
Copyright 2018, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2018, em São Paulo, no mês de maio de 2018.

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

Influência da preparação de superfície no desempenho de tintas de fundo aplicadas a estruturas marítimas sob proteção catódica

Idalba Souza dos Santos^a, Ladimir José de Carvalho^b, Simone L. D. C. Brasil^c

Abstract

Ships and offshore structures are protected by anticorrosive coatings and cathodic protection because of the very aggressive marine environment. Coating performance depends on the surface preparation selected to cleaning the metal surface. The performance of two epoxy primers systems was evaluated: one based on the principle of “protective rust” and the other formulated with the zinc phosphate pigment. Three types of surface preparation conditions were applied, under cathodic protection. Accelerated corrosion tests (immersion in 3,5 % NaCl solution with and without cathodic protection, salt spray and alternating immersion-emersion), and adhesion tests were carried out with these coatings. The results showed better performance for the wet abrasive blast cleaning to Sa 2 ½ grade. Cathodic protection reduced the adhesion between coatings and their substrates. The epoxy coating formulated with zinc phosphate presented better performance in the accelerated corrosion tests. However, the coating pigmented with “protective rust” demonstrated lower cathodic protection current demand in the immersion test when compared to the coating pigmented with zinc phosphate.

Keywords: coating, cathodic protection, surface preparation, corrosion.

Resumo

Navios e estruturas *offshore* geralmente são protegidos por tintas anticorrosivas e proteção catódica, uma vez que o ambiente marinho é considerado um meio de alta agressividade ao aço carbono. O desempenho das tintas depende em grande parte do tipo de preparação de superfície adotada. Foi investigado o desempenho de dois sistemas de *primers* epóxis, sendo um deles formulado com base no princípio das “ferrugens protetoras” e o outro pigmentado com fosfato de zinco, quando submetidos a três tipos de preparação de superfície e sob proteção catódica. A avaliação dos revestimentos foi efetuada por meio de ensaios acelerados de corrosão (imersão em solução de NaCl 3,5% com e sem proteção catódica, névoa salina e imersão-emersão alternada) e de aderência. Os resultados mostraram melhor desempenho para o jateamento abrasivo úmido ao grau Sa 2 ½. A proteção catódica reduziu a aderência dos revestimentos ao substrato. A tinta epóxi formulada com fosfato de zinco apresentou melhor desempenho nos ensaios acelerados de corrosão. Entretanto, a tinta formulada com “ferrugem

^a Mestranda, Engenheira Química - MB - Marinha do Brasil - UFRJ/EQ, Laboratório de Corrosão.

^b D.Sc., Professor - UFRJ/EQ - Universidade Federal do Rio de Janeiro - Escola de Química, Laboratório de Corrosão.

^c D.Sc., Professora - UFRJ/EQ - Universidade Federal do Rio de Janeiro - Escola de Química, Laboratório de Corrosão.

protetora” apresentou menor demanda de corrente de proteção catódica no ensaio de imersão quando comparada à tinta com fosfato de zinco.

Palavras-chave: revestimento, proteção catódica, preparação de superfície, corrosão.

Introdução

Na indústria naval, a pintura de estruturas marítimas é largamente empregada para conferir proteção anticorrosiva às áreas que se encontram imersas na água do mar ou em atmosfera marítima. Além da aplicação de esquema de pintura, a proteção catódica também é utilizada como técnica complementar à proteção contra corrosão dessas estruturas (1).

O desempenho de um esquema de pintura é influenciado por fatores como o tipo de preparação da superfície aplicado ao substrato, o método de aplicação das tintas, a qualidade dos produtos e a especificação de pintura selecionada. Durante a execução dos serviços de pintura nos estaleiros, são utilizadas várias ferramentas e equipamentos que possibilitam obter preparações de superfície com diferentes graus de limpeza e rugosidade.

O desenvolvimento tecnológico na área de revestimentos orgânicos tem sido intenso, mas o emprego de tecnologias convencionais ainda se apresenta como uma alternativa adequada por possibilitar a obtenção de custos e de desempenho razoavelmente aceitáveis, como é o caso do uso de tintas epoxídicas pigmentadas com fosfato de zinco. Uma proposta alternativa de proteção anticorrosiva é o uso de tintas chamadas “ferrugens protetoras”, cuja origem está baseada no comportamento dos denominados aços patináveis (2). Estas tintas propõem a redução da corrente de corrosão que circula entre as áreas anódica e catódica durante um processo corrosivo, através da manutenção de toda a superfície metálica em um mesmo nível de potencial. Para tal, aplica-se uma tinta pigmentada com um óxido de composição igual à da ferrugem que é formada naturalmente quando o metal está exposto ao meio corrosivo (2). Desta forma, as tintas denominadas “ferrugens protetoras” se propõem a funcionar com base nos princípios da termodinâmica eletroquímica, além do convencional mecanismo de proteção por barreira comum à maioria das tintas usadas industrialmente.

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho de dois sistemas de *primers*, quando submetidos a diferentes preparações de superfície e sob proteção catódica. Dos sistemas de *primers* estudados, um deles é formulado com base nas “ferrugens protetoras” e o outro composto de tintas pigmentadas com fosfato de zinco, conforme especificação de pintura da Marinha do Brasil (MB). Para preparação da superfície dos corpos de prova foram empregados jateamento abrasivo seco ao grau Sa 2 ½, jateamento abrasivo úmido ao grau Sa 2 ½ e tratamento mecânico ao grau SP 11, que são métodos de limpeza largamente utilizados na indústria naval.

Metodologia

Foram preparados corpos de prova de aço-carbono AISI 1016 com dimensões 100 mm x 150 mm x 6,75 mm e, para o ensaio de imersão-emersão alternada, com dimensões 40 mm x 100 mm.

Para avaliação da influência da preparação de superfície, foram aplicadas as seguintes técnicas para preparação de superfície: jateamento abrasivo seco ao grau Sa 2 ½ (3), jateamento abrasivo úmido ao Sa 2 ½ (3) e tratamento mecânico ao grau SP 11 (4). Para simplificação, estas preparações de superfície serão denominadas por JS Sa 2 ½, JU Sa 2 ½ e SP11, respectivamente.

