

Copyright 2014, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2014, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2014.

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

EFEITO DE TINTAS DE FUNDO RICAS EM ZINCO NO DESEMPENHO ANTICORROSIVO DE ESQUEMAS DE PINTURA APLICADOS EM CHAPAS DE AÇO-CARBONO OXIDADAS PREPARADAS POR FERRAMENTAS MECÂNICAS

¹C. C. Amorim, ²F. L. Fragata, ³M. M. de Sá, ⁴A. P. Ordine, ⁵Y. H. P. Café

Abstract

In maintenance services, often due to operating conditions, it is not always possible to use surface preparation methods to remove completely the corrosion products. In these cases, surface cleaning is performed by means of mechanical or manual tools and surface tolerant paints are specified. Thus, this paper presents results of a study conducted in Cepel on corrosion performance of coating systems containing paints with different mechanism of action, applied to oxidized carbon steel surfaces, treated by mechanical tools. Accelerated corrosion tests and a test of natural exposure for five years conducted in accelerated manner by means of spraying of a solution of 1% sodium chloride, twice a week, were carried out. Paint systems with barrier protection mechanism and others with galvanic protection based on the principle of cathodic protection were studied, and those schemes with rich zinc paints presented higher performance than those barrier type, even after a long time of exposure in the accelerated natural test.

Keywords: Mechanical/manual tools, Maintenance Coatings, St3, Zinc rich primer

Resumo

Em serviços de manutenção, muitas vezes, devido a condições operacionais, não é possível utilizar métodos de preparação de superfície que retirem completamente os produtos de corrosão. Nestes casos, a limpeza da superfície é feita por meio de ferramentas mecânicas/manuais e são especificadas tintas de fundo tolerantes a este tipo de superfície tratada. Assim, este trabalho apresenta os resultados de um estudo realizado no Cepel sobre o desempenho anticorrosivo de esquemas de pintura, contendo tintas de fundo com diferentes tipos de mecanismo de atuação, aplicados em superfícies de aço carbono oxidadas, tratadas por meio de ferramentas mecânicas. Foram realizados ensaios acelerados de corrosão e um ensaio de exposição natural por cinco anos, conduzido de forma acelerada, por meio do borrifamento de solução de cloreto de sódio 1%, duas vezes por semana. Foram estudados esquemas com mecanismo de proteção por barreira e esquemas de proteção galvânica baseada no princípio da proteção catódica. Em função dos resultados obtidos, observou-se que os esquemas de pintura com a tinta de fundo rica em zinco apresentaram desempenho superior ao dos esquemas do tipo barreira, mesmo após um longo período de exposição no ensaio natural acelerado.

Palavras-chave: Ferramentas mecânicas e manuais, Manutenção, Revestimentos, St3, Tinta rica em zinco

¹ M. Sc.- Química Industrial - Faculdades Católicas (PUC-Rio)

² Engenheiro Químico

³ Técnico em Química - Cepel - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

⁴ D. Sc.- Engenheiro Químico - Cepel - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

⁵ Graduando em Química - Cepel - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

1. INTRODUÇÃO

Em serviços de manutenção e na recuperação de áreas com corrosão, devido a condições operacionais de equipamentos e estruturas metálicas, nem sempre é possível utilizar métodos de preparação de superfície que retirem completamente os produtos de oxidação. Com o desenvolvimento de novas tecnologias onde o tempo de cura das tintas é reduzido, tem-se conseguido diminuir o tempo de aplicação dos esquemas de pintura e, conseqüentemente, o tempo de parada dos equipamentos e também o custo da obra.

O CEPEL, em conjunto com as empresas Eletrobras, desenvolveu um estudo, do qual participaram fabricantes de tintas e de resinas, no sentido de avaliar e identificar esquemas de pintura, com diferentes mecanismos de proteção anticorrosiva, que permitissem reduzir o tempo de aplicação do sistema de proteção anticorrosiva. Para tal, tintas com curtos intervalos de tempo entre demãos foram utilizadas, e elaboradas especificamente para a realização do estudo e, em sua maioria, foram produzidas a partir de resinas epoxídicas curadas com fenolcamina, cuja escolha foi feita de forma consensual entre o CEPEL e as empresas que colaboraram no estudo, pois, segundo informações dos fabricantes, trata-se de uma resina que possui características capazes de atender aos objetivos do estudo (1).

Este trabalho apresenta resultados sobre o desempenho anticorrosivo de esquemas de pintura de proteção anticorrosiva de superfícies ferrosas expostas à atmosfera, contendo tintas de fundo com diferentes tipos de mecanismo de atuação, aplicados em superfícies de aço carbono oxidadas, tratadas por meio de ferramentas mecânicas. Foram realizados ensaios acelerados de corrosão e um ensaio de exposição natural por cinco anos, conduzido de forma acelerada, por meio do borrifamento de solução de cloreto de sódio 1% sobre os corpos-de-prova, duas vezes por semana.

Foram estudados esquemas de pintura com mecanismo de proteção por barreira e esquemas contendo tintas de fundo ricas em zinco, cujo mecanismo é de proteção galvânica baseada nos princípios da proteção catódica. Os esquemas com a tinta de fundo rica em zinco apresentaram desempenho superior aos dos esquemas do tipo barreira, mesmo após cinco anos de exposição no ensaio natural acelerado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Preparação dos Corpos-de-prova

Por se tratar de uma das atividades mais importantes do estudo, a preparação dos corpos-de-prova foi realizada de forma bastante cuidadosa. As principais atividades realizadas estão descritas nos itens a seguir.

2.1.2 Substratos metálicos

Os corpos-de-prova foram confeccionados a partir de chapas de aço-carbono com dimensões de 150 mm x 100 mm e espessura de 4,8 mm. Para se atingir o grau de intemperismo desejado, as chapas de aço com carepa de laminação intacta foram, inicialmente, submetidas a um processo de jateamento abrasivo, utilizando-se granalha de aço angular (G-50), até a obtenção do grau de limpeza ASa 2½ (metal quase branco), conforme classificação da norma ISO 8501-1 (2). O perfil de rugosidade obtido foi de, aproximadamente, 50 µm.

Os corpos-de-prova foram submetidos a duas diferentes condições superficiais de oxidação, a saber:

- **Condição 1:** chapas de aço com grau de intemperismo C, conforme norma ISO 8501-1 (2), sem contaminação

As chapas foram expostas ao intemperismo natural no pátio do CEPTEL, por um período aproximado de 15 meses. Durante este tempo, as chapas foram molhadas com água potável, duas a três vezes ao dia, exceto em dias chuvosos, feriados e finais de semana. O objetivo da molhagem com água era acelerar o processo de oxidação das chapas de aço.

