espessura do Primer utilizado na empresa (μm)	Média da Espessura Total (μm)	Desvio Padrão (μm)
Epóxi fosfato de zinco	115 a 135	135,85	21,97

O valor da espessura seca proposta pela empresa que executou o procedimento de pintura é de 115 μm a 135 μm , portanto, como pode ser visto na Tabela 2 o valor obtido se aproxima do valor especificado.

Aderência do revestimento

O teste de aderência em X foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR D-11003 (5), que descreve as condições de realização do ensaio. A Figura 2 mostra o resultado obtido após o teste de aderência.



Figura 2 - Fotografia do ensaio de Aderência em X.

De acordo com a Figura 2, pode-se concluir que após a realização do teste de aderência não houve destacamento do revestimento sendo, portanto a aderência considerada eficiente.

Análises Eletroquímicas

- **Potencial de Circuito aberto**

Os potenciais de circuito aberto dos corpos-de-prova sem revestimento, revestido intacto e revestido com falha, em função do tempo, para as primeiras 7h de imersão, são apresentados na Figura 3.

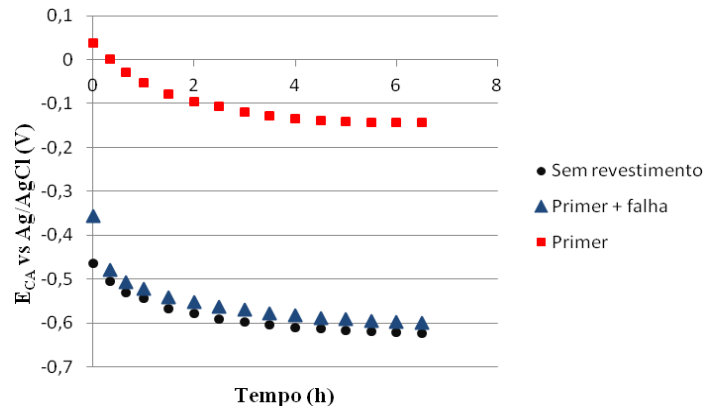


Figura 3 - Evolução do potencial de circuito aberto para as primeiras 7h de imersão.

O potencial de corrosão encontrado para a chapa de aço ASTM A36 sem revestimento, quando imerso em solução de NaCl a 3% p/v foi de $-0,648$ V em relação ao eletrodo de referência Ag/AgCl, para os outros dois sistemas, tinta sem falha e tinta com falha, são respectivamente $-0,120$ V e $-0,625$ V. De acordo com a literatura o valor de potencial típico para aços expostos a água do mar é de $-0,65$ V (6).

A partir do gráfico anterior, são observados ao longo de todo o período de imersão, valores de potenciais mais altos para o substrato revestido com tinta, o que demonstra o efeito protetivo desse material.

Os valores dos potenciais da tinta com falha e do metal, ao longo do tempo mantêm-se bastante próximos, sugerindo, que defeitos, mesmo que pequenos, quando introduzidos promovem modificações no potencial do material, uma vez que a tinta sem falha teve um comportamento protetivo muito superior (6, 7).

A Figura 3 mostra o decaimento dos valores de potencial em função do tempo e posterior tendência à estabilização. O decaimento do valor de potencial é indicativo do processo de corrosão. No caso do material revestido sem falha, o decaimento sugere que apesar da ausência de falha a tinta está sendo permeada

O monitoramento do potencial de circuito aberto permite avaliar os fenômenos que ocorrem na interfase - superfície (metal ou tinta)/eletrólito - contudo pode gerar interpretações ambíguas, por exemplo um aumento do potencial pode está associado a um processo de passivação ou ao aumento da delaminação do revestimento. (6, 7).

Logo, o seu uso deve ser integrado a outras técnicas, que permitam uma compreensão dos fenômenos na interfase, na película de tinta e por baixo dela, como por exemplo, a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica (8, 9, 10), cujos resultados serão apresentados a seguir.

