

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DE AÇOS ESTRUTURAIS COM ALTO TEOR DE SILÍCIO*

*Daniela Barçante Perasoli¹
Raphael França Assumpção¹
Rogério Augusto Carneiro²
Dalila Chaves Sicupira³
Vanessa de Freitas Cunha Lins⁴*

Resumo

Grande parte da produção de aço do mundo pertence à classe dos aços HSLA (High Strength Low Alloy) e, como consequência da crescente variedade de aplicações desses materiais, novas gerações estão sendo desenvolvidas, dentre elas uma nova versão com alto teor de silício, que é o foco deste trabalho. Nesse sentido, o objetivo foi avaliar o comportamento de aços estruturais com alto teor de silício em comparação ao aço carbono manganês. Para isso, após 6 e 15 ciclos de ensaios cíclicos acelerados em atmosferas marinha e industrial, as amostras foram submetidas a testes de impedância eletroquímica em solução de Na_2SO_4 . De forma geral, o estudo mostrou que em atmosfera marinha a resistência da camada de óxido formada (Rrust) aumentou com o número de ciclos. Já em atmosfera industrial não foi observada mudança significativa no comportamento dos aços com o aumento do número de ciclos. Além disso, observou-se um aumento da resistência à corrosão (Rt) em atmosfera industrial para os aços 2,18Si-Cu-Cr e 1,13Si-Cu-Cr com o número de ciclos. Por fim, destaca-se que o aço com maior adição de silício teve um desempenho superior aos demais aços quando em atmosfera marinha.

Palavras-chave: Aços estruturais; Resistência à corrosão; Ensaio cíclicos; Espectroscopia de impedância eletroquímica.

EVALUATION OF CORROSION RESISTANCE OF HIGH SILICON STRUCTURAL STEELS

Abstract

Most of the world's steel production belongs to the HSLA (High Strength Low Alloy) steel class. As a result of the growing variety of applications of these materials, new generations of HSLA are being developed, among them a new high silicon content steel which is the focus of this work. In this way, the objective of the work was to evaluate the behavior of structural steels with high silicon content in comparison to manganese carbon steel. For this, after 6 and 15 weeks of accelerated cyclic tests in marine and industrial atmospheres, the samples were submitted to electrochemical impedance tests in Na_2SO_4 solution. In general, the study showed that in marine atmosphere the resistance of the formed oxide layer (Rrust) increased with the number of cycles. In the industrial atmosphere, no significant change was observed in the behavior of the steels with the increase in the number of cycles. In addition, an increase in the corrosion resistance (Rt) in industrial atmosphere was observed for 2,18Si-Cu-Cr and 1,13Si-Cu-Cr steels with the number of cycles. Finally, it should be noted that steel with a higher silicon addition performed better than others when in marine atmosphere.

Keywords: Weathering steel; Corrosion resistance; Cyclic tests; Electrochemical impedance spectroscopy.

* Contribuição técnica ao 18º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 04 de outubro de 2018, São Paulo, SP, Brasil.

- ¹ Engenharia Metalúrgica, Graduando, Estudante, Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil.
- ² Engenharia Química, MSc., Pesquisador Especialista Pleno da Gerência Geral de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas, Ipatinga, MG
- ³ Química, Doutora, Professora, Departamento de Química, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil
- ⁴ Engenharia Química, Doutora, Professora, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

[NG1] Comentário: Verificar se é engenheira ou engenharia, pois tem engenheiro químico.

[DP2] Comentário: Alterado para Engenharia Química o segundo perfil, mantendo o padrão.

1 INTRODUÇÃO

Entre os materiais de construção, o aço tem uma posição de destaque por combinar resistência mecânica, trabalhabilidade, disponibilidade e baixo custo em relação a outros metais e ligas metálicas que também possuem boa resistência mecânica. Neste sentido, é fácil compreender a importância e a extensão da aplicação dos aços em todos os campos da engenharia, como nas estruturas fixas (edifícios, pontes, etc.) ou móveis (indústria ferroviária, automobilística, naval, aeronáutica, etc.) [1]. Em algumas aplicações há a necessidade de uma relação resistência/peso mais satisfatória e, para essas, os aços indicados são os aços baixa liga, conhecidos também como “de alta resistência e baixa liga” [1].