Na execução do JS Sa 2 ½ utilizou-se o óxido de alumínio N40 como abrasivo e o perfil de rugosidade médio obtido foi de 28 µm. No JU Sa 2 ½ foi empregada a escória de cobre como abrasivo, que resultou em uma rugosidade média de 100 µm e em uma superfície com *flash rust* leve. Para obter o SP 11, foi efetuada uma remoção preliminar da carepa de laminação com uma lixadeira angular com disco de desbaste grão 80 e, posteriormente, foi utilizada uma escova rotativa elétrica, cujo princípio de funcionamento é mecânico-rotativo, que conferiu ao substrato uma rugosidade média de 48 µm.

Os seguintes sistemas de *primers* foram aplicados:

- uma demão de tinta epóxi pigmentada com “ferrugem protetora” e com polianilina (PAni), sendo aqui representado por EFP (produto patentado (5)); e
- uma demão de tinta epóxi tolerante à umidade residual pigmentada com fosfato de zinco e curada com poliamida e de uma demão de tinta epóxi modificada com fosfato de zinco e curada com poliamida (produto de fabricante nacional utilizado pela MB). Para simplificação, será denominado por sistema de *primers* epóxi fosfato de zinco (EFZ).

A aplicação das tintas foi feita por meio de rolo, seguindo as recomendações dos fabricantes. A espessura seca média das películas de tinta foi de 277 µm para as placas pintadas com EFP e de 280 µm para as placas pintadas com EFZ (cerca de 90 µm para primeira demão e de 190 µm para a segunda demão).

Os seguintes ensaios foram realizados:

- Análise do teor de cloretos por análise cromatográfica do extrato aquoso colocado em contato com as placas;
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da seção transversal para caracterizar a rugosidade e a eficiência da limpeza dos substratos;
- Ensaio de imersão sem proteção catódica (PC) com base na norma ISO 2812-2 (6) e ensaio de imersão com PC em potencial de, aproximadamente, -955 mV em relação ao eletrodo de calomelano 3 M (representado por EC3M). A Figura 1 ilustra o aparato montado para os sistemas de imersão em solução de NaCl 3,5% com e sem PC. A duração total dos ensaios foi de 4313 h. Apenas as amostras do ensaio com PC tiveram uma incisão de 50 mm x 3 mm;
- Névoa salina durante 2432 h, segundo a norma ASTM B117 (7). Duas amostras receberam incisão de 80 mm x 3 mm e uma foi mantida com pintura intacta para referência;
- Ensaio de imersão-emersão alternada, com base no método desenvolvido pelo *Centre Belge d'Étude de la Corrosion* (CEBELCOR) (8). Os corpos de prova foram mantidos em movimento circular, sendo alternativamente imersos em solução de NaCl 3,5%, por 77 dias, totalizando 2813 ciclos. A temperatura da solução foi de, aproximadamente, 34°C e do ar seco 40°C. As amostras receberam uma incisão de 50 mm x 3 mm; e



Figura 1 - Arranjo experimental para os ensaios de imersão em solução de NaCl 3,5% com e sem proteção catódica.

– Monitoramento do potencial dos corpos de prova dos ensaios de imersão em solução de NaCl 3,5% com e sem PC. Adicionalmente, no ensaio de imersão com PC foi efetuada a medição da corrente efetivamente necessária para conferir PC à placa revestida com incisão. Desta forma, foi possível comparar, quantitativamente, a demanda da corrente de PC entre os diferentes sistemas de *primers* e para os três tipos de preparação da superfície.

A avaliação das amostras ensaiadas foi realizada pelos seguintes critérios:

- Avanço da corrosão e da delaminação a partir da incisão para as placas dos ensaios de imersão com PC, névoa salina e imersão-emersão, com base na norma ISO 4628-8 (9). Neste trabalho, optou-se por calcular apenas a área delaminada para representar a área do avanço de corrosão e de delaminação nos corpos de prova;
- Grau de degradação dos revestimentos: grau de empolamento, de corrosão e de fendimento segundo as normas ISO 4628-2 (10), ISO 4628-3 (11) e ISO 4628-4(12), respectivamente;
- Avaliação da presença de corrosão no substrato após a remoção da pintura, em uma área ensaiada dos corpos de prova submetidos aos ensaios de imersão com e sem PC e de névoa salina. Foi empregada a norma ASTM D 610 (13) para classificar os resultados; e
- Avaliação da adesão dos revestimentos das placas submetidas aos ensaios de imersão em solução de NaCl 3,5% com e sem PC e de névoa salina. O método empregado foi o da ASTM D4541 (14). Também foi realizado ensaio de aderência em amostras não ensaiadas, como referência.

Resultados e discussão

Avaliação dos substratos submetidos a diferentes preparações de superfície

O teor de cloreto na superfície das amostras, após cada preparação de superfície, está apresentado na Tabela 1. Observa-se que os teores de cloreto não apresentam diferenças significativas entre as preparações e são inferiores aos limites estabelecidos nas normas nacionais e internacionais, que preconizam tolerâncias para o teor de cloreto entre 20 mg/m² a 30 mg/m² para áreas imersas das estruturas metálicas (15).

Tabela 1 - Teor de cloreto remanescente nos substratos metálicos após a realização das preparações de superfície.

Preparação de superfície	Teor de cloreto (mg/m^2) ¹
JS Sa 2 ½	8,4 ± 0,9
JU Sa 2 ½	10,3 ± 3,5
SP 11	8,7 ± 5,8

1. Valores expressos em termos de média aritmética e desvio padrão.

As imagens obtidas na MEV da seção transversal de amostras tratadas, pintadas e não ensaiadas estão apresentadas na Figura 2. A resina identificada nas imagens refere-se ao produto usado para o embutimento das amostras.