- **Análises de espectroscopia de impedância eletroquímica**

A EIS possibilita avaliar o comportamento do revestimento submetido à imersão contínua ao longo do tempo, permitindo o estudo da evolução de falhas superficiais, e permeação do eletrólito na película de tinta ao longo do tempo.

A Figura 4 apresenta o comportamento do diagrama de Nyquist do metal sem revestimento, e do metal revestido com e sem falha em solução de NaCl (30g/L), todos no tempo de imersão de 0 h.

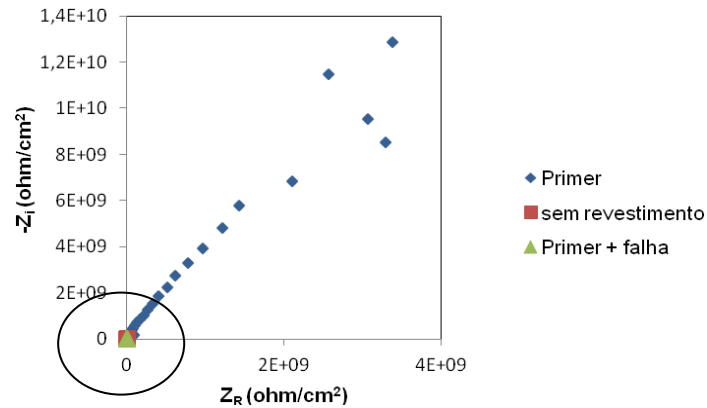


Figura 4 – Diagrama de Nyquist no tempo 0 h para as três situações analisadas.

De acordo com a Figura 4, pode-se observar que o metal que possui revestimento intacto (*primer*) atua limitando a passagem de corrente elétrica entre o metal e o eletrólito. Isso é confirmado através da curva de aproximação retilínea observada, cuja interpretação revela valores de resistência mais expressivos se comparado ao metal não revestido e ao revestimento com falha.

Como observado na Figura 4, os valores de impedância das curvas do metal sem revestimento e do corpo-de-prova com falha no revestimento estão bem próximos da origem, sendo suprimidos pelos valores da curva do *primer*. Isto ocorre devido à grande diferença na ordem de grandeza dos valores de impedância para o *primer* intacto quando comparado aos demais sistemas.

Para melhor visualização do comportamento obtido, são apresentadas na Figura 5, apenas as curvas do metal com falha no revestimento e do metal sem revestimento no tempo de 0h de imersão.

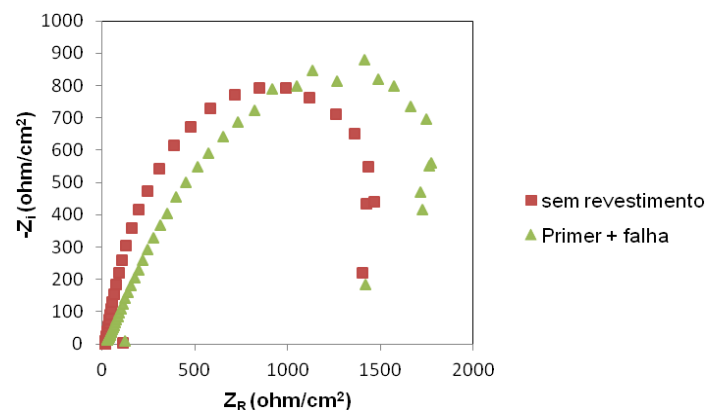


Figura 5 – Diagrama de Nyquist no tempo 0 h para o metal sem revestimento e o revestimento com falha.

A Figura 5 demonstra que tanto para o metal apresentando revestimento com falha quanto para o metal sem revestimento há a tendência, nos primeiros instantes de exposição, de formação de um semicírculo que está relacionado aos componentes resistivos e capacitivos.