- **Condição 2:** chapas de aço com grau de intemperismo compreendido entre os graus C e D da norma ISO 8501-1 (2), com contaminação de cloreto.

Neste caso, as chapas de aço foram expostas na estação de corrosão atmosférica do CEPTEL e duas vezes por semana eram imersas em solução de cloreto de sódio 1%, durante seis meses. O objetivo desta imersão era fazer com que a ferrugem resultante contivesse a presença do íon cloreto (Cl⁻), tal como ocorre nas estruturas de aço carbono quando sofrem oxidação em atmosfera marinha.

A atmosfera onde as chapas de aço foram oxidadas possui categoria de corrosividade C4, em relação ao aço carbono e C3 em relação ao zinco, de acordo com a norma ISO 9223 (3). Além disso, uma das características especiais da estação de ensaio é a alta concentração de gás sulfídrico (H₂S) na atmosfera. Na Tabela I, apresentam-se outros dados técnicos a respeito da mesma.

Tabela I – Dados técnicos da estação de corrosão atmosférica do CEPTEL (*).

Temperatura média (°C)	Umidade relativa média (%)	[SO ₂] (mg.m ⁻² .d ⁻¹)	[Cl ⁻] (mg.m ⁻² .d ⁻¹)	Velocidade de corrosão (µm/ano)		
				Fe	Zn	Cu
21,5	80,0	40 - 50	15 - 20	50 - 70	1 - 2	4 - 8

(*) Fonte: Morcillo et al., *Corrosión y Protección de Metales en las Atmosferas de Iberoamerica*, CYTED, Madrid (2002).

2.1.2 Métodos de preparação de superfície e graus de limpeza

Os substratos de aço-carbono citados foram submetidos a uma etapa prévia de desengraxamento por meio de solventes orgânicos, seguida da preparação por meio de ferramentas mecânicas. Neste processo utilizaram-se ferramentas mecânicas (ex.: lixadeira elétrica) e manuais (ex.: lixa de grana 36), e, em ambos os casos, o grau de limpeza final obtido foi o St3, de acordo com a classificação da norma ISO 8501-1 (2).

Nota: As chapas oxidadas na condição 2 foram submetidas a um processo de limpeza prévia com água pressurizada (\cong 3500 psi), antes das etapas de desengorduramento e de remoção de produtos de corrosão, com o objetivo de reduzir o teor de sais de cloreto na superfície e evitar a contaminação das ferramentas mecânicas.

2.2 Descrição das Tintas e dos Esquemas de Pintura Utilizados no Estudo

Nas Tabelas II e III, estão descritos as tintas e os esquemas de pintura selecionados para o estudo, segundo o mecanismo de proteção anticorrosiva dos mesmos.

Na identificação dos corpos-de-prova é importante destacar que a letra após o número do esquema de pintura está relacionada ao grau de limpeza da superfície e à condição de oxidação das chapas de aço, conforme os exemplos a seguir:

2B : esquema de pintura 2 aplicado em chapas com grau de limpeza St3, previamente oxidadas em condições naturais (condição 1).

2C : esquema de pintura 2 aplicado em chapas com grau de limpeza St3, previamente oxidadas de forma acelerada na presença de cloreto (condição 2).

2.2.1 Tintas Utilizadas

O estudo contou com a colaboração de dois importantes fabricantes de tintas anticorrosivas e um de resinas (fornecedor do agente de cura à base de fenolcamina). Na Tabela II apresentam-se o código e a descrição básica das tintas de fundo, intermediária e de acabamento utilizadas.

Tabela II – Descrição Básica das Tintas Utilizadas no Estudo

Tipo de tinta	Código da tinta (*)	Descrição básica
Fundo	DA.288	Tinta de fundo epóxi de alta espessura, pigmentada com alumínio e curada com poliamida (DA) . Trata-se de uma tinta do tipo “ <i>surface tolerant</i> ”.
	FK.288	Tinta de fundo epóxi de alta espessura, pigmentada com alumínio e curada com fenolcamina (FK) . Trata-se, também, de uma tinta do tipo “ <i>surface tolerant</i> ”.
	MCU85	Tinta de fundo rica em zinco, monocomponente, à base de poliisocianato de cura com a umidade do ar . O teor de Zn ⁰ na película seca era de 85%.
	EP.Zn	Tinta de fundo epóxi rica em zinco curada com poliamida . O teor de Zn ⁰ na película seca era de 82%.
Intermediária	FKIa	Tinta intermediária epóxi de alta espessura, de cor cinza claro e curada com fenolcamina (fabricante a) .
	FKIb	Tinta intermediária epóxi de alta espessura, pigmentada com alumínio e óxido de ferro micáceo e curada com fenolcamina (fabricante b) .
	EP.HB	Tinta intermediária epóxi de alto teor de sólidos, do tipo “ <i>surface tolerant</i> ”.
Acabamento	PU.AC	Tinta de acabamento poliuretano acrílico alifático , cor branca.

(*) **DA** (agente de cura poliamida); **FK** (agente de cura fenolcamina)

As análises preliminares das características físico-químicas das tintas líquidas, realizadas em laboratório, mostraram que as tintas epoxídicas curadas com fenolcamina possuem uma secatividade (tempo de secagem completa) bem mais rápida do que a tinta epóxi tradicional (DA.288), que é curada com poliamida. Da mesma forma, a tinta de fundo MCU85 possui um

tempo de secagem bem mais curto que o da tinta de fundo epóxi rica em zinco EP.Zn. A secagem rápida apresentada por estas tintas atenderam aos requisitos do presente estudo (1).

2.2.2 Descrição dos Esquemas de Pintura

Vários esquemas de pintura foram avaliados com o objetivo de se identificar aqueles que pudessem atender aos objetivos do estudo. Para simplificar a apresentação e facilitar a compreensão dos resultados, apenas os esquemas de pintura que tiveram melhor desempenho serão apresentados. O código dos esquemas de pintura e a sua descrição básica, incluindo o intervalo de tempo entre demãos e o tempo total para a aplicação das demãos de tintas, estão apresentados na Tabela III.

Tabela III – Descrição Básica dos Esquemas de Pintura

Esquema de pintura [EFS ⁽¹⁾ total (µm)]	Tinta de Fundo EFS (µm)	Intervalo entre demãos (horas)	Tinta Intermediária EFS (µm)	Intervalo entre demãos (horas)	Tinta de Acabamento EFS (µm)
1 (*)	DA.288 (120)	24	EP.HB (100)	24	PU.AC (60)
2 (**)	FK.288 (120)	3	FKIa (100)	3	PU.AC (60)
7 (**)	MCU85 (70)	3,5	FKIa (120)	2,5	PU.AC (60)
10 (***)	EP.Zn (70)	24	FKIb (120)	4	PU.AC (60)

(1)EFS : espessura de filme seco

(*) A aplicação das três demãos de tintas foi feita em três dias consecutivos.