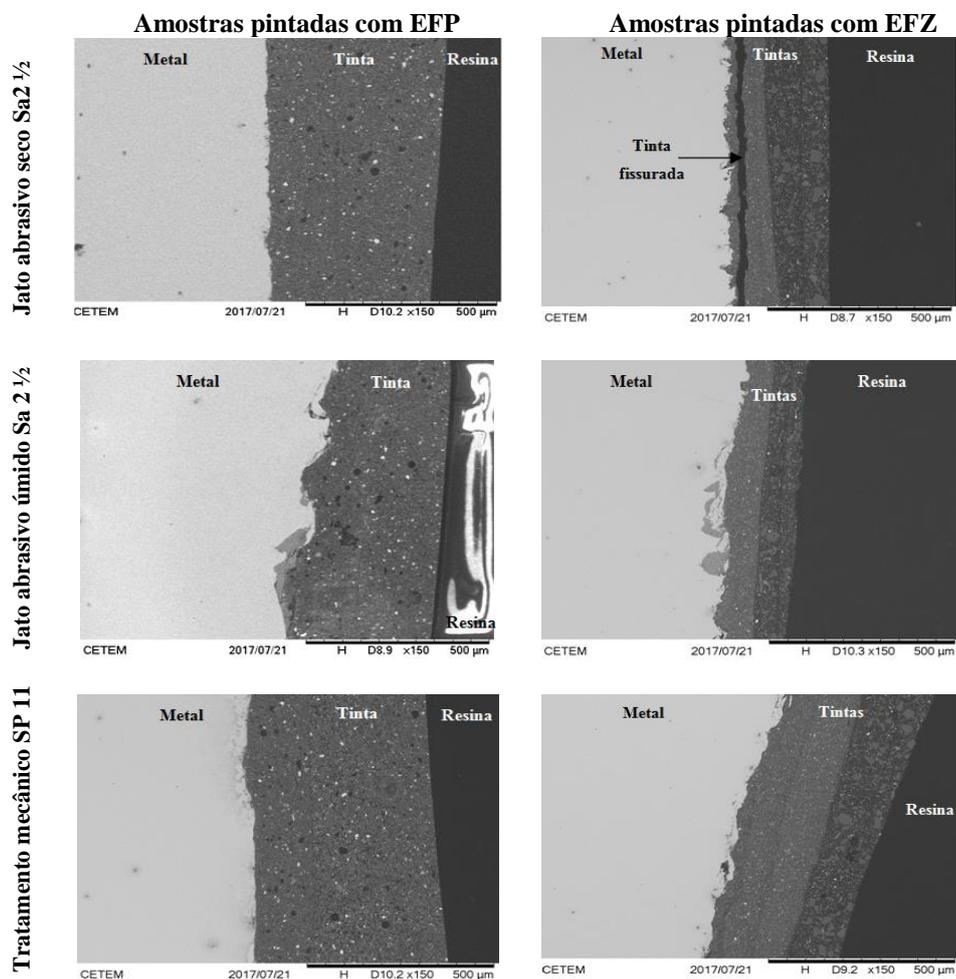


Figura 2 - Imagens da MEV na seção transversal das placas não ensaiadas, submetidas a diferentes preparações de superfície e pintadas com *primers* EFP e EFZ.

No que se refere à rugosidade, nota-se que as amostras preparadas por JU Sa 2 ½ apresentam vales mais profundos, o que contribui para melhor ancoragem da tinta. Desta forma, tem-se o seguinte resultado em ordem decrescente de rugosidade: JU Sa 2 ½ > SP 11 > JS Sa 2 ½. A menor rugosidade observada para o JS Sa 2 ½ deve-se ao abrasivo empregado, o óxido de alumínio, que gera menor perfil de rugosidade e alto consumo de abrasivo por área jateada

devido à sua maior fragmentação pelo impacto com o substrato (16). Além disso, nas imagens não foram identificados produtos de corrosão remanescentes na interface substrato/tinta.

Avaliação do desempenho anticorrosivo dos revestimentos

- Grau de degradação dos revestimentos

Na Figura 3 estão apresentadas a densidade e o tamanho das bolhas observadas em cada tipo de preparação de superfície e sistema de *primers*, para os ensaios de imersão-emersão alternada e névoa salina, baseando-se na norma ISO 4628-2 (10). Os valores reportados representam a classificação média das amostras ensaiadas.

Não foi identificado empolamento na maioria dos corpos de prova dos ensaios de imersão com e sem PC. A névoa salina e a imersão-emersão mostraram-se como ensaios de maior agressividade aos revestimentos, mesmo com menor tempo de duração. Apesar de serem observadas bolhas apenas nas placas pintadas com EFP durante a imersão-emersão alternada, no ensaio de névoa salina foram identificadas bolhas apenas no sistema de *primers* EFZ, o que denota a necessidade de comparação dos resultados do grau de degradação com os demais critérios de avaliação dos revestimentos.

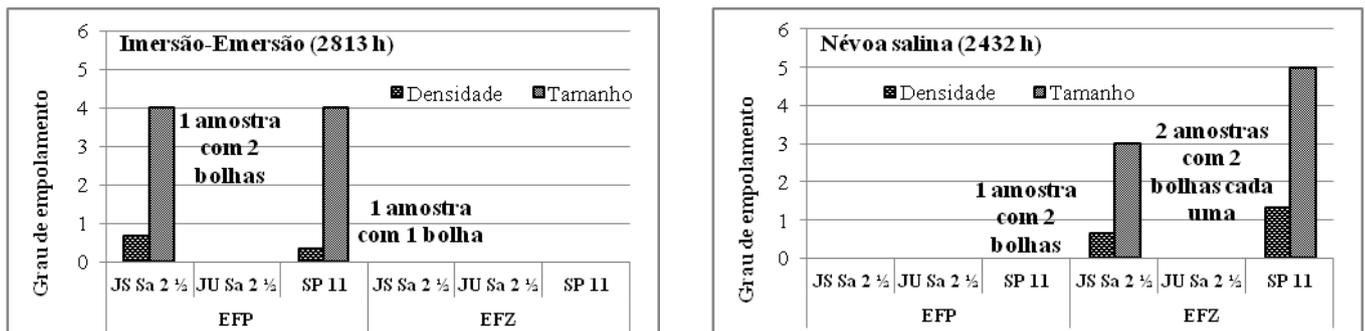


Figura 3 - Classificação do grau de empolamento quanto à densidade e ao tamanho de bolhas no final dos ensaios acelerados de corrosão.

Não foi observado grau de corrosão considerável nos revestimentos por pintura para as diferentes preparações de superfície, considerando o procedimento da ISO 4628-3 (11). Com relação ao grau de fendimento (ISO 4628-4 (12)), em nenhum dos ensaios foram identificadas amostras com este defeito de pintura.

A Tabela 2 apresenta os graus de corrosão no substrato, conforme norma ASTM D610 (13). O maior grau de corrosão nos substratos das amostras pintadas foi identificado para aquelas pintadas com EFP e tratadas com SP 11.