A introdução de uma pequena falha na película de tinta faz com que uma região do metal fique exposta ao eletrólito, de modo a sofrer corrosão preferencialmente nesta região. Além disso, pode haver permeação de eletrólito por baixo da película de tinta na zona de defeito, bem como através do trecho da tinta intacta, o que promove uma diferenciação entre as duas curvas observadas anteriormente.

Analisou-se o comportamento do metal revestido com *primer* intacto durante um tempo 72 h de exposição ao eletrólito. Esta análise possibilita o acompanhamento da degradação do revestimento em função do contato com o eletrólito ao longo do tempo. A Figura 6 apresenta o diagrama de Nyquist para as condições ditas acima.

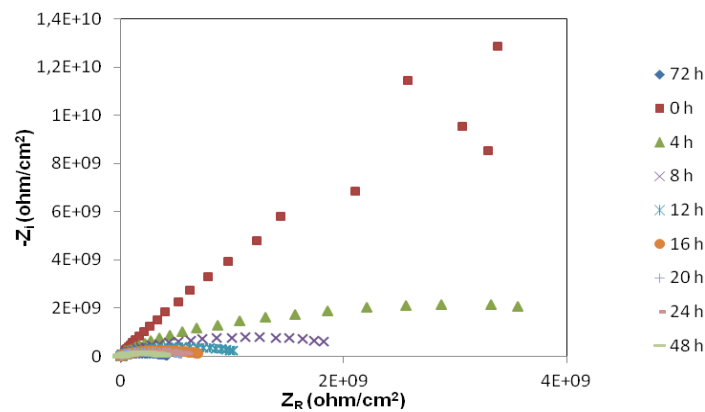


Figura 6 – Diagrama de Nyquist para o corpo-de-prova revestido com *primer* intacto ao longo de um período de 72 h de imersão.

Como para tempos de exposição mais elevados há uma diminuição do arco capacitivo, para melhor visualização do comportamento do revestimento em função do tempo traçou-se um novo gráfico apresentado na Figura 7, suprimindo a curva do tempo 0 h de imersão, que apresenta um comportamento de elevada resistência caracterizando materiais ainda não permeados.

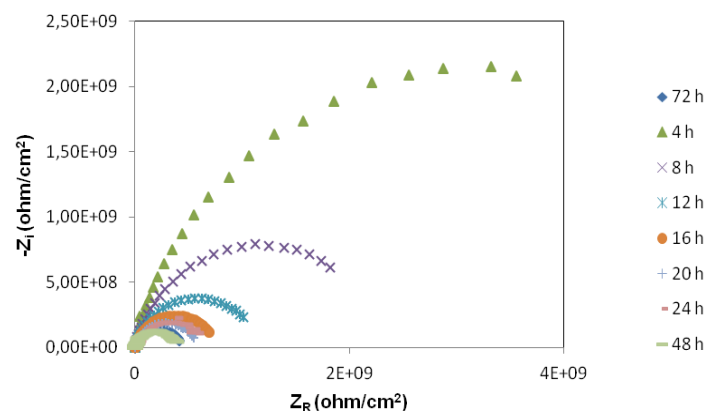


Figura 7 – Diagrama de Nyquist para o corpo-de-prova revestido com *primer* intacto ao longo de um período de 72 h de imersão, com supressão do tempo de imersão de 0 h.

Na Figura 7 observa-se uma diminuição do arco capacitivo em função do tempo de imersão, o que sugere a ocorrência de permeação do eletrólito através da película de tinta.

Da mesma forma, foi avaliado o comportamento do revestimento quando este apresenta falha, ao longo de 72h em imersão contínua na mesma solução de NaCl a 30 g/L.

Na Figura 8 é apresentado o diagrama de Nyquist para o material com defeito no revestimento.

