

RESISTÊNCIA À CORROSÃO ATMOSFÉRICA DO AÇO ASTM A-36 PINTADO COM TINTAS À BASE DE RESINAS EPOXI E POLIURETANO, MEDIDA POR TESTES SEMI-ACELERADOS¹

*Ezio Machado de Oliveira²
José Rubens Gonçalves Carneiro³
Vanessa de Freitas Cunha Lins⁴*

Resumo

Foi estudada a influência da temperatura, umidade relativa do ar, salinidade, e número de ciclos de umedecimento e secagem na resistência à corrosão atmosférica do aço ASTM A-36 pintado com tintas à base de resinas epóxi e poliuretano. O objetivo do trabalho é apresentar uma alternativa ao uso de testes acelerados e de campo, desenvolvendo um teste semi-acelerado para avaliar a resistência e durabilidade de um sistema de proteção anticorrosiva, submetido a um ambiente específico durante um ano. As amostras foram expostas em uma câmara para teste cíclico de corrosão durante 2000 horas com valores fixos de temperatura, umidade relativa do ar, salinidade e número de ciclos de umedecimento e secagem. A perda de massa do substrato na área do risco de corte na pintura foi medida após cada período de 250 horas de teste. O segundo estágio da pesquisa foi a análise de sensibilidade da taxa de corrosão com a mudança nos valores dos parâmetros de referência. O terceiro estágio consistiu em submeter as amostras ao teste cíclico durante 750 horas e a seguir um teste de campo em atmosfera marinha durante um ano. A perda de massa do substrato na região do risco foi medida após cada período de 60 dias. A caracterização do produto da corrosão foi feita usando-se microscopia eletrônica de varredura, difração de Raios X, espectroscopia no infravermelho, e termogravimetria. Após ajuste polinomial da função perda de massa associada, com a análise de sensibilidade de alteração dos parâmetros, a vida útil estimada das amostras foi de 30 a 38 meses.

Palavras-chave: Corrosão atmosférica; Pintura; Teste semi-acelerado; Análise de sensibilidade.

EVALUATION OF THE ATMOSPHERIC CORROSION RESISTANCE OF AISI A-36 STEEL PAINTED WITH COATINGS BASED ON EPOXY AND POLY (URETHANE) RESINS USING SEMI-ACCELERATED TESTING

Abstract

The influence of temperature, humidity, salinity, and number of wet-dry cycles in the atmospheric corrosion resistance of the ASTM A-36 steel, painted with coatings based on epoxy and poly(urethane) resins, was studied. The aim of this work is to present an alternative to the accelerated and field tests developing a semi-accelerated test in order to evaluate the resistance and durability of a protection system applied to a specific environment for one year. The samples were exposed in a corrosion cyclic test chamber for 2000 hours with fixed parameters of temperature, relative humidity of air, salinity, and a number of dry-wet cycles. Mass loss of substrate in the scratch area was measured after each 250 hours of testing. The second stage of research was the sensibility analysis of the corrosion rate with the change of the reference test parameters. The third stage was the testing of the samples using the cyclic test for 750 hours, and the transfer of samples to a marine atmosphere exposure for one year. The mass loss was measured after each 60 days period of testing. Material characterization involved scanning electron microscopy, X Ray diffraction, infrared spectroscopy, and thermogravimetry. After polynomial adjustment of the mass loss function, associated with the sensibility analysis of the parameters alteration, the estimated life span of the samples was from 30 to 38 months.

Key words: Atmospheric corrosion; Painting; Semi-accelerated test; Sensibility analysis.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *M.Sc., Toshiba Transmissão e Distribuição do Brasil Ltda*

³ *D.Sc., Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais*

⁴ *D.Sc., Universidade Feral de Minas Gerais*

1 INTRODUÇÃO

A corrosão atmosférica é um fenômeno complexo que é influenciado por diversos fatores tais como temperatura, salinidade, umidade relativa do ar.⁽¹⁾

Testes de corrosão em escala de laboratório são importantes, devido ao curto período de duração, mas, muitas vezes, os resultados obtidos não são suficientes para subsidiar as decisões de engenheiros quanto à seleção e especificação de materiais. A literatura cita o uso de testes semi-acelerados para a avaliação da resistência à corrosão de aços e seus sistemas de pintura, bem como para a seleção de materiais da construção civil.⁽²⁾ Lins, Paranhos e Alvarenga⁽²⁾ relataram que os resultados da resistência à corrosão de aços fosfatizados e pintados, expostos a uma atmosfera industrial durante 24 meses, sujeitos à aspersão de uma solução salina uma vez por semana, foram similares aos resultados de resistência à corrosão dos mesmos aços submetidos ao teste GM 9540P/B durante 40 ciclos.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma alternativa aos testes de corrosão acelerados e de campo, desenvolvendo um teste semi-acelerado para avaliar a durabilidade de um sistema de proteção aplicado a aços, submetidos a um ambiente específico durante um ano. O material estudado foi o aço ASTM A-36, revestido com tintas a base de resinas epóxi poliamida e poliuretano alifático.