No ensaio de imersão com PC as amostras pintadas com EFP e EFZ apresentaram corrosão no substrato, demonstrando que a PC não evitou completamente a corrosão na superfície metálica. Tal fato se deve às rápidas paradas programadas para manutenção e inspeção do sistema de imersão durante o ensaio, momento em que o sistema de PC era desligado intencionalmente, assim como à condição da aderência dos revestimentos nestas placas, conforme discussão a seguir.

Tabela 2 - Grau de corrosão no substrato dos corpos de prova após ensaios de imersão em solução de NaCl 3,5% com e sem PC e de névoa salina.

Preparação de superfície	Grau de corrosão no substrato segundo a ASTM D610 ¹					
	Imersão sem PC		Imersão com PC		Névoa salina	
	EFP	EFZ	EFP	EFZ	EFP	EFZ
JS Sa 2 ½	6P/5P	9P	6P	9P	5P/4P	9P
JU Sa 2 ½	8P	8P	9P/8P	8P	8P	7P
SP 11	4P	9P	2P/1P	8P	1G	9P

1. O “P” representa a corrosão puntiforme e o “G” a corrosão geral.

- Aderência dos revestimentos

Os resultados de aderência por resistência à tração dos diferentes corpos de prova antes e após a imersão em solução de NaCl 3,5% com e sem PC e o ensaio de névoa salina estão apresentados na Figura 4, por meio dos valores médios das medidas de tensão de ruptura em MPa e de natureza das falhas das amostras ensaiadas, com suas barras de erro.

Na Figura 4 observa-se que, na maioria dos casos, a película de tinta apresentou maior adesão e melhores resultados para natureza da falha para a superfície tratada com JU Sa 2 ½, após os ensaios acelerados. As placas preparadas com o SP 11 sofreram maior redução nos valores de tensão de ruptura ao longo dos ensaios, seguida pelas amostras submetidas ao JS Sa 2 ½ e ao JU Sa 2 ½. O melhor desempenho das placas tratadas por JU Sa 2 ½ pode ser atribuído à alta rugosidade e à qualidade da limpeza conferida por esta preparação ao substrato das amostras, uma vez que quanto maior a rugosidade e menor a quantidade de sujidades no substrato metálico, maior será a interação entre a tinta e o substrato, melhorando a sua adesão (17).

Para a condição inicial, foram observados altos valores de tensão de ruptura e apenas falhas coesivas da primeira demão de tinta (tipo B), os quais foram melhores para as amostras pintadas com EFP. Foi observada maior diminuição nos valores de tensão de ruptura para as placas pintadas com EFP durante os ensaios, demonstrando que o *primer* EFP sofreu uma maior degradação da sua aderência ao substrato quando exposto ao meio corrosivo em comparação ao EFZ. Isto é corroborado também pela variação da natureza das falhas com o aumento do tempo dos ensaios de imersão e de névoa salina, pois as amostras pintadas com EFP tiveram um maior percentual de falhas do tipo A/B nas inspeções intermediária e final. Vale salientar que a falha adesiva A/B é indesejável em esquemas de pintura, pois representa uma aderência baixa entre a tinta e o substrato, podendo ser responsável pelo comprometimento do desempenho anticorrosivo do revestimento.

Comparando os sistemas de imersão com e sem PC, observa-se na Figura 4 que a maior diminuição na tensão de ruptura e na natureza das falhas ocorre para a imersão com PC. A maior redução na aderência das tintas para este ensaio pode estar associada ao ambiente alcalino que se desenvolve próximo do dano mecânico (incisão na película de tinta da amostra), em decorrência da reação catódica que ocorre no metal protegido, na presença de eletrólito e oxigênio, gerando íons hidroxila (17). Além disso, houve menor compatibilidade do SP 11 com o sistema de proteção catódica quando comparado ao JU Sa 2 ½ e ao JS Sa 2

½. Este resultado foi ainda pior para as placas pintadas com EFP, pois foi observado descolamento da película e corrosão. Tal fato pode ser observado na Figura 5.