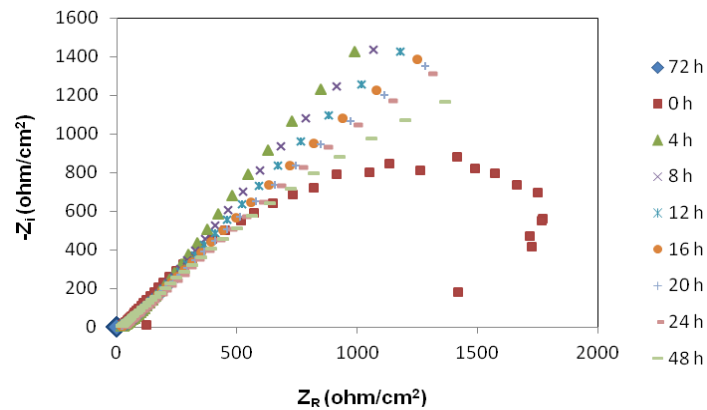


Figura 8 – Diagrama de Nyquist para o corpo-de-prova revestido com *primer* apresentando falha ao longo de um período de 72 h de imersão.

Os dados obtidos a partir do digrama de Nyquist da Figura 8 mostram que os valores dos Z real e Z imaginário apresentam-se bem menores se comparados com a situação anterior (Figura 7), para o *primer* intacto. Isto implica que para o revestimento com defeito, são observados menores valores de resistência e valores de capacitância mais elevados, quando comparados aos valores obtidos para o revestimento isento de falha.

Comparando-se os gráficos das Figuras 7 e 8, observa-se para a curva do *primer* intacto a formação de um semicírculo, já no sistema *primer* com falha há uma distorção do gráfico nas zonas de baixa frequência, provavelmente ocasionada por: processo difusional do líquido, taxa de corrosão e permeação do eletrólito sob a película de tinta (11).

A partir dos diagramas de Nyquist foram obtidos os valores de resistência e capacitância dos esquemas analisados por meio da extrapolação do arco capacitivo ao eixo real. Na Tabela 3 são apresentados os valores de resistência e capacitância para o tempo 0 h de análise.

Tabela 3 – Média dos valores das espessuras de película seca do revestimento e o seu respectivo desvio padrão.

Condições do substrato	Substrato	Substrato revestido intacto	Substrato revestido com falha
Resistência (Rp - ohm)	$1,812 \times 10^3$	$3,353 \times 10^{10}$	$2,567 \times 10^3$
Capacitância (F)	$1,490 \times 10^{-4}$	$7,911 \times 10^{-10}$	$4,158 \times 10^{-5}$

De acordo com os dados apresentados na Tabela 3 pode-se avaliar que o sistema que confere maior proteção anticorrosiva é o substrato com revestimento intacto, pois este por se tratar de um revestimento polimérico não condutor, atuará inicialmente como barreira para a passagem de corrente o que é observado através do valor de resistência da ordem de $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}^2$. Para o metal não revestido e o revestido com falha, a resistência é da ordem de $10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$, que sugere a ocorrência da passagem de fluxo de corrente e conseqüentemente, a corrosão do substrato (3, 12).

Para o aço, a proteção contra a corrosão é garantida quando o valor da resistência excede $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$; a corrosão pode ocorrer e pode não ocorrer se este valor estiver entre $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ e $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$, mas quando este valor cai para menos de $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ a corrosão sempre ocorre (7, 12, 13). Logo, pode-se afirmar que tanto o metal sem revestimento, quanto o sistema com falha introduzida estão sujeitos à ação corrosiva, já nos primeiros instantes de exposição ao eletrólito.

O substrato revestido com presença de falha apresenta uma resistência à corrosão baixa se comparada à do revestimento intacto. Além da permeação através dos trechos de tinta sem defeitos, outro fator que pode acarretar na intensificação do processo corrosivo na região com metal exposto é a possibilidade do processo difusional por baixo da película de tinta.

Na Figura 9, é apresentado um gráfico que relaciona a evolução da resistência à polarização ao longo de 72 h dos corpos-de-prova com revestimento intacto e com falha no revestimento.