(**) A aplicação das três demãos de tintas foi feita no mesmo dia.

(***) A aplicação das três demãos de tintas foi feita em dois dias consecutivos.

Pode-se verificar que as tintas utilizadas permitiram reduzir o tempo de aplicação devido às suas características físico-químicas, principalmente no que se refere à secatividade, que no caso dos esquemas **2** e **7**, diminuiu consideravelmente o intervalo de repintura entre as demãos subsequentes. Esse efeito também foi verificado no esquema **10** na redução do intervalo de aplicação entre a segunda e a terceira demãos.

Outro aspecto importante a destacar é que os esquemas de pintura **7** e **10**, por possuírem tinta de fundo rica em zinco, conferem, além da proteção por barreira, um mecanismo adicional de proteção anticorrosiva ao aço, o qual está baseado nos princípios da proteção catódica. Já os esquemas **1** e **2** possuem mecanismo de proteção exclusivamente por barreira.

2.3 Ensaios Realizados

A avaliação do desempenho à corrosão, dos esquemas de pintura descritos na Tabela III, foi feita com base nos resultados obtidos nos ensaios descritos a seguir.

2.3.1 Medição de aderência, antes e após os ensaios de corrosão

No presente estudo, a medição de aderência dos revestimentos por pintura, tanto inicialmente quanto após a realização dos ensaios de corrosão, foi efetuada pelos métodos de corte em X e em grade e de resistência à tração, com base nas seguintes normas:

- **NBR 11003 (métodos A) (4)**: verificação do grau de aderência é feita em função do destacamento do revestimento ao longo dos cortes e na interseção dos mesmos. Quanto menor o índice, melhor é a aderência do revestimento por pintura.
- **ISO 2409 (5)**: (corte em grade ou quadrículas): a verificação do grau de aderência é feita em função do destacamento do revestimento ao longo dos cortes das quadrículas, bem como na interseção dos cortes. Quanto menor o valor numérico, melhor é a aderência do revestimento por pintura. Vale ressaltar que, no caso do presente estudo, o espaçamento entre os cortes foi de 3 mm.

Nos dois métodos citados, na avaliação da falha não foi considerado somente o padrão fotográfico presente na norma, mas também o local onde ocorreu o rompimento, conforme a descrição apresentada na Tabela IV.

- **ASTM D4541 (6)**: a verificação do grau de aderência por este método consiste, basicamente, em determinar a resistência do revestimento a um esforço de tração. Para tal, carretéis de alumínio são fixados à superfície por meio de adesivo apropriado. Após a cura do mesmo, submete-se o corpo-de-prova a um esforço de tração em um equipamento apropriado para esta finalidade sendo que, no caso do presente estudo, foi utilizado o *PATTI*®, o qual corresponde ao tipo A4 da referida norma. Os resultados são expressos em MPa. Além dos valores da tensão de ruptura, também se avaliou a natureza da falha de aderência como descrito a seguir na Tabela IV (para o caso de um esquema de pintura com três demãos de tinta: B, C e D).

Tabela IV - Descrição da Natureza das Falhas de Aderência

Classificação	Natureza da Falha de Aderência
A	falha coesiva do substrato
A/B	falha adesiva entre o substrato e a primeira camada do revestimento
B	falha coesiva da segunda camada
B/C	falha adesiva entre as camadas B e C
C	falha coesiva da camada C
C/D	falha adesiva entre as camadas C e D
D	falha coesiva da camada D
D/Y	falha adesiva entre a última camada de tinta e o adesivo
Y	falha coesiva do adesivo
Y/Z	falha adesiva entre o adesivo e o carretel (“dolly”)

2.3.2 Ensaio cíclico de corrosão [radiação UV-B e condensação de umidade + frio + névoa salina (ASTM B 117)]

Neste ensaio, realizado em laboratório, os corpos-de-prova foram expostos às condições de agressividade descritas abaixo.

- 7 dias (168 horas) de exposição à radiação ultravioleta B (UVB) e condensação de umidade, de acordo com a norma ASTM G 154 (7), utilizando-se o ciclo de 8 horas de radiação UVB e 4 horas de condensação de umidade;
- 1 dia (24 horas) a baixa temperatura ($\cong -10^{\circ}\text{C}$);
- 6 dias (144 horas) de exposição em câmara de névoa salina contínua, segundo a norma ASTM B 117 (8).

Cada ciclo possuía a duração de 336 horas e o tempo total de exposição dos corpos-de-prova, nas condições acima, foi de aproximadamente 10,1 ciclos, sendo que os mesmos eram inspecionados após cada ciclo completo de exposição. Vale destacar que, durante este período, o ensaio sofreu algumas interrupções em função de fatores que podem ser considerados normais, como por exemplo, a parada das câmaras por problemas técnicos.

2.3.3 Exposição em atmosfera urbana, com pulverização de solução de cloreto de sódio (NaCl) com concentração de 1% (9)

Este ensaio foi realizado através da exposição de corpos-de-prova ao intemperismo natural, na estação de corrosão atmosférica do CEPEL (RJ). Para acelerar o processo de corrosão, os mesmos foram pulverizados com uma solução de cloreto de sódio (NaCl 1%) duas vezes por semana. Buscou-se com este procedimento acelerar o processo de corrosão na presença de fatores naturais de degradação dos revestimentos, como por exemplo, radiação ultravioleta, chuva e variações térmicas. Os corpos-de-prova ficaram expostos durante 5 (cinco) anos nessas condições.

2.4 Considerações Técnicas Sobre Alguns Parâmetros Utilizados na Avaliação de Desempenho à Corrosão dos Esquemas de Pintura

Além da verificação do grau de aderência dos esquemas de pintura antes dos ensaios de corrosão, a avaliação do desempenho dos esquemas de pintura, nos ensaios que dizem respeito à resistência à corrosão, foi realizada através de técnicas convencionais baseadas na norma ISO 4628 (10). Para facilitar o entendimento dos resultados obtidos, a seguir serão apresentadas informações gerais importantes a respeito de alguns parâmetros de avaliação de desempenho dos revestimentos.

2.4.1 Empolamento (“Blistering”)

O empolamento foi avaliado com base na norma ISO 4628/2 (11). De acordo com a referida norma, a avaliação do empolamento é feita considerando-se o tamanho e a frequência ou intensidade das bolhas presentes no revestimento. Com relação à frequência, esta pode variar desde o grau 0 (zero), que indica a ausência de bolhas, até o grau 5 (cinco), que corresponde ao grau mais intenso. Quanto ao tamanho, este pode variar desde S2 (diâmetro menor) até S5 (diâmetro maior). Em alguns casos adotou-se a classificação S1 para indicar um tamanho de bolhas inferior a S2.

