

AÇO ESTRUTURAL COM RESISTÊNCIA À CORROSÃO ATMOSFÉRICA MARINHA SEVERA E DE ELEVADA RESISTÊNCIA MECÂNICA

Rogério Augusto Carneiro¹
Evandro de Azevedo Alvarenga²

Resumo

Foi desenvolvido, em escala piloto, aço estrutural Ni-Si-Mo com limite de escoamento acima de 480 MPa e alta resistência à corrosão atmosférica marinha. A elevada resistência mecânica possibilita reduzir a espessura de componentes metálicos e, conseqüentemente, o peso final de toda a estrutura, tanto da parte metálica quanto de alvenaria. A resistência à corrosão foi medida por meio de teste acelerado de corrosão atmosférica com aspersão intermitente de solução salina a 3% p/v de NaCl três vezes por semana (norma ISO 11474) durante três anos e de teste não-acelerado de corrosão com exposição em atmosfera marinha (norma NBR 6209) durante seis anos, comparativamente a aços USI-SAC 300 (patinável) e SAE 1006. O desempenho do aço Ni-Si-Mo foi muito superior, com taxas de corrosão menores e ausência de deslocamento de camada de óxidos. O melhor desempenho anticorrosivo, atribuído à formação de camada de óxidos mais compacta e protetora, permite eliminar proteção por pintura na maioria de situações em que essa é necessária para os aços patináveis tradicionais. Dessa forma, são eliminados os custos diretos da pintura inicial e de sua manutenção, bem como os indiretos devido a eventuais necessidades de paradas operacionais, além de problemas relacionados com dificuldades de acesso ou contaminações.

Palavras-chave: Aço estrutural; Resistência à corrosão; Resistência mecânica.

STRUCTURAL STEEL WITH HIGH MECHANICAL STRENGTH AND ATMOSPHERIC CORROSION RESISTANCES

Abstract

A Ni-Si-Mo structural steel was developed with yield strength above 480 MPa and high atmospheric corrosion resistance. The high yield strength enables the thickness reduction of metallic components and, consequently, the weight of the whole structure, including masonry. The corrosion resistance was measured by field tests with intermittent sprinkling of 3% w/v NaCl salt solution three times a week (ISO 11474) during three years and exposure to marine atmosphere (NBR 6209) during six years, compared with USI-SAC 300 (weathering steel) and SAE 1006 steels. The Ni-Si-Mo steel shows the best performance and its oxide layer does not scale off. According to these results, it is possible to recommend the use of the unpainted Ni-Si-Mo steel in environments where the traditional weathering steels usually requires painting. In this way, all costs involved with maintenance, repair and eventual shutdowns can be eliminated, as well as occasional problems such as contamination and poor access to the site.

Key words: Structural steel; Corrosion resistance; Mechanical strength.

¹ Engenheiro Químico, M.Sc., Pesquisador Especialista Pleno do Centro de Tecnologia Usiminas, Av. Pedro Linhares Gomes, 5431, Bairro Usiminas, Cep 36160-900, Ipatinga, MG, Brasil. E-mail: rogerio.carneiro@usiminas.com

² Engenheiro Químico, Dr., CQE/ASQ, Pesquisador Especialista Sênior do Centro de Tecnologia Usiminas, Ipatinga, MG, Av. Pedro Linhares Gomes, 5431, Bairro Usiminas, Cep 36160-900, Ipatinga, MG, Brasil. E-mail: evandro.alvarenga@usiminas.com

I INTRODUÇÃO

A corrosão geralmente é problema para estruturas em aços carbono e pode ser severa quando a umidade e íons cloreto e/ou compostos de enxofre estão em concentrações suficientemente altas na atmosfera. Dentre as medidas para sua prevenção estão a aplicação de revestimentos metálicos e/ou esquemas de pintura. A utilização de aços carbono com resistência à corrosão atmosférica, em conformidade com as normas ASTM A588,⁽¹⁾ conhecidos como aços patináveis ou aclimáveis (*weathering steel*), por formarem camadas de óxidos resistentes à corrosão atmosférica que muitas vezes possibilitam o uso sem nenhuma proteção, e ASTM A606,⁽²⁾ é também uma forma de reduzir as taxas de corrosão e otimizar o desempenho nesse quesito.