Recentemente, foi desenvolvida uma nova versão de aços estruturais para aplicação em estruturas sujeitas à corrosão pelos íons cloreto, presentes em atmosferas marinhas. Essa nova versão contém silício em teor médio de 2,00%, contra 1,10% do aço tradicional, e é uma proposta de excelente desempenho contra a corrosão marinha. Com adições de elementos de liga, tais como Cu, Cr, Si e P, esses aços desenvolvem uma camada de óxido altamente protetora durante o contato com o meio, conferindo ótima resistência à corrosão atmosférica se comparado aos aços carbono comum. As principais vantagens da sua utilização são o aumento do tempo de vida útil dos componentes, melhoria da rigidez e resistência mecânica dos conjuntos montados, além da ótima relação custo/benefício obtida em projetos da construção civil e da indústria em geral.

Os aços patináveis são aços de baixo teor de carbono para uso estrutural. Conhecidos também como aços Cor-ten, eles se enquadram na classificação HSLA (High Strength Low Alloy) e possuem resistência mecânica superior aos aços carbono [2]. A alta resistência dos aços HSLA é resultado de fatores microestruturais, como refino de grão, endurecimento por precipitação e controle de forma de inclusões [3,4]. Quando em contato com a atmosfera, os aços patináveis desenvolvem em sua superfície uma camada protetora, denominada “pátina”. A proteção é formada a partir de camadas de óxidos, que atuam como barreira contra corrosão e possibilita sua utilização sem qualquer tipo de revestimento em maior variedade de atmosferas, quando comparado aos aços carbono manganês [5]. Esta propriedade está intimamente relacionada com a adição de certos elementos de liga como cobre, cromo, níquel e silício, que ajudam a produzir uma camada de óxidos menos porosa e mais aderente, impedindo o acesso adicional de oxigênio e umidade à superfície do metal. Além da presença de alguns elementos de liga, a natureza química das condições ambientais e o tempo de exposição exercem forte influência na formação da camada protetora de ferrugem, que leva em média de 2 a 3 anos para se formar no material [5,6,7].

Em relação ao mecanismo de corrosão e conseqüente formação da pátina, PANNONI [8] considera a existência de uma etapa introdutória onde os primeiros compostos óxidos são formados, sendo eles: as lepidocrocitas (γ -FeOOH) em maiores frações e goetitas (α -FeOOH), akaganeitas (β -FeOOH) e magnetitas (Fe_3O_4) em menores teores. Posteriormente, sob influência dos elementos de liga e das condições ambientais, observa-se a formação de uma nova fase, amorfa (na realidade, com cristais menores do que 15 nm), na interface metal/ferrugem. É justamente essa camada que limita o contato entre os agentes de corrosão e a superfície metálica, reduzindo drasticamente a velocidade com que a corrosão se processa.

[NG3] Comentário: Baixo custo se comparado a (Pois baixo custo pode ser para uns e para outros não), por isso é interessante fazer uma comparação com outro material

[DP4] Comentário: Corrigido.

[NG5] Comentário: Idem comentário anterior.

[DP6] Comentário: Corrigido.

Um dos desafios no âmbito da pesquisa em corrosão é a capacidade de prever o tempo de vida de metais e componentes a partir de dados de corrosão experimental de curto prazo. Desse modo, os testes cíclicos de corrosão, realizados em laboratório, são de extrema importância para este estudo, de modo a se poder estimar, em prazo relativamente curto, o desempenho contra a corrosão atmosférica dessa nova versão de aços baixa liga, comparando-a a outras versões já estudadas. Na literatura existem poucos trabalhos que exploram os aços baixa liga. A maior parte das pesquisas realizadas com esses aços são conduzidas pelas indústrias, sendo poucos os trabalhos acadêmicos relacionados ao tema. Neste contexto, este trabalho pretende contribuir para o estudo do mecanismo de corrosão de aços alta resistência baixa liga através da utilização de testes cíclicos e da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica,

2 DESENVOLVIMENTO

Os materiais do estudo foram fornecidos pela empresa Usiminas e as composições químicas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química dos aços utilizados.