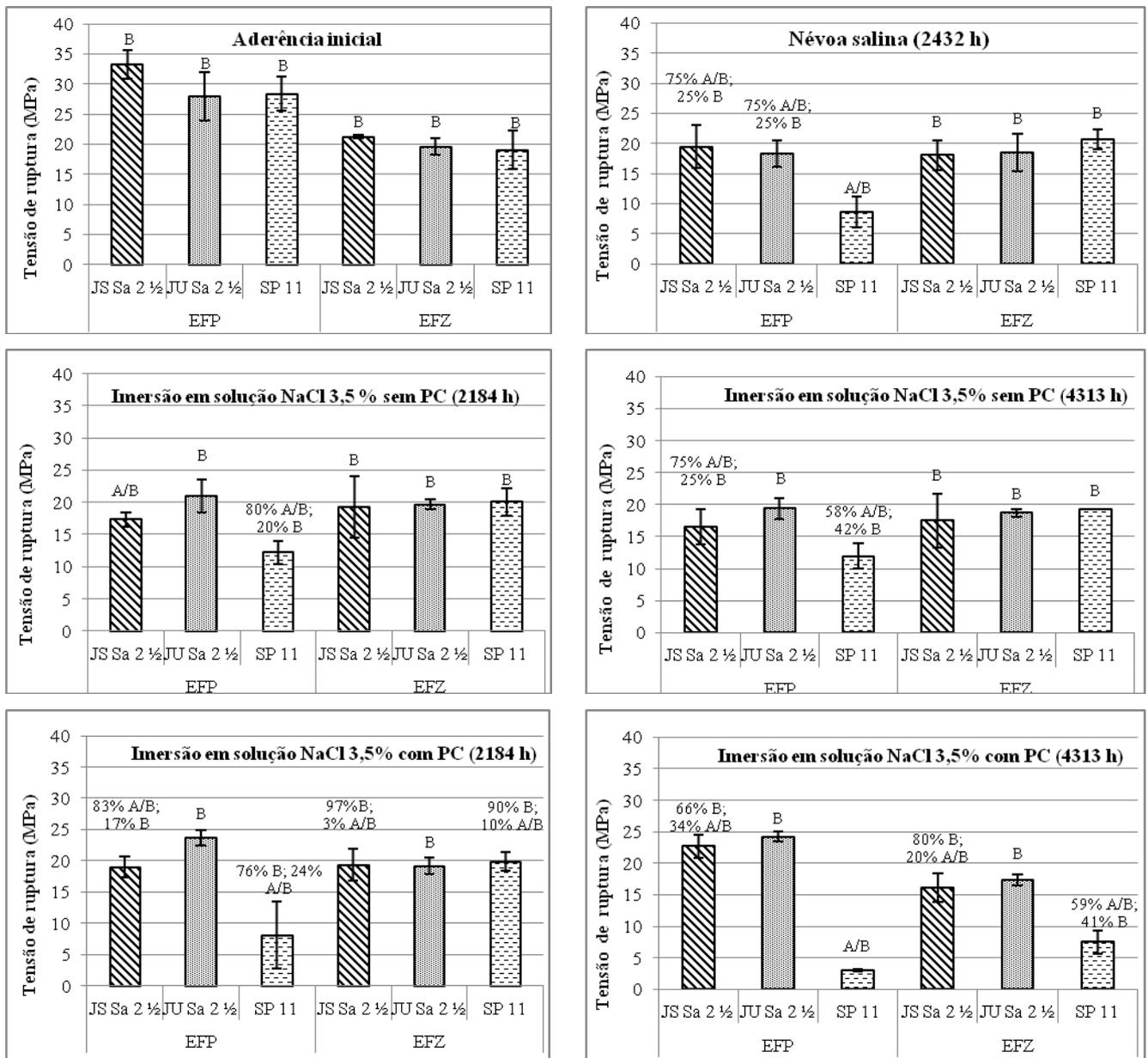


Figura 4: Tensão de ruptura e natureza das falhas das amostras pintadas na condição inicial, em inspeção intermediária e final dos ensaios de imersão em solução de NaCl 3,5% com e sem proteção catódica e após ensaio de névoa salina.

Apesar da PC nas amostras pintadas com EFP e tratadas com SP 11, ocorreu corrosão no substrato nas áreas do revestimento que estavam delaminadas ou sem aderência. Isto demonstra que a corrente de PC não conseguiu alcançar toda a superfície metálica sob o revestimento deslocado. É reportado na literatura que o alcance da PC torna-se menos efetivo embaixo da película deslocada, penetrando apenas em distâncias pequenas a partir do dano mecânico (18).

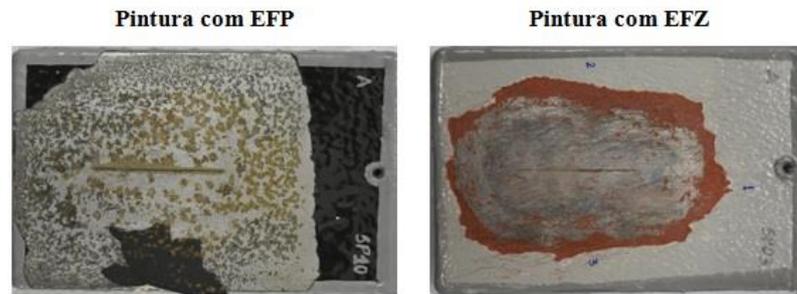


Figura 5: Aspecto visual do substrato dos corpos de prova tratados com SP 11 após 4313 h de imersão em solução de NaCl 3,5% com proteção catódica.

- Avanço de corrosão e de delaminação na região da incisão

Os valores médios das medidas do grau de avanço, considerando a delaminação após os ensaios acelerados de corrosão são demonstrados na Figura 6, junto com suas barras de erro.

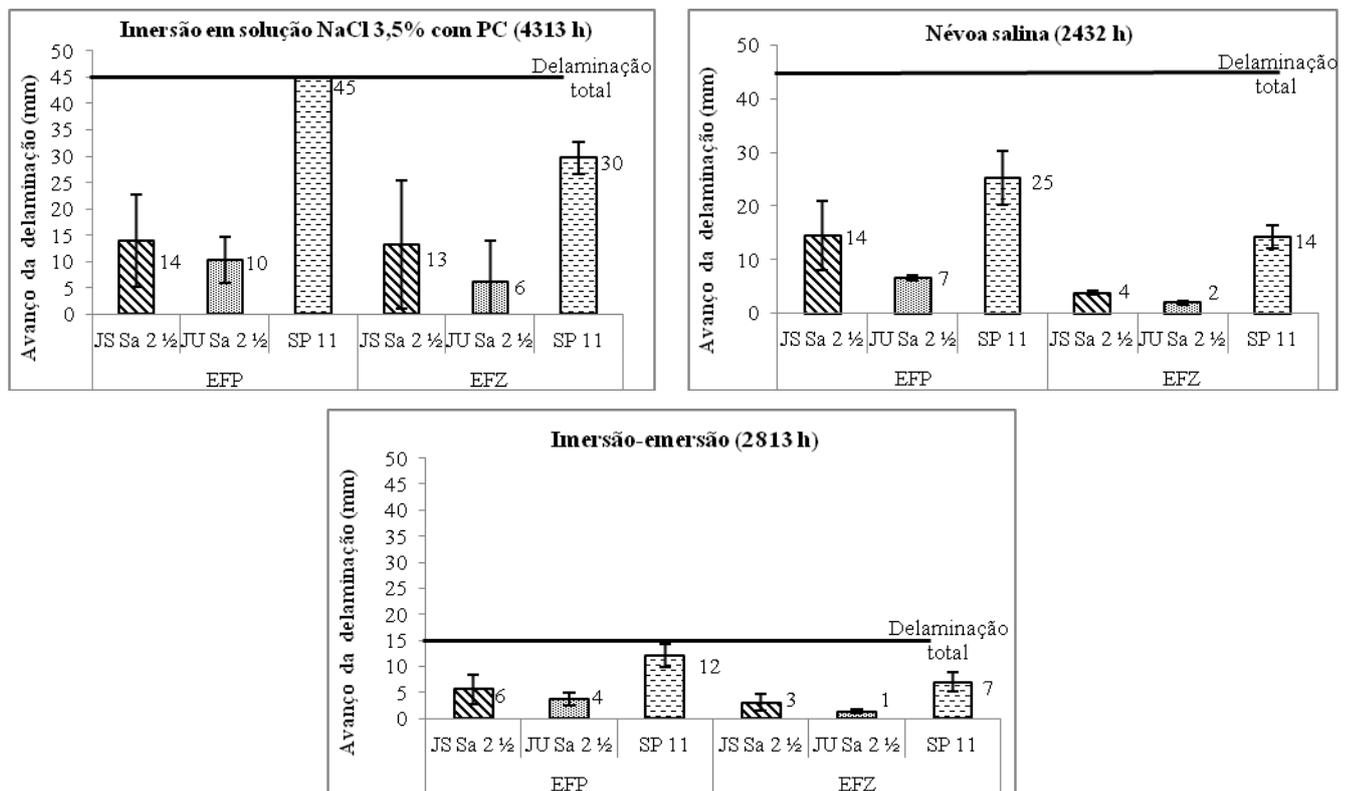


Figura 6: Avanço da delaminação nos corpos de prova no final dos ensaios de imersão em solução de NaCl 3,5% com proteção catódica, de imersão-emersão alternada e de névoa salina.