Entretanto, mesmo esses aços estão sujeitos a corrosão intensa e, eventualmente, com desprendimento de camada de óxidos (corrosão anômala) quando expostos a ambientes marinhos de elevada concentração de íons cloreto. Nessa situação a proteção anticorrosiva é necessária e acarreta, além de custos iniciais de aplicação de pintura, outros decorrentes de manutenções periódicas da pintura. Deve-se considerar, ainda, que dificuldades de acesso podem inviabilizar a manutenção e até mesmo o emprego de aço em determinada estrutura.

Com relação à presença de íons cloreto na atmosfera, alguns países exigem a proteção de estruturas por pintura quando a taxa de deposição desses íons supera determinados valores, que variam em função de métodos de análise ou de sua origem.⁽³⁾ No Japão, onde o mar é a principal fonte de corrosão, a pintura deve ser feita quando a taxa de deposição, determinada pelo método de gaze seca,⁽⁴⁾ supera 5 mg Cl⁻/m².dia. Nos Estados Unidos, onde a principal procedência de íons cloreto é o sal utilizado no degelo de estradas e o método de análise é o de vela úmida,⁽⁵⁾ mais eficiente na coleta desses íons da atmosfera, a pintura é exigida quando a taxa de deposição é maior do que 50 mg Cl⁻/m².dia. Na Inglaterra, que também utiliza o método de vela úmida, mas a origem de íons cloreto é o mar, a pintura deve ser feita quando a taxa de deposição é superior a 10 mg Cl⁻/m².dia. No Brasil não há normas ou recomendações de quando se deve pintar determinada estrutura, sendo a pintura feita por análise subjetiva ou por motivos estéticos.

Assim, apesar dos aços apresentarem vantagens sobre o concreto, como menor peso, possibilidades de vãos livres maiores, melhores soluções arquitetônicas, rapidez de construção, menores perdas de material e canteiros de obra mais limpos, os custos relacionados à eventual pintura e aqueles decorrentes de sua manutenção ao longo da vida útil da edificação são fatores que contribuem para reduzir a competitividade do aço e inibir sua maior utilização, principalmente junto à orla marinha.

Com o propósito de agregar valor ao aço e ampliar sua participação no setor de construção civil, a Usiminas desenvolveu um aço carbono de alta resistência mecânica, doravante Ni-Si-Mo, para aplicação sem pintura em estruturas destinadas a ambientes onde a taxa de deposição de íons cloreto pode atingir valores da ordem de 100 mg/m².dia.⁽⁵⁾ Essas características foram obtidas por meio de adições de elementos químicos de liga Ni, Si e Mo ao aço carbono.

O objetivo deste trabalho é avaliar a resistência à corrosão atmosférica do aço Ni-Si-Mo, comparativamente aos aços SAE 1006 e USI-SAC 300, sendo esse último versão de melhor resistência à corrosão atmosférica do tradicional aço patinável USI-SAC 41. As taxas de corrosão foram determinadas ao longo de três anos em teste acelerado de corrosão atmosférica com aspersão intermitente de solução salina e de seis anos em teste não-acelerado de corrosão atmosférica marinha.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais e Preparação de Superfície

Além do novo aço estrutural Ni-Si-Mo, foram utilizados os aços USI-SAC 300 (SAC 300) e SAE 1006. O primeiro foi obtido a partir de chapa laminada a quente produzida em escala piloto, com espessura nominal final de 5,5 mm. Os dois últimos foram provenientes de bobinas industriais laminadas a quente, com espessuras nominais de 5,0 mm. Na Tabela 1 são apresentadas as composições químicas e, na Tabela 2, as propriedades mecânicas desses aços. A preparação da superfície para os testes de corrosão constou de jateamento com granalha de aço até ao padrão Sa 3 (metal branco) da norma SIS 05 5900.⁽⁶⁾

Tabela 1. Composição química típica de aços Ni-Si-Mo, SAC 300 e SAE 1006

Aço	Composição Química Típica (% p/p)								C _{eq} ^(a)	P _{CM} ^(b)
	C	Mn	P	Ni	Cu	Mo	Si	Cr		
Ni-Si-Mo	0,100	0,70	0,015	< 3,5	0,08	< 0,50	< 1,50	sem adição	0,40	0,23
SAC 300	0,048	0,24	0,032	0,014	0,090	sem adição	< 1,50	sem adição	0,10	0,10
SAE 1006	0,029	0,47	0,017	0,018	0,012	sem adição	0,20	0,025	0,12	0,06

OBS.: a) C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 (valores típicos); b) P_{CM} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + (Mo + V)/15 + 5B (valores típicos).