2.4.2 Corrosão

A avaliação do grau de corrosão foi realizada de acordo com a norma ISO 4628/3 (12). Conforme estabelecido na referida norma, o grau de corrosão é determinado em função do percentual de área corroída. Neste sentido, os graus podem variar desde Ri0 (0 % de corrosão) até Ri5 (40 % a 50 % de corrosão).

2.4.3 Fendimento (“Cracking”)

A avaliação do grau de fendimento foi feita com base na norma ISO 4628/4 (13), a qual leva em consideração a intensidade e a largura das fissuras, bem como a profundidade das mesmas. No que diz respeito à intensidade, de acordo com os padrões fotográficos da norma, esta pode variar de 1 (um) até 5 (cinco), este último grau correspondendo ao mais intenso. Quanto à largura, esta pode variar de 0 (zero) até 5 (cinco), sendo que este último grau aplica-se para fissuras com largura superior a 1 mm. No que diz respeito à profundidade, esta é avaliada da seguinte forma:

- *Tipo a*: fissuras que atingem somente, de forma superficial, a tinta de acabamento;
- *Tipo b*: fissuras que penetram em toda tinta de acabamento e deixam visíveis as camadas inferiores e,
- *Tipo c*: fissuras que penetram em todo o revestimento e atingem o substrato.

2.4.4 Avanço de Corrosão/Degradação, Sob o Revestimento, na Região da Incisão

Nos corpos-de-prova com incisão, o avanço de corrosão/degradação, sob o revestimento, na região da incisão (Ac), em milímetros, e equivalente a um lado, foi calculado pela seguinte fórmula:

$$Ac = (d - 0,3) \div 2$$

onde:

Ac = avanço de corrosão sob o revestimento/degradação na região da incisão

d = valor médio (em milímetros) correspondente à largura total do avanço/degradação na região da incisão sob o revestimento por pintura.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dentro dos objetivos do estudo, onde foram avaliados esquemas de pintura com intervalos reduzidos de aplicação entre demãos, e também diferentes estados de oxidação das superfícies metálicas, serão apresentados os resultados dos ensaios de corrosão realizados.

Foram estudados diversos esquemas de pintura porém, para efeito de comparação, foram escolhidos 4 (quatro) entre eles, sendo dois de mecanismo de proteção por barreira e os outros dois de mecanismo de proteção galvânica, baseada nos princípios da proteção catódica.

Serão comparados os resultados obtidos no ensaio cíclico de corrosão, realizado em laboratório com aqueles do ensaio de campo, onde os corpos-de-prova foram expostos às intempéries naturais com borrifamento de solução salina em sua superfície, por um período de 5 (cinco) anos, tempo este em que a evolução do processo corrosivo foi acompanhada. A avaliação dos resultados foi realizada utilizando-se os parâmetros citados no item 2, e será apresentada a seguir.

3.1 Aderência

Os resultados dos ensaios de aderência, referente à condição inicial, para cada um dos esquemas de pintura estudados, estão mostrados na Tabela V.

Tabela V - Resultados dos ensaios de aderência, referentes à condição inicial, dos corpos-de-prova de cada esquema de pintura submetido aos ensaios de desempenho à corrosão.

ADERÊNCIA INICIAL						
Esquema	ASTM D 4541 (MPa)	Natureza da Falha	NBR 11003 A (corte em X)	Natureza da Falha	ISO 2409 ^(a) (corte em grade)	Natureza da Falha
1B	21,0	10% A/B; 90% D	X ₀ Y ₀₋₁	-	0-1	-
1C	20,4	40% B; 60% D	X ₀ Y ₀₋₁	-	0-1	-
2B	16,0	D	X ₀ Y ₀₋₁	A/B	0-1	A/B
2C	16,0	D	X ₀ Y ₀₋₁	A/B	1	A/B
7B	16,5	50% B; 50% C/D	X ₀ Y ₁	B	1	A/B
7C	16,5	B	X ₀ Y ₁	B	1-2	A/B
10B	15,0	B	X ₀ Y ₀₋₁	B	1	B
10C	14,0	B	X ₀ Y ₀	-	1-2	B
Observações						
(a) Embora não previsto na norma, no caso do presente trabalho o espaçamento adotado entre os cortes foi de 3 mm, independente da espessura dos revestimentos.						

3.1.1 Discussão dos resultados

Pode-se notar que, os esquemas de pintura aplicados sobre superfícies ferrosas com grau de limpeza St3 (ferramentas mecânicas), apresentaram excelentes resultados de aderência inicial e, portanto, não se pode atribuir à aderência inicial qualquer responsabilidade pelo desempenho dos revestimentos por pintura em caso de falhas dos mesmos em relação ao seu desempenho anticorrosivo após os ensaios de corrosão realizados.

3.2 Ensaio Cíclico de Corrosão [radiação UV-B e condensação de umidade + frio + névoa salina (ASTM B 117)]

Os resultados obtidos, após 10,1 ciclos de exposição, estão descritos na Tabela VI. Na Figura 2 mostram-se, em forma de gráfico, os resultados de avanço de corrosão, sob o revestimento, na região da incisão e, na Figura 1, mostra-se o aspecto dos corpos-de-prova, após a conclusão do ensaio, de cada esquema de pintura. Na Tabela VII, apresentam-se os resultados dos ensaios de aderência após a conclusão do ensaio.

Tabela VI - Resultados do ensaio cíclico de resistência à corrosão [radiação UV-B e condensação de umidade + frio + névoa salina contínua (ASTM B 117)].

Esquema	Inspeção visual do revestimento após 10,1 ciclos de exposição:
1B	<ul style="list-style-type: none"> • Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço/degradação foi de 13,4 mm.

1C	<ul style="list-style-type: none"> • Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço/degradação foi de 12,5 mm.
2B	<ul style="list-style-type: none"> • Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço/degradação foi de 14,0 mm.
2C	<ul style="list-style-type: none"> • Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço/degradação foi de 12,6 mm.
7B	<ul style="list-style-type: none"> • Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço/degradação foi de de 3,2 mm.
7C	<ul style="list-style-type: none"> • Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço/degradação foi de 2,5 mm.
10B	<ul style="list-style-type: none"> • Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço/degradação foi de 2,2 mm.
10C	<ul style="list-style-type: none"> • Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço/degradação foi de 1,8 mm.

