

Copyright 2010, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.

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

Desempenho De Esquemas De Pintura Com Intervalos Curtos Entre Demãos - Alternativas Para A Redução Do Tempo De Execução Da Pintura

Fernando Fragata¹, Cristina C. Amorim², Alberto P. Ordine³

Abstract

This paper presents the results of a study, in which the aim was to evaluate painting systems that can be applied in a single working day, in order to reduce the time of maintenance services and the out-of-operation time of equipments. So, several different epoxy paints (primers and intermediate), with short time intervals between coats were investigated. Several corrosion tests were carried out in laboratory and also, in field. It was found that paint systems with epoxy paints, cured with phenolkamine, can be applied in a working day and that they have good anticorrosive properties. The paint systems had three coats, two of them being epoxy paints (the primer and the intermediate coat) and one of them being an acrylic aliphatic polyurethane paint (the top coat).

Keywords: epoxy paint, phenolkamine, intervals between coats, anticorrosive properties.

Resumo

Neste trabalho apresentam-se os resultados de um estudo, o qual teve como objetivo avaliar e identificar esquemas de pintura que possam ser aplicados dentro de uma mesma jornada de trabalho, de modo a reduzir o tempo de execução dos serviços de manutenção e o de parada dos equipamentos. Para tal, diversos tipos de tinta epóxi, com curtos intervalos de tempo entre demãos foram utilizados. Após a conclusão do estudo, o qual envolveu a realização de ensaios de corrosão em laboratório e em campo, verificou-se que os esquemas de pintura com tintas epoxídicas, curadas com fenolcamina, podem ser aplicados dentro da mesma jornada de trabalho, sem prejuízo das propriedades de proteção anticorrosiva do revestimento. No presente estudo, os esquemas de pintura possuíam três demãos, sendo duas de tinta epóxi (uma de fundo e uma de intermediária) e uma de poliuretano acrílico alifático (acabamento).

Palavras-chave: tinta epóxi, fenolcamina, intervalo entre demãos, redução de tempo de aplicação.

1. INTRODUÇÃO

⁽¹⁾ Engenheiro Químico, Pesquisador do CEPPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

⁽²⁾ Mestre, Química Industrial, Fundação Padre Leonel Franca

⁽³⁾ D.Sc., Engenheiro Químico, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

Em nível mundial, no campo da proteção anticorrosiva, tem sido observada uma grande preocupação, por parte das empresas, em buscar alternativas técnicas que permitam reduzir o tempo de aplicação dos esquemas de pintura. O objetivo básico é diminuir o tempo de parada dos equipamentos e o de mobilização de pessoal nas obras. Isto, certamente, trará benefícios técnicos e econômicos substanciais para as empresas, desde que os esquemas de pintura possuam desempenho adequado. Obviamente que a redução do tempo de execução de uma pintura não depende só das características técnicas das tintas, mas também da logística envolvida na aplicação dos esquemas de pintura.

O CEPEL, em conjunto com as empresas do Sistema Eletrobrás, 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. Tais tintas foram elaboradas especificamente para a realização do estudo e, em sua maioria, foram produzidas a partir de resinas epoxídicas curadas com fenolcamina. A escolha deste agente de cura 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.

Após a realização de uma série de ensaios de corrosão foi possível identificar um bom desempenho dos esquemas de pintura, elaborados com tintas epoxídicas curadas com fenolcamina, que permitem a sua aplicação dentro de uma mesma jornada de trabalho. Tais esquemas de pintura possuíam, no máximo, três demãos de tintas. A redução do tempo de aplicação não afetou as propriedades anticorrosivas dos revestimentos, no que diz respeito à proteção de superfícies ferrosas expostas à atmosfera. Obviamente que, como descrito anteriormente, em campo, isto só será possível se o planejamento (logística) de aplicação do esquema de pintura for adequado para que o mesmo possa ser aplicado dentro da mesma jornada de trabalho.

Neste trabalho, são apresentados os resultados do estudo realizado e as considerações técnicas a respeito do desempenho dos esquemas de pintura estudados. Para facilitar o entendimento dos mesmos, apenas os resultados dos esquemas que atenderam aos objetivos do trabalho serão mostrados, em conjunto com os dos esquemas de pintura tradicionais, que foram utilizados como referência para fins de comparação de desempenho à corrosão.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Tintas Utilizadas no Estudo

Como descrito anteriormente, dois importantes fabricantes de tintas anticorrosivas e um de resinas (fornecedor do agente de cura a base de fenolcamina) colaboraram no desenvolvimento do estudo. Na Tabela I apresentam-se o código e a descrição básica das

tintas de fundo, intermediária e de acabamento utilizadas. Na Tabela II, para fins de comparação, apresentam-se algumas características físico-químicas das referidas tintas.

Tabela I – 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, a 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) .
Acabamento	PU.AC	Tinta de acabamento poliuretano acrílico alifático , cor branca.

