
Copyright 2018, ABRACO

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

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

Estudo da corrosão atmosférica dos aços patináveis, carbono e inoxidáveis expostos em site de uma termoeétrica no Ceará.

Úrsula C. Pereira^a, Valeria S. dos Santos^b, Sílvia B. F. de Souza^c, Priscilla F. de O. Ferreira^d, Darley da S. Lima^e, Egnalda P. S. Pimentá^f, Adriana de Oliveira S. Leite^g e Walney S. Araújo^h

Abstract

Weathering steel are alloys with anticorrosive properties, develop over time, a layer of compact and little porous oxide capable of reducing the degradation of the substrate. Still, the material is not free of atmospheric corrosion, being these, and complex and subject to the action of several factors and substances present in the middle. In trying to understand the action of atmospheric contaminants before the Weathering steel (USISAC 300 and 350), carbon steel (SAE 1020) and 304 stainless steel, corrosion research is being developed in order to characterize, classify and map the corrosiveness in thermoelectric in coast of Ceará, using a methodology based on the implantation of six stations of atmospheric corrosion (EC's). These materials have been analyzed on a monthly basis as to the loss of mass, additionally deposition rates of chloride ions (Cl⁻), particulates and SO₂ present in the atmosphere were determined. The values found are preliminary results to the classification of the corrosiveness of the studied atmosphere, however assist in understanding of the analysis of loss in mass of the materials studied, where it has been found that for carbon steel the environment is framed in C₅ (above 155 μm/year), stainless steel in C₂ (above 0.6 g/m²/year) and the Weathering steel USISAC 350 and USISAC 300 in C₂ with losses around 0.18 μm/year and 0.14 μm/year, respectively.

Keywords: Atmospheric corrosion; Weathering steel, Metallic Materials. Loss of mass

Resumo

Os aços patináveis são ligas com propriedades anticorrosivas por desenvolverem, ao longo do tempo, uma camada de óxido compacta e pouco porosa capaz de diminuir a degradação do substrato. Ainda assim, o material não está livre da corrosão, sendo estes, complexos e sujeitos à ação de condições e substâncias presentes no meio. Na tentativa de compreender a

^a pós graduanda, Engenheira Metalurgista - UFC

^b pós graduanda, Química – UFC

^c graduanda, Engenheiro Civil - UFC

^d graduanda, Engenheiro Química- UFC

^e pós graduando, Engenheiro Metalurgista - UFC

^f Especialista, Engenheira Química – Usiminas

^g Doutora, Química Industrial - UNIFOR

^h Doutor, Engenheiro Químico - UFC

ação dos contaminantes frente aos aços patináveis (USISAC 300 e 350), aço carbono (SAE 1010) e aço inoxidável 304, pesquisas de corrosão estão sendo feitas a fim de caracterizar, classificar e mapear a corrosividade em usina termelétrica localizada no litoral do Ceará, utilizando uma metodologia baseada na implantação de seis estações de corrosão atmosférica (EC's). Os referidos materiais foram analisados mensalmente quanto à perda de massa, adicionalmente taxas de deposição de íons cloreto (Cl^-), particulados e SO_2 presentes na atmosfera foram determinados. Os valores encontrados são resultados preliminares para a classificação da corrosividade da atmosfera estudada, entretanto auxiliam no entendimento das análises de perda de massa dos materiais estudados, onde foi constatado que para o aço carbono o ambiente está enquadrado em C5 ($145 \mu\text{m}/\text{Ano}$), aço inox em C2 ($0,32 \text{ g}/\text{m}^2/\text{ano}$), o aço patinável USISAC 350 e USISAC 300 em C2 com perdas em torno de $0,25 \mu\text{m}/\text{Ano}$ e $0,18 \mu\text{m}/\text{Ano}$, respectivamente.

Palavras-chave: Corrosão atmosférica; aços patináveis, materiais metálicos. Perda de massa.

Introdução

O município de São Gonçalo do Amarante, localizado no litoral oeste do Ceará, a 70 km da capital Fortaleza, é apontado como a região do futuro econômico para o Estado, o complexo industrial e portuário do Pecém (Cipp) vem abrigando algumas das maiores indústrias do Estado (1). É fato que o desenvolvimento econômico traz consigo modificações significativas às características naturais do lugar, associado a inúmeras transformações das condições atmosféricas que os parques industriais lançam a partir de seus processos, além das características litorâneas da região associam a estas condições contaminantes químicos potencialmente prejudiciais a resistência de materiais metálicos, muitos destes de elevado uso industrial e de baixa resistência à corrosão na maioria das atmosferas (2).

Os aços têm a tendência natural de oxidar na presença da umidade e do ar, assim como outros fatores: a presença de oxigênio e contaminantes atmosféricos na superfície metálica. Conforme o processo de corrosão progride, a camada de óxido forma uma barreira que dificulta a permeação de agentes corrosivos, diminuindo a taxa de corrosão do aço. Essa camada de óxido não é aderente à superfície dos aços estruturais comuns, e se destaca facilmente, assim o ciclo de corrosão inicia novamente, levando à contínua perda de massa metálica.

Para os aços patináveis, o processo de oxidação é iniciado do mesmo modo, mas elementos de liga específicos como Cu, Ni, Cr, Si e, eventualmente, P adicionados ao aço, acabam por produzir uma camada de óxido estável, aderente à superfície do metal, menos porosa do que a ferrugem comum chamada de pátina (3-4).