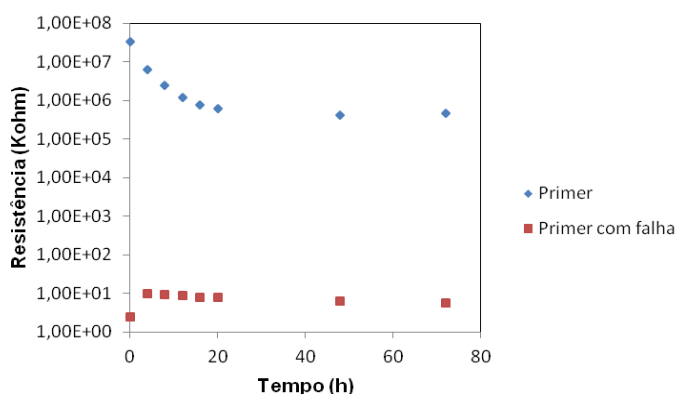


Figura 9 – Gráfico da Resistência x Tempo (h) para os substratos com revestimento intacto e com revestimento com falha.

Como podem ser observados na Figura 9, os valores mais altos de resistência ao longo do tempo correspondem ao sistema *primer* intacto, o que permite concluir que esta confere ao substrato uma proteção anticorrosiva mais eficiente.

Ainda na Figura 9, observa-se que os fluxos de corrente nos sistemas apresentam valores bastante diferentes. Isso ocorre, pois regiões com falhas, onde ocorre a exposição contínua de uma pequena área do metal (região anódica), fazem com que o fluxo de corrente seja direcionado a essas regiões, intensificando o processo corrosivo, podendo provocar o processo de corrosão localizada (6).

Na Figura 10 é apresentado o comportamento da capacitância ao longo de tempo para corpos-de-prova pintados na ausência e na presença de falha.

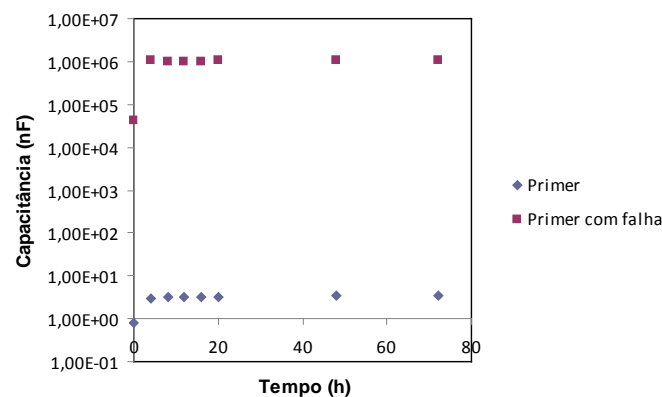


Figura 10 – Gráfico da Capacitância x Tempo (h) para os substratos com revestimento intacto e revestimento com falha.

A partir da Figura 10 observa-se que nas primeiras 4 h de imersão ao eletrólito há uma elevação do valor da capacitância, tanto para o sistema *primer* quanto para o sistema *primer* com falha. Em seguida os valores apresentam pequenas variações tendendo para uma estabilização.

Para uma melhor visualização desse comportamento ao longo do tempo, a Tabela 4 mostra os valores de capacitância para as duas condições de revestimento ao longo do tempo de 72 h.

Tabela 4 – Valores de capacitância para o revestimento intacto e o revestimento com falha ao longo do tempo de 72 h

Tempo de Imersão (h)	Capacitância (F)	
	Revestimento sem falha	Revestimento com falha
0	$7,90 \times 10^{-10}$	$4,16 \times 10^{-5}$
4	$3,00 \times 10^{-9}$	$1,11 \times 10^{-3}$
8	$3,10 \times 10^{-9}$	$1,03 \times 10^{-3}$
12	$3,18 \times 10^{-9}$	$1,02 \times 10^{-3}$
16	$3,22 \times 10^{-9}$	$1,00 \times 10^{-3}$
20	$3,20 \times 10^{-9}$	$1,03 \times 10^{-3}$
48	$3,40 \times 10^{-9}$	$1,08 \times 10^{-3}$
72	$3,50 \times 10^{-9}$	$1,07 \times 10^{-3}$