Aço	Composição química (% em massa)									
	C	Mn	S	P	Si	Ni	Mo	Cu	Cr	Al
2,18Si-Cu-Cr	0,057	0,50	0,0013	0,025	2,18	0,010	-	0,10	0,19	0,033
1,13Si-Cu-Cr	0,092	0,41	0,0063	0,037	1,13	0,012	-	0,11	0,22	0,020
Aço Carbono	0,160	0,58	0,0087	0,020	0,01	0,010	-	0,01	0,01	0,298
1,13Si-1,71Ni-0,25Mo-Cu	0,07	1,10	0,0030	0,0033	1,13	1,710	0,25	0,08	0,02	0,038

[NG7] Comentário: Verifica na formatação e instrução do artigo a diferença entre quadro (apresentado) e tabela.

[DP8] Comentário: Alterado.

As amostras utilizadas foram preparadas nas dimensões de 5x7,5 cm. A descrição dos testes cíclicos acelerados simulando atmosferas marinha e industrial são apresentados a seguir.

2.1 Testes cíclicos acelerados simulando a atmosfera marinha (7 dias cada ciclo)

Dia 1: 24h névoa salina 0,5% em massa NaCl a 35°C ± 2°C.

Dias 2 e 3: 12h de estágio seco (umidade relativa < 35%) a 45°C ± 3°C, seguido de 12h de estágio úmido (umidade relativa > 95%) a 35°C ± 2°C.

Dias 4 a 7: 8h de estágio seco (umidade relativa < 35%) a 45°C ± 3°C, seguido de 4h névoa salina 0,5% em massa de NaCl a 35°C ± 2°C, 4h de estágio úmido (umidade relativa > 95%) a 35°C ± 2°C e 8h de estágio seco (umidade relativa < 35%) a 45°C ± 3°C.

2.2 Testes cíclicos acelerados simulando a atmosfera industrial (7 dias cada ciclo)

Dia 1: 24h névoa de solução 0,02 mol/L de Na_2SO_4 a $35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

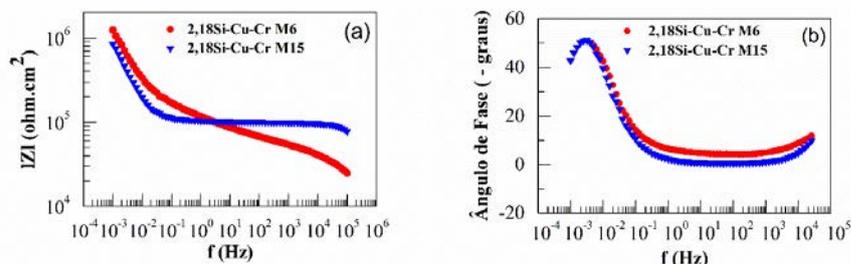
Dias 2 e 3: 12h de estágio seco (umidade relativa < 35%) a $45^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$, seguido de 12h de estágio úmido (umidade relativa > 95%) a $35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Dias 4 a 7: 8h de estágio seco (umidade relativa < 35%) a $45^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$, seguido de 4h de névoa de solução 0,02 mol/L de Na_2SO_4 a $35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, 4h de estágio úmido (umidade relativa > 95%) a $35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ e 8h de estágio seco (umidade relativa < 35%) a $45^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$.

2.3. Testes eletroquímicos

Após os testes cíclicos, as amostras foram preparadas para a realização das medidas de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) removendo os produtos de corrosão não aderentes. O contato elétrico foi estabelecido utilizando fios de cobre entrelaçados nas amostras. Os experimentos foram feitos utilizando um potenciostato PGSTAT302N, acoplado a um analisador de resposta de frequência FRA32M da marca AUTOLAB. Para as medidas de EIE usou-se uma solução 0,1M de Na_2SO_4 e uma célula de dois eletrodos, o eletrodo de trabalho (a amostra) e o eletrodo de platina como contra eletrodo. A amplitude de perturbação no potencial foi de 10 mV e 10 pontos por década de frequência no intervalo de 20 kHz a 0,3 mHz. De acordo com NISHIMURA *et al.* [9] como a técnica exige 5 h para obter todos os resultados até 0,3 mHz, a camada aderente de produto de corrosão sofreria mudanças durante a medição em uma solução de NaCl, o que não ocorre em uma solução Na_2SO_4 . Por esta razão, é tecnicamente necessário usar uma solução Na_2SO_4 para manter a condição da ferrugem nas medidas EIE. As medidas foram iniciadas após 1 h de imersão para estabilização do potencial de circuito aberto (OCP). Os testes foram realizados em triplicata, conforme Norma ASTM G 106.