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

Tabela II – Características Físico-químicas das Tintas

Ensaio	DA.288	EP.HB	FK.288	MCU85	EP.Zn	FKIa	FKIb	PU.AC	
Massa específica (g/cm ³)	1,398	1,600	1,440	3,355	3,227	1,640	1,615	1,533	
Teor de sólidos (%)	Massa	81,8	87,0	85,2	91,3	89,4	84,4	80,2	79,2
	Volume	70,8	80,0	75,3	-	-	69,0	70,0	66,4
COV (g/l)	254	208	213	292	342	256	320	319	
Zn ⁰ na película seca (%)	-	-	-	85,2	82,4	-	-	-	
Tempo de secagem	Ao toque	30 min	1h e 30 min	40 min	13 min	6 min	30 min	10 min	15 min
	Livre de pegajosidade	4h e 50 min	6h	2h e 15 min	25 min	30 min	2h e 30 min	1h e 15 min	4 h
	Completa	7h e 30 min	7h e 15 min	3h e 20 min	1 h	4h	3h e 20 min	3h e 10 min	7h e 45 min

Como pode ser observado na Tabela II, as tintas epoxídicas curadas com fenolcamina possuem uma secatividade (ver 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. Portanto, uma característica técnica bastante benéfica para os objetivos do estudo em questão.

2.2 Descrição dos Esquemas de Pintura

Como informado anteriormente, 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. Por esta razão, os códigos atribuídos aos esquemas de pintura, neste trabalho, são os mesmos daqueles utilizados no estudo. 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 na mesma jornada de trabalho (mesmo dia).

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

Como se pode observar na Tabela III, nos esquemas 2 e 7, as três demãos de tintas foram aplicadas dentro da mesma jornada de trabalho, ou seja, no mesmo dia. No esquema 10 as três demãos foram aplicadas em dois dias ao invés de três, como seria normal caso a tinta intermediária fosse curada com poliamida convencional. A redução de um dia, na aplicação deste esquema, deveu-se às características técnicas da tinta intermediária epóxi curada com fenolcamina (FKIb). No caso do esquema 1, utilizado como referência, as três demãos de tintas foram aplicadas em três dias, haja vista que o intervalo entre demãos das tintas foi de 24 horas.

Um 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. A idéia de se incluir no estudo esquemas de pintura com tintas de fundo ricas em zinco, foi para se identificar alternativas técnicas de revestimentos por pintura para atmosferas marinha e/ou industrial agressivas, capazes de permitirem a redução do tempo de execução dos serviços de pintura.

2.3 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 e obedecendo, rigorosamente, à metodologia previamente estabelecida. Os corpos-de-prova foram confeccionados a partir de chapas de aço-carbono com carepa de laminação intacta, correspondente ao grau de intemperismo A da norma ISO 8501-1[1]. As dimensões destas chapas eram de 150 mm x 100 mm e espessura de 6,4 mm.

A preparação de superfície constou de desengorduramento por meio de solventes orgânicos, seguido de limpeza por meio de jateamento abrasivo. Neste processo de limpeza o abrasivo utilizado foi granalha de aço angular (G-50) e o grau de limpeza obtido, de acordo com a classificação da norma ISO 8501-1[1], foi o Sa3 (metal branco). O perfil de rugosidade da superfície ficou situado em torno de 50 μm .

Após a preparação da superfície, procedeu-se a aplicação das tintas dos esquemas de pintura, a qual foi feita seguindo-se as recomendações de seus respectivos fabricantes. Antes do início dos ensaios de avaliação dos esquemas de pintura, os corpos-de-prova permaneceram, pelo menos, 15 dias nas condições de $(24 \pm 1)^\circ\text{C}$ de temperatura e $(60 \pm 5) \%$ de umidade relativa.

2.4 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.

2.4.1 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 e B) [2]:** a verificação do grau de aderência é feita em função do destacamento do revestimento ao longo dos cortes e na interseção dos mesmos. No método A (corte em X), o resultado pode variar desde X_0 até X_4 e de Y_0 até Y_4 . No método B (corte em grade), o resultado pode variar desde Gr0 a Gr4. Em ambos os casos, quanto menor o índice, melhor é a aderência do revestimento por pintura. Na realização do teste

de corte em grade, utilizou-se um instrumento de corte único e o espaçamento entre os cortes foi de 3 mm.

Na avaliação da aderência 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 D 4541 [3]:** 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”)

2.4.2 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 (UV-B) e condensação de umidade, de acordo com a norma ASTM G 154[4], utilizando-se o ciclo de 8 h de radiação UV-B e 4 h 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[5].

Como pode ser observado, cada ciclo possuía a duração de 336 horas. A duração total do ensaio foi de 13,5 ciclos (4536 horas). 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.

2.4.3 Resistência à imersão em água destilada, a 40 °C

Este ensaio foi realizado imergindo-se, aproximadamente, 90% da área total dos corpos-de-prova em água destilada, na temperatura de $(40 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, controlada por meio de um termostato. A duração total do ensaio foi de 4300 horas, sendo que os corpos-de-prova eram inspecionados após cada 168 horas (7 dias) de imersão.