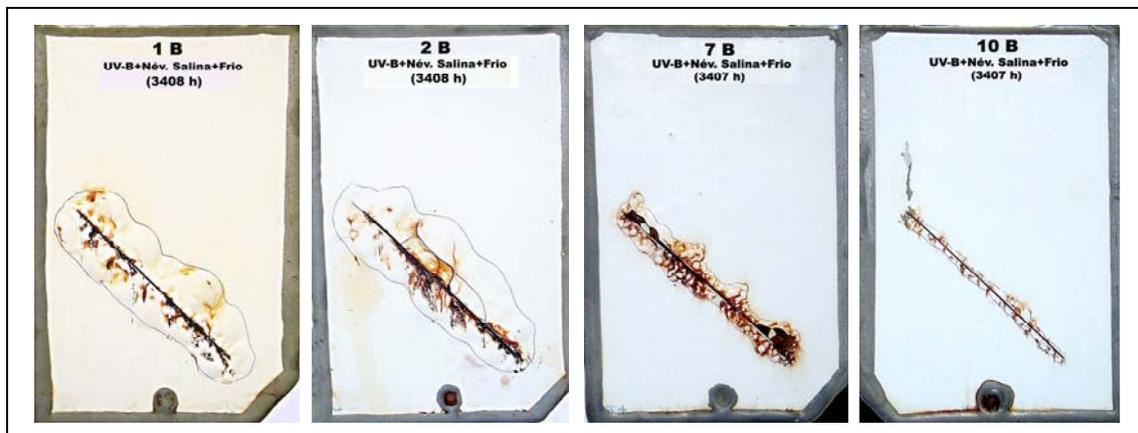




Figura 1 – Aspecto dos corpos-de-prova com incisão, após o término do ensaio cíclico de corrosão.

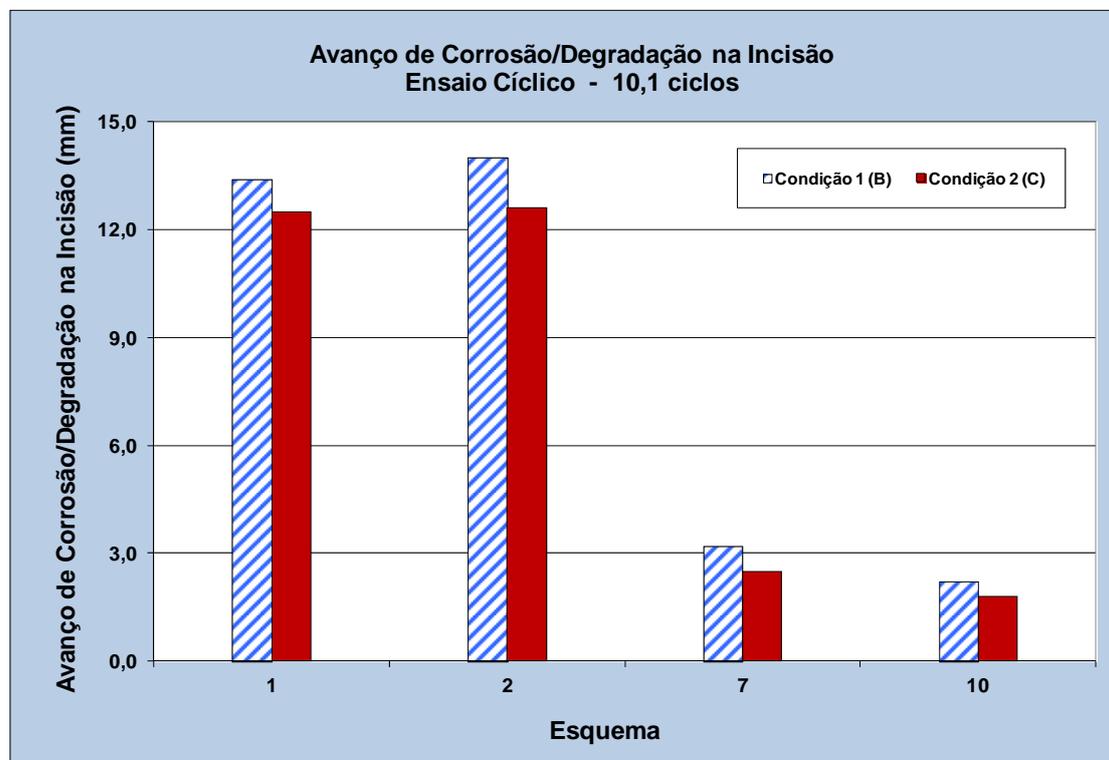


Figura 2 – Gráfico referente ao avanço de corrosão/degradação, sob o revestimento, na região da incisão, após o ensaio cíclico de corrosão.

Tabela VII - Resultados dos ensaios de aderência, após a conclusão do ensaio cíclico de resistência à corrosão [radiação UV-B e condensação de umidade + frio + névoa salina contínua (ASTM B 117)].

ADERÊNCIA						
Esquema	ASTM D 4541 (MPa)	Natureza da Falha	NBR 11003 A (corte em X)	Natureza da Falha	ISO 2409 ^(a) (corte em grade)	Natureza da Falha
1B	20,0	(A/B) _R	X ₀ Y ₀	-	0	-
1C	18,5	(A/B) _R	X ₀ Y ₀	A/B	0-1	B
2B	21,0	A/B	X ₀ Y ₀	-	0	-
2C	10,2	A/B	X ₀ Y ₁	A/B	0-1	A/B
7B	11,3	A/B	X ₀ Y ₁₋₂	A/B	3-4	A/B

7C	11,9	A/B	X_1Y_1	A/B	1	A/B
10B	14,0	B	X_1Y_{1-2}	B	1	B
10C	13,2	B	X_1Y_1	B	1	B

Observações

- (a) Embora não previsto na norma, no caso do presente trabalho o espaçamento adotado entre os cortes foi de 3 mm, independente da espessura dos revestimentos.
- (b) $(A/B)_R$: significa que, embora a falha tenha sido predominantemente A/B, observou-se a presença de resíduos da tinta de fundo aderidos ao substrato.

Antes de iniciar a discussão dos resultados, é importante ressaltar que o ensaio de corrosão em questão tem uma grande importância dentro dos objetivos do trabalho, uma vez que os corpos-de-prova são expostos a condições de agressividade que contêm os principais agentes causadores da corrosão atmosférica e que afetam a durabilidade dos revestimentos por pintura, como por exemplo, radiação ultravioleta, umidade, sais (ex.: NaCl), temperatura, oxigênio e variações térmicas.

Todos os esquemas de pintura apresentaram-se sem alterações nos revestimentos, na região fora da incisão, após o término do ensaio. Quanto ao avanço de corrosão sob o revestimento na região da incisão, pode-se observar na Figura 2 que os esquemas **1B** e **1C** (referências), **2B** e **2C** tiveram comportamentos bem parecidos.

Com relação aos esquemas contendo tinta rica em zinco (**7B**, **7C**, **10B** e **10C**) estes também apresentaram-se sem alterações nos revestimentos ao término do ensaio, no que diz respeito a empolamento, corrosão e fendimento. No que diz respeito ao avanço de corrosão, sob os revestimentos na região da incisão, pode-se observar na Figura 1 e no gráfico da Figura 2 que os esquemas de referência (**10B** e **10C**) foram os que proporcionaram melhor desempenho, seguidos dos esquemas **7B** e **7C**.