Os dados de impedância eletroquímica fornecem informações relacionadas ao processo eletroquímico que ocorre no sistema em estudo. As figuras a seguir mostram os resultados das medidas de EIE após testes cíclicos de corrosão. É possível reconhecer o componente de resistência em altas frequências > 10^3 Hz (R_{rust}), capacitância na região de 1 mHz a 10^3 Hz e o componente de resistência a baixas frequências < 1mHz (R_t). A Figura 1 é referente ao comportamento eletroquímico do aço 2,18Si-Cu-Cr para 6 e 15 ciclos, sendo este o de maior teor de silício quando comparado aos demais aços estudados neste trabalho.



[NG9] Comentário: O que significa o M de 0,02M (é ml?)

[DP10] Comentário: Molar. Corrigido.

[NG11] Comentário: O que significa essas iniciais, pode se colocar o nome antes e depois utilizar a sigla - sugestão

[DP12] Comentário: Corrigido.

Figura 1. Diagrama de Bode (a) módulo de impedância e (b) ângulo de fase para o aço 2,18Si-Cu-Cr para 6 e 15 ciclos em atmosfera marinha (M: Marinho).

Observa-se pela Figura 1a que em altas frequências a resistência da camada de óxido aumentou com o número de ciclos. Por outro lado, em baixas frequências visualiza-se um maior valor de impedância para um menor número de ciclos. Pelo diagrama de Bode (Figura 1b) nota-se uma diminuição do ângulo de fase, sendo que o mesmo se aproxima de 0° em frequências intermediárias, caracterizando um comportamento resistivo [10]. O ângulo de fase atingiu valor máximo em baixas frequências seguido de uma diminuição da componente capacitiva, e de acordo com AFONSO [11] mostra que o sistema está em transição entre o estado passivo e ativo.

Segundo NISHIMURA *et al.* [9] pode-se relacionar R_{rust} com a resistência do óxido. No entanto, considera-se que R_{rust} realmente mostra a resistência da solução nos finos poros da camada de óxido devido aos elevados valores encontrados. Por outro lado, observando a Figura 1b, o ângulo de fase retornou a 0° quando $f < 1$ mHz, mostrando o componente de resistência a baixas frequências (R_t) e este foi considerado a resistência à reação de corrosão. O valor de Z a 0,3 mHz foi considerado como R_t .

A Figura 2 mostra os diagramas de Bode do aço 1,13Si-Cu-Cr, sendo observado um comportamento análogo ao descrito para o aço 2,18Si-Cu-Cr dessa forma R_t e R_{rust} foi encontrado utilizando o mesmo raciocínio sugerido.

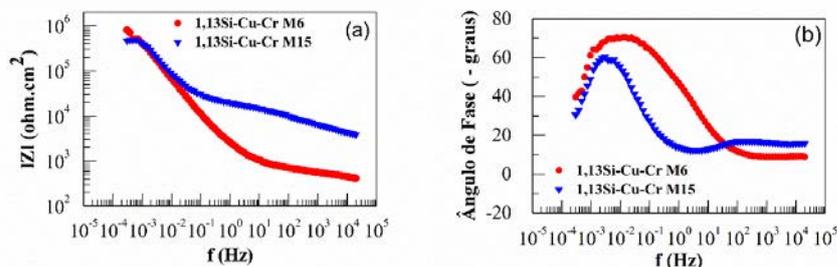


Figura 2. Diagrama de Bode (a) módulo de impedância e (b) ângulo de fase para o aço 1,13Si-Cu-Cr para 6 e 15 ciclos em atmosfera marinha (M: Marinho).