Observa-se que o sistema de *primers* EFZ apresentou menor avanço de delaminação a partir da incisão nos ensaios acelerados quando comparado à tinta EFP. Ademais, para os ensaios de imersão com PC e de névoa salina verificou-se maior grau de corrosão no substrato das amostras pintadas com EFP após a delaminação da pintura das amostras, conforme

demonstrado na Tabela 2. Para o ensaio de imersão-emersão, o grau de corrosão observado nas áreas delaminadas das placas foi similar para as amostras pintadas com EFP e EFZ.

Uma característica observada nas amostras do ensaio de imersão-emersão foi a formação de um óxido de ferro visualmente contínuo e aderente na região da incisão, que dificultou consideravelmente a remoção do revestimento nas proximidades da incisão, como pode ser observado na Figura 7.

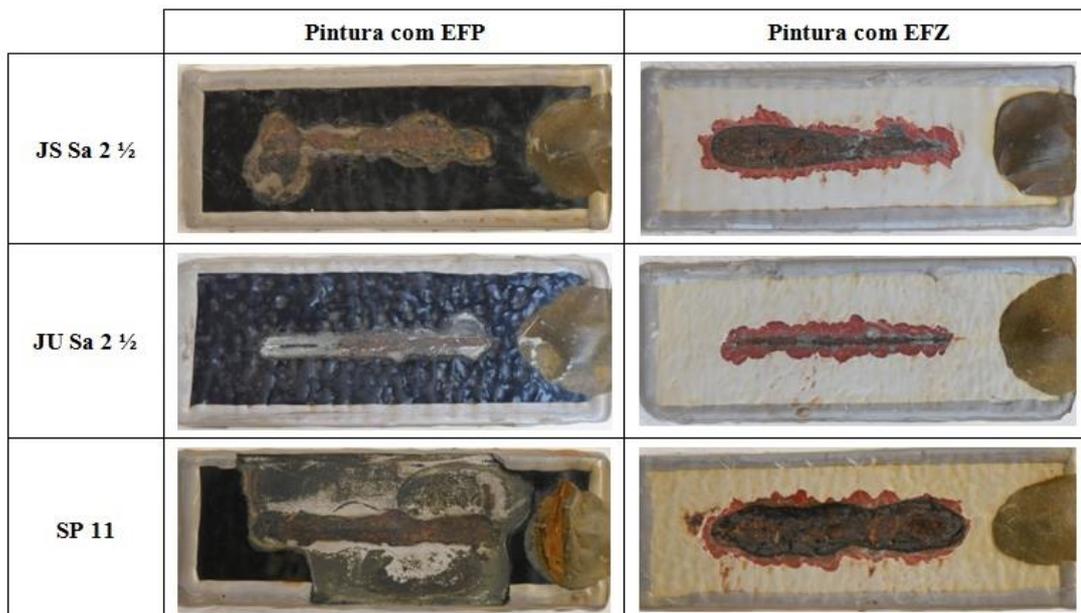


Figura 7: Ilustrações dos corpos de prova com incisão após ensaio de imersão-emersão alternada.

Apesar de haver formação de produtos de corrosão na incisão das amostras pintadas com EFZ, estes produtos não tinham a mesma aderência e quantidade que aqueles existentes nas placas pintadas com EFP. O produto de corrosão preto identificado na incisão sugere a formação de magnetita (1). No estudo das tintas formuladas com o princípio da “ferrugem protetora”, a magnetita é o óxido protetor que se forma nas áreas de dano da tinta para diminuir o alastramento da corrosão a partir dele (2). Nos ensaios realizados neste trabalho, o produto de corrosão formado não impediu totalmente o avanço da delaminação. Entretanto, à exceção da amostra tratada com SP 11, observa-se que nas placas pintadas com EFP não houve uma grande região delaminada a partir da região onde ocorreu a formação deste óxido aderente, sendo possível afirmar que este produto contribuiu com certo efeito protetor (de barreira) para evitar maior permeação dos agentes corrosivos a partir da incisão.

Os produtos de corrosão nos corpos de prova pintados com EFP dos ensaios de imersão com PC e de névoa salina não apresentaram a característica de alta aderência verificada na imersão-emersão. Isto sugere que a formação destes produtos de corrosão aderentes é mais favorável em certos meios corrosivos, estando assim mais propensa a aparecer no ensaio de imersão-emersão que simula a corrosão atmosférica (no presente trabalho, esta atmosfera é a marinha) do que na condição de imersão total.

- Monitoramento do potencial e da corrente

O potencial e a corrente de PC durante o ensaio de imersão em solução de NaCl 3,5% com PC estão apresentados na Figura 9. Observa-se que as amostras ficaram polarizadas em torno do potencial de $-955 \text{ mV}_{\text{EC3M}}$, valor selecionado para representar a PC empregada em estruturas marítimas.

Inicialmente, os corpos de prova pintados com EFZ demandaram mais corrente de PC, o que é modificado entre o 14° e o 45° dia de imersão com PC, quando as amostras pintadas com EFP e tratadas com JU Sa 2 ½ e JS Sa 2 ½ passam a demandar mais corrente, possivelmente devido ao início de um processo corrosivo no substrato das placas pintadas com EFP após ser atingido pelo eletrólito que permeou a película de tinta.