Os aços patináveis, são classificados como baixa liga, pois o teor de carbono é menor 0,20% em massa, apresentam maior resistência à corrosão atmosférica comparados aos aços estruturais comuns. A pátina se desenvolve sob condições de umedecimento e secagem alternadas, o que torna esses aços ideais para aplicações em ambientes externos, desta forma é fundamental a análise dos microclimas da referida região para entendimento do quanto resistente são estes materiais. Desta forma, o trabalho irá avaliar o desempenho de aços patináveis USI-SAC 350 e USI-SAC 300 com relação à resistência à corrosão atmosférica da

Termelétrica do Pecém-Ce, frente aos aços tradicionais aço carbono (SAE 1010) e aço inoxidável 304.

Metodologia

Foram utilizadas amostras de aço carbono SAE 1010, aço inoxidável 304 e aços patináveis USISAC 350 e USISAC 300 (Usiminas), a composição química dos materiais pode ser vista na Tabela 1. Os corpos de-prova apresentam dimensões 100 mm x 50 mm, segundo a recomendação da norma ASTM G92 :1986 (5). Após o corte, foi feito furo de 8mm de diâmetro próximo a uma das extremidades de cada corpo-de-prova com a finalidade de viabilizar a fixação no suporte de exposição. Após o preparo dos CPs estes foram codificados por meio de um orifício na superfície do metal, com braçadeiras poliméricas e anilhas de letras e números. Toda a metodologia utilizada no projeto de pesquisa está apresentada no fluxograma da Figura 1.

Tabela 1 – Composição química dos aços utilizados

Tipo	C	S	Al	Cu	Mn	P	Si	Cr
Aço Carbono SAE 1010	0,037	0,009	0,062	<0,005	0,27	0,020	0,011	<0,005
Aço inoxidável 306	0,048	-	0,005	0,096	1,00	0,021	0,409	17,3
Patinável SAC 300M	0,20	0,020	0,017	0,05-0,40	1,5	0,010-0,060	0,50-1,5	0,6
Patinável SAC 350	0,25	0,020	0,017	0,05-0,40	1,5	0,010- 0,060	0,50-1,5	0,6

Fonte: USIMINAS, 2017

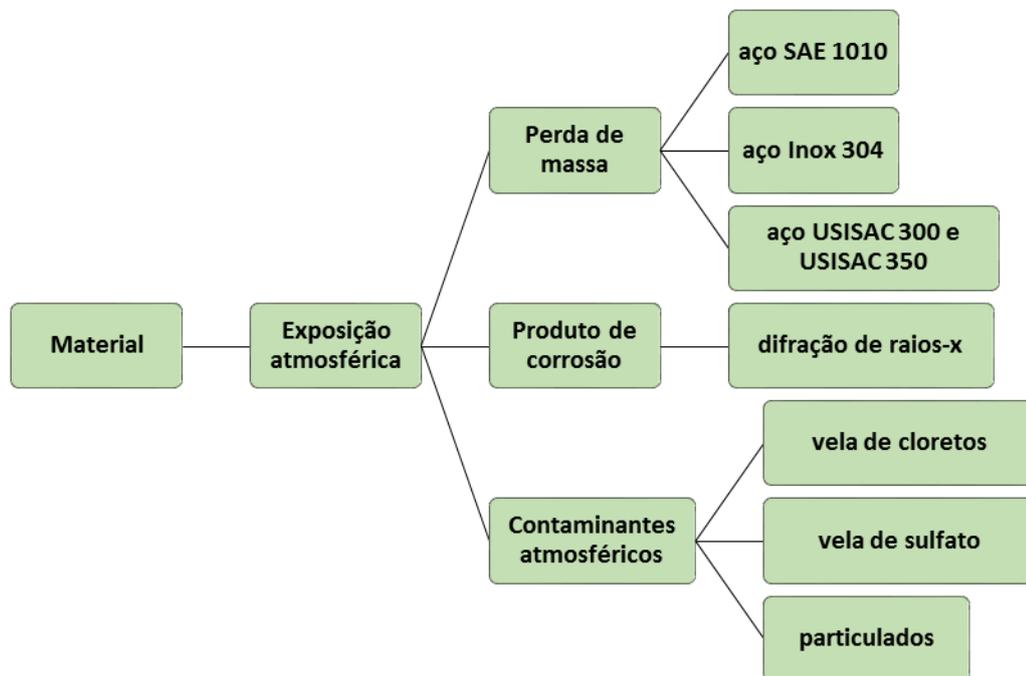


Figura 1 – Fluxograma de análise a ser seguida na pesquisa

Fonte: Própria autora, 2018.

1. Perda de massa

A metodologia adotada consiste em expor corpos-de-prova padrões em estações de corrosão atmosférica (EC), acompanhando a variação da perda de massa mensalmente. A preparação dos corpos de prova (CP) para exposição nas estações seguiu as especificações técnicas quanto às dimensões, materiais e quantidades. Os CPs foram devidamente cortados, desengraxados com solvente (acetona), submetidos à limpeza química, pesados e tiveram sua área determinada conforme a norma NBR 6210:2008 (6). Para a avaliação do comportamento do processo corrosivo, a perda de massa, medida em grama (g), foi convertida em perda de espessura e em taxa de corrosão, como recomenda a norma ASTM G 92-86.

Devido à perda de massa dos corpos-de-prova metálicos serem influenciada pela área exposta e pelo tempo de exposição, essas variáveis são combinadas e expressas numa fórmula que determina a taxa de corrosão conforme Equação 1.

$$\text{taxa de corrosão} = \frac{K \cdot M}{s \cdot t \cdot \rho} \quad 1$$

Onde:

(K) é uma constante que determina a unidade da taxa de corrosão (conforme Tabela 2);

(M) é a perda de massa em g, com aproximação de 1 mg;

(S) é a área do corpo de prova em cm², com aproximação de 0,01 cm²;

(t) é o tempo de exposição em horas e

(ρ) é a massa específica em g/cm³.

Tabela 2 - Valores para a constante k.

Unidade	Valor de K
Milímetros por ano (mm/ano)	8,76 x10 ⁴
Micrômetros por ano (μm/ano)	8,76 x10 ⁷
Gramas por metro quadrado por hora (g/m ² /h)	1,00 x10 ⁴ .ρ
Miligramas por decímetro quadrado por dia (mdd)	2,40 x10 ⁶ .ρ
Miligramas por decímetro quadrado por ano (mda)	8,76 x10 ⁸ .ρ

NOTA: para o cálculo de corrosão na última unidade não é necessário entrar com o valor da massa específica, uma vez que esta variável é cancelada na fórmula.

Fonte: Adaptada NBR 6210:2008.

2. Identificação dos produtos de corrosão

A identificação dos produtos de corrosão foi feita por difração de raios-X (DRX). Nesta técnica foi utilizado um difratômetro marca Panalytical modelo XPERT pro MPD, operando em 40kV x 40mA, equipado com um tubo de cobalto, utilizando radiação Cu Ka. A intensidade será medida em função de um ângulo de 2θ. Os difratogramas foram obtidos diretamente da superfície das amostras, no caso dos ensaios de campo, e do pó raspado da superfície, no caso do ensaio acelerado. A técnica de raios X permitirá examinar e determinar a forma básica dos cristais e suas distâncias interatômicas, conseqüentemente suas fases cristalinas presentes. A análise da camada de óxidos foi qualitativa (tipo de óxido) e semi quantitativa (quantidade relativa de cada fase presente). Esta análise foi realizada em óxidos raspados e triturados provenientes de amostras expostas por 240 dias nas estações de corrosão.

3. Contaminantes atmosféricos

A determinação dos contaminantes atmosféricos para a classificação da agressividade do meio, foram os listados a seguir:

- Sulfatos - As velas de dióxido de chumbo para a determinação de SO_2 segundo NBR 6921:2001 (7).
- Cloretos - A determinação de íons cloreto no ar atmosférico foi realizada seguindo as recomendações da NBR 6211:2001 (8).
- Particulados - A taxa de deposição de partículas totais em suspensão (PTS) no ar ambiente segundo NBR 9547:1997

Resultados e discussão

A formação da pátina e consequente resistência frente à corrosão atmosférica, leva em conta fatores, tais como: à composição química do próprio aço, principalmente os teores de cobre e fósforo. Outros fatores, tais como a geometria das peças que são atacadas de maneira distintas e ainda os fatores ambientais, como a presença de dióxido de enxofre e de cloreto na atmosfera, a temperatura, a direção e velocidade dos ventos e umidade. Desta forma os parâmetros atmosféricos serão apresentados a seguir como auxiliares a interpretação dos resultados da corrosão dos aços.

1. Teor de contaminantes atmosféricos no site avaliado

Na Figura 2 estão demonstrados os teores de cloretos para cada EC no período analisado, foi possível constatar que a EC 6 e EC1 obtiveram os maiores índices de cloretos, atingindo médias de $337 \text{ mg/m}^2.\text{dia}$ e $151 \text{ mg/m}^2.\text{dia}$, respectivamente. Todas as demais estações ficaram com as taxas de corrosão em média $57 \text{ mg/m}^2.\text{dia}$. Estes fatores levaram a categorização da contaminação de cloreto em B_2 para as estações 6 e 1, assim como B_1 para as demais estações.