As resinas epóxi são largamente usadas como sistema de pintura para proteção contra a corrosão.⁽³⁻⁶⁾ As poliamidas usadas como agentes de cura de resinas epóxi conferem à tinta maior flexibilidade e resistência à água do que as poliaminas. Os poliuretanos também vêm sendo utilizados como revestimentos industriais nos últimos 45 anos.⁽⁷⁾

Foi feito o estudo da sensibilidade da variação das taxas de corrosão em função da temperatura, salinidade, umidade relativa e número de ciclos de umedecimento e secagem. A análise de sensibilidade é um processo sistemático usado para explorar uma solução ótima, e, de acordo com Pareto, é capaz de reagir às mudanças das condições iniciais.^(8,9) As curvas de sensibilidade da taxa de corrosão do aço pintado em função da salinidade, temperatura, umidade relativa e frequência dos ciclos de umedecimento e secagem foram obtidas, e a vida útil do aço pintado foi estimada.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O substrato usado foi o aço ASTM A-36, cortado de chapa nas dimensões 3 mm x 1200 mm x 3000 mm. As amostras foram produzidas em duas formas, sendo uma irregular e outra de dimensões 150 mm x 150 mm.

O jateamento do substrato com granalha de aço foi feito no padrão SA 2 $\frac{1}{2}$, de acordo com a Norma SSPC-SP-10 NACE 2. A rugosidade encontrada foi de $37 \pm 2 \mu\text{m}$.

A pintura do substrato foi realizada oito horas depois do jateamento. A resina epóxi poliamida óxido de ferro, Starflex 339, fabricante Starquímica, foi aplicada usando-se o método spray com a umidade relativa do ar de 65%. A viscosidade da tinta foi $40 \pm 2\text{s}$, medida de acordo com a Norma ASTM D1200-94(2005), usando-se o copo Ford número 4. A espessura da tinta seca foi de 115 μm a 130 μm , medida de acordo com a Norma ASTM E 376/89. A cura foi realizada ao ar livre durante 12 horas.

A segunda camada aplicada foi de poliuretano alifático, Stardur 470, fabricante Starquímica. A aplicação foi feita com a viscosidade de 55 ± 2 s, medida pelo copo Ford número 4, de acordo com a Norma ASTM D1200-94(2005). A espessura da tinta seca foi de $80 -0/+10$ μ m, medida de acordo com a Norma ASTM E 376/89 S. Após um período de 10 dias de cura, a aderência da tinta foi avaliada usando-se a Norma ASTM D 3359/97. Um risco longitudinal com 0,4 mm de largura foi feito para expor o substrato.

O teste acelerado foi feito usando-se uma câmara de névoa salina, modelo USC, BASS, e uma estufa fabricada pela Toshiba T & D do Brasil. As amostras foram testadas durante 2000 horas a temperatura de 35°C, umidade relativa de 100%, solução salina com salina 5% (p/p) de NaCl, e 360 ciclos de umedecimento e secagem por ano. O ciclo consistiu de 23 horas por dia de exposição na câmara de névoa salina e uma hora diária de exposição na estufa a 35°C.

A penetração da corrosão sob a camada de tinta foi avaliada de acordo com a Norma ASTM D1654-05.

O empolamento da tinta foi avaliado de acordo com a Norma ASTM D714.

A caracterização dos produtos da corrosão foi feita usando-se um microscópio eletrônico de varredura Jeol, modelo JSM-35, 25 kV de potencial de aceleração e resolução lateral de 3 μ m. A análise de fluorescência e difração de Raios X foi feita usando-se o espectrômetro Philips, PW 2400, e o difratômetro Philips, X'Pert-APD, PW 3710/31. A análise de espectroscopia no infra-vermelho foi realizada usando-se o espectrômetro 1760X Perkin-Elmer.