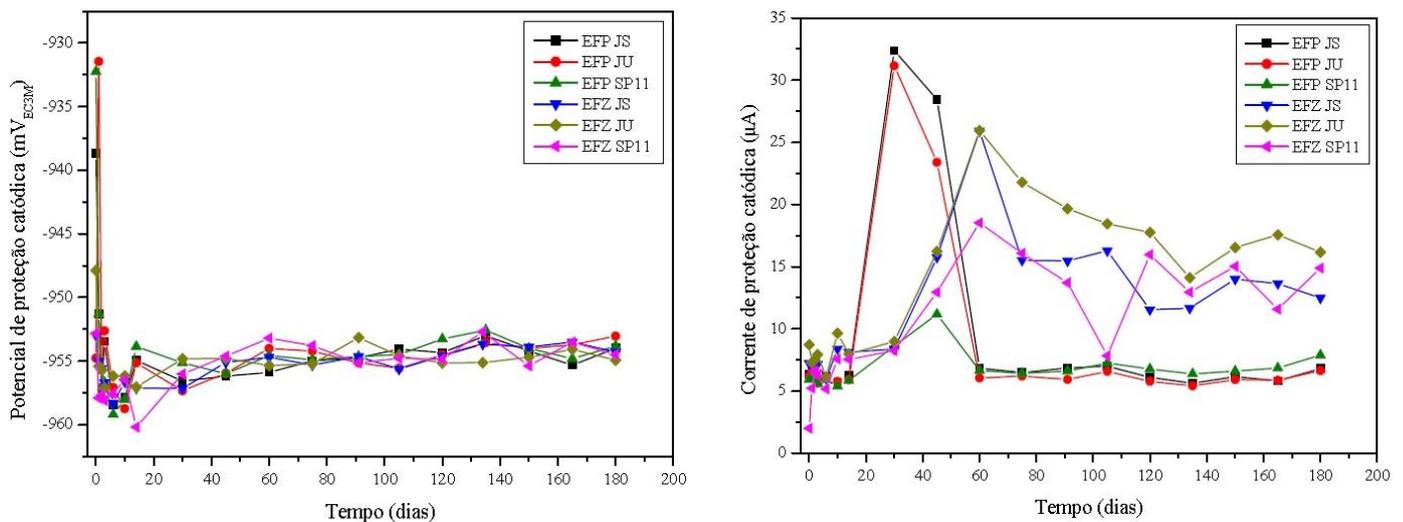


Figura 9: Potencial e corrente de proteção catódica dos corpos de prova durante o ensaio de imersão em solução de NaCl 3,5% com proteção catódica.

A partir do 60° dia observa-se que todas as amostras pintadas com EFP passam a demandar menos corrente de PC, cujos valores permanecem quase constantes até o final do ensaio, indicando estabilização do processo corrosivo. Esta menor demanda de corrente pode ser explicada pelo fato da tinta EFP estabelecer uma diminuição na diferença de potencial existente entre o potencial de corrosão da superfície oxidada e o potencial medido na superfície pintada, o que permite reduzir a corrente de corrosão no substrato.

No caso das amostras pintadas com EFZ, houve aumento da demanda de corrente entre o 30° e o 60° dia, que também indica a existência de um processo corrosivo no substrato. Como a corrente de PC diminui a partir do 60° dia, sugere-se que houve a formação de uma película protetora de fosfatos no substrato, oriunda da ação do pigmento fosfato de zinco. Esta camada se tornou mais protetora com aumento do tempo de ensaio já que, em média, os valores de corrente de PC passaram a cair a partir do 60° dia.

As amostras pintadas com EFP e tratadas com JU Sa 2 ½ e com JS Sa 2 ½ apresentam uma demanda de corrente de PC ligeiramente inferior àquela das amostras tratadas com SP 11. Tal fato está associado a melhor qualidade da limpeza da superfície proporcionada pelo JU Sa 2 ½ e pelo JS Sa 2 ½ e, conseqüentemente, melhor proteção conferida pelo sistema de pintura contra os agentes corrosivos, o que faz com que os corpos de prova demandem menos

corrente de PC. No caso da EFZ, dentre as preparações de superfície o JU Sa 2 ½ apresentou a maior demanda de corrente.

A evolução do potencial com o tempo de imersão em solução de NaCl 3,5% sem PC está apresentada na Figura 10. Após uma oscilação inicial, os potenciais das amostras pintadas com EFP passam a diminuir, enquanto os potenciais das placas pintadas com EFZ passam a assumir valores mais nobres. Tal comportamento está associado com os mecanismos de proteção das tintas estudadas: a EFP tem como princípio diminuir o ΔE entre a tinta e o substrato, o que leva o substrato a assumir, com o tempo, potenciais mais catódicos, até alcançar o potencial da tinta pigmentada com magnetita; por outro lado, a EFZ possui o pigmento fosfato de zinco, que atua pelo mecanismo de passivação anódica, de modo que, com a formação da camada de fosfatos sobre a superfície metálica, se interrompe o processo corrosivo, aumentando o potencial do substrato para valores mais anódicos.

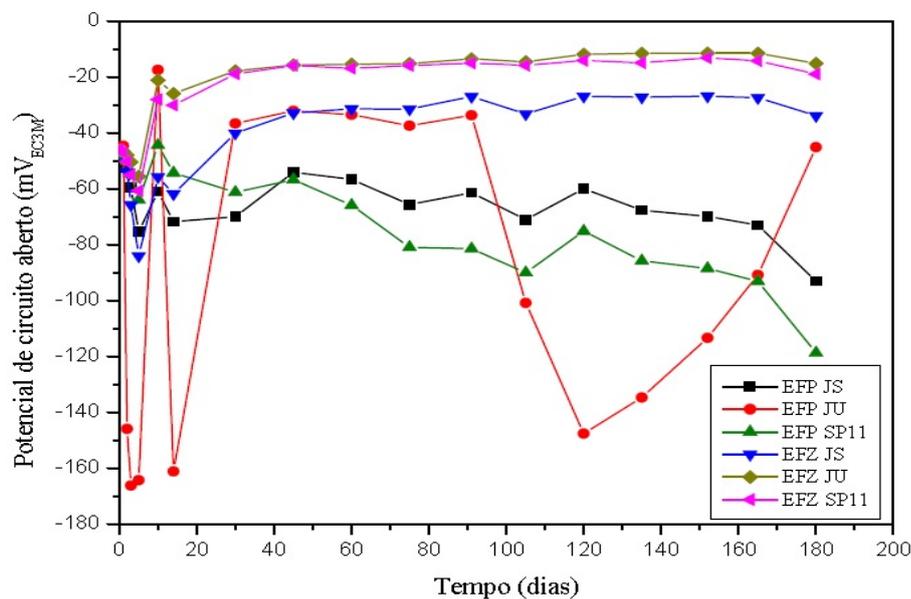


Figura 10: Potencial de circuito aberto dos corpos de prova durante o ensaio de imersão sem proteção catódica.