Como observado na Figura 2b identifica-se primeiramente um comportamento resistivo em altas frequências. Com subsequente diminuição da frequência tem-se um aumento do ângulo de fase até se atingir o valor máximo, no qual se observa um comportamento mais capacitivo para um menor número de ciclos, sendo este observado em um maior intervalo de frequência.

O aço carbono (Figura 3) mostrou um comportamento semelhante em baixas frequências e contrário em altas frequências, onde o R_{rust} foi menor para um maior número de ciclos. Este fato pode ser associado a uma possível estrutura de poros grosseiros em comparação aos poros existentes na estrutura da camada passiva desenvolvida no aço exposto em atmosfera marinha por 6 ciclos ou até mesmo a uma instabilidade do óxido que foi formado.

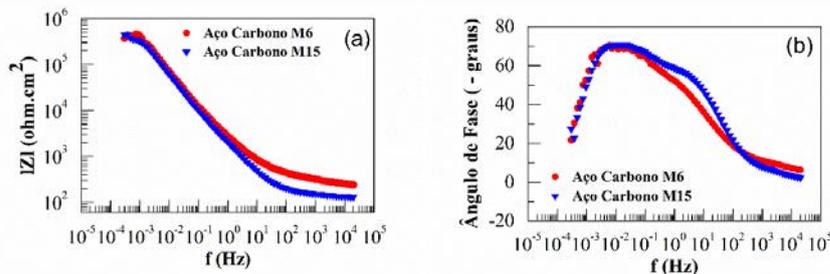


Figura 3. Diagrama de Bode (a) módulo de impedância e (b) ângulo de fase para o aço carbono exposto em atmosfera marinha por 6 e 15 ciclos (M: Marinho).

Como pode ser observado, a Figura 3 apresenta duas constantes de tempo (dois máximos no ângulo de fase na região de frequência média), sugerindo a existência de dois filmes, um interno com resistência maior e outro externo menos resistente, ou poroso.

A Figura 4 refere-se ao aço 1,13Si-1,71Ni-0,25Mo-Cu sendo possível visualizar o maior decaimento das componentes de resistência, tanto em baixas frequências para um maior número de ciclos como em altas frequências para um menor número de ciclos. Nota-se também, da Figura 4b, uma diferença significativa entre os ângulos de fase em relação aos ciclos, mostrando um comportamento mais capacitivo em baixas frequências para o material exposto em atmosfera marinha por 6 ciclos.

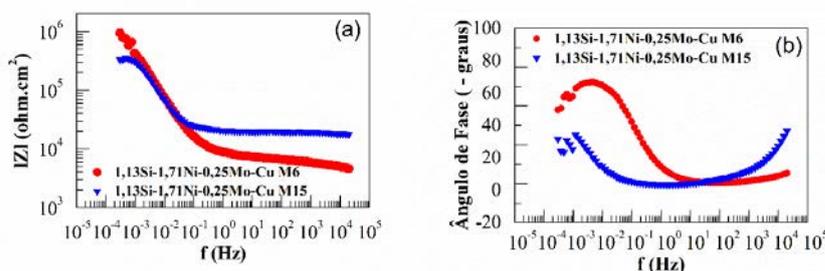


Figura 4. Diagrama de Bode (a) módulo de impedância e (b) ângulo de fase para o aço 1,13Si-1,71Ni-0,25Mo-Cu para 6 e 15 ciclos em atmosfera marinha (M: Marinho).

A técnica de impedância eletroquímica também foi utilizada para caracterizar o comportamento dos aços discutidos acima após testes cíclicos de corrosão realizados em atmosfera industrial. É possível observar (Figuras 5 a 8) que o número de ciclos não afetou significativamente o comportamento dos aços em altas frequências, ou seja Rust manteve-se praticamente constante (variando entre $110\Omega\cdot\text{cm}^2$ e $140\Omega\cdot\text{cm}^2$). De maneira contrária, **em baixas frequências o valor de R_t medido variou.**

Além disso, a partir dos diagramas de Bode nota-se para os aços estudados (Figuras 5b, 6b, 7b e 8b) um comportamento resistivo em altas frequências. Com a diminuição da frequência é observado o aumento do ângulo de fase e a presença de duas constantes de tempo sendo o ângulo máximo em torno de 70° . O ângulo de fase retornou a 0° quando $f < 1\text{ mHz}$ validando a escolha da frequência sugerida por Nishimura *et. al* [9] para determinar o valor de R_t .