Os revestimentos orgânicos, de forma geral, quando imersos em solução aquosa, provocam um aumento significativo na capacitância, o qual é interrompido quando a película de revestimento torna-se saturada (14). A quantidade de eletrólito que permeia depende da natureza e da microestrutura do revestimento. Em sistemas onde a imersão ocorre por tempos prolongados, a capacitância pode permanecer constante ou aumentar por absorção de água (7, 10).

Quando a película de revestimento sofre permeação do eletrólito, os valores de capacitância geralmente ficam na faixa de valores entre 10^{-8} F a 10^{-10} F, para estágios mais avançados de imersão com tempos maiores, observam-se valores de capacitância em torno de 10^{-7} F a 10^{-4} F (7,15).

Logo, a partir dos valores apresentados na Tabela 4, observa-se que os corpos-de-prova com falha no revestimento apresentaram valores de capacitância alta (10^{-5} F a 10^{-3} F), devido à intensa permeação do eletrólito, enquanto que os corpos-de-prova que não possuíam falhas apresentaram capacitância em torno de 10^{-11} F a 10^{-9} F, que se deve a uma menor permeação de eletrólito ao filme de revestimento.

Análise visual do processo corrosivo

Ao realizar as análises eletroquímicas nos corpos-de-prova, estes sofreram alterações visuais que estão apresentadas na Figura 11.

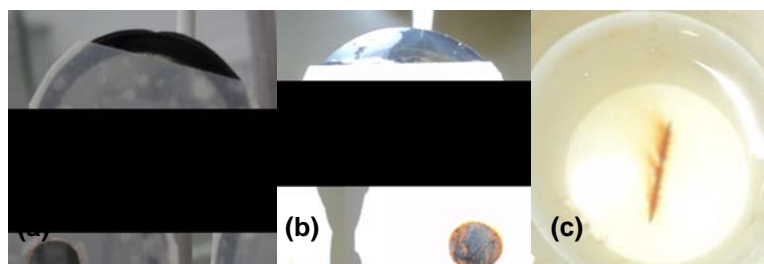


Figura 11 – Fotos dos corpos-de-prova usados para análises de medidas eletroquímicas: (a) não revestido antes dos ensaios eletroquímicos; (b) não revestido após ensaios eletroquímicos; (c) corpo-de-prova com falha no revestimento.

A Figura 11 (a) mostra um corpo-de-prova embutido antes da realização das análises eletroquímicas de potencial de circuito aberto e de espectroscopia de impedância eletroquímica, em seguida na Figura 11 (b), é apresentado o mesmo corpo-de-prova após a realização dessas medidas em solução de NaCl a 3% p/v como eletrólito. Observa-se a corrosão generalizada da superfície metálica exposta ao meio corrosivo.

A Figura 11 (c) apresenta o processo de corrosão na região de falha introduzida na película de tinta. Em trechos com defeitos observa-se a intensificação da corrosão, pois todo o ataque corrosivo é direcionado a esta região. Além disso, a zona de defeito é bastante propícia à permeação de eletrólito por baixo da película, podendo ocasionar o processo de corrosão filiforme (1).

Conclusões

A partir da análise eletroquímica de potencial de circuito aberto, observaram-se significativas diferenças entre os potenciais dos sistemas sem revestimento e com revestimento nas condições de presença e ausência de falha. Maiores valores de potenciais foram observados, para os corpos de prova revestidos e isentos de falhas, confirmando a maior proteção, quando comparado com o metal não revestido e com a tinta apresentando falha, que caracteriza processo corrosivo do metal.