Quanto aos ensaios de aderência, cujos resultados estão apresentados na Tabela VII, observa-se que os esquemas de referência **10B** e **10C** foram os que apresentaram melhores resultados, em relação a esta propriedade, após o ensaio. Além dos valores estarem satisfatórios, considerando-se as características das tintas de fundo epóxi ricas em zinco, não foram observadas falhas de natureza adesiva ao substrato e nem entre as demãos de tintas. Os demais esquemas apresentaram valores também satisfatórios, porém a natureza da falha de aderência foi do tipo A/B (substrato/revestimento).

Face ao exposto, observa-se que, neste ensaio, para o grau de limpeza de superfície utilizado, os esquemas de referência **10B** e **10C** foram superiores aos demais, seguidos dos esquemas **7B** e **7C** em termos de melhor desempenho.

3.3 Exposição em Atmosfera Urbana, com Pulverização de Solução de Cloreto de Sódio (NaCl 1%)

Este ensaio foi realizado através da exposição de corpos-de-prova ao intemperismo natural, na estação de corrosão atmosférica do CEPEL (RJ). Para acelerar o processo de corrosão, os mesmos eram pulverizados com uma solução de cloreto de sódio (NaCl 1%) duas vezes por semana. Buscou-se com este procedimento acelerar o processo de corrosão na presença de fatores naturais de degradação dos revestimentos, como por exemplo radiação ultravioleta, chuva e variações térmicas.

Os resultados da inspeção visual obtidos, após dois tempos distintos de exposição, 10 meses e 5 anos, estão descritos na Tabela VIII.

As Figuras 3 e 4 mostram, respectivamente, o aspecto dos corpos-de-prova e o avanço de corrosão/degradação na região da incisão de todos os esquemas de pintura estudados, após 10 meses de exposição. Na Tabela IX apresentam-se os resultados dos ensaios de aderência, para o tempo de ensaio avaliado.

Tabela VIII - Resultados do ensaio de exposição em atmosfera urbana, com pulverização de solução de cloreto de sódio (NaCl 1%).

Esquema	Inspeção visual do revestimento
	Após dez meses de exposição
1B	• Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço de corrosão/degradação foi de 30,5 mm.
1C	• Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço de corrosão/degradação foi de 25,6 mm.
2B	• Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço de corrosão/degradação foi de 21,5 mm.
2C	• Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço de corrosão/degradação foi de 15,5 mm.
7B	• Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço de corrosão/degradação foi de 2,4 mm.
7C	• Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço de corrosão/degradação foi de 2,5 mm.
10B	• Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço de corrosão/degradação foi de 5,0 mm.
10C	• Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço de corrosão/degradação foi de 4,8 mm.

Tabela VIII – continuação

Esquema	Após cinco anos de exposição
1B	• Em função do elevado grau de degradação do revestimento por pintura, não foi possível a medição do avanço de corrosão.
1C	• Em função do elevado grau de degradação do revestimento por pintura, não foi possível a medição do avanço de corrosão.
2B	• Em função do elevado grau de degradação do revestimento por pintura, não foi possível a medição do avanço de corrosão.
2C	• Em função do elevado grau de degradação do revestimento por pintura, não foi possível a medição do avanço de corrosão.
7B	• Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço de corrosão/degradação foi de 21,3 mm.
7C	• Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço de corrosão/degradação foi de 16,2 mm.

10B	<ul style="list-style-type: none">• Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço de corrosão/degradação foi de 19,9 mm.
10C	<ul style="list-style-type: none">• Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço de corrosão/degradação foi de 10,6 mm.



Figura 3 - Aspecto dos corpos-de-prova com incisão, após 10 meses de exposição em atmosfera urbana, com pulverização de solução de NaCl 1%.

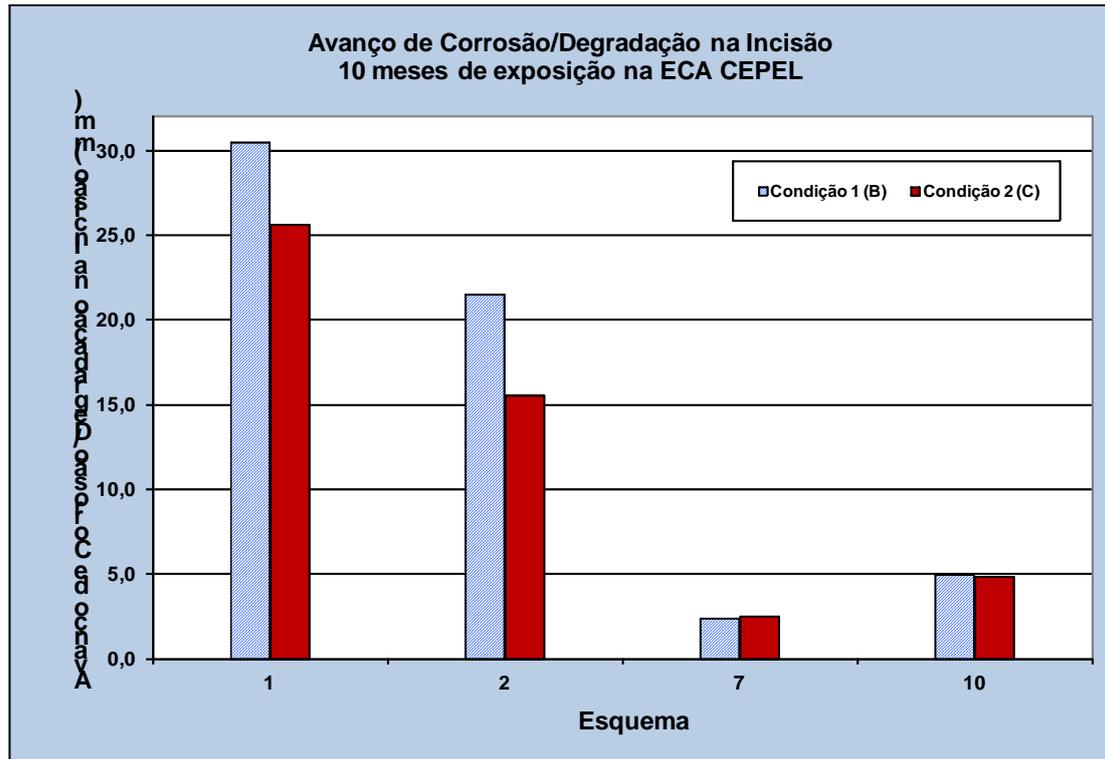


Figura 4 - Gráfico referente ao avanço de corrosão/degradação, sob o revestimento, na região da incisão, após 10 meses de exposição em atmosfera urbana, com pulverização de solução de NaCl 1%.