2.4.4 Resistência à imersão em solução de cloreto de sódio (NaCl 3,5%), a 40 °C

Este ensaio, a exemplo do anterior, foi realizado imergindo-se, aproximadamente, 90% da área total dos corpos-de-prova em solução de cloreto de sódio (NaCl, 3,5%), na temperatura de $(40 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, controlada por meio de um termostato. A duração total do ensaio foi de 4300 horas, sendo que os corpos-de-prova eram inspecionados após cada 168 horas (7 dias) de imersão.

2.4.5 Exposição em câmara de umidade (100%, 40 °C)

Este ensaio foi realizado com base na norma ASTM D 2247[6], nas condições de (98 a 100)% de umidade relativa e temperatura de $(40 \pm 2)^{\circ}\text{C}$. A duração total do ensaio foi de 4508 horas.

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

Este ensaio foi realizado através da exposição de corpos-de-prova ao intemperismo natural, na estação de corrosão atmosférica do CEPTEL (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 corpos-de-prova ficaram expostos durante 10 (dez) meses nessas condições.

3. CONSIDERAÇÕES TÉCNICAS SOBRE ALGUNS PARÂMETROS UTILIZADOS NA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO À CORROSÃO DOS ESQUEMAS DE PINTURA

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[7]. Além destas, foram utilizadas as normas ASTM D 4541[3] e NBR 11003[2] (método A, corte em X e método B, corte em grade), para a avaliação da aderência dos revestimentos, conforme descrito no item 2.4.1. 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.

3.1 Empolamento (Blistering)

O empolamento foi avaliado com base na norma ISO 4628/2[8]. 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. A seguir, apresentam-se alguns exemplos de avaliação de empolamento.

- 3(S2) : frequência 3 e tamanho de bolhas 2;
- 5(S3) : frequência 5 e tamanho de bolhas 3;

3.2 Corrosão

A avaliação do grau de corrosão foi realizada de acordo com a norma ISO 4628/3[9]. 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).

3.3 Fendimento (Cracking)

A avaliação do grau de fendimento foi feita com base na norma ISO 4628/4[10], 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.

Um exemplo de avaliação de fendimento de um revestimento é mostrado a seguir:

- fissuras 2(S5)a, sop: densidade de fissuras igual a 2, com largura superior a 1 mm, que se apresentam na superfície da tinta de acabamento, sem orientação preferencial (sop).
- fissuras 5(S4)c, cop: densidade de fissuras igual a 5, com largura de até 1 mm, sendo que se apresentam bastante profundas, deixando visível o substrato metálico e com orientação preferencial (cop).

3.4 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 (A_c), em milímetros, e equivalente a um lado, foi calculado pela seguinte fórmula:

$$A_c = \left(d - 0,3 \right) \div 2$$

onde:

A_c = 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.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, serão apresentados os resultados referentes aos ensaios descritos no item anterior, bem como os comentários e as considerações técnicas a respeito dos mesmos.

4.1 Aderência Referente às Condições Iniciais dos Revestimentos

Os resultados dos ensaios de aderência, referentes à condição inicial (antes da realização dos ensaios de corrosão), estão apresentados na Tabela V.

Tabela V – Resultados dos Ensaios de Aderência, Referentes à Condição Inicial

ADERÊNCIA INICIAL						
Esquema	ASTM D 4541 (MPa)	Natureza da Falha	NBR 11003 A (corte em X)	Natureza da Falha	NBR 11003 B (corte em grade)*	Natureza da Falha
1	21,6	D	X ₀ Y ₀	-	Gr 0	-
2	16,0	D	X ₀ Y ₀	-	Gr 0	-
7	17,5	B	X ₀ Y ₀	-	Gr 1	B
10	13,9	B	X ₀ Y ₀	-	Gr 0-1	B

* Embora não previsto na norma NBR 11003 B, no caso do presente trabalho o espaçamento adotado entre os cortes foi de 3 mm, independente da espessura dos revestimentos. Além disso, os cortes foram feitos com instrumento de apenas um gume.

Como pode ser observado, todos os esquemas de pintura apresentaram excelentes resultados de aderência, tanto pelo método de resistência à tração quanto pelos de corte em X e em grade. Os valores de tensão de ruptura foram elevados e a natureza da falha coerente com as características das tintas utilizadas nos esquemas de pintura. Portanto, o fato dos esquemas 2 e 7 terem sido aplicados na mesma jornada de trabalho (todas as demãos em apenas um dia), não afetou as propriedades de aderência e de coesão dos revestimentos. O valor de tensão de ruptura (13,9 MPa), bem como a natureza da falha (B), para o esquema 10, é comum para esquemas de pintura com tintas de fundo ricas em zinco a base de resina epóxi curada com poliamida. A diferença observada entre valores de tensão de ruptura dos esquemas de pintura estudados pode ser creditada às características das tintas utilizadas.