A análise de espectroscopia de impedância eletroquímica mostrou-se bastante sensível ao processo de permeação do eletrólito através da película de tinta, sendo possível identificar modificações significativas no processo de degradação do revestimento em função do tempo.

O revestimento intacto apresentou valores de resistência superiores aos valores observados para o metal sem pintura e para o material pintado com a presença de falha. Esse efeito representa uma maior barreira ao fluxo de corrente, conferindo ao material intacto um caráter de maior proteção.

O comportamento da capacitância revelou a forte influência da presença de defeito no processo de degradação da película de tinta, sendo observados para esse sistema, valores de capacitância da ordem de 10^{-5} F a 10^{-3} F, que são característicos de processo corrosivo ocorrendo sob a película de tinta.

Referências bibliográficas

- (1) GENTIL, V. **Corrosão**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 6ª Ed., 2011.
- (2) PAREDES, R.S.C.; RODRIGUEZ, R.M.H.P.; PAEZ, M.T.P; VIANNA, G.; CAPRA, A., Proteção contra a corrosão marinha - comparação de revestimentos de alumínio depositados por aspersão térmica com ar comprimido, argônio e nitrogênio. Anais do 2º Congresso brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. Associação brasileira de P&D em Petróleo e Gás. 2005.
- (3) McINTYRE, J. M.; PHAM, H. Q. Electrochemical impedance spectroscopy a coatings optimizations. **Progress in Organic Coatings**, v. 27; p. 201-207, 1996.
- (4) LOVEDAY, D., PETERSON, P., RODGERS, B. Evaluation of Organic Coatings with Electrochemical Impedance Spectroscopy. Part 2: Application of EIS to Coatings. **JCT CoatingsTech**, p. 88-93, 2004.
- (5) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR11003: **Tintas - Determinação da aderência**, 2009.
- (6) VERGÉS, G. R. **Estudo do desempenho de sistemas de pintura para materiais das redes de distribuição de energia elétrica situadas em regiões litorâneas**. Dissertação de Mestrado – Setor de Tecnologia (Engenharia e Ciências dos Materiais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- (7) VIEIRA, M.R.S. **Avaliação de ensaios simulativos de corrosão e biocorrosão em sistemas estático e dinâmico de revestimentos aplicados em aço carbono**. Dissertação de Mestrado – Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.
- (8) MARGARIT, I. C. P. **Aplicação da técnica de Impedância Eletroquímica no Estudo de Tintas sob forma de filmes livres e aplicadas sobre aço-carbono**. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1987.
- (9) ARAÚJO, W. S. **Influência dos óleos naturais nas propriedades anticorrosivas das tintas alquídicas**. Tese de Doutorado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.
- (10) LEITE, A. O. S. **Desenvolvimento e estudos de tintas epóxis anticorrosivas ecologicamente corretas**. Tese de Doutorado em Química Inorgânica. UFC. Fortaleza, 2004.
- (11) SUAY, J.J., RODRIGUEZ, M.T., RAZZAQ, K.A., CARPIO, J.J., SAURA, J.J. The evaluation of anticorrosive automotive epoxy coatings by means of electrochemical impedance spectroscopy. **Progress in Organic Coatings**, v. 46; p. 121-129, 2003.

- (12) AMIRUDIN, A. e THIERRY, D. Application of electrochemical impedance spectroscopy to study the degradation of polymer – coated metals. **Progress in Organic Coatings**. v.26, 1-28 p., 1995.
- (13) CASTELA, A.S.L; SIMÕES, A.M. Assessment of water uptake in coil coatings by capacitance measurements. **Progress in Organic Coatings**, v. 46; 55-61 p., 2003.
- (14) DEFLORIAN, F.; FEDRIZZI, L.; ROSSI, S. e BONORA, P. L. Organic Coatings Capacitance Measurement by EIS: Ideal and Actual Trends. **Electrochimica Acta**, v.44, 4243-4249 p., 1999.
- (15) WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, vol.2, 2003.