Tabela IX - Resultados dos ensaios de aderência, após dez meses de exposição em atmosfera urbana, com pulverização de solução de cloreto de sódio (NaCl 1%).

Esquema	ADERÊNCIA					
	ASTM D 4541 (MPa)	Natureza da Falha	NBR 11003 A (corte em X)	Natureza da Falha	ISO 2409 ^(a) (corte em grade)	Natureza da Falha
1B	22,5	80% A/B; 20% C	X ₀ Y ₀	-	0	-
1C	23,0	50% B; 50% C	X ₀ Y ₀	-	0	-
2B	19,2	A/B	X ₀ Y ₀	-	0	-
2C	12,0	A/B	X ₀ Y ₀	-	0	-
7B	19,0	B	X ₀ Y ₁	A/B	2	A/B
7C	15,5	(A/B) _R	X ₀ Y ₁	A/B	1-2	A/B
10B	14,6	B	X ₀ Y ₀	-	1	B
10C	14,2	B	X ₀ Y ₁	B	1	B

Observações

- (a) Embora não previsto na norma, no caso do presente trabalho o espaçamento adotado entre os cortes foi de 3 mm, independente da espessura dos revestimentos.
- (b) (A/B)_R: significa que, embora a falha tenha sido predominantemente A/B, observou-se a presença de resíduos da tinta de fundo aderidos ao substrato.

Pelos resultados de desempenho após 10 meses de exposição, apresentados na Tabela VIII, observa-se que, na região fora da incisão, todos os esquemas de pintura apresentaram-se sem alterações nos revestimentos no que diz respeito a empolamento, corrosão e fendimento.

Quanto ao avanço de corrosão sob o revestimento na região da incisão, de uma forma geral, os revestimentos de proteção por barreira apresentaram valores mais elevados, como pode ser observado na Figura 3 e no gráfico da Figura 4. Neste sentido, o esquema de referência **1B** foi o que apresentou o maior avanço de corrosão sob o revestimento.

Com relação à influência das condições de superfície (**B** ou **C**), não se observou uma diferença significativa no desempenho dos esquemas **1B** e **1C**. No caso dos esquemas **2B** e **2C**, observou-se, no ensaio de aderência por tração, um menor valor de tensão de ruptura para o esquema **2C**.

No que diz respeito aos ensaios de aderência (Tabela IX), todos os resultados obtidos foram satisfatórios. Além dos valores elevados de tensão de ruptura (no caso do método de resistência à tração), com exceção dos esquemas **2B** e **2C**, não se observaram falhas de natureza adesiva. Quanto à falha encontrada nestes dois esquemas, é possível que tenha sido um fato isolado decorrente de alguma heterogeneidade na preparação de superfície dos corpos-de-prova dos mesmos. Como é conhecido, o grau de limpeza St3 nem sempre deixa a superfície totalmente homogênea.

Quanto aos ensaios de aderência, dos esquemas contendo tintas ricas em zinco (**7B**, **10B** e **10C**) apresentaram resultados bastante satisfatórios, uma vez que, além dos valores de tensão de ruptura elevados, não apresentaram falhas de natureza adesiva. O esquema **7C** também apresentou valores de tensão de ruptura elevados. Apenas a natureza da falha é que foi do tipo A/B, porém no substrato ainda se observava resíduos da tinta de fundo, o que não deixa de ser um fato positivo.

Os resultados de desempenho após 5 anos de exposição, apresentados na Tabela VIII mostram que houve um grau de degradação bastante elevado, principalmente nos esquemas de proteção por barreira, não sendo, por esse motivo, possível a avaliação do avanço de corrosão. Por outro lado, os esquemas contendo tinta rica em zinco, apesar do longo tempo de ensaio, apresentaram boas condições do revestimento na região adjacente à incisão e, mesmo com valores elevados de avanço, foi possível medi-los. Estas observações podem ser vistas na Figura 5.

Vale ressaltar que, no caso dos esquemas **1** e **2** não foi possível realizar o ensaio de aderência em função do elevado grau de degradação dos revestimentos. Também optou-se por não realizar esse ensaio para os esquemas **7** e **10**.

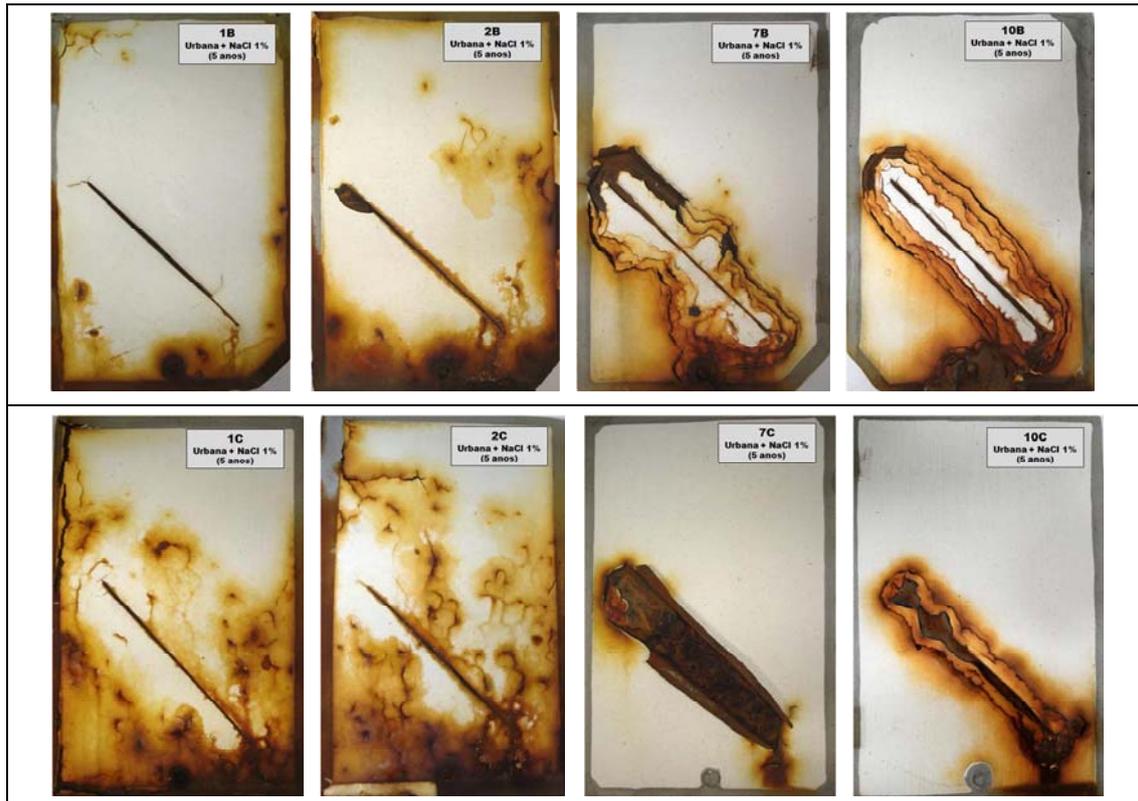


Figura 5 - Aspecto dos corpos-de-prova com incisão, após 5 anos de exposição em atmosfera urbana, com pulverização de solução de NaCl 1%.