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

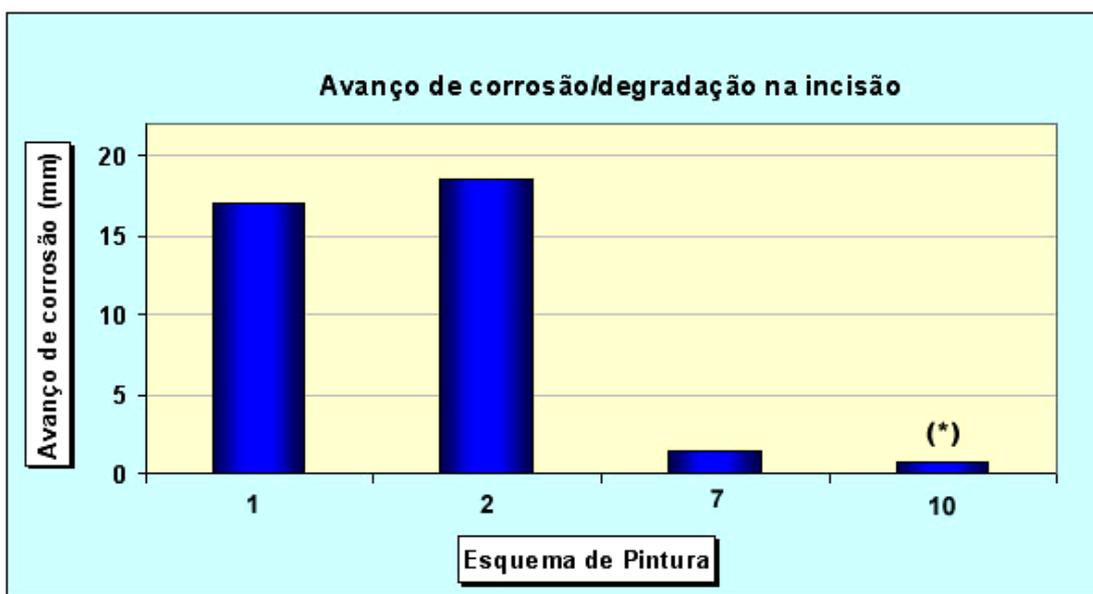
Os resultados obtidos, após 13,5 ciclos de exposição, estão descritos na Tabela VI. Na Figura 1 mostram-se, em forma de gráfico, os resultados de avanço de corrosão, sob o revestimento, na região da incisão. Na Figura 2, mostra-se o aspecto dos corpos-de-prova, após a conclusão do ensaio, de cada esquema de pintura. Na Tabela VII, apresentam-se os resultados dos ensaios de aderência após a conclusão do ensaio.

Tabela VI – Resultados da Inspeção Visual dos Esquemas de Pintura após o Término do Ensaio Cíclico de Corrosão

Esquema	Inspeção visual do revestimento após 13,5 ciclos de exposição:
1	Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço de corrosão/degradação foi de 17,0 mm.
2	Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço de corrosão/degradação foi de 18,6 mm.

7	Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço de corrosão/degradação foi de 1,4 mm.
10	Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço de corrosão/degradação foi de 0,8 mm(*).

(*). Este valor se refere apenas à delaminação do revestimento observada na região da incisão. Não houve avanço de corrosão do substrato de aço-carbono (ferrugem) sob o revestimento.



(*)Valor referente à delaminação do revestimento. Não houve avanço de corrosão do aço, sob o revestimento na região da incisão.

Figura 1 – Gráfico referente ao avanço de corrosão/degradação, sob o revestimento, na região da incisão, após o ensaio cíclico de corrosão.

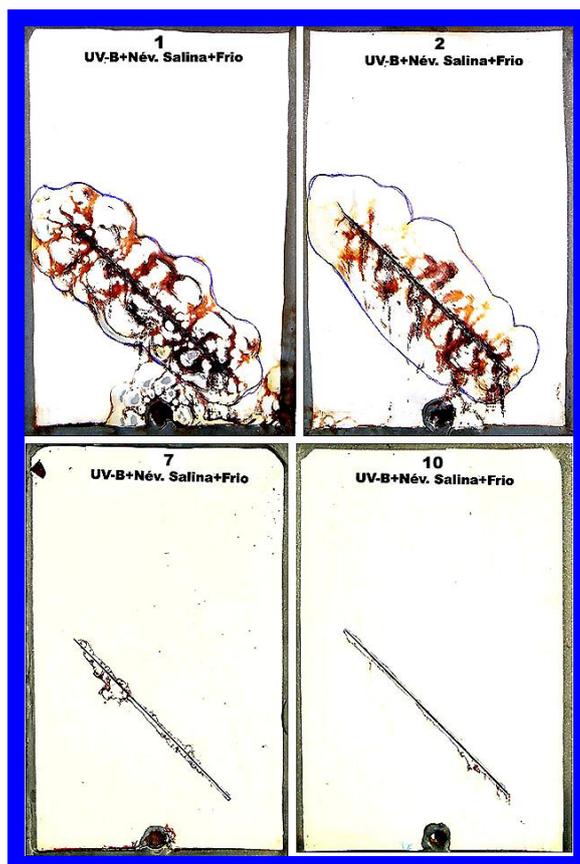


Figura 2 – Aspecto dos corpos-de-prova com incisão, após o término do ensaio cíclico de corrosão.