Um sistema Shimadzu de análise térmica foi usado, tendo sido feita a análise termogravimétrica (TGA), módulo TGA-50. As medidas foram feitas em atmosfera de ar sintético, uma mistura de O₂ ($20 \pm 0,5\%$ v/v) e N₂, com fluxo de 50 mL/min. TGA foi realizada usando 8,65 mg de poliuretano e 11,73 mg de resina epoxi na faixa de temperatura de 40°C-900°C, com taxa de aquecimento de 20°C/minuto.

As amostras foram pesadas após períodos de 250 horas, usando uma balança analítica Ohyo Jupiter, modelo C3-200D, e resolução de 0,0001 g. A limpeza das amostras foi feita de acordo com a Norma ASTM G1-03.

Uma aproximação polinomial foi feita usando o método dos mínimos quadrados para se obter a função perda de massa em função do tempo. O método utilizado foi o relatado por Hoffman.⁽¹⁰⁾

Os testes de corrosão foram feitos alterando-se um parâmetro em cada experimento, em relação à referência. Os valores estudados dos parâmetros estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores dos parâmetros estudados

Temperatura (°C)	Umidade relativa (%)	Teor de NaCl (% w/w)	Número de ciclos de umedecimento e secagem
	60		72
	70		90
	80	3,5	120
25	90	4,2	180

35 (teste de referência) 100(teste de referência) 5,0 (teste de referência) 360 (teste de referência)

45

55

A sensibilidade^(8,9) para o parâmetro alterado foi avaliada e uma nova função de perda de massa em função do tempo foi obtida.

Outra série de amostras foi testada em laboratório durante 750 horas e então, transferida para o teste de campo em atmosfera marinha, de acordo com a Norma ASTM D1014-02 durante um ano. A perda de massa na região do risco foi medida após cada período de 60 dias. Outra série de amostras foi submetida apenas ao teste de campo por um ano. A temperatura, umidade relativa do ar, e número de dias chuvosos foram registrados. A salinidade do teste foi considerada como 3,5% (p/p)³.

3 RESULTADOS

O substrato usado foi o aço carbono AISI A-36 com 0,16%C-0,14%Si-0,6%Mn-0,01%Cr-0,03%Al-0,01%C.

A granalha de aço apresentou um diâmetro médio de 0,9 mm.

O aço pintado, submetido a 1500 horas de teste acelerado de referência, apresentou um destacamento máximo de 1,5 mm na região do risco e o destacamento permissível é de 2 mm, de acordo com a Norma NBR 11388. O empolamento iniciou após 1.600 horas do teste acelerado. Ele foi classificado como d2/t3, de acordo com a Norma NBR 5841. A resistência à corrosão do sistema foi avaliada como sendo 1.500 horas. Após este período, o empolamento e falha de adesão ocorreram. O tempo total do teste acelerado foi 2.000 horas.

A análise térmica da resina de poliuretano alifático indicou uma estabilidade térmica até 250°C. A taxa de perda de massa é maior a 441°C. A resina epóxi óxido de ferro possui estabilidade térmica até a temperatura de 100°C. Como a máxima temperatura estudada foi 55°C, as tintas são estáveis termicamente.

A análise de espectroscopia no infra-vermelho da resina epoxi identificou os grupos: OH da carboxila, CH, CH₂, C-O, C-H de benzeno, (CH₂)_n.

A análise de espectroscopia no infra-vermelho da resina de poliuretano identificou os grupos OH de polioliol, C=O do uretano, -RNHCOOR'-, e CH₂.

A análise de fluorescência de Raios X identificou os seguintes elementos na resina epoxi: Zn, Fe, Ca, Si, N, Cr, S, P, Mg, O. A tinta de poliuretano apresentou os elementos: Ti, O, Ba, Si, Fe, S.

A Figura 1 mostra a superfície do aço pintado após 306 horas do teste de referência. A análise química semi-quantitativa da superfície identificou os elementos: Ti, Ca, Cl, Si, Al, Mg, Na, e oxigênio que são oriundos dos polímeros, enchimento, pigmentos, e da câmara de névoa salina. Na área do risco, ferro e oxigênio foram os elementos presentes em maior teor. O cloro pode ser oriundo da câmara de névoa salina ou do epiclorohidrin. Os resultados da microscopia eletrônica de varredura mostraram que a largura do risco aumentou de 1,50 mm para a amostra submetida a 306 horas no teste cíclico até 8,74 mm para a amostra submetida a 1.500 horas.

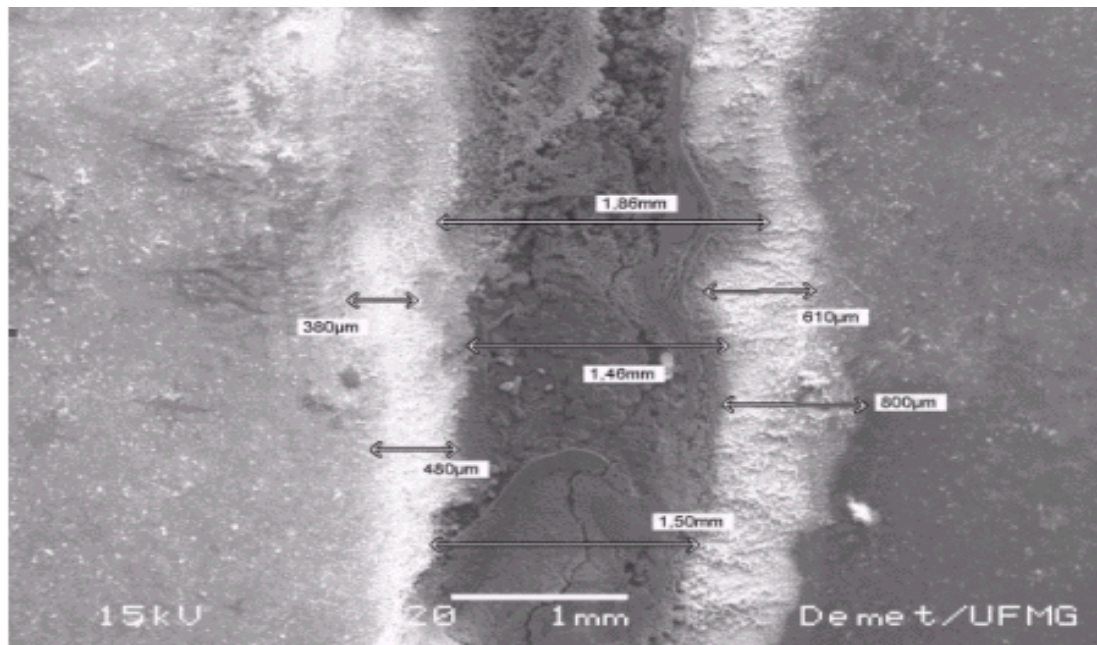


Figura 1. Superfície do aço pintado após 306 horas do teste de referência

A análise de difração de Raios X identificou as fases akaganeita e magnetita no produto da corrosão nas amostras submetidas a 1000 horas de teste acelerado. Akaganeite^(11,12) é um óxido-hidróxido de ferro III/ cloreto mineral cuja fórmula é $\beta\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH},\text{Cl})$; $\beta\text{-FeO}(\text{OH})$.⁽¹²⁾

As curvas mostradas na Figura 2 representam os resultados obtidos usando-se testes de campo e de laboratório. A taxa de corrosão é menor para as amostras submetidas ao teste de campo. A curva de perda de massa em função do tempo foi projetada para o processo corrosivo no ambiente marinho, baseada no teste de referência e na análise de sensibilidade considerando as alterações de temperatura, umidade relativa, salinidade, e número de ciclos de secagem e umedecimento. As curvas para a máxima e mínima corrosão foram projetadas. A projeção do processo corrosivo em função da sensibilidade dos parâmetros estudados permitiu estimar uma vida útil de 34,3 meses para o sistema de proteção. A maior diferença de massa entre a curva obtida e a estimada foi de 10,2 mg para 10 meses de exposição em ambiente marinho. Variáveis como o sistema de ventos, poluentes, e os efeitos da chuva contribuem para gerar as diferenças entre os valores de perda de massa.

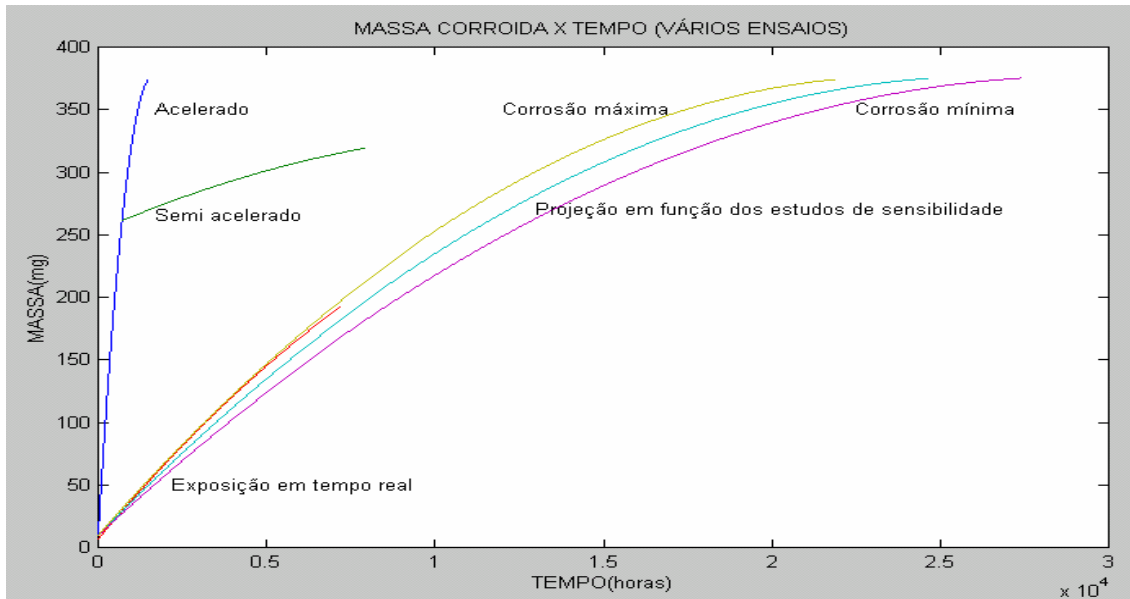


Figura 2 - Gráfico de massa corroída x tempo, para comparação de vários ensaios reunidos.

A análise estatística de erro foi feita considerando o erro experimental e o erro no ajuste polinomial derivado da transformação dos pontos discretos para função contínua. Os erros devidos aos outros fatores que influenciam na corrosão atmosférica e que não foram considerados nesta pesquisa foram atribuídos na diferença entre a função projetada e a função real. O desvio padrão foi de $\pm 40,6$ mg ou 10,8% em relação ao maior valor obtido da perda de massa (374,9 mg para 1500 horas de teste). A vida útil do aço pintado foi estimada em 34 ± 4 meses.

4 DISCUSSÃO

A perda de massa em função do tempo de teste para o teste de referência foi obtida usando a aproximação polinomial (método de mínimos quadrados), conforme a Eq.1.

$$m(t) = -1.41 \times 10^{-4} t^2 + 0.45t + 10.12 \quad R^2 = 99.44\% \quad [1]$$

Desde que a função foi de segunda ordem em relação ao tempo, a taxa de corrosão é uma função de primeira ordem. A taxa de corrosão diminuiu com o aumento do tempo de teste, devido à formação de uma camada de produto de corrosão, que age como barreira. De acordo com Melchers⁽¹³⁾ a perda de massa do aço exposto em atmosfera marinha é descrita pela equação:

$$c(t) = [2(At + B)]^{1/2} \quad [2]$$

As constantes A e B foram calculadas usando os resultados obtidos para tempos de 250 e 500 horas. Uma comparação entre os resultados de perda de massa obtidos neste trabalho e os valores obtidos usando a função proposta por Melchers⁽¹³⁾ mostrou uma diferença entre $-6,0\%$ e $+0,6\%$.

De acordo com Benárie,⁽¹⁴⁾ a corrosão atmosférica pode ser descrita pela equação:

$$\Delta m = k t^{(1-n)} \quad [3]$$

A comparação entre os resultados de perda de massa obtidos neste trabalho e os obtidos usando a função de Benárie⁽¹⁴⁾ indicou uma diferença entre +0,3% e +10,9%.

4.1 Sensibilidade à Alteração dos Parâmetros

A taxa de corrosão foi alterada devido à redução na temperatura de 35°C para 25°C, determinando uma nova função de perda de massa.

Considerando que a nova função possui o mesmo comportamento, a mesma ordem, e constância na razão entre as taxas de corrosão, a sensibilidade à alteração de um único parâmetro pode ser representada pela equação:

$$Sensibilit y = \frac{\frac{\partial m_{(1)}(txyzw)}{\partial t}}{\frac{\partial m_{(2)}(tx'yzw)}{\partial t}} = \frac{f1(t)}{f2(t)} \quad [4]$$

$m_{(1)}$ = massa corroída, função de t, x, y, z e w .

$m_{(2)}$ = massa corroída, função de t, x', y, z e w .

x = temperatura (T).

y = umidade relativa do ar (UR).

z = salinidade (SLN).

w = número de ciclos de secagem e umedecimento (CSU).

x' = temperatura para a função $f2(t)$.

As variáveis x, y, z, w e x' são constantes em cada teste, e a derivada pode ser alterada de uma derivada parcial para uma total.

$$\frac{\frac{dm_{(1)}(txyzw)}{dt}}{\frac{dm_{(2)}(tx'yzw)}{dt}} = \frac{f1(t)}{f2(t)} \quad [5]$$

As seguintes equações foram obtidas da equação 5.

$$dm_{(2)}(tx'yzw) = \frac{dm_{(1)}(txyzw)}{\frac{f1(t)}{f2(t)}} \quad [6]$$

$$dm_{(2)}(tx'yzw) = \frac{f2(t)}{f1(t)} dm_{(1)}(txyzw) \quad [7]$$

$$\int dm_{(2)}(tx'yzw) = \int \frac{f2(t)}{f1(t)} dm_{(1)}(txyzw) \quad [8]$$

O termo $\frac{f2(t)}{f1(t)}$ é constante e pode ser removido para fora da integral.

$$\int dm_{(2)}(tx' yzw) = \frac{f2(t)}{f1(t)} \int dm_{(1)}(txyzw) \quad [9]$$

$$m_{(2)}(t) = \frac{f2(t)}{f1(t)} m_{(1)}(t) \quad [10]$$

$$f2(t) = \frac{m_{(2)}(t)}{m_{(1)}(t)} f1(t) \quad [11]$$

A razão $\frac{m_{(2)}(t = 250)}{m_{(1)}(t = 250)}$ é conhecida porque a massa corroída a 250 horas de teste foi medida, e a função $f2(t)$ pode ser calculada. O último termo da equação de $f1(t)$, que não é função do tempo, foi excluído.

O mesmo procedimento foi adotado para o estudo da variação da umidade relativa, salinidade, e número de ciclos de secagem e umedecimento. Os resultados para temperatura são mostrados na Figura 3.

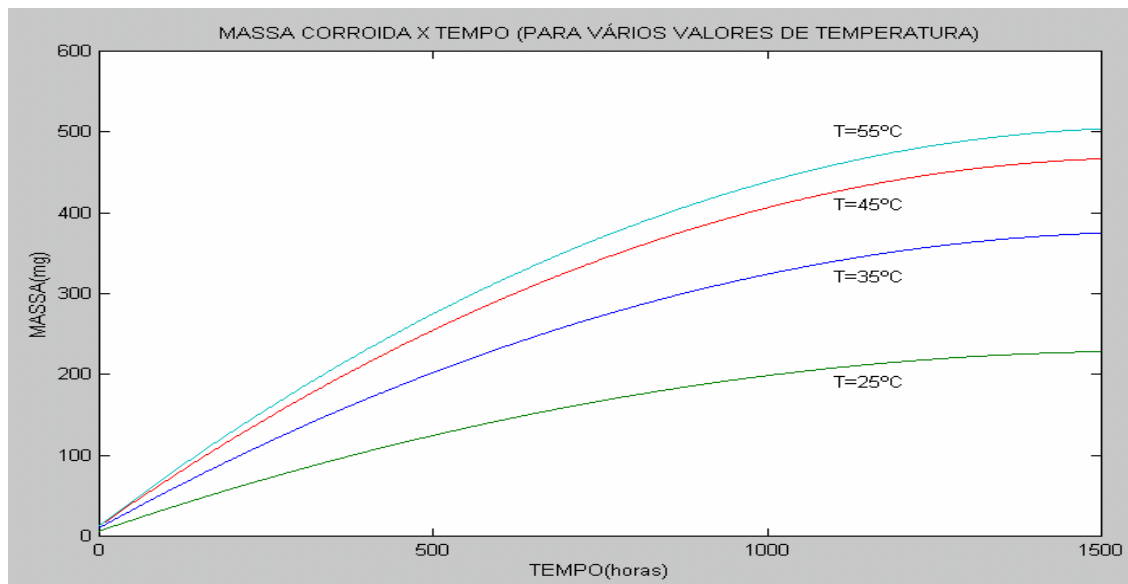


Figura 3 – Massa corroída do substrato em função do tempo para alguns valores de temperatura

A temperatura tem uma grande influência na taxa de corrosão, e a razão obtida de $m_{(2)}(t)/ m_{(1)}(t)$, fator de sensibilidade, varia significativamente como função da temperatura. As curvas mostradas na Figura 3 possuem um erro devido à exclusão do terceiro membro da equação 1, que não é função do tempo. Para 250 horas de exposição, o erro foi de 9,64%, e diminuiu para tempos maiores. A massa corroída aumentou com o aumento na temperatura, mas a taxa de corrosão diminuiu. O efeito barreira do produto de corrosão inibiu o desenvolvimento do processo corrosivo.

A curva de massa corroída foi obtida usando-se o método dos mínimos quadrados e foi ajustada a uma função polinomial de segunda ordem:

$$m(UR) = 0.02 \times (UR)^2 - 2.75 \times (UR) + 76.77 \quad R^2 = 99.79\% \quad [12]$$

A curva do teste de referencia pode ser corrigida para outros valores de umidade relativa com os dados da função $m(UR)$, e as curvas da Figura 4 foram obtidas.

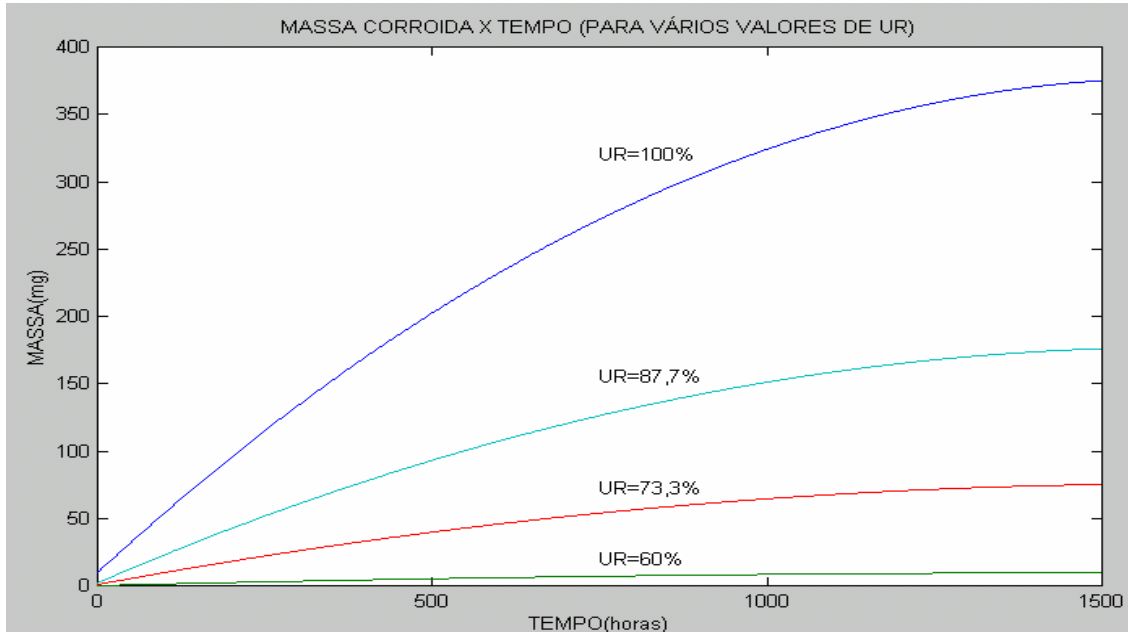


Figura 4 – Massa corroída do substrato em função do tempo para alguns valores de umidade relativa

A umidade relativa foi o fator de maior influencia no aumento da taxa de corrosão. O volume do produto de corrosão e a taxa de corrosão aumentaram com o aumento da umidade relativa. O erro devido à exclusão do terceiro membro da equação 1 foi -23.9% e diminuiu para maiores tempos de teste.

A equação foi ajustada com os resultados.

$$m(SLN) = -0.40 \times (SLN)^2 + 1.85 \times (SLN) + 133.03 \quad R^2 = 1 \quad [13]$$

A solução de cloreto de sódio é um eletrólito forte. Entretanto, o aumento na concentração de NaCl de 3 para 5% reduziu a corrosividade, provavelmente pela redução da solubilidade do oxigênio. Gentil⁽¹⁵⁾ relata que a perda de massa de um dado metal aumenta com o aumento da concentração de NaCl até 3%, e que um aumento do teor de NaCl de 3% a 26% reduz a taxa de corrosão. A perda de massa apresentou uma alteração mínima na faixa de 3% a 5% de NaCl, e as correções da curva de referencia não foram feitas.

O ajuste da curva foi feito para a variação no número de ciclos de umedecimento e secagem e o resultado pode ser representado pela equação:

$$m(CSU) = -0.0006 \times (CSU)^2 + 0.74 \times (CSU) + 13.37 \quad R^2 = 99.89\% \quad [14]$$

A variação no número de ciclos de secagem e umedecimento teve grande influência na taxa de corrosão. O erro no cálculo das curvas foi de -5.3% para 500 horas de exposição, e diminuiu para maiores tempos de teste.

5 CONCLUSÃO

Após exposição do aço carbono pintado com tinta à base de resina epoxi e poliuretano durante um ano em atmosfera marinha, o sistema de pintura não apresentou empolamento ou falha na adesão ao substrato.

Após 1.600 horas de teste acelerado, o aço pintado com tintas a base de resinas epoxi e de poliuretano apresentou empolamento.

As fases magnetita e akaganeita foram identificadas no produto de corrosão formado em laboratório, sendo também identificada uma fração amorfa.

As curvas de sensibilidade da taxa de corrosão em relação às mudanças na salinidade, temperatura, umidade relativa e número de ciclos de umedecimento e secagem foram obtidas. A corrosividade do teste acelerado foi 16,5 vezes maior que da atmosfera marinha. Os parâmetros que tiveram maior influência na taxa de corrosão foram a umidade relativa (52%), temperatura (24,5%), e o número de ciclos de umedecimento e secagem (23,5%). A alteração do teor de NaCl de 3% para 5% (p/p) não alterou a taxa de corrosão significativamente.

A vida útil do aço carbono pintado com tintas à base de resinas epoxi e poliuretano foi estimada em 34 ± 4 meses, sendo o erro estimado em $\pm 10,8\%$.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Toshiba Transmissão e Distribuição do Brasil Ltda, à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, e ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais.

REFERÊNCIAS

- 1 KATAYAMA, H.; NODA, K.; MASUDA, H.; Nagasawa, M.; Itagaki, M.; Watanabe, K. Corrosion simulation of carbon steels in atmospheric environment. *Corrosion Science*, v. 47, n.10, p. 2599-2606. 2005.
- 2 LINS, V.F.C.; PARANHOS, R.M.S.; ALVARENGA, E.A. Behavior of the electrogalvanized and painted carbon steel and low Cu and Cr carbon steel during cyclic and field corrosion tests. *Journal of Materials Science*, v. 42, p. 5094-5104. 2007.
- 3 ROBERGE, P.R. *Handbook of Corrosion Engineering*. New York: McGraw Hill, 1999.
- 4 TRUC, T.A.; HANG, T.T.X.; OANH, V.K.; DANTRAS, E.; LACABANNE, C.; OQUAB, D.; PÉBÈRE, N. Incorporation of an indole-3 butyric acid modified clay in epoxy resin for corrosion protection of carbon steel. *Surface and Coatings Technology*, v. 202, n.20, p. 4945-4951. 2008.
- 5 GARCÍA, S.J.; SUAY, J. Influence on the anticorrosive properties of the use of erbium (III) trifluoromethanesulfonate as initiator in an epoxy powder clearcoat. *Corrosion Science*, v. 49, n.8, p. 3256-3275. 2007.
- 6 ZHANG, S-Y.; DING, Y-F.; LI, S-J; LUO, X-W.; ZHOU, W-F. Effect of polymeric structure on the corrosion protection of epoxy coatings. *Corrosion Science*, v. 44, n.4, p. 861-869. 2002.
- 7 GONZÁLEZ-GARCÍA, Y.; GONZÁLEZ, S.; SOUTO, R.M. Electrochemical and structural properties of a polyurethane coating on steel substrates for corrosion protection, *Corrosion Science*, v. 49, n.9, p. 3514-3526. 2007.
- 8 VINCKE, P. Robust Solutions and Methods in Decision Aid, *Journal of Multicriteria Decision Analysis*, v. 8, p. 181-187. 1999.
- 9 RÍOS-INSÚA, D.; RUGGERI, F. *Robust Bayesian Analysis*, New York: Springer Verlag, 2000.
- 10 HOFFMAN, J.D. *Numerical methods for engineers and scientists*, New York: Congress Cataloging-in-Publication Data, 1992.

- 11 GARCÍA, K.E.; BARRERO, C.A.; MORALES, A.L.; GRENECHE, J.M. Lost iron and iron converted into rust in steels submitted to dry–wet corrosion process, *Corrosion Science*, v. 50, n. 3, p. 763-772. 2008.
- 12 RÉMAZEILLES, C.; REFAIT Ph. On the formation of β -FeOOH (akaganéite) in chloride-containing environments, *Corrosion Science*, v. 49, n.2, p.844-857. 2007.
- 13 MELCHERS, R.E. Mathematical modeling of the diffusion controlled phase in marine immersion corrosion of mild steel, *Corrosion Science*, v. 45, p. 923-940. 2003.
- 14 BENARIE, M.; LIPFERT, F.L. A general corrosion function in terms of atmospheric pollutant concentrations and rain pH, *Atmospheric Environment*, v. 20, p. 1947-1958. 1986.