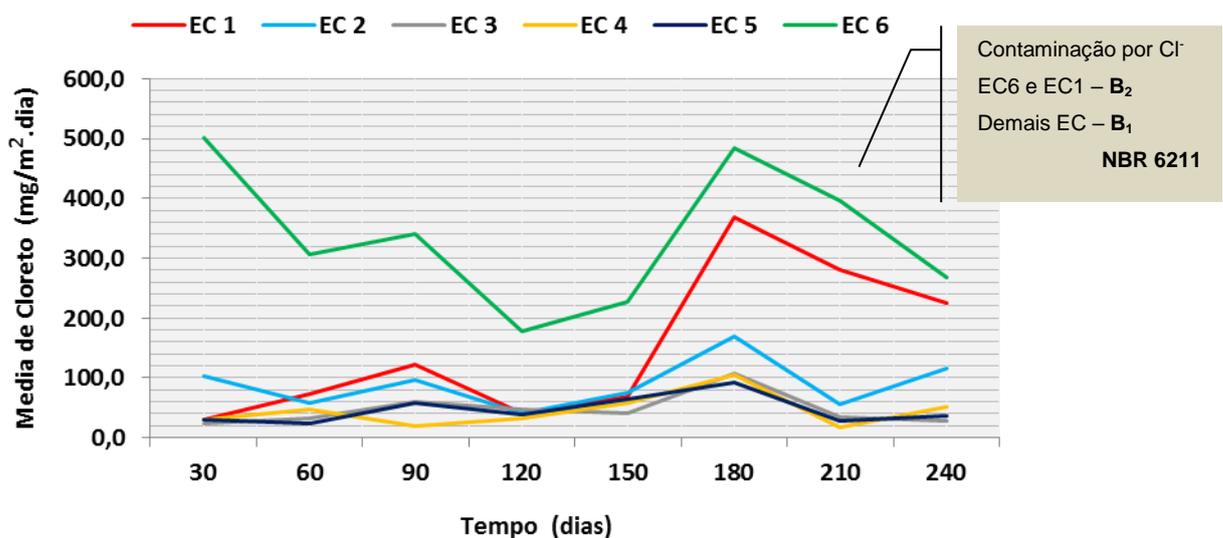


Figura 2 – Taxa de contaminação por cloreto nas estações de corrosão do site avaliado

Fonte: Própria autora, 2018.

A taxa de deposição de SO_2 está apresentada na Figura 3, onde foi possível verificar que o comportamento ao longo do período ensaiado foi bem variável. Entretanto as características atmosféricas para este contaminante nas EC 1 e EC 6 foram as maiores taxas, atingindo médias de $24 \text{ mg SO}_2/\text{m}^2.\text{dia}$ ($\cong 30 \text{ g/m}^3$).

O dióxido de enxofre favorece o desenvolvimento da pátina, enquanto o cloreto em suspensão na atmosfera prejudica as propriedades protetoras da camada formada sobre o substrato (10). Os aços patináveis podem ser recomendados para ambientes os quais a concentração de SO_2 atmosférico está abaixo de 250 mg/m^3 . Todavia em atmosfera com taxas de deposição de cloretos superiores a $300 \text{ mg/m}^2.\text{dia}$ como a EC 6 não poderiam ser recomendados e utilizados (11).

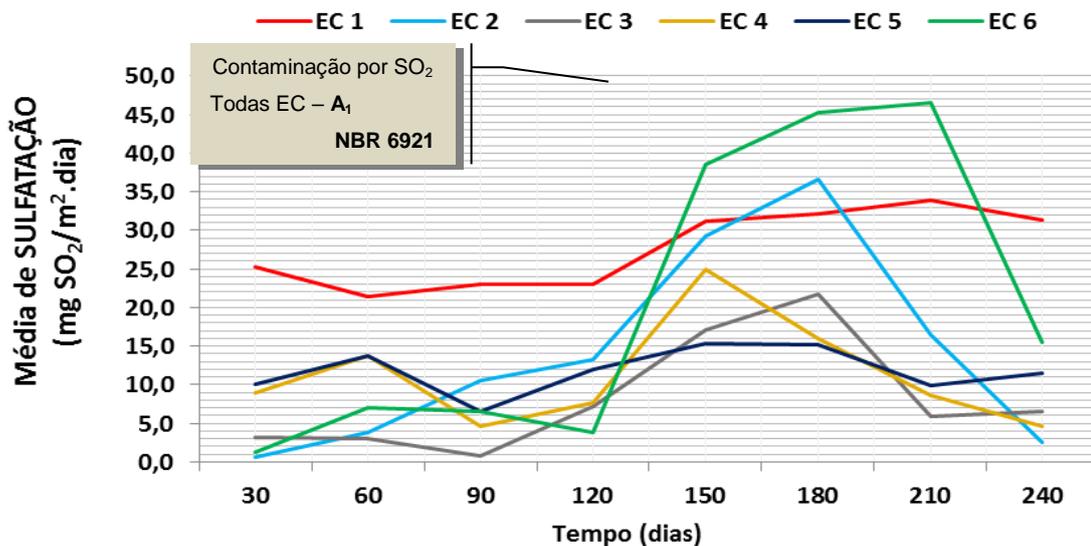


Figura 3 – Taxa de contaminação de SO_2 nas estações de corrosão do site avaliado

Fonte: Própria autora, 2018.

Outro fator importante é são os particulados que, sob a forma de poeira ou fuligem, são responsáveis por tornar a atmosfera mais corrosiva, assim como a deposição de partículas metálicas que podem agravar o processo corrosivo se sua natureza química for diferente do metal-base ou substrato, devido ao processo de corrosão galvânica. Analisando os resultados apresentados na Figura 4, foi observado que o site fabril da Termelétrica do Pecém apresenta locais de elevado teor de partículas, neste caso carvão, como as EC 2, EC 3 e EC 5 que ficam próximos às esteiras de carvão, o que prejudicou os resultados de alguns meses destas estações quanto ao teor particulados, pois ocorrem acúmulos de grandes quantidades de carvão nos reservatórios de grande volume.

Enquanto as estações EC 1, EC 4 e EC 6 resultaram áreas de baixa concentração de particulados, ficando em torno de $1,85 \text{ g/cm}^2$.

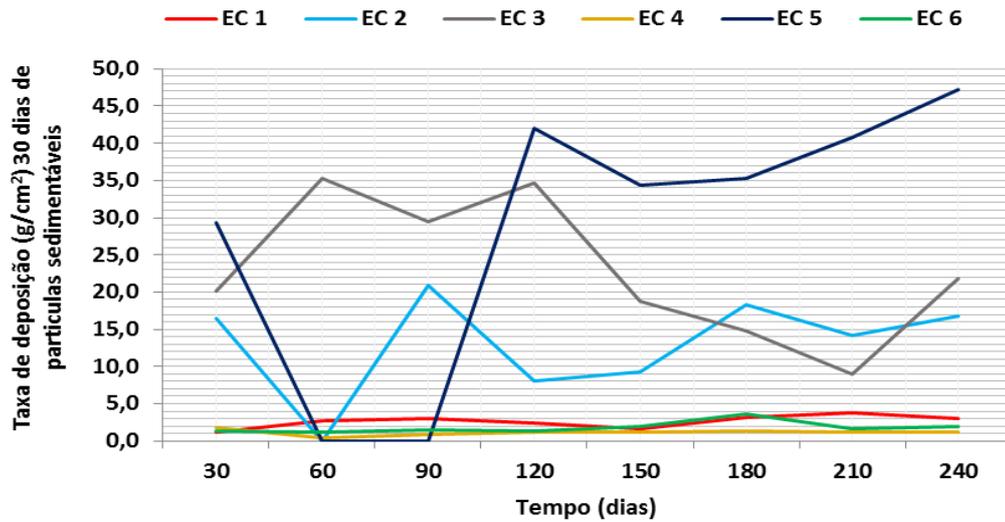


Figura 4 – Taxa de determinação de particulados sedimentáveis nas estações de corrosão
Fonte: Própria autora, 2018.

2. Perda de massa

Os corpos-de-prova de aço carbono foram os que sofreram maior deterioração por processos corrosivos, resultando em superfícies com acúmulo de produtos como carepas, o aço inox teve perda de brilho e formação pites sobre superfície. Analisando os aços patináveis foi observado a formação da patina já no 1º. mês de exposição, após 8 meses de ensaio o aspecto superficial dos corpos de prova configura um produto de corrosão bem aderente, diferentemente do aço carbono cujo produto é quebradiço. A Figura 5 apresentam o aspecto superficial dos corpos de prova.

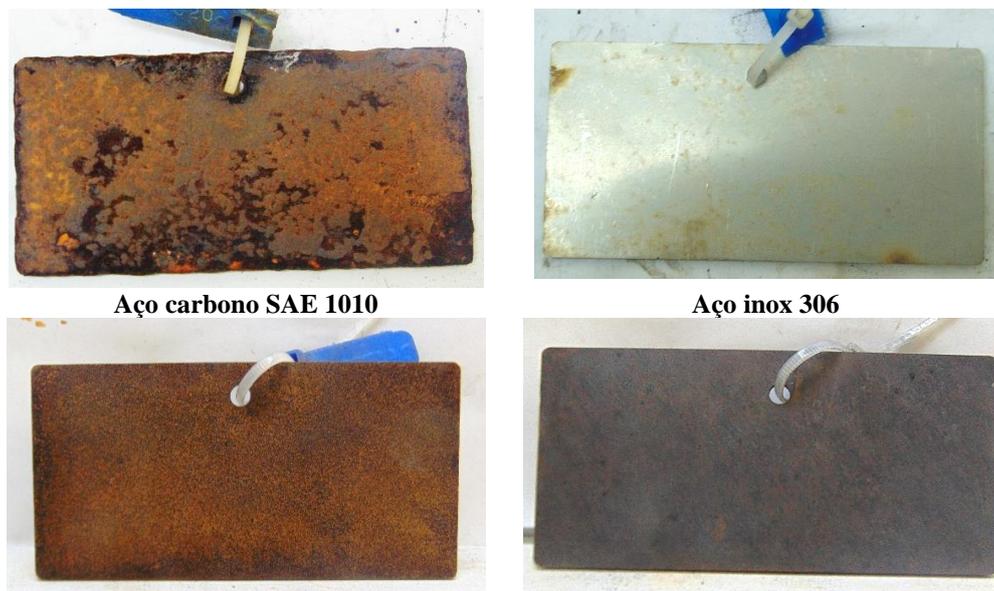


Figura 5 – Aspecto superficial dos corpos de prova após exposição atmosférica
Fonte: Próprio autor, 2018

A taxa de corrosão do aço carbono, ao contrário dos outros materiais avaliados, foi cerca de 102% maior que os aços patináveis USISAC 300 e USISAC 350 em todas as 6 estações avaliadas, atingindo o valor médio de perda de 144 $\mu\text{m}/\text{ano}$, esta taxa de corrosão classifica a corrosividade para o aço carbono em C₅ (80 a 200) $\mu\text{m}/\text{ano}$.

Os corpos-de-prova em aço inox 306 expostos às intempéries no ambiente fabril da pesquisa apresentaram estabilidade, com apenas alguns pontos de corrosão por pites, sua taxa de corrosão média ficou em torno de 0,32 $\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{ano}$, e sua a categoria de corrosividade ficou em C₁ (conforme índices observados para a velocidade de corrosão do aço carbono.)

Na condição de atmosfera industrial, onde os teores de SO₂ foram significativos, os três tipos de aços mostraram as maiores taxas de corrosão. Os aços patináveis USISAC 350 e USISAC 300 tiveram velocidades de corrosão média de 0,18 ($\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{ano}$) e 0,14 ($\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{ano}$), respectivamente, sendo estes superiores ao comportamento do aço inox 306 e aço carbono SAE 1010. Assim, os aços USISAC 300 e USISAC 350 apresentaram uma menor taxa de corrosão atmosférica frente aos contaminantes avaliados, em cerca de 55% e 43% quando comparado ao aço inox para todas as estações avaliadas. Nas estações da usina Termelétrica a classificação de corrosividade dos aços USISAC 300 e USISAC 350 foi C₁. Todas as taxas e classificações do grau de corrosividade estão dispostas na Tabela 3.

Tabela 3 – Critérios de corrosividade para o aço carbono nas estações da termelétrica.

Estação	Tempo de ensaio	Cl ⁻	SO ₂	Taxa de corrosão aço Carbono		Taxa de corrosão aço Inox 306		Taxa de corrosão aço patináveis		
				$\mu\text{m}/\text{ano}$	grau	$\mu\text{m}/\text{ano}$	grau	$\mu\text{m}/\text{ano}$ USISAC 350	$\mu\text{m}/\text{ano}$ USISAC 300	grau
EC 1	240	B ₂	A ₁	183,69	C ₅	0,343	C ₂	0,265	0,209	C ₁
EC 2	240	B ₂	A ₁	116,68	C ₅	0,422	C ₂	0,207	0,135	C ₁
EC 3	240	B ₂	A ₀	95,47	C ₅	0,334	C ₂	0,153	0,128	C ₁
EC 4	240	B ₂	A ₀	111,23	C ₅	0,220	C ₂	0,141	0,111	C ₁
EC 5	240	B ₂	A ₀	138,67	C ₅	0,278	C ₂	0,147	0,111	C ₁
EC 6	240	B ₃	A ₁	218,71	C _x	0,358	C ₂	0,194	0,188	C ₁

Fonte: Próprio autor, 2018

Estas ocorrências associadas às taxas de Cl⁻ e SO₂ podem levar a considerações de que os óxidos formados na presença dos íons contaminantes não foram, suficientemente, compactados e aderentes, ao ponto de para reduzir o avanço da corrosão nos referidos materiais, principalmente o aço carbono SAE 1010 (12 a 14).

Na atmosfera marinha, os teores mais elevados dos íons Cl⁻ comprometem a eficiência da camada protetora dos óxidos formados, inclusive para nos aços patináveis estudados. Os gráficos apresentados na Figura 6 mostram as perdas de massa por estação avaliada no período de 240 dias. Nesta análise foi possível constatar que a EC 6 apresentou-se mais agressiva para todos os materiais estudados.

Foi possível observar que a taxa de corrosão para os aços patináveis, ao longo do tempo de exposição, não apresentou significativas alterações de aumento da velocidade de corrosão nas estações de 1 a 5, sendo verificado uma leve alteração mensal na estação 6 (Figura 6). Este

comportamento é comum e pode ser creditada à barreira proporcionada pela camada de óxidos, que dificulta o contato entre o ferro do substrato metálico e o oxigênio, a umidade e os agentes corrosivos do ambiente.

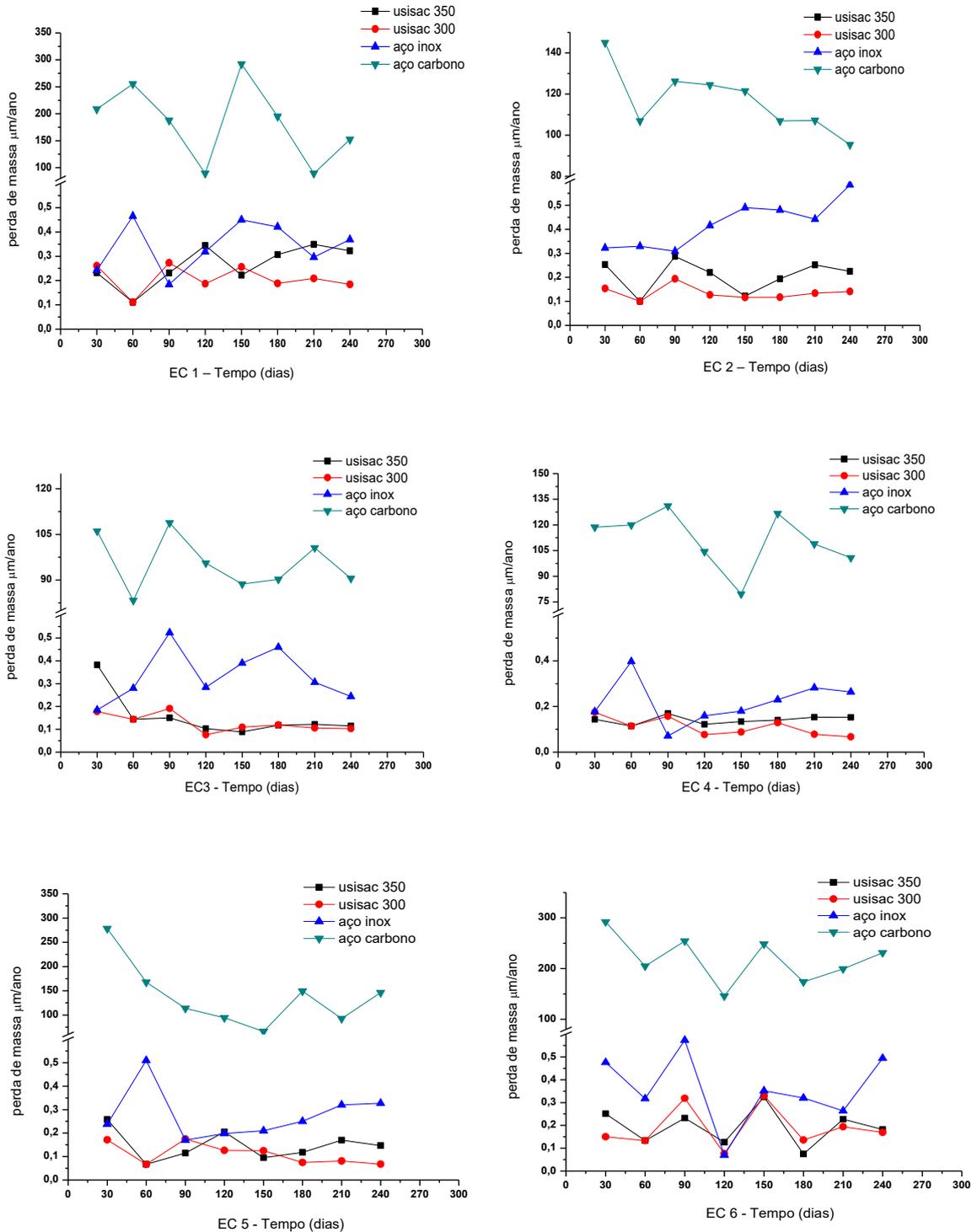


Figura 6 – Perda de Massa de materiais metálicos nas estações de corrosão

Fonte: Própria autora, 2018.

Os aços patináveis avaliados possuem resistência à corrosão superior quando comparado aos aços estruturais convencionais e seu uso apresenta como principais vantagens o aumento da vida útil dos componentes, melhor rigidez, resistência mecânica e uma ótima relação custo/benefício (15-16). Estas características permitem uma ausência de revestimento contra corrosão, sendo que a pátina pode levar em média de 2 a 3 anos para se formar, dependendo do ambiente e da exposição do aço. As características deste material podem ser fator de decisão, quando na escolha de materiais metálicos para futuras manutenções na usina Termelétrica.

3. Difração de raios-X

Os resultados obtidos por difratometria de raios-X, da camada de óxidos protetora dos aços USISAC 300 e USISAC 350, foram feitos em amostras expostas após 120 dias no site da Termelétrica, e estão apresentados na Tabela 4, onde nesta estão descritas as fases presentes assim como os percentuais de cada fase.

Tabela 4 - Resultados de análise qualitativa e semi quantitativa dos óxidos raspados de amostras com 240 meses de exposição.

Tipo	Fases	Teor
Aço Carbono SAE 1010	Fe ₃ O ₄ Magnetita g-FeOOH Lepidocrocita a-FeOOH Goetita	79,3% 5,3% 10,3%
Patinável USISAC 300	g-FeOOH Lepidocrocita a-FeOOH Goetita Fe ₃ O ₄ Magnetita α-Fe	51% a 47% 24% a 32% 20 % a 24% 1%
Patinável USISAC 350	g-FeOOH Lepidocrocita a-FeOOH Goetita Fe ₃ O ₄ Magnetita SiO ₂ – quartzo α-Fe	35% a 46% 27% a 32% 18% a 31% 4% 3%

Fonte: Própria autora, 2018.

Pode ser observado que os tipos de óxidos formados nos aços patináveis foram semelhantes, variando apenas as quantidades relativas entre eles. Esses resultados estão de acordo com a literatura que relata não haver diferenças entre os tipos de óxidos formados sobre aços carbono, sejam eles patináveis ou comuns, mas sim nas quantidades relativas e nos tamanhos dos cristais que compõem a camada interna de óxidos adjacente à interface dos substratos (17).

Os cristais de lepidocrocita (g-FeOOH) da camada externa de óxidos dos aços patináveis, bem como dos aços carbono comum, são também bem maiores que as goetita dos aços patináveis. Enquanto os aços patináveis apresentam uma camada interna de óxidos rica em goetita ultrafina e compacta, resistente à corrosão, os aços comuns apresentam uma mistura de partículas grosseiras de lepidocrocita e goetita contendo vazios e trincas que reduzem sua resistência contra a corrosão, pois possuem características cristalinas (17).

É relatado ainda que, os aços patináveis e aço carbono apresentam aproximadamente a mesma área superficial específica (m^2/g) para a camada de óxidos. O volume total e as dimensões dos microporos da camada de óxidos dos aços patináveis é cerca de metade do observado na camada de óxidos dos aços carbono comuns, o que contribui para aumentar a resistência contra a corrosão, uma vez que a difusão de água e agentes corrosivos através da camada de óxidos fica dificultada (18).

Conclusões

Em relação aos contaminantes atmosféricos foi constatado que a EC 6 e a EC1 obtiveram os maiores índices de cloretos (média de $337 \text{ mg}/\text{m}^2.\text{dia}$ e $151 \text{ mg}/\text{m}^2.\text{dia}$), respectivamente. O comportamento quanto ao SO_2 foi variável ao longo do período ensaiado, sendo que a EC 1 teve as maiores taxas, ficando em torno de $27 \text{ mg SO}_2/\text{m}^2.\text{dia}$, classificadas como A1 como atmosferas urbanas.

As estações EC1, EC4 e EC6 denotaram áreas de baixa concentração de particulados, ficando em torno de $1,85 \text{ g}/\text{cm}^2$, enquanto as EC2, EC3 e EC6 tiveram maiores concentrações de particulados pela contribuição do carvão, oriundo do processo.

Os aços USISAC-300 e USISAC-350 com baixo teor de cobre, na faixa de 0,08% a 0,12%, apresentaram desempenho similar nos testes propostos sendo superior desempenho de que o aço

Na avaliação por perda de massa, não houve diferença significativa na resistência a corrosão dos aços USISAC-300 e USISAC-350. Adicionalmente, estes materiais apresentaram de desempenho anticorrosivo superior ao aço inox e ao aço carbono em todas as 6 estações avaliadas.

No site da Termelétrica os aços inox e aços USISAC 300 e USISAC 350 apresentaram categoria da corrosividade C_2 e C_1 , respectivamente, enquanto os aços carbono C_5 .

Pode ser observado que os tipos de óxidos formados nos aços patináveis foram semelhantes, variando apenas as quantidades relativas entre eles. Sendo que os maiores teores evidenciados foram de Lepidocrocita e Goetita.

Referências bibliográficas

- (1) ARAÚJO, Rogério César Pereira de., et al. **Impactos socioeconômicos do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) sobre os pescadores artesanais, São Gonçalo do Amarante-CE**. Porto Alegre, 47º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, 26 a 30 de jul. 2009. Disponível em: <http://www.sober.org.br/palestra/13/260.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2018.
- (2) VISCONDI Gabriel de Freitas; et al. **Série Termoeletricidade em foco geração termoeletrica e emissões atmosféricas: poluentes e sistemas de controle**. IEMA - Instituto de Energia e Meio Ambiente. São Paulo, novembro de 2016. Disponível em <http://www.energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2016/11/IEMA-EMISSOES.pdf>

- (3) PANNONI, F. D. E.; et al. Investigação da corrosão de um aço-carbono e de um aço patinável submetidos a diferentes condições ambientais. In: **Anais do 48º Congresso Anual da ABM**, p.135-154, 1993.
- (4) CHIAVARI, C.; et al. Atmospheric of Cor-Ten steel with different surface finish: Accelerated ageing and metal release. **Materials Chemistry and Physics** 136, p. 477-486, 2012.
- (5) ASTM G92 - 86(2015) Standard Practice for Characterization of Atmospheric Test Sites.
- (6) ABNT NBR 6210:1987 - Preparo, Limpeza E Avaliação Da Taxa De Corrosão De Corpos-de-prova em ensaios de corrosão.
- (7) ABNT NBR 6921 - Corrosão atmosférica - Taxa de Sulfatação - Determinação pelo método da vela de dióxido de chumbo.
- (8) ABNT NBR 6211 Corrosão atmosférica - Determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida.
- (9) ABNT NBR 9547 (1997) - Material particulado em suspensão no ar ambiente - Determinação da concentração total pelo método do amostrador de grande volume.
- (10) PANNONI, F. D. E.; **Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio**, 1ª Edição, Volume 2. 2002.
- (11) Corus Construction Centre. **Weathering Steel Bridges**. Publicação Corus (2001).
- (12) YAMASHITA, M. et al - Characterization of Rust Layers on Weathering Steel Exposed to the Atmosphere for 17 years. **CORROSION ENGINEERING** v. 50, pp 733-750, (2001).
- (13) Di Carloa G. et al., Artificial patina formation onto copper-based alloys: Chloride and sulphate induced corrosion processes, *Appl. Surf. Sci.* (2017), 1-8.
- (14) FARIA, Adão Vieira de. **Avaliação do desempenho frente à corrosão atmosférica dos aços usi-sac-41 e usi-sac-300 em atmosferas industrial e marinha**, 2007. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2007. Cap. 181.
- (15) ABNT NBR 14643: Corrosão atmosférica – classificação da corrosividade de atmosferas. Rio de Janeiro; 2001.
- (16) LEITE, Leandro Alberto Silva. **Estudo da corrosão de aços-carbono e patinável durante 39 meses de exposição em ambiente marinho-industrial**, 2007. 87 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.
- (17) YAMASHITA, M., MISAWA, T. – Long-Term Phase Change of Rust Layer on Weathering Steel with Respect to Cr-substituted Ultra-Fine Goethite. **CORROSION ENGINEERING**, vol. 49, pp. 159-163, (2000).
- (18) YAMASHITA, M., MIYUKI, H., MATSUDA, Y., NAGANO, H., MISAWA, T. – The long term growth of the protective rust layer formed on weathering steel by atmospheric corrosion during a quarter of a century. **CORROSION SCIENCE**, vol. 36, nº 2, pp.283-299, (1994).