Tabela VII – Resultados dos Ensaios de Aderência, após o Término do Ensaio Cíclico de Corrosão

ADERÊNCIA						
Esquema	ASTM D 4541 (MPa)	Natureza da Falha	NBR 11003 A (corte em X)	Natureza da Falha	NBR 11003 B (corte em grade)*	Natureza da Falha
1	25,0	D	X ₀ Y ₀	-	Gr 0	-
2	23,0	D	X ₀ Y ₀	-	Gr 0	-
7	20,8	B	X ₀ Y ₁	B	Gr 0-1	B
10	17,8	B	X ₁ Y ₁	B	Gr 1-2	B

* Embora não previsto na norma NBR 11003 B, no caso do presente trabalho o espaçamento adotado entre os cortes foi de 3 mm, independente da espessura dos revestimentos. Além disso, os cortes foram feitos com instrumento de apenas um gume.

Em função dos resultados obtidos, pode-se observar que o desempenho do esquema 2 foi, praticamente, igual ao do esquema 1 (referência). Nos dois esquemas, a única alteração ocorreu na região da incisão, na qual se observou um avanço de corrosão substancial sob o revestimento, em ambos os casos. Neste aspecto, a diferença observada entre os valores de avanço de corrosão pode ser considerada desprezível. Isto, de certa forma, já era esperado pois trata-se de dois esquemas

cujo mecanismo de proteção é somente por barreira. Sob condições de elevada agressividade, a tendência é se observar um avanço de corrosão significativo. Isto, entretanto, nem sempre significa que os referidos esquemas não tenham boas propriedades anticorrosivas. É muito comum se encontrar esquemas de pintura com excelentes características de proteção por barreira porém com desempenho ruim na região da incisão, com relação ao avanço de corrosão sob o revestimento.

Quanto aos esquemas 7 e 10, observa-se também que o 7 (todas as demãos aplicadas no mesmo dia) apresentou um desempenho bastante parecido com o 10, tanto na região da incisão quanto fora dela. A exemplo dos esquemas anteriores, a diferença observada na incisão pode ser considerada desprezível.

Com relação à aderência dos revestimentos por pintura, após o término do ensaio, os resultados obtidos foram excelentes, principalmente, aqueles obtidos pelo método de resistência à tração. Os valores de tensão de ruptura foram altos, maiores até que os da condição inicial, e a natureza da falha foi coesiva em todos os casos, que é a condição desejada. Nos testes de corte em X e em grade observou-se, no caso dos esquemas 7 e 10, algum destacamento na interseção dos cortes, porém com falha coesiva das tintas de fundo ricas em zinco. Isto é normal para estes tipos de esquemas de pintura pois, como é conhecido, as tintas de fundo ricas em zinco, em geral, não possuem uma coesão muito elevada devido à sua alta concentração volumétrica de pigmentos.

O último fato a ser destacado neste item diz respeito ao desempenho dos esquemas 1 e 2 e dos esquemas 7 e 10 na região da incisão. A diferença substancial entre os dois primeiros e estes dois últimos se deve à presença das tintas de fundo ricas em zinco nos esquemas 7 e 10. Como já é amplamente conhecido, estas tintas conferem ao aço, além da proteção por barreira, o mecanismo de proteção baseado nos princípios da proteção catódica, em função do zinco ser um metal anódico em relação ao aço-carbono. Como consequência, estes tipos de esquemas de pintura conferem, principalmente em atmosferas de elevada agressividade (ex.: marinha) excelentes características de proteção anticorrosiva aos substratos ferrosos, principalmente nas regiões de falhas dos revestimentos.

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

Os resultados obtidos, após 10 meses de exposição, estão descritos na Tabela VIII. Na Figura 3 mostram-se, em forma de gráfico, os resultados de avanço de corrosão, sob o revestimento, na região da incisão. Na Figura 4 mostra-se o aspecto dos corpos-de-prova, com incisão, de cada esquema de pintura. Na Tabela IX apresentam-se os resultados dos ensaios de aderência após a conclusão do ensaio.

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 10 meses de exposição:
---------	-------------------------------------------------------------

1	Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço de corrosão/degradação foi de 15,6 mm.
2	Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço de corrosão/degradação foi de 3,8 mm.
7	Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, não se observou avanço de corrosão/degradação sob o revestimento.
10	Não houve alteração, quanto à corrosão (Ri0), fendimento e empolamento. Na região da incisão, o avanço de corrosão/degradação foi de 0,7 mm.