Comparando as preparações de superfície, verifica-se na Figura 10 que as amostras preparadas com JU Sa 2 ½ apresentam potenciais mais anódicos em ambos os sistemas de *primers*, seguida daquelas tratadas com o JS Sa 2 ½ e com o SP 11. Tal fato sugere que a preparação de superfície tem influência significativa no comportamento dos revestimentos durante a exposição destes ao ambiente corrosivo, pois as amostras preparadas com JU Sa 2 ½ mantêm seus potenciais em valores mais nobres. O melhor desempenho do JU Sa 2 ½ é explicado pela sua melhor qualidade de limpeza e maior rugosidade.

Conclusões

– O jato abrasivo úmido Sa 2 ½ apresentou melhor desempenho nos ensaios acelerados de corrosão, seguido do jato abrasivo seco Sa 2 ½ e, por último, do tratamento mecânico por ferramentas mecânico-rotativas ao grau SP 11. O jato abrasivo seco ao grau Sa 2 ½ conferiu melhor desempenho que o SP 11 na maioria dos ensaios, mesmo tendo rugosidade

ligeiramente menor, indicando que promoveu melhor limpeza do substrato das amostras, melhorando assim a aderência do revestimento.

– O sistema EFZ apresentou melhor desempenho na maioria dos ensaios acelerados de corrosão.

– No caso dos sistemas com EFP, foram identificados potenciais mais catódicos, uma vez que o seu mecanismo de proteção visa a diminuir a diferença de potencial entre a tinta pigmentada com magnetita e PANi e o substrato, levando a superfície metálica a assumir, com o tempo, potenciais mais negativos relativos à região de domínio termodinâmico da magnetita

– O sistema EFZ demonstrou ser mais compatível com sistema de proteção catódica que o EFP. Entretanto, EFP demandou menor corrente de proteção durante o ensaio de imersão com proteção catódica, embora esta menor demanda de corrente não implique em menor grau de corrosão no substrato. É necessário combinar as boas propriedades de uma resina, como barreira, aderência e umectação, aos efeitos positivos dos pigmentos da tinta EFP para obter melhores resultados.

– A corrente de proteção catódica não consegue alcançar toda a superfície metálica a ser protegida nos locais onde o revestimento apresenta descolamento.

Referências bibliográficas

- (1) GENTIL, V. *Corrosão*. 6ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 360 p.
- (2) BARBOSA, V. F. F. *Aspectos Eletroquímicos de Sistemas de Pinturas Formuladas à Base de Ferrugens Protetoras*. 118f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1993.
- (3) ISO. *International Organization for Standardization. ISO 8501-1. Preparation of steel substrates before application of paints and related products: Visual assessment of surface cleanliness. Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings*. Switzerland, 2007. 90 p.
- (4) SSPC. *The Society for Protective Coatings. SSPC-SP11: Power-Tool Cleaning to bare Metal*. July, 2012. 4p. 2012.
- (5) MIRANDA, L. R. M. D. et al. *Relatório Descritivo da Patente de Invenção “Composição Destinada a ser Aplicada em Aços para Proteção de suas Superfícies contra Corrosão e Processo para Preparação da Mesma”*. BR nº 0600814-3 (8606478-9), 15 abr. 2008. Disponível em: <https://www.escavador.com/patentes/630517/composicao-destinada-ser-aplicada-em-acos-protacao-suas-superficies-contr>. Acesso em: 26 nov. 2017.
- (6) ISO. *International Organization for Standardization. ISO 2812-2: Paints and varnishes — Determination of resistance to liquids — Part 2: Water immersion method*. Geneva: ISO, 2007. 4p.
- (7) ASTM. *American Society for Testing and Materials. ASTM B117. Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus*. West Conshohocken: ASTM, 2011. 12p.
- (8) MIRANDA, L. R. D. *Aspects électrochimiques de la corrosion atmosphérique des aciers patinables*. 147f. Tese (Doutorado), v. 125 - Centre Belge d'Etude de la Corrosion (CEBELCOR), Université Libre de Bruxelles, [S.l.], 1974.
- (9) ISO. *International Organization for Standardization. ISO 4628-8: Paints and varnishes — Evaluation of degradation of coatings — Designation of quantity and size of defects, and*

- of intensity of uniform changes in appearance. Part 8: Assessment of degree of delamination and corrosion around a scribe or other.* Switzerland: ISO, 2012. 8p.
- (10) ISO. *International Organization for Standardization. ISO 4628-2: Paints and varnishes — Evaluation of degradation of coatings — Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance. Part 2: Assessment of degree of blistering.* Switzerland: ISO, 2003. 12p.
- (11) ISO. *International Organization for Standardization. ISO 4628-3: Paints and varnishes — Evaluation of degradation of coatings — Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance. Part 3: Assessment of degree of rusting.* [S.l.], p. Switzerland: ISO, 2016. 15p.
- (12) ISO. *International Organization for Standardization. ISO 4628-4: Paints and varnishes — Evaluation of degradation of coatings — Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance. Part 4: Assessment of degree of cracking.* Switzerland: ISO, 2003. 13p.
- (13) ASTM. *American Society for Testing and Materials. ASTM D610. Standard Practice for Evaluating Degree of Rusting on Painted Steel Surfaces.* West Conshohocken: ASTM International, 2008 (Revised 2012). 6p.
- (14) ASTM. *American Society for Testing and Materials. ASTM D4541: Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers.* West Conshohocken: ASTM International, 2009. 16p.
- (15) APPLEMAN, B. R. Advances in Technology and Standards for Mitigating the Effects of Soluble Salts. *Journal of Protective Coatings & Linings*, v. 19, n. 5, p. 42-47, 2002.
- (16) Nascimento (2012) NASCIMENTO, Á. V. D. *Aspectos do tratamento de superfície de aço super duplex para aplicação de revestimentos orgânicos anticorrosivos.* 121f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2012.
- (17) SØRENSEN et al. (2009) SØRENSEN, P. A. et al. Anticorrosive Coatings: a Review. *Journal of Coatings Technology and Research*, v. 6, n. 2, p. 135-176, 2009.
- (18) YAN, L.; ARAFIN, M.; GRAVEL, J.-P. Penetration of Cathodic Protection into Pipeline Coating Disbondment. *Corrosion 2017 - Conference & Expo*, Houston/Texas, v. 9146, 2017. NACE International, 14p.