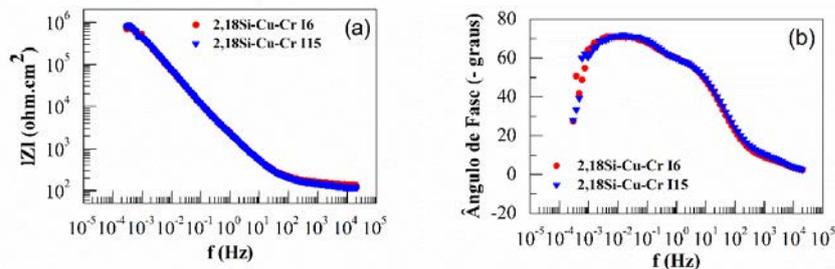


Figura 5. Diagrama de Bode (a) módulo de impedância e (b) ângulo de fase para o aço 2,18Si-Cu-Cr para 6 e 15 ciclos em atmosfera industrial (I: Industrial).

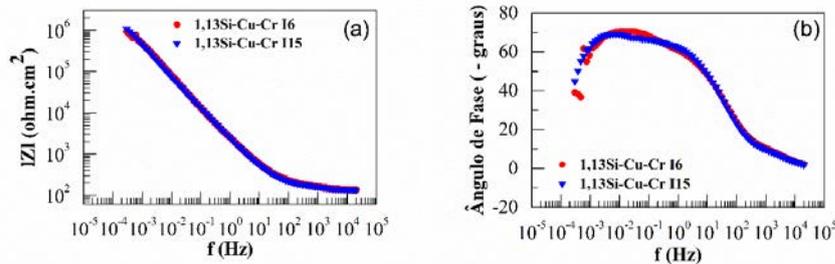


Figura 6. Diagrama de Bode (a) módulo de impedância e (b) ângulo de fase para o aço 1,13Si-Cu-Cr para 6 e 15 ciclos em atmosfera industrial (I: Industrial).

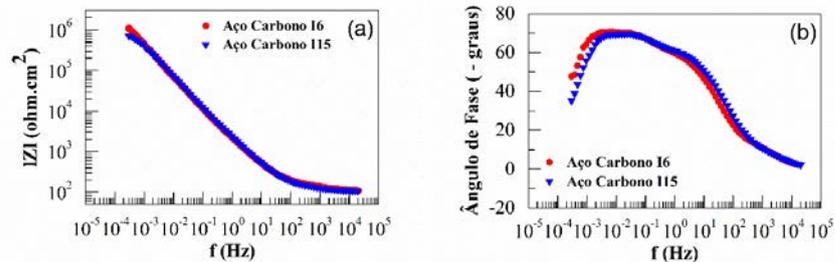


Figura 7. Diagrama de Bode (a) módulo de impedância e (b) ângulo de fase para o aço carbono para 6 e 15 ciclos em atmosfera industrial (I: Industrial).

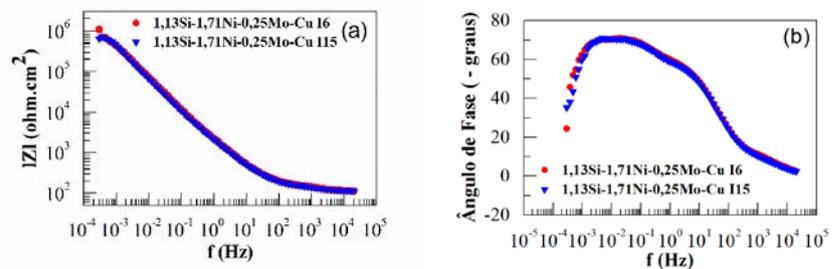


Figura 8. Diagrama de Bode (a) módulo de impedância e (b) ângulo de fase para o aço 1,13Si-1,71Ni-0,25Mo-Cu para 6 e 15 ciclos em atmosfera industrial (I: Industrial).