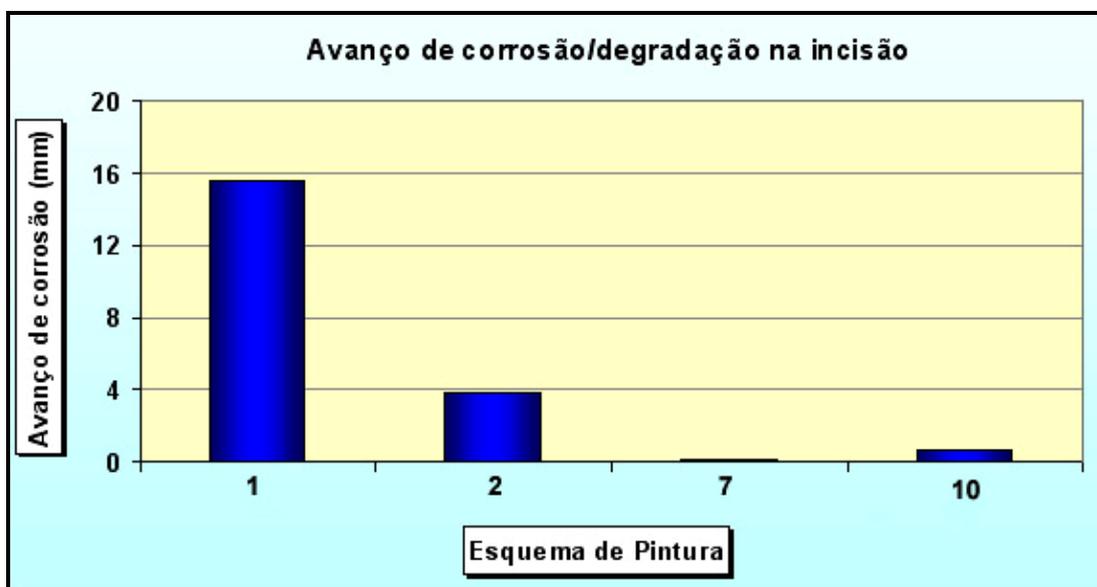


Figura 3- Gráfico referente ao avanço de corrosão/degradação, sob o revestimento, na região da incisão, após o ensaio de exposição em atmosfera urbana, com pulverização de solução de NaCl 1%.

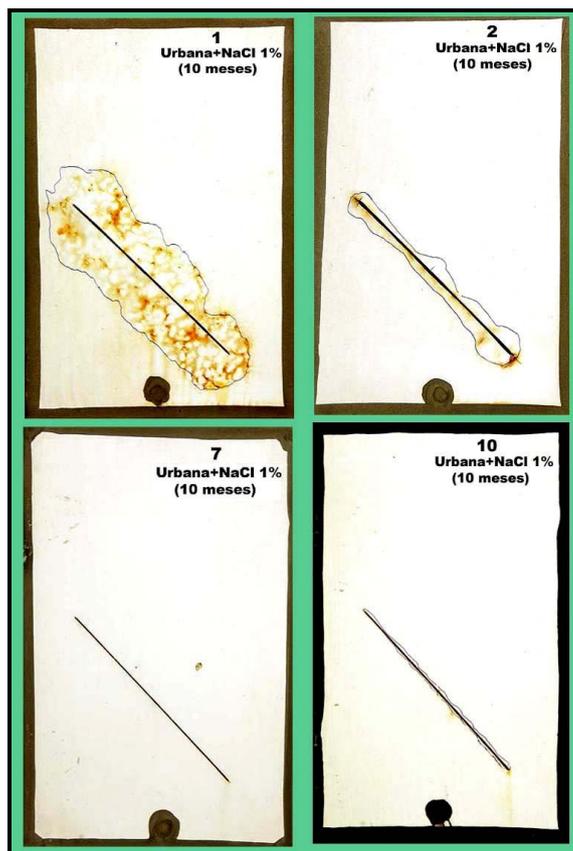


Figura 4 - Aspecto dos corpos-de-prova com incisão, após o ensaio de exposição em atmosfera urbana, com pulverização de solução de NaCl 1%.

Tabela IX- Resultados dos Ensaios de Aderência, após 10 Meses de Exposição em Atmosfera Urbana com Pulverização de Solução de NaCl 1%.

ADERÊNCIA						
Esquema	ASTM D 4541 (MPa)	Natureza da Falha	NBR 11003 A (corte em X)	Natureza da Falha	NBR 11003 B (corte em grade)*	Natureza da Falha
1	26,2	C	X ₀ Y ₀	-	Gr 0	-
2	25,3	C	X ₀ Y ₀	-	Gr 0	-
7	21,0	70%B; 30%Y/Z	X ₀ Y ₀	-	Gr 0	-
10	17,1	B	X ₀ Y ₀	-	Gr 1	B

* Embora não previsto na norma NBR 11003 B, no caso do presente trabalho o espaçamento adotado entre os cortes foi de 3 mm, independente da espessura dos revestimentos. Além disso, os cortes foram feitos com instrumento de apenas um gume.