Tabela 2. Propriedades mecânicas de aços Ni-Si-Mo, SAC 300 e SAE 1006

Aço	Propriedades Mecânicas			
	LE (MPa)	LR (MPa)	Alongamento (%)	Dureza HV (2 kg)
Ni-Si-Mo ^(a)	505	746	21,2 (BM ^(c) = 80 mm)	241
SAC 300 ^(b)	≥ 300	≥ 402	≥ 19,0 (BM = 200 mm)	153
SAE 1006 ^(b)	≥ 250	400 a 500	≥ 18,0 (BM = 200 mm)	115

OBS.: a) tração: ASTM-A-370, *sub-size*; b) para os aços SAC 300 e SAE 1006 os valores são típicos; c) BM: base de medida.

2.2 Testes de Corrosão

2.2.1 Teste acelerado de corrosão com aspersão intermitente de solução salina

Neste teste, realizado de acordo com a norma ISO 11474,⁽⁷⁾ os corpos-de-prova ficam expostos ao intemperismo natural e recebem aspersão de solução salina, sendo uma combinação de testes acelerado e não-acelerado de corrosão atmosférica. No presente caso, foi utilizada solução a 3% p/v de NaCl, aspergida três vezes por semana.

A estação de corrosão escolhida para o teste foi a Miniestação de Corrosão Atmosférica Industrial da Usiminas⁽⁸⁾ (Figura 1a), que fica localizada dentro e no mesmo nível da planta industrial de Ipatinga (MG), cuja agressividade é considerada como sendo de baixa a média (C2 a C3), de acordo com a norma ISO 9223.⁽⁹⁾ Normalmente, a taxa de corrosão do ferro nessa Miniestação é em torno de 0,3 kg Fe/m².ano; porém, com aspersão de solução salina essa taxa aumenta para valores em torno de 4,6 kg Fe/m².ano, o que corresponde a uma agressividade muito alta (C5).

Os corpos-de-prova possuem dimensões 100 mm × 150 mm e espessuras de 5,5 mm (para o aço Ni-Si-Mo) e 5,0 mm (para os aços SAC 300 e SAE 1006). O período de exposição foi de 3 anos com avaliações após 1 ano, 1,5 ano, 2 anos e 3 anos.

2.2.2 Teste não-acelerado de corrosão com exposição em atmosfera marinha

Este teste é realizado de acordo com a norma NBR 6209⁽¹⁰⁾ e consiste na exposição de corpos-de-prova ao intemperismo natural em ambiente marinho, cujos agentes corrosivos característicos são sais à base de cloreto.

A estação utilizada foi a Estação de Corrosão Atmosférica Marinha da Usiminas,⁽⁸⁾ localizada na ilha de Cabo Frio, em Arraial do Cabo (RJ), a 48,7 m de altitude em relação ao nível do mar, Figura 1b. Essa estação, com corrosividade média de 0,6 kg Fe/m².ano e taxa de deposição de íons cloreto, determinada pelo método de vela úmida, de 102 mg Cl/m².ano, é classificada como de alta agressividade (C4), de acordo com a norma ISO 9223.⁽⁹⁾

As dimensões dos corpos-de-prova foram as mesmas daqueles utilizados no teste acelerado e o período de exposição foi de seis anos, com avaliações anuais.



Miniestação industrial, em Ipatinga-MG.



Estação marinha, Arraial do Cabo-RJ.

Figura 1. Estações de Corrosão Atmosférica do Centro de Tecnologia Usiminas, Ipatinga, MG.

2.2.3 Determinação de taxas de corrosão

As taxas de corrosão dos testes foram determinadas de acordo com a norma NBR 6210,⁽¹¹⁾ conforme a Equação 1:

$$T_{\text{corrosão}} = (k \cdot w) / (A \cdot t \cdot d) \quad (1)$$

onde: $T_{\text{corrosão}}$ = taxa de corrosão; k = constante (depende da unidade desejada para a taxa de corrosão); w = perda de massa; A = área do corpo-de-prova; t = tempo de exposição; d = massa específica do aço.

As perdas de espessura que os aços avaliados sofreriam, para o período de até 30 anos, foram estimadas utilizando metodologia desenvolvida por Pourbaix,⁽¹²⁾ que utilizou lei bilogarítmica para corrosão atmosférica para descrever a taxa de corrosão ou a perda de espessura de aços em base matemática, utilizando gráfico — \log_{10} (taxa ou penetração da corrosão, mm/ano ou mm) versus \log_{10} (tempo, anos). Embora nem todas as combinações entre ligas metálicas e atmosfera sigam essa lei, ela geralmente produz bons resultados para combinações envolvendo atmosferas marinha, rural e industrial e ligas metálicas como as de aços carbono, patinável, galvanizados e aluminizados. Em termos de penetração, essa lei pode ser expressa pelas Equações 2 ou 3:

$$P_{\text{corrosão}} = A.t^B \quad (2)$$

$$\log_{10}(P_{\text{corrosão}}) = A' + B.\log_{10}.t \quad (3)$$

onde $P_{\text{corrosão}}$ é a penetração da corrosão e t o tempo de exposição.

Em termos de taxa de corrosão tem-se:

$$P_{\text{corrosão}}/t = A.t^{(B-1)} \quad (4)$$

$$\log_{10}(T_{\text{corrosão}}) = A' + (B-1).\log_{10} t \quad (5)$$

sendo $T_{\text{corrosão}}$ a taxa de corrosão e t o tempo de exposição.

O parâmetro A corresponde à taxa ou à penetração da corrosão no primeiro ano de exposição e o parâmetro B reflete as características protetoras da camada de óxidos. Se $B = 0,5$, a penetração de corrosão segue uma lei parabólica, com o processo de corrosão sendo controlado pela difusão através de produtos de corrosão. Valores de B abaixo de $0,5$ indicam que a camada de óxido tem características protetoras e valores acima indicam que ela é pouco protetora, apresentando-se porosa e/ou com aderência deficiente. Com base em dados coletados em período mínimo de quatro anos é possível, utilizando a equação linear obtida a partir de correlação bilogarítmica, prever as taxas de corrosão em prazos de até trinta anos, desde que as condições de exposição não sejam alteradas significativamente com o tempo e a equação apresente boa correlação com os dados.⁽¹²⁾ Programas de avaliação da corrosividade, como o *ISO CORRAG*, utilizam esse modelo.⁽¹²⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Taxas de Corrosão

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios de taxas de corrosão dos aços estudados, obtidos em função do tempo em testes de campo com aspersão intermitente de solução salina e não-acelerado de corrosão atmosférica marinha.

Observa-se, após três anos de teste de campo com aspersão de solução salina, que a taxa de corrosão do aço Ni-Si-Mo é cerca de treze vezes menor que a do aço SAC 300 e de vinte e três vezes menor que a do aço SAE 1006. Os corpos-de-prova de aço SAC 300 já apresentavam comprometimento estrutural, pois a perda de massa média era equivalente a 49% de seu valor inicial. Nesse mesmo período, os corpos-de-prova do aço SAE 1006 já estavam destruídos, pois a perda de massa chegou a 88% da inicial. Ambos sofreram corrosão anômala, em que camadas de produtos de corrosão se deslocam em lamelas. Por outro lado, os corpos-de-prova de aço Ni-Si-Mo permaneceram estruturalmente íntegros, com perda de massa média de apenas 3,3% de seu valor inicial e sem incidência de corrosão anômala.

Ao final de seis anos de teste de exposição em atmosfera marinha, a taxa de corrosão do aço Ni-Si-Mo foi cerca de cinco vezes menor que a do aço SAC 300 e dezesseis vezes menor que a do aço SAE 1006. Os corpos-de-prova de aço SAC 300 apresentavam corrosão anômala principalmente na face inferior, voltada para o solo, e perda de massa média de 17,9% de seu valor inicial. Os de aço SAE 1006 ficaram destruídos, com corrosão anômala nas duas faces e perda média de massa equivalente a 56,3% do valor inicial. Por sua vez, os corpos-de-prova de aço Ni-Si-Mo apresentaram corrosão uniforme e perda de massa média de apenas 3%. Na Figura 2 são mostrados os aspectos representativos de corpos-de-prova após seis anos de teste de exposição em atmosfera marinha.

Como se percebe a partir dos resultados da Tabela 3, as taxas de corrosão variam com o tempo, uma vez que o crescimento da camada de óxidos de ferro funciona como barreira física que protege o substrato metálico. Entretanto, as características protetoras

Tabela 3. Taxas de corrosão em testes de corrosão com aspersão intermitente de solução salina e não-acelerado em atmosfera marinha

Aço	Aspersão				Atmosfera Marinha					
	Taxa de corrosão (mm/ano)				Taxa de corrosão (mm/ano)					
	1 ano	1,5 ano	2 anos	3 anos	1 ano	2 anos	3 anos	4 anos	5 anos	6 anos
Ni-Si-Mo	0,046	0,035	0,037	0,028	0,037	0,027	0,020	0,017	0,014	0,013
SAC 300	0,125	0,214	0,252	0,362	0,047	0,036	0,033	0,040	0,057	0,066
SAE 1006	0,425	0,547	0,583	0,637	0,055	0,118	0,159	0,184	0,216	0,208

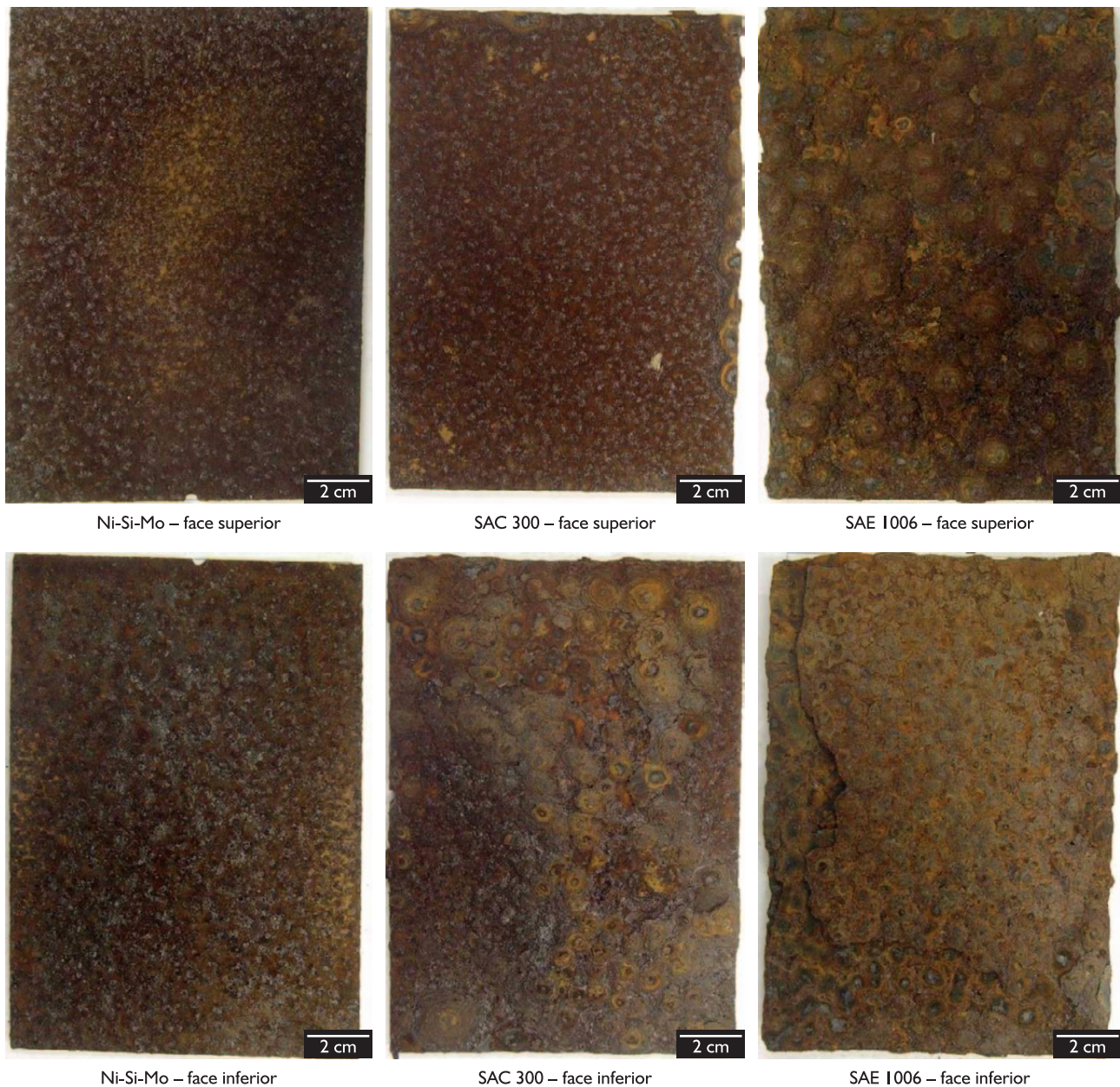


Figura 2. Aspectos representativos de corpos-de-prova após 6 anos de teste não-acelerado de corrosão em atmosfera marinha.

dessas camadas mudam com o ambiente de exposição e com os elementos químicos de liga presentes no aço. Em geral, as camadas de óxidos possuem trincas e alguma permeabilidade iônica ou eletrônica que afetam sua capacidade protetora. Com o tempo, essas camadas podem se destacar e, com isso, a taxa de corrosão do aço volta a aumentar até que o crescimento da camada de óxidos venha reduzi-la novamente e ocorra outro deslocamento, em um processo cíclico que provoca a destruição total do aço.

As taxas de corrosão dos testes de corrosão com aspersão intermitente de solução salina e não-acelerado em atmosfera marinha, com os correspondentes gráficos

bilogartimos, são mostrados na Figura 3. Nessa figura, a inclinação de cada reta bilogartímica corresponde ao valor de $(B - 1)$ para a combinação ambiente/aço em questão, o que permite obter o valor de B das Equações 2 e 4. Como o parâmetro A nas Equações 2 e 4 corresponde à taxa de corrosão do primeiro ano de exposição do aço, a equação para a perda de espessura, $P_{\text{corrosão}} = A.t^B$, de cada um dos aços fica determinada e podem-se estimar tais perdas para até 30 anos. As estimativas de perdas de espessura de cada aço a partir de resultados de testes de corrosão com aspersão intermitente de solução salina e não-acelerado de corrosão em atmosfera marinha são mostradas nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

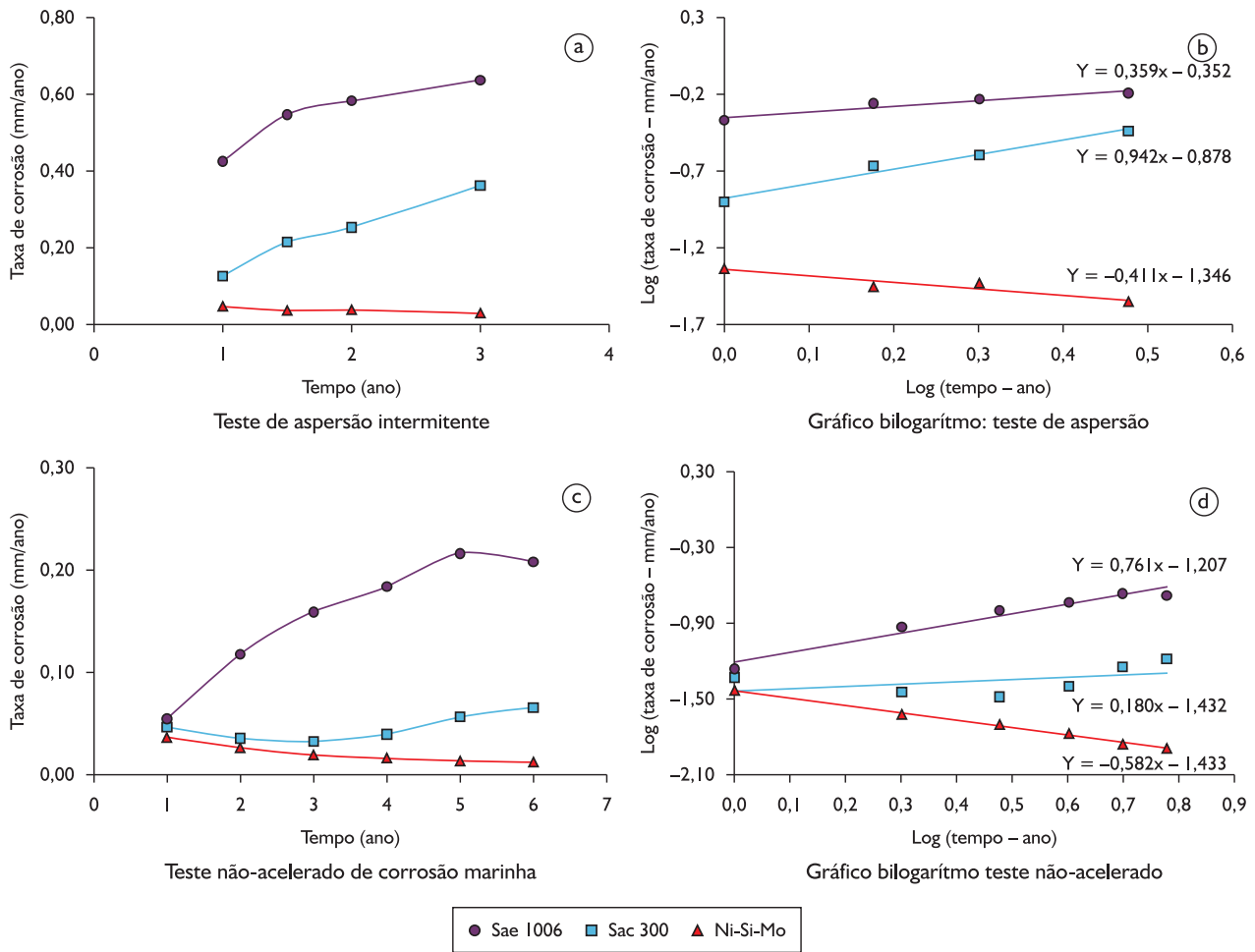


Figura 3. Taxas de corrosão de testes de corrosão com aspersão intermitente de solução salina e não-acelerado em atmosfera marinha e seus correspondentes gráficos bilogarítmicos.

Tabela 4. Estimativas de perdas de espessura ao longo do tempo ($P = At^B$) a partir de resultados de teste de corrosão com aspersão intermitente de solução salina

Aço	Parâmetros		Estimativa de Perda de Espessura (mm)				
	A	B	10 anos	15 anos	20 anos	25 anos	30 anos
Ni-Si-Mo	0,046	0,589	0,18	0,23	0,27	0,31	0,34
SAC 300	0,125	1,942	10,94	24,05	42,05	64,86	92,42
SAE 1006	0,425	1,359	9,72	16,85	24,91	37,73	43,22

Tabela 5. Estimativas de perdas de espessura ao longo do tempo ($P = At^B$) a partir de resultados de teste não-acelerado de corrosão em atmosfera marinha

Aço	Parâmetros		Estimativa de Perda de Espessura (mm)				
	A	B	10 anos	15 anos	20 anos	25 anos	30 anos
Ni-Si-Mo	0,037	0,4185	0,10	0,12	0,13	0,14	0,16
SAC 300	0,047	1,0478	0,55	0,84	1,13	1,43	1,73
SAE 1006	0,055	1,8404	3,81	8,03	13,64	20,57	28,76

Da Tabela 4 verifica-se que todos os valores do parâmetro B são maiores do que 0,5, significando que os aços não formaram camadas de óxidos com características protetoras quando submetidos a teste de corrosão com aspersão

intermitente de solução salina. Para o aço Ni-Si-Mo o valor de B é 0,589, muito abaixo dos valores de 1,942 e 1,359 dos aços SAC 300 e SAE 1006, respectivamente, e próximo da fronteira entre a característica protetora e não protetora.

Nas estimativas de perda de espessura após 30 anos, o aço Ni-Si-Mo perderia apenas 0,34 mm, contra 92,42 mm do aço SAC 300 e 43,22 mm do aço SAE 1006. No caso de aços SAC 300, a tendência de taxa de corrosão oscila, indicando que o mecanismo do processo corrosivo sofreria alterações ao longo do tempo e, provavelmente, não seguiria a lei prevista por Poubaix.⁽¹²⁾ Essa hipótese é reforçada pelo fato de que estimativas de maiores perdas de espessura para o aço SAC 300, comparadas às do aço SAE 1006, não são verificadas na prática. De qualquer maneira, os resultados mostram que em ambiente marinho estruturas construídas com estes dois aços exigem proteção por pintura anticorrosiva de alto desempenho.

Ainda em relação ao teste de campo com aspersão intermitente de solução salina, o aço Ni-Si-Mo não apresenta corrosão anômala nem comprometimento estrutural, o que torna a estimativa de perda de espessura mais confiável. Por outro lado, considerando que o parâmetro B é maior do que 0,50, pode ser conveniente em alguns casos proteger a estrutura com pintura anticorrosiva. Em particular, isto é recomendado em áreas críticas para desenvolvimento de processo corrosivo, como aquelas protegidas da ação de chuva e ou sujeitas ao acúmulo de pó e de outros resíduos ou, ainda, quando esse aço for empregado em ambientes de corrosividade muito elevada, como a do presente teste, com taxa de corrosão da ordem de 4,6 kg Fe/m².ano.

Dos resultados de teste não-acelerado de corrosão atmosférica marinha observa-se que o valor do parâmetro B para o aço Ni-Si-Mo é menor do que 0,5 e a perda de espessura estimada para 30 anos é muito menor do que

as dos aços SAC 300 e SAE 1006, conforme mostrado na tabela 5. Neste caso, também é possível que as oscilações na tendência da taxa de corrosão do aço SAC 300 tenham prejudicado as estimativas de perda de espessura deste material, como já mencionado.

4 CONCLUSÃO

O aço Ni-Si-Mo, desenvolvido em escala piloto, apresenta desempenho contra a corrosão em ambientes contendo íons cloretos muito superior aos de aços SAC 300 (patinável) e SAE 1006, com taxas de corrosão menores e ausência de corrosão anômala, além de melhores propriedades mecânicas. O melhor desempenho contra a corrosão possibilita eliminar a proteção por pintura na maioria das situações nas quais ela é necessária para aços patináveis tradicionais. Assim, são eliminados não só os custos diretos decorrentes de pintura inicial e de sua manutenção, como aqueles indiretos de eventuais paradas operacionais, além de possíveis problemas de acesso ou contaminações. A maior resistência mecânica permite reduzir a espessura de peças e, em consequência, o peso final de estruturas, tanto na parte metálica quanto na de alvenaria. Estas características fazem do aço Ni-Si-Mo um material adequado para aplicações em estruturas expostas a altas taxas de deposição de íons cloreto, como pontes junto à orla marítima ou sobre o mar, torres eólicas e componentes internos de navios e plataformas, como decks, escadarias e corrimões.

REFERÊNCIAS

- 1 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard ASTM A588/A588M*: Standard specification for high-strength low-alloy structural steel, up to 50 ksi [345 MPa] minimum yield point, with atmospheric corrosion resistance. West Conshohocken, 2005.
- 2 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard ASTM A606/A606M-09a*: Standard specification for steel, sheet and strip, high-strength, low-alloy, hot-rolled and cold-rolled, with improved atmospheric corrosion resistance. West Conshohocken, 2004.
- 3 KODAMA, T. Weathering steel in a coastal atmosphere. *Corrosion Engineering*, v. 48, p. 1-14, 2000.
- 4 JAPANESE INDUSTRIAL STANDARDS. *Standard JIS Z 2382*: Determination of pollution for evaluation of corrosivity of atmospheres. Tokyo, 2001.
- 5 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard ASTM Test G140*: Test method for determining atmospheric chloride deposition rate by wet candle method. West Conshohocken, 2002.
- 6 SWEDISH STANDARDS INSTITUTION. *Standard SIS 05 5900*: Pictorial surface preparation standards for painting steel surfaces. Stockholm, 1988.
- 7 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Standard ISO 11474*: Corrosion of metals and alloys: corrosion tests in artificial atmosphere: accelerated outdoor test by intermittent spraying of salt solution (scab test). Geneva, 1998.
- 8 DAMIÃO, D. P.; ALVARENGA, E. A. Pesquisa e desenvolvimento em corrosão e em engenharia de superfície na Usiminas: infraestrutura e resultados. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 64, 2009, Belo Horizonte [palestra].

- 9 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Standard ISO 9223: Corrosion of metals and alloys: corrosivity of atmospheres: classification*. Geneva, 1992.
- 10 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Norma NBR 6209: Materiais metálicos não-revestidos: ensaios não-acelerado de corrosão atmosférica: método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1986.
- 11 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Norma NBR 6210: Corrosão atmosférica: materiais metálicos: preparo, limpeza e determinação da taxa de corrosão de corpos-de-prova em ensaios de corrosão*. Rio de Janeiro, 2008.
- 12 POURBAIX, M. the linear bilogarithmic law for atmospheric corrosion. In: AILOR, W. H. (Ed.). *Atmospheric corrosion*. New York: John Wiley, 1982. p. 107-21.

Recebido em: 4/1/2011

Aprovado em: 11/3/2011