Os parâmetros de impedância R_{rust} e R_t em função dos ciclos de corrosão em atmosferas marinha e industrial são mostrados na Figura 9. Para os aços 2,18Si-Cu-Cr observa-se um aumento de R_t em atmosfera industrial e diminuição em atmosfera marinha. Já para o aço carbono tem-se um aumento de R_t em atmosfera marinha e diminuição em atmosfera industrial. Por fim, para o 1,13Si-1,71Ni-0,25Mo-Cu R_t diminuiu tanto em atmosfera marinha como industrial. De acordo com Nishimura *et. al.* [9] o aumento de R_t pode ser atribuído a duas razões: (1) proteção física pela criação de óxidos de Si e Al em nano-escala em microdefeitos e (2) prevenção química da passagem de íons Cl^- pela alteração da permeabilidade seletiva resultante da formação de óxidos complexos contendo Si e Al.

Além disso, observam-se valores menores de R_{rust} (independentemente do número de ciclos) para o aço carbono, o que mostra que a camada óxido desenvolvida nos outros aços possui uma estrutura de poros mais refinada. Ainda para estes aços, o aumento do número de ciclos em atmosfera marinha levou a um aumento de R_{rust} , o que não ocorreu para o aço carbono.

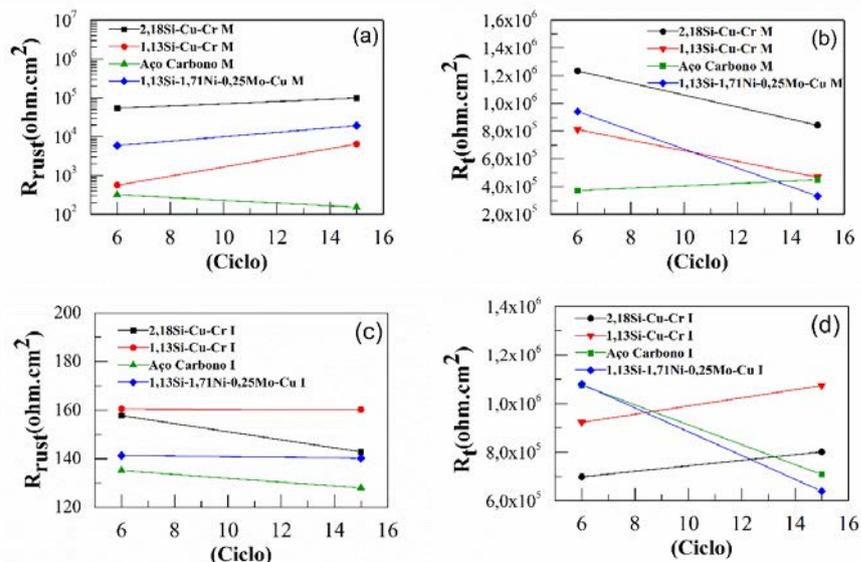


Figura 9. Parâmetros de impedância (R_{rust} e R_t) em função dos ciclos de corrosão: (a) e (b): atmosfera marinha, (c) e (d): atmosfera industrial (M: Marinho, I: Industrial).

A Tabela 2 apresenta os valores encontrados de Rrust e Rt para os aços estudados.

Tabela 2. Valores de Rrust e Rt para os aços estudados.

Aço	Atmosfera	Tempo (ciclos)	Rrust (ohm.cm ²)	Rt (ohm.cm ²)
2,18Si-Cu-Cr	Marinha	6	5,39E+04	1,23E+06
		15	9,92E+04	8,43E+05
	Industrial	6	1,58E+02	6,98E+05
		15	1,43E+02	8,00E+05
1,13Si-Cu-Cr	Marinha	6	5,62E+02	8,12E+05
		15	6,46E+03	4,67E+05
	Industrial	6	1,60E+02	9,22E+05
		15	1,60E+02	1,07E+06
Aço Carbono	Marinha	6	3,18E+02	3,72E+05
		15	1,53E+02	4,50E+05
	Industrial	6	1,35E+02	1,08E+06
		15	1,28E+02	7,08E+05
1,13Si-1,71Ni-0,25Mo-Cu	Marinha	6	5,90E+03	9,40E+05
		15	1,93E+04	3,32E+05
	Industrial	6	1,41E+02	1,08E+06
		15	1,40E+02	6,39E+05