Pelos resultados mostrados na Tabela VIII, fora da região da incisão, pode-se observar que o esquema 2 apresentou um desempenho tão bom quanto o esquema 1 (referência). Na região da incisão, conforme pode ser observado nas Figuras 3 e 4, mostrou, inclusive, um comportamento melhor que o 1.

Da mesma forma, o esquema 7 (todas as demãos de tintas aplicadas no mesmo dia, a exemplo do esquema 2), também apresentou um desempenho tão bom quanto o 10. A pequena diferença observada na região da incisão entre os dois esquemas pode ser considerada desprezível, haja vista que os valores obtidos foram muito pequenos (0 mm para o esquema 7 e 0,7 mm para o esquema 10).

Quanto aos ensaios de aderência, os resultados obtidos foram excelentes por todos os métodos de medição utilizados. No caso do método de resistência à tração, além dos valores elevados de tensão de ruptura, em todos os esquemas a natureza da falha (plano onde ocorreu a fratura) foi coesiva. Portanto, também neste ensaio, constata-se que as tintas epoxídicas curadas com fenolcamina podem ser bastante úteis na elaboração de esquemas de pintura, para proteção anticorrosiva de superfícies ferrosas **expostas à atmosfera**, principalmente quando se deseja reduzir o tempo de aplicação dos revestimentos por pintura.

4.4 Exposição em Câmara de Umidade (100%, 40 °C)

Após as 4508 horas de exposição em câmara de umidade, todos os esquemas de pintura não apresentaram quaisquer problemas no que diz respeito aos aspectos de corrosão, empolamento e fendimento nos respectivos revestimentos. Quanto aos ensaios de aderência, após a conclusão do ensaio, os resultados estão apresentados na Tabela X.

Tabela X – Resultados dos Ensaios de Aderência após Exposição em Câmara de Umidade (100%, 40 °C)

ADERÊNCIA						
Esquema	ASTM D 4541 (MPa)	Natureza da Falha	NBR 11003 A (corte em X)	Natureza da Falha	NBR 11003 B (corte em grade)*	Natureza da Falha
1	25,2	95% D; 5% C	X ₀ Y ₀	-	Gr 0	-
2	19,3	C	X ₀ Y ₀	-	Gr 0	-
7	17,5	B	X ₀ Y ₁	B	Gr 1	B
10	12,9	B	X ₀ Y ₁	B	Gr 1-2	B

* Embora não previsto na norma NBR 11003 B, no caso do presente trabalho o espaçamento adotado entre os cortes foi de 3 mm, independente da espessura dos revestimentos. Além disso, os cortes foram feitos com instrumento de apenas um gume.

Neste ensaio de exposição em câmara de umidade, todos os esquemas de pintura tiveram, basicamente, o mesmo comportamento, em relação às propriedades anticorrosivas dos revestimentos. Os resultados dos ensaios de aderência também foram todos satisfatórios e os valores encontrados estão em conformidade com as propriedades físico-químicas das tintas utilizadas, principalmente as de fundo ricas em zinco. Um outro fato positivo é que em nenhum dos esquemas se observou falha adesiva entre o revestimento e o substrato (A/B). O rompimento dos carretéis ocorreu sempre devido à coesão de uma das camadas de tinta.

4.5 Resistência à Imersão em Solução de Cloreto de Sódio (NaCl 3,5%) e em Água Destilada, a 40 °C.

Após as 4300 horas de imersão, em ambos os ensaios todos os esquemas de pintura se apresentaram sem quaisquer problemas nos respectivos revestimentos, no que diz respeito aos aspectos de corrosão, empolamento e fendimento. Quanto aos ensaios de aderência, após a conclusão dos ensaios de imersão, os resultados estão apresentados nas Tabelas XI (imersão em solução de cloreto de sódio) e XII (imersão em água destilada).

Tabela XI – Resultados dos Ensaios de Aderência, após 4300 h de Imersão em NaCl 3,5%

ADERÊNCIA						
Esquema	ASTM D 4541 (MPa)	Natureza da Falha	NBR 11003 A (corte em X)	Natureza da Falha	NBR 11003 B (corte em grade)*	Natureza da Falha
1	24,0	D	X ₀ Y ₀	-	Gr 0	-
2	18,7	D	X ₀ Y ₀	-	Gr 0	-
7	16,5	B	X ₀ Y ₀	B	Gr 0	-
10	10,5	B	X ₀ Y ₁	B	Gr 1	B

* Embora não previsto na norma NBR 11003 B, no caso do presente trabalho o espaçamento adotado entre os cortes foi de 3 mm, independente da espessura dos revestimentos. Além disso, os cortes foram feitos com instrumento de apenas um gume.

Tabela XII – Resultados dos Ensaios de Aderência, após 4300 h de Imersão em Água Destilada

ADERÊNCIA						
Esquema	ASTM D 4541 (MPa)	Natureza da Falha	NBR 11003 A (corte em X)	Natureza da Falha	NBR 11003 B (corte em grade)*	Natureza da Falha
1	20,3	D	X ₀ Y ₀	-	Gr 0	-
2	18,3	D	X ₀ Y ₀	-	Gr 0	-
7	16,5	B	X ₀ Y ₀	-	Gr 0-1	B
10	9,6	B	X ₀ Y ₁	B	Gr 1	B

* Embora não previsto na norma NBR 11003 B, no caso do presente trabalho o espaçamento adotado entre os cortes foi de 3 mm, independente da espessura dos revestimentos. Além disso, os cortes foram feitos com instrumento de apenas um gume.

Como pode ser observado, também nestes dois ensaios, o desempenho do esquema de pintura 2 foi parecido com o do esquema 1 (referência). Da mesma forma, o esquema de pintura 7 também apresentou um desempenho comparável ao do esquema 10. Portanto, os esquemas de pintura 2 e 7, em que as três demãos de tintas foram aplicadas no mesmo dia, apresentaram, nos dois ensaios em questão, características técnicas que atenderam aos objetivos do estudo realizado.

Com relação aos ensaios de aderência, todos os resultados foram bastante satisfatórios. O fato das tintas terem sido aplicadas em um só dia, no caso dos esquemas de pintura 2 e 7, em nada interferiu no desempenho e na aderência dos respectivos revestimentos.

No caso do esquema 10, observou-se uma redução na tensão de ruptura, em relação ao valor inicial, porém com o mesmo tipo da falha coesiva da tinta de fundo, ao contrário do que ocorreu em outros ensaios, cuja tensão de ruptura aumentou em relação à condição inicial. Provavelmente, a condição de imersão sendo mais agressiva pode ter afetado a coesão do filme da tinta de fundo epóxi rica em zinco, muito embora, de uma forma geral, os resultados obtidos podem ser considerados satisfatórios para o esquema de pintura em questão.

5. COMENTÁRIOS GERAIS SOBRE O ESTUDO REALIZADO

Ao longo da apresentação dos resultados dos ensaios realizados, constatou-se que os esquemas de pintura com tintas epoxídicas curadas com fenolcamina atenderam aos objetivos do trabalho, ou seja, permitem 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 após 2,5 horas fosse aplicada a tinta de acabamento PU.AC.

É importante destacar que as tintas epoxídicas curadas com fenolcaminas são uma das alternativas de tecnologias existentes para a elaboração de esquemas de pintura que permitem a redução do tempo de aplicação dos revestimentos. Outros tipos de tinta podem atender a este requisito. Por exemplo, a combinação de tintas de fundo a base de poliisocianato, de cura com a umidade do ar, como a MCU85, com tintas de acabamento poliasspárticas também dão origem a esquemas de pintura que permitem reduzir o tempo de aplicação dos revestimentos.

Tal como destacado em itens anteriores, 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 estudo apenas revelou 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 tanto em atmosferas de baixa a média agressividade (por exemplo o esquema 2) como em atmosferas de elevada agressividade, especialmente marinhas (esquemas 7 e 10).

6. 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 a utilização de 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 identificaram-se 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) É importante que as empresas, antes de comprarem as tintas, para atingir este tipo de objetivo (redução do tempo de aplicação), se certifiquem se as mesmas possuem propriedades técnicas capazes de atenderem a tais requisitos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ISO 8501-1, Preparation of Steel Surfaces Before Application of Paints, ISO, Genève, Switzerland, (1988).
- [2] NBR 11003, Tintas - Determinação da Aderência, Rio de Janeiro, Brasil, (1990).
- [3] ASTM D 4541, Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers, Philadelphia, (2005).
- [4] ASTM G 154, Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials, (2001).
- [5] ASTM B 117, Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus, Philadelphia, (1997).
- [6] ASTM D 2247, Standard Practice for Testing Water Resistance of Coatings in 100% Relative Humidity, Philadelphia, (2002).
- [7] ISO 4628/Part 1-6, Evaluation of Degradation of Paint Coatings - Designation of Intensity, Quantity and Size of Common Types of Defect, Second Edition, International Organization for Standardization, (2003).
- [8] ISO 4628/2, Evaluation of Degradation of Paint Coatings - Designation of Intensity, Quantity and Size of Common Types of Defect – Part 2: Designation of Degree of Blistering, (2003).
- [9] ISO 4628/3, Evaluation of Degradation of Paint Coatings - Designation of Intensity, Quantity and Size of Common Types of Defect – Part 3: Designation of Degree of Rusting, (2003).

[10] ISO 4628/4, Evaluation of Degradation of Paint Coatings - Designation of Intensity, Quantity and Size of Common Types of Defect – Part 3: Designation of Degree of Cracking, (2003).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as empresas do Sistema Eletrobrás (CHESF, ELETRONORTE, ELETROSUL e FURNAS) pelo apoio na realização do estudo. Os agradecimentos são também extensivos às empresas Akzo Nobel (Tintas International), Sherwin-Williams e Cardolite pela valiosa colaboração, não só no fornecimento das amostras de tintas e resinas mas também na discussão dos resultados obtidos no estudo .