4 CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS

Após a análise dos resultados dos ensaios realizados, constatou-se que os esquemas de pintura com tintas epoxídicas curadas com fenolcamina permitiram a redução do tempo de aplicação dos revestimentos e, como consequência, principalmente, o de parada dos equipamentos, por ocasião da realização dos serviços de manutenção. Estes resultados dizem respeito somente aos produtos utilizados e não podem ser extrapolados sem critério para todas as tintas epoxídicas curadas com fenolcamina. É amplamente conhecido que as tecnologias de formulação e de fabricação das tintas têm uma influência substancial no desempenho dos revestimentos, mesmo se utilizando os mesmos tipos de resina na composição.

A combinação de diferentes tecnologias de tintas, na especificação de esquemas de pintura, também é uma alternativa importante para a redução do tempo de aplicação dos revestimentos anticorrosivos. No presente trabalho, isto ficou bastante evidente no esquema 7, onde a tinta de fundo rica em zinco, de apenas um componente, a base de poliisocianato de cura com a umidade do ar, devido à sua rápida secagem, permitiu que a tinta epóxi curada com fenolcamina FK1a fosse aplicada com curto intervalo de tempo entre demãos (3,5 horas). Esta última, por sua vez, em função de sua secatividade, permitiu que pouco tempo (3 a 4) h depois fosse aplicada a tinta de acabamento PU.AC.

Os resultados obtidos também mostraram o grau de proteção que os esquemas contendo tinta de fundo rica em zinco conferem às superfícies, uma vez que, mesmo depois de um tempo muito

grande de exposição (5 anos), estas mostraram um grau de proteção muito maior do que aqueles esquemas contendo tinta de fundo epóxi. Este fato reforça, mais uma vez, que este tipo de revestimento atua muito bem em atmosferas agressivas, em especial as marinhas.

Além disso, verificou-se que existe uma correspondência qualitativa bastante satisfatória ao se comparar os desempenhos anticorrosivos dos diferentes revestimentos no tempo de 10 meses e no tempo de 5 anos no ensaio de exposição natural conduzido de forma acelerada. Assim, verifica-se que apenas com 10 meses de ensaio já se tem um resultado confiável para o desempenho dos revestimentos, mostrando-se que mesmo em tempos longos de exposição à intempéries, os revestimentos estudados não mudam o comportamento em relação a proteção anticorrosiva. Como já observado em estudos anteriores realizados pelo Cepel, o ensaio de exposição natural, acelerado pelo borrifamento de solução de cloreto de sódio 1% sobre os corpos-de-prova apresenta bons resultados na classificação de desempenho de revestimentos. E no presente estudo, a confiabilidade nos resultados obtidos por este ensaio pode ser confirmada por um tempo muito maior de exposição (5 anos).

Por fim, é importante lembrar que a redução do tempo de execução de uma pintura anticorrosiva não depende só das características técnicas das tintas. A logística de aplicação (planejamento) dos esquemas de pintura é também um fator de grande importância para que este objetivo seja alcançado. O trabalho mostrou que, com relação às tintas, já existem tecnologias disponíveis para que se possa reduzir o tempo de aplicação dos revestimentos, sem prejuízo às propriedades de proteção anticorrosiva das superfícies ferrosas expostas em diversos tipos de atmosfera.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, na discussão dos mesmos e nos comentários gerais, pode-se concluir que:

- a) As tintas epoxídicas curadas com fenolcamina, utilizadas no estudo, permitem a especificação de esquemas de pintura com curtos intervalos de tempo entre demãos, bem como a redução do tempo para a aplicação dos revestimentos anticorrosivos e, como consequência, principalmente o tempo de parada dos equipamentos durante os serviços de manutenção.
- b) O mesmo efeito também pode ser conseguido utilizando-se tais tintas em conjunto com diferentes tecnologias de tintas anticorrosivas, atualmente existentes, como ocorreu no caso do esquema de pintura 7.
- c) O estudo realizado atingiu plenamente os objetivos desejados, pois foram identificados esquemas de pintura, com diferentes mecanismos de proteção anticorrosiva, que permitem a redução do tempo de aplicação dos revestimentos, desde que a logística de aplicação seja adequada.
- d) Os resultados mostraram que, mesmo após 5 anos de exposição em atmosfera agressiva, mais uma vez fica comprovado que os esquemas contendo tintas de fundo ricas em zinco protegem de forma satisfatória as superfícies metálicas em relação aos esquemas de proteção por barreira, nas mesmas condições. Além disso, o ensaio de exposição natural, conduzido de forma acelerada, apresentou um resultado bastante satisfatório para os revestimentos estudados e equivalentes entre si, tanto com 10 meses de ensaio, quanto após 5 anos. O que fornece uma boa confiabilidade nos resultados obtidos com apenas 10 meses de exposição.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Fernando Fragata; Amorim, C. C.; Alberto P. Ordine. Desempenho de Esquemas de Pintura com Intervalos Curtos entre Demãos de Tintas - Alternativas para a Redução do Tempo de Execução da Pintura. In: INTERCORR 2010, Fortaleza-CE.
- (2) ISO 8501-1:2007, 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.
- (3) ISO 9223:2012, Corrosion of Metals and Alloys - Corrosivity of Atmospheres - Classification, Determination and Estimation.
- (4) ABNT NBR 11003:2009, Tintas - Determinação da Aderência, Rio de Janeiro, Brasil.
- (5) ISO 2409:2013 - Paints and varnishes - Cross-cut test
- (6) ASTM D4541 - 09e1, Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers.
- (7) ASTM G154 - 06, Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials.
- (8) ASTM B117-11, Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus.
- (9) ISO 11474 - Corrosion of metals and alloys - Corrosion Tests in Artificial Atmosphere - Accelerated Outdoor Test by Intermittent Spraying of a Salt Solution (Scab Test)
- (10) ISO 4628:2003/Part 1-6, Evaluation of Degradation of Paint Coatings - Designation of Intensity, Quantity and Size of Common Types of Defect.
- (11) ISO 4628-2:2003 - 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.
- (12) ISO 4628-3:2003 - 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.
- (13) ISO 4628-4:2003 - 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.