3 CONCLUSÃO

- ✓ O estudo mostrou que Rrust aumentou com o número de ciclos para os aços 2,18Si-Cu-Cr, 1,13Si-Cu-Cr, 1,13Si-1,71Ni-0,25Mo-Cu em atmosfera marinha.
- ✓ Os aços expostos em atmosfera industrial apresentaram duas constantes de tempo sugerindo a existência de dois filmes, um interno com resistência maior e outro externo menos resistente, ou poroso. Contudo, os valores de Rrust não mostraram mudança significativa com o aumento do número de ciclos.
- ✓ Para os aços 2,18Si-Cu-Cr e 1,13Si-Cu-Cr, Rt aumentou com o número de ciclos em atmosfera industrial.
- ✓ Por fim, destaca-se que o aço com maior adição de silício teve um desempenho superior aos demais aços em atmosfera marinha e, em atmosfera industrial, o aço com melhor desempenho frente à corrosão foi o aço 1,13Si-Cu-Cr.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Usiminas pelo fornecimento do material e suporte ao estudo. Também agradecem ao CNPq e a PIP/UFOP pela concessão de bolsas de IC.

REFERÊNCIAS

- 1 CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos, 7ª ed., ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.
- 2 DUTRA, A. S.; BOFF, U.; MARQUES, A. S.; SCHAEFFER L. Estudo analisa o uso de aços estruturais resistentes à corrosão atmosférica. Corte & Conformação, 93, 86-93, 2013.

- 3 CHEN, M. Y.; GOUNÉ, M.; VERDIER, M.; BRÉCHET, Y.; YANG, J. R. Interphase precipitation in vanadium-alloyed steels: strengthening contribution and morphological variability with austenite to ferrite transformation. *Acta Mater*, 64, 78-92, 2014.
- 4 ALTUNA, M. A.; IZA-MENDIA, A.; GUTIÉRREZ, I. Precipitation of Nb in ferrite after austenite conditioning. Part II: strengthening contribution in high-strength low-alloy (HSLA) steels. *Metall. Trans. A*, 43, 4571-4586, 2012.
- 5 MORCILLO, M.; DIAZ, I.; CHICO, B.; et al. Weathering steels: From empirical development to scientific design. *Corrosion Sci.*, 83, 6-31, 2014.
- 6 MEJÍA GÓMEZ, J. A.; ANTONISSEN, J.; PALACIO, C. A.; DE GRAVE, E. Effects of Si as alloying element on corrosion resistance of weathering steel. *Corrosion Science*, 59, 198-203, 2012.
- 7 CHIAVARI, C.; BERNARDI, E.; MARTINI, C.; PASSARINI, F.; MOTORI, A.; BIGNOZZI, M. C. Atmospheric corrosion of Cor-Ten steel with different surface finish: Accelerated ageing and metal release. *Materials Chemistry and Physics*, 136, 477-486, 2012.
- 8 PANNONI, F. D. História, Comportamento e Usos dos Aços Patináveis na Engenharia Estrutural Brasileira. 59º Congresso Anual da ABM, 678-689, 2004.
- 9 NISHIMURA, T. Rust formation and corrosion performance of Si- and Al-bearing ultrafine grained weathering steel. *Corrosion Science*, 50, 1306-1312, 2008.
- 10 FAJARDO, S.; BASTIDAS, D. M.; CRIADO, M.; BASTIDAS, J. M. Electrochemical study on the corrosion behaviour of a new low-nickel stainless steel in carbonated alkaline solution in the presence of chlorides. *Electrochimica Acta*, 129, 160-170, 2014.
- 11 AFONSO, M. L. C. A. Caracterização do aço inoxidável austenítico UNS S31254 em meio de NaCl 0,11 mol L⁻¹ visando seu emprego em implantes ortopédicos. 2006. 142 p. Tese – Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo.