

Copyright 2010, ABRACO

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

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

Formulação de uma mistura de inibidores de corrosão para aço carbono ABNT 1010 em meio de ácido clorídrico 2,0 M.

Victor C. Moreira¹, Maria E. S. Taqueda², Isabel C. Guedes³

Abstract

Four substances with low toxicity rates were studied as corrosion inhibitors for the ABNT 1010 steel, in 2,0M hydrochloric acid media. Next, looking for a synergic effect between these substances it was prepared a mixture formulation using a factorial statistical project. The studied substances were: sodium molybdate, $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, sodium tungstate, Na_2WO_4 , copper phtalocyanine, Ft-Cu, and cerium chloride, CeCl_3 . The techniques used were: corrosion potential measurement, electrochemical impedance spectroscopy and polarization curves. The results obtained to the substances studied individually were: -18%; 26%, -5% and 14%, respectively. It is important the fact that in the studied condition the sodium molybdate and the copper phtalocyanine act stimulating the dissolution process of the ABNT 1010 steel. Next, a factorial statistical project was developed. Efficiency about 93% was obtained. The results statical analysis shows that the second and third orders interactions between the first three substances are strongly significative, by significance level about 5%. The efficiency obtained for the substances individually or combined was estimated from the results of a electrochemical impedance spectroscopy parameter, R_{tc} . The polarization curves indicate that with the formulation, the studied substances mixture behaves like an anodic and cathodic corrosion inhibitor. With the results, we can conclude that formulation contribution of the first three substances studied is much stronger than the total of the contributions of the substances individually and that the presence of cerium chloride is not important to the formulation.

Resumo

Foram estudadas quatro substâncias atóxicas ou de baixos índices de toxidez como inibidores de corrosão para aço ABNT 1010 em meio de ácido clorídrico 2,0 M. A seguir, com o objetivo de verificar a existência de sinergismo entre essas substâncias foi preparada uma formulação de mistura através de um projeto estatístico fatorial. As substâncias estudadas foram: molibdato de sódio, $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, tungstato de sódio, Na_2WO_4 , ftalocianina de

¹ Inic. Científica, Eng. Metalúrgica – EPUSP

² PHD – Engenharia Química - EPUSP

³ PHD - Engenharia Química - EPUSP

cobre, Ft-Cu e cloreto de cério(III), $CeCl_3$. As técnicas empregadas foram: potencial de corrosão; espectroscopia de impedância eletroquímica e curva de polarização. Os resultados obtidos para as substâncias estudadas individualmente foram: -18%; 26%; -5% e 14% respectivamente. Chama-se a atenção para o fato de que o molibdato de sódio e a ftalocianina de cobre, nas condições em que foram estudadas agem de forma a incentivar o processo de dissolução do aço ABNT 1010. A seguir foi desenvolvido o projeto estatístico fatorial, onde foi possível obter eficiência de até 93%. A análise estatística dos resultados mostra que as interações de segunda e terceira ordem das três primeiras substâncias são fortemente significativas ao nível de significância de 5%. A eficiência obtida, tanto das substâncias estudadas individualmente quanto da formulação foi estimada a partir dos resultados de parâmetros de impedância eletroquímica, R_{tc} . As curvas de polarização indicam que com a formulação, a mistura das substâncias estudadas comporta-se como inibidor misto de corrosão. Com esses resultados, pode-se concluir que a contribuição da formulação das três primeiras substâncias estudadas é muito superior à soma das contribuições individuais e que a presença do cloreto de cério não é significativamente importante na formulação.

Palavras-chave: aço ABNT 1010, ácido clorídrico 2,0 M, inibidores de corrosão atóxicos, técnicas eletroquímicas e projeto estatístico fatorial.

1 - Introdução

Os aços carbono são um tipo de material de construção bastante comum e de variada aplicação. No entanto, podem sofrer ataques severos quando em serviço, como em sistemas de produção de óleos, gases e até mesmo no processo de limpeza superficial das chapas. Com o fim de reduzir o consumo de ácido, a redução de fumos provenientes da menor produção de gás hidrogênio no caso de ataque ácido e, principalmente a dissolução do metal, é usualmente empregado inibidor de corrosão [1-3].

É comum empregarem-se dois ou mais inibidores conjuntamente, pois a ação combinada pode ser maior que a soma das contribuições individuais, tendo-se uma ação sinérgica [1].

Muitos inibidores de corrosão empregados, por exemplo, em sistemas de refrigeração e aquecimento são tóxicos, o que limita a área de utilização dos mesmos [4]. Até a década de 80 era comum o uso de compostos a base de cromatos como inibidores de corrosão. No entanto, a alta toxicidade dos cromatos tem sido o principal motivo de pesquisas que visam a sua substituição, tendo em vista as restrições impostas ao seu uso [5, 6].

Diante desta constatação, o principal objetivo deste trabalho é estudar individualmente quatro substâncias com baixos índices de toxidez como inibidores de corrosão para aço carbono em meio ácido.

2 - Revisão bibliográfica

Até a década de 80 era comum o uso de compostos a base de cromatos como inibidores de corrosão. No entanto, a alta toxicidade dos cromatos tem sido o principal motivo de pesquisas que visam a sua substituição, tendo em vista as restrições impostas ao seu uso [5, 6].

Baseado na similaridade da estrutura química e periodicidade entre cromatos e outros íons do grupo VI, estudos vem sendo realizados com molibdato e tungstato. Estes estudos apontam boa eficiência destes íons em termos de inibição de corrosão em meios menos agressivos, isto é, próximo da neutralidade. A presença de oxigênio dissolvido ou agente oxidante em solução é essencial para a boa eficiência do tungstato. Além disso, devido ao alto custo e baixa capacidade de oxidação, não é comum utilizar apenas este íon em solução. A maioria das formulações que utilizam o tungstato apresenta alta eficiência quando combinam tungstato com um ou mais íons inibidores de corrosão [5, 6].

As ftalocianinas são compostos macro-cíclicos que alternam átomos de nitrogênio e carbono numa estrutura de anel aromático. Possuem características que combinam a solubilidade e flexibilidade dos plásticos com as propriedades elétricas e ópticas dos metais e materiais semicondutores, além de possuir excelentes propriedades anticorrosivas [7].

As ftalocianinas apresentam boas propriedades anticorrosivas que são atribuídas a sua estrutura química plana com sistema de elétrons π livres, que se traduzem em boa condutividade eletrônica o qual permite alto nível de adsorção na superfície.[8].

A ação inibidora da ftalocianina de cobre, Ft-Cu é atribuída à forte adsorção química na superfície metálica, a qual é determinada pela sua geometria planar e pares de elétrons livres em seus heteroátomos. Estudo realizado em meio de ácido clorídrico 16% para o aço ASTM A606-4 com a presença da Ft-Cu obteve-se uma eficiência de 94% em termos de inibição de corrosão para concentrações da ordem de $5.10^{-3}M$. Neste estudo foi observado a obediência dos resultados a isoterma de adsorção de Langmuir e o mecanismo de adsorção foi caracterizado como sendo adsorção física [9].

3 - Materiais e métodos

3.1 - Materiais utilizados neste trabalho

O metal usado neste estudo foi o aço ABNT 1010, cuja composição é a seguinte: 0,010%C, 0,053%Si, 0,512%Mn, 0,012%S, 0,018%Cr, e 0,017%Cu. O meio estabelecido para este estudo foi o de HCl 2M.

Empregaram-se como inibidores de corrosão as substâncias atóxicas ftalocianina de cobre, Ft-Cu, tungstato de sódio, Na_2WO_4 , molibdato de sódio, Na_2MoO_4 e cloreto de cério III, $CeCl_3$.

3.2 - Metodologia empregada

Com o intuito de obter uma formulação ideal de inibidores de corrosão, inicialmente foi realizado um projeto estatístico fatorial completo visando observar a existência de sinergismo entre as substâncias empregadas. As técnicas usadas neste estudo foram: medidas de potencial de corrosão, E_{corr} ; espectroscopia de impedância eletroquímica, EIE e curvas de polarização potenciodinâmicas, Cpol.

O trabalho foi iniciado com a preparação dos corpos de prova, cdp's. Para isto, as amostras de aço ABNT 1010 foram cortadas em forma de disco e tratadas superficialmente. O tratamento da superfície dos corpos de prova foi feito em politriz com lixas d'água de granas 320, 400 e 600 e em seguida lavados com água deionizada e desengraxados com álcool etílico, acetona, e secos em corrente de ar quente. Os cdp's assim tratados funcionaram como eletrodo de trabalho, com área plana exposta de 1 cm^2 . A seguir, foram montados em um porta-eletrodo constituído de polivinilidenodifluorano, com contato interno de aço inoxidável. Os ensaios foram realizados em uma célula de vidro de três bocas com capacidade para 500 ml. O eletrodo de referência empregado foi o de prata/cloreto de prata $Ag/AgCl_{(KCl.sat)}$, e o contra-

eletrodo, uma folha de platina com área exposta à solução de 15 cm². Para as medidas de E_{corr} , os cdp's foram imersos no meio corrosivo, e o sistema evoluiu espontaneamente por tempo suficiente para a estabilização do E_{corr} , que foi de 30 minutos.

Os espectros de impedância eletroquímica foram obtidos imediatamente após a estabilização do E_{corr} . A faixa de frequência estudada foi de 50 kHz a 20 mHz, com dez leituras por década de frequência e a perturbação aplicada de 10 mV.

As curvas de polarização potenciodinâmicas anódicas e catódicas foram obtidas imediatamente após os ensaios de impedância eletroquímica. A faixa de potencial estudada foi de -500 mV versus E_{corr} a +500 mV. A velocidade de varredura usada foi de 0,5 mV/s.

Todos os ensaios foram realizados com auxílio de um Potenciostato/Galvanostato EG&G Princeton Applied Research (PAR modelo 273) interfaciado a um analisador de frequências Solatron 1255. O meio foi de HCl 2 M, sem agitação e naturalmente aerado, na ausência e presença das diferentes substâncias estudadas e em diferentes concentrações.

Para avaliar a existência de sinergismo entre as moléculas estudadas, foi realizado um projeto estatístico fatorial, o qual propôs ensaios com misturas das substâncias em diferentes concentrações, isto é, entre 1.10^{-4}M e 5.10^{-4}M . A Tabela 1 mostra as concentrações de cada substância estudada na ordem padrão e na ordem de corrida dos ensaios. Para análise do projeto estatístico fatorial completo foi usada como variável dependente ou variável resposta a resistência à transferência de carga, R_{tc} , que foi obtida através da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica, EIE.

Tabela 1

4 - Resultados e discussões

4.1 – Espectroscopia de impedância eletroquímica, EIE

Os resultados foram obtidos na seqüência de ensaios programados na Tabela 1. Visando conhecer os efeitos sinérgicos entre as substâncias estudadas, a variável resposta escolhida para análise estatística, foi a R_{tc} . O tratamento dos resultados obtidos pelos ensaios de impedância eletroquímica permitiu quantificar o valor de R_{tc} dos filmes formados sobre a superfície metálica. Com este objetivo e visando obter resultados mais consistentes, foi proposto e usado um modelo de circuito elétrico equivalente, Figura 1, para simular o comportamento do aço em meio de HCl 2,0 M na presença e ausência das diferentes substâncias estudadas como inibidores de corrosão.

Figura 1

No modelo representado na Figura 1, R_s corresponde à resistência da solução, CPE é um elemento constante de fase e representa a capacitância da dupla camada elétrica, C_{dl} e R_{tc} representam a resistência à transferência de carga na interface metal/solução. Os dois últimos representam o comportamento eletroquímico na superfície do aço. O elemento de fase constante CPE representa um sistema não homogêneo [10].

Os valores de R_{tc} para os trinta e um ensaios realizados foram comparados com o valor encontrado para a resistência à transferência de carga quando o metal foi exposto ao meio de HCl 2 M na ausência de qualquer inibidor de corrosão. A relação da eficiência de inibição da corrosão dada pela equação 1 permitiu a análise estatística dos resultados obtidos para os

ensaios sugeridos pelo projeto estatístico fatorial, avaliando assim o efeito sinérgico entre as substâncias estudadas, como indicado na Tabela 2.

$$\eta (\%) = R_{tc,i} / (R_{tc,i} - R_{tc,o}) \quad \text{Eq. 1}$$

onde $R_{tc,i}$ é a resistência à transferência de carga em presença do inibidor ou formulação de inibidor e $R_{tc,o}$ é o valor obtido na ausência de qualquer inibidor.

Tabela 2

Na Tabela 2, a segunda coluna corresponde à relevância da interação entre as substâncias. Para as moléculas estudadas individualmente, estes valores relacionam-se com a eficiência das substâncias como inibidores de corrosão. A terceira coluna representa o nível de significância “p” dos resultados.

Como pode ser observada na Tabela 2, a substância cloreto de cério III, $CeCl_3$ apresenta efeito negativo ou muito baixo nas interações investigadas, acompanhado de baixo nível de significância. Assim, esta molécula será descartada de estudos posteriores, que visam uma formulação ideal de mistura entre as substâncias empregadas como inibidores de corrosão para o aço carbono ABNT 1010 em meio de HCl 2M.

Na Figura 2 são apresentados os diagramas de impedância eletroquímica, EIE que foram obtidos na ausência de inibidor e em presença das substâncias estudadas individualmente. Na Figura 3 são apresentados os diagramas obtidos sem inibidor, com a formulação das quatro substâncias e também com a formulação cujo resultado apresentou maior efeito sinérgico, isto é, com maior eficiência de inibição da corrosão do aço ABNT 1010 em meio de HCl 2,0 M, correspondente ao ensaio 10 da ordem de correr.

Figura 2

Figura 3

O efeito sinérgico entre as substâncias estudadas pode ser avaliado comparando-se as Figuras 2 e 3. Nos diagramas de Nyquist, nota-se o aumento do diâmetro do arco capacitivo, correspondendo a um aumento da resistência à transferência de carga, R_{Tc} , do filme formado pelos inibidores de corrosão. Nos diagramas de Bode, pode-se observar o aumento do módulo de impedância, $|Z|$, acompanhado do aumento do ângulo de fase. No diagrama de Bode, θ vs $\log \omega$, nota-se também que no valor máximo de ângulo de fase, este permanece por uma maior faixa de frequência indicando maior faixa de proteção oferecida pelo filme na superfície do metal.

Os valores de módulo de impedância $|Z|$, foram lidos diretamente nos diagramas de Bode. Os valores de resistência e transferência de carga, R_{tc} , foram obtidos do ajuste dos resultados de EIE ao circuito elétrico equivalente proposto, Fig. 1. A eficiência das formulações dos inibidores, η foi calculada a partir dos valores de R_{tc} , Eq. 1. Estes resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3

A análise da Tabela 3 permite observar que a maior eficiência foi de 93% e foi obtida com a formulação das três primeiras substâncias estudadas que foram: Na_2MoO_4 , Ft-Cu e Na_2WO_4 . Observa-se que com esta formulação foi obtido o maior valor de módulo de impedância, indicando que o filme formado na superfície do aço torna-se mais protetor.

4.2 – Curvas de polarização anódicas e catódicas

Na Figura 4 são apresentadas as curvas de polarização que foram obtidas com a presença de cada substância estudada individualmente como inibidor de corrosão. Na avaliação da Figura 4, fica evidente a pouca influência das substâncias estudadas como inibidores de corrosão, ou seja, a presença das substâncias não polarizam significativamente as curvas de polarização tanto anódica quanto as catódica.

Figura 4

Na Figura 5 apresentam-se as curvas de polarização que foram obtidas a partir dos ensaios cujas formulações apresentaram maior efeito sinérgico. Esses ensaios constam na Tabela 1 e correspondem na ordem de realização dos ensaios ou de correr, aos números 10 (formulação que apresentou maior eficiência) e 12 (formulação com a presença de todas as substâncias estudadas), além de um ensaio na ausência de inibidor. Analisando os resultados observa-se que o potencial de corrosão é ligeiramente deslocado para valores mais positivos nas curvas de polarização o que sugere que a formulação estudada age como inibidor misto de corrosão para o aço ABNT 1010 em meio de HCl 2,0 M [11]. Inicialmente observa-se uma maior polarização de todas as curvas se comparado com o estudo feito com as substâncias estudadas individualmente (Figura 4), indicando a existência de sinergismo entre as substâncias estudadas. Finalmente, pode-se concluir que a formulação estudada age como inibidor misto de corrosão. O tratamento das curvas de polarização permitiu obter os coeficientes de Tafel para as regiões anódicas e catódicas, como mostrado na Tabela 4.

Figura 5

Tabela 4

A Tabela 4 mostra que a presença das substâncias estudadas individualmente não altera o mecanismo de redução da espécie catódica, H^+ / H_2 e também não altera o mecanismo de dissolução do aço ABNT 1010 em meio de HCl 2,0 M. No entanto, nos resultados de b_c e b_a obtidos dos ensaios 10 e 12, não é observado alteração do mecanismo de redução, enquanto verifica-se uma alteração no mecanismo de dissolução do aço, indicando a influência do sinergismo entre as substâncias estudadas.

4.3 – Micrografias

Com o objetivo de avaliar o efeito da corrosão na superfície do aço ABNT 1010, foram feitas micrografias dos corpos de prova, cdp's em microscópio óptico. O tratamento superficial dos cdp's foi o mesmo usado para os ensaios eletroquímicos, isto é, lixa d'água de granas 320, 400 e 600. A seguir foram lavados em água destilada e desengordurados com álcool e acetona e por fim secos em corrente de ar quente. As imagens obtidas foram: a) apenas tratado superficialmente; b) após imersão por 2 horas em HCl 2,0 M; c) após a imersão em HCl 2,0M com a formulação que apresentou maior sinergismo. As micrografias são mostradas na Figura 6.

Figura 6

A Figura 6a mostra apenas a presença de riscos da lixa, isto é, não é observada a presença da corrosão, bem como não se observa a presença de filme protetor. Comparando-se as Figuras 6b e 6c nota-se que a corrosão é muito mais intensa na imagem b, na qual o corpo de prova não recebeu qualquer tipo de proteção, além do que a corrosão ocorre de forma generalizada, não apresentando a formação de pites. Por outro lado, na imagem c, embora o corpo de prova apresente-se com corrosão, esta parece de menor intensidade que a apresentada na Figura 6b.

4.4 – Análise do projeto estatístico fatorial completo

Para facilitar a visualização do efeito sinérgico entre a ftalocianina de cobre, molibdato de sódio e tungstato de sódio, foram plotados os gráficos de R_{tc} em função da concentração de molibdato e tungstato de sódio, com as respectivas linhas de contorno, mantendo fixa a concentração de ftalocianina de cobre no valor máximo ($5,0 \times 10^{-4}$ M) e ausência de cloreto de cério III. Assim, foram obtidas a curva de nível e as linhas de contorno, que são apresentadas nas Figuras 7a e 7b respectivamente.

Figura 7

Nota-se no comportamento da curva de nível a existência de efeito positivo. Observa-se na Figura uma interação mais significativa para concentrações maiores das substâncias usadas como inibidores de corrosão, além de sugerir que se pode obter uma melhor interação aumentando a faixa de concentração estudada para a próxima fase do projeto.

Conclusões

Do estudo com o planejamento estatístico fatorial completo, onde foram envolvidas as quatro substâncias testadas como inibidores de corrosão para o aço carbono ABNT 1010 em meio de HCl 2,0 M podem ser extraídas as seguintes conclusões:

- Para a concentração de $5,0 \times 10^{-4}$ M, os valores de resistência à transferência de carga, R_{tc} , da mistura formada pelas substâncias tungstato de sódio, molibdato de sódio e ftalocianina de cobre são superiores a soma dos valores obtidos com as substâncias estudadas individualmente. Portanto, pode-se concluir a existência de efeito sinérgico positivo entre estas moléculas nas condições de estudo;
- A análise do planejamento estatístico fatorial completo permite concluir que o efeito sinérgico seja ainda maior para maiores concentrações das substâncias envolvidas, podendo este ser objeto de novos estudos visando otimizar a formulação de mistura de inibidores de corrosão no meio estudado;
- A mistura das substâncias estudadas age como inibidor misto, porém com maior predominância na reação anódica de dissolução do aço ABNT 1010;
- Os valores de inclinação anódica de Tafel obtidos da formulação revelam uma possível alteração do mecanismo de dissolução do aço ABNT 1010;
- Nas condições deste estudo o efeito do cloreto de cério III mostrou-se desprezível. Portanto, pode ser retirado da formulação da mistura usada como inibidores de corrosão para o aço ABNT 1010 em meio de HCl 2,0M;
- Todas as técnicas utilizadas apresentaram concordância entre si.

TABELAS

Ordem Padrão	Ordem de correr	Concentração molar / x10 ⁻⁴			
		FtCu	Na ₂ MoO ₄	Na ₂ WO ₄	CeCl ₃
20	1	1,3	1,3	3,8	1,3
10	2	0,0	5,0	0,0	5,0
27	3	3,8	3,8	1,3	3,8
9	4	5,0	0,0	0,0	5,0
13	5	5,0	0,0	5,0	5,0
23	6	3,8	3,8	3,8	1,3
1	7	5,0	0,0	0,0	0,0
4	8	0,0	0,0	5,0	0,0
22	9	1,3	3,8	3,8	1,3
7	10	5,0	5,0	5,0	0,0
6	11	0,0	5,0	5,0	0,0
15	12	5,0	5,0	5,0	5,0
28	13	1,3	1,3	3,8	3,8
29	14	3,8	1,3	3,8	3,8
8	15	0,0	0,0	0,0	5,0
2	16	0,0	5,0	0,0	0,0
19	17	3,8	3,8	1,3	1,3
14	18	0,0	5,0	5,0	5,0
30	19	1,3	3,8	3,8	3,8
12	20	0,0	0,0	5,0	5,0
18	21	1,3	3,8	1,3	1,3
31	22	3,8	3,8	3,8	3,8
21	23	3,8	1,3	3,8	1,3
25	24	3,8	1,3	1,3	3,8
11	25	5,0	5,0	0,0	5,0
5	26	5,0	0,0	5,0	0,0
17	27	3,8	1,3	1,3	1,3
26	28	1,3	3,8	1,3	3,8
3	29	5,0	5,0	0,0	0,0
24	30	1,3	1,3	1,3	3,8
16	31	2,7	2,7	2,7	2,7

Tabela 1 -Ensaio propostos pelo projeto estatístico fatorial completo.

	Effect	p
Interação	27,9	0,000
(1)FtCu	32,5	0,001
(2)MoO4	31,4	0,002
(3)WO4	39,9	0,000
(4)CeCl3	4,56	0,599
1 com 2	25,8	0,013
1 com 3	32,5	0,003
1 com 4	-2,77	0,767
2 com 3	28,1	0,007
2 com 4	-6,80	0,470
3 com 4	-6,59	0,484
1*2*3	29,3	0,006
1*2*4	-6,14	0,519
1*3*4	1,50	0,874
2*3*4	-6,82	0,475

Tabela 2: Avaliação do efeito sinérgico entre as substâncias empregadas como inibidores de corrosão para o aço carbono ABNT 1010 em meio de HCl 2M

Mistura	$ Z _{MAX} / \text{kOhm.cm}^2$	$R_{tc} / \text{ohm.cm}^2$	$\eta / \%$
(1)FtCu	11,11	11,91	-5,0
(2)MoO4	10,32	9,93	-18
(3)WO4	16,40	15,92	26
(4)CeCl3	14,24	13,62	14
1 com 2	15,54	14,96	22
1 com 3	21,13	21,44	45
1 com 4	20,72	19,73	41
2 com 3	28,38	28,13	58
2 com 4	24,20	24,08	51
3 com 4	12,50	12,17	4,0
1*2*3	153,4	164,2	93
1*2*4	23,28	22,94	49
1*3*4	41,20	41,54	72
2*3*4	17,84	17,30	32

Tabela 3: módulo de impedância $|Z|$, resistência a transferência de carga, R_{tc} e eficiência η das formulações dos inibidores estudados

	Ensaio	b_c	b_a
	HCl 2M	-117	64
(Ft-Cu)	7	-105	60
(MoO4)	16	-140	91
(WO4)	8	-115	86
(CeCl3)	15	-128	68
maior eficiência	10	-132	37
todas substâncias	12	-117	36

Tabela 4: Coeficientes de Tafel obtidos para as curvas: sem inibidor; com as substâncias estudadas individualmente e para formulações com estas moléculas.

FIGURAS

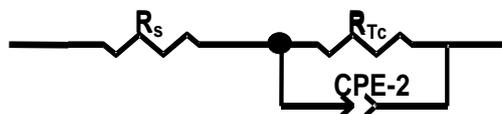


Figura 1. Circuito elétrico equivalente proposto para análise da espectroscopia de impedância eletroquímica, EIE.

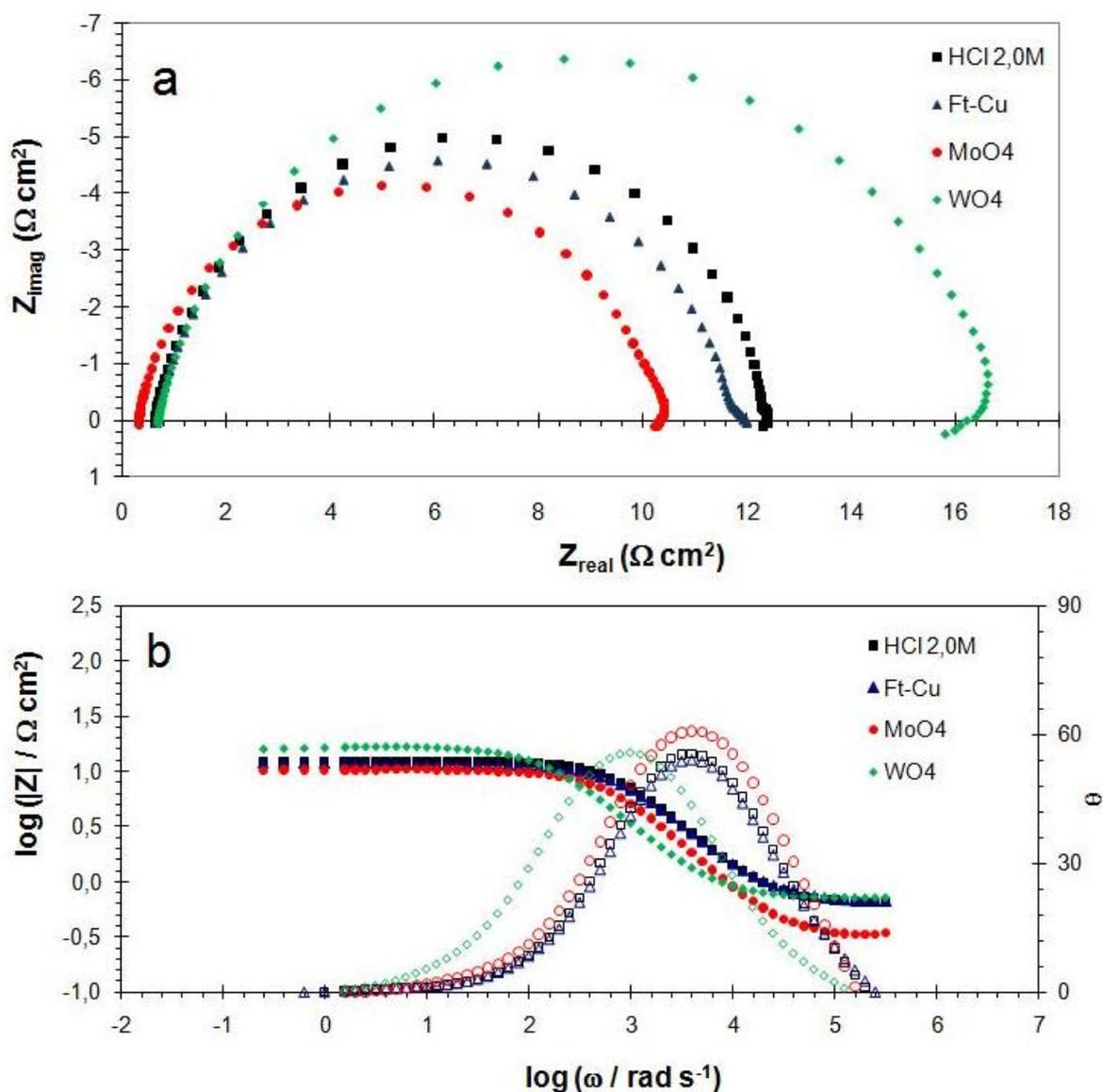


Figura 2. Diagramas de EIE que foram obtidos na ausência e presença dos inibidores estudados individualmente. a) Nyquist e b) Bode.

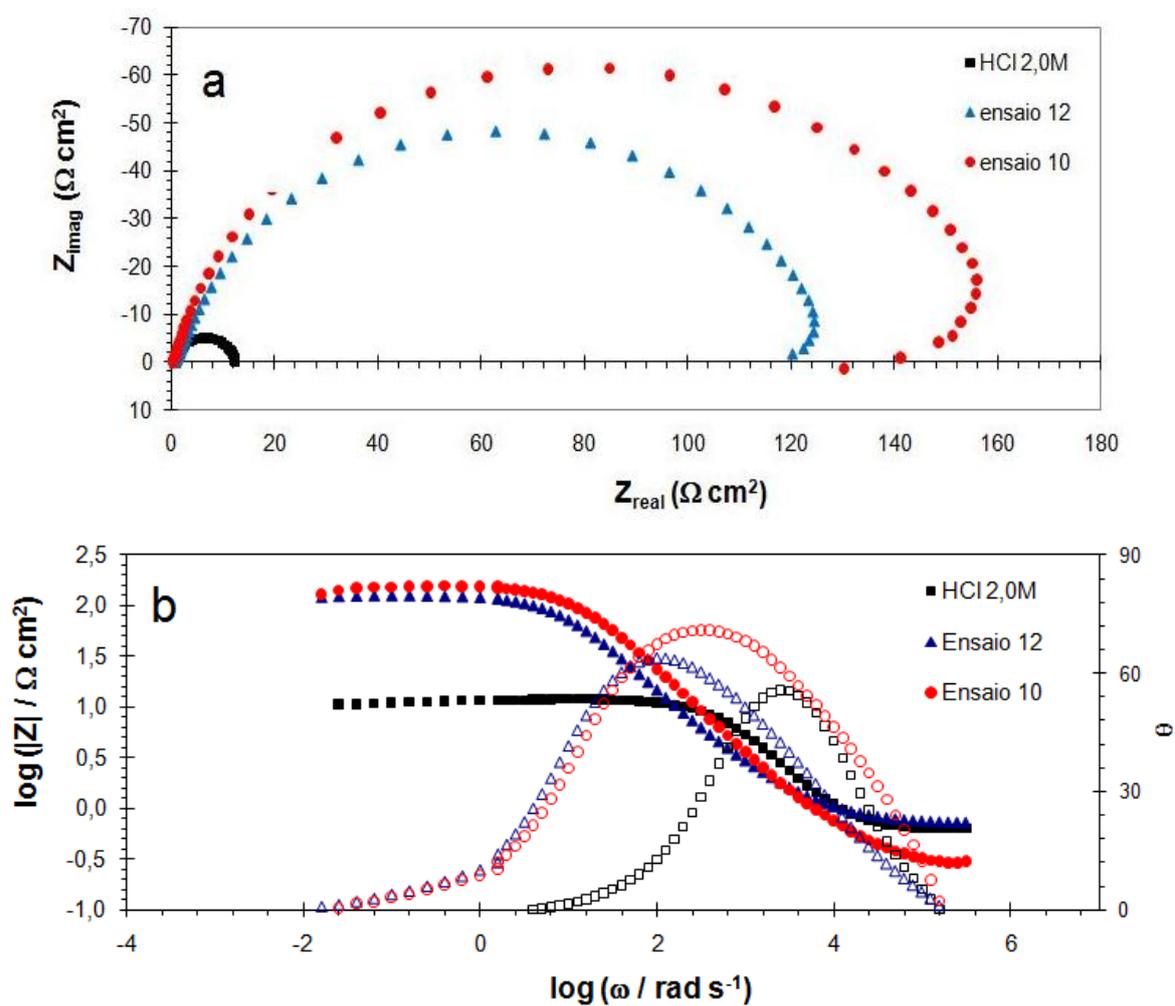


Figura 3 Diagramas de EIE que foram obtidos: ensaio na ausência de inibidor; ensaio nº12; ensaio nº10 (formulação de máxima eficiência de inibição). 3a) Nyquist e 3b) Bode.

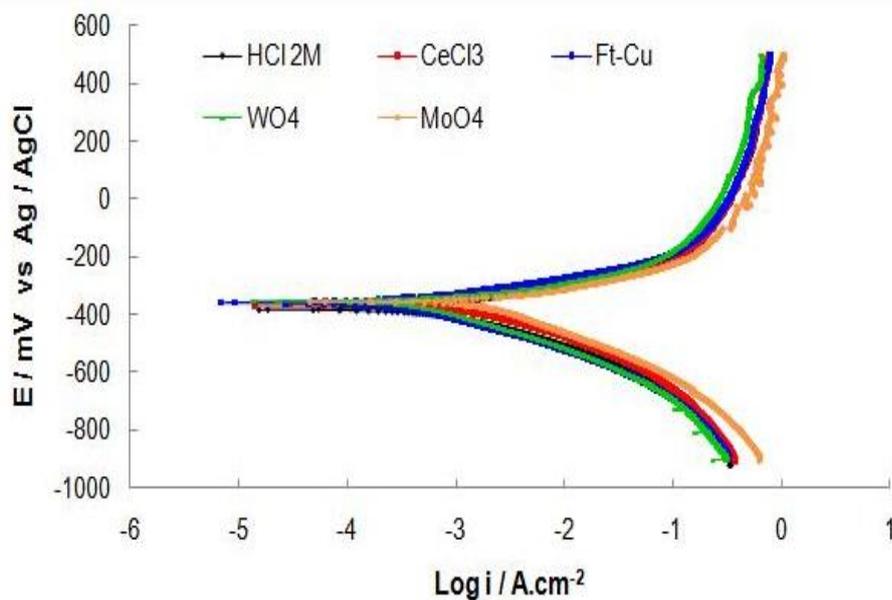


Figura 4: Curvas de polarização obtidas com e sem as substâncias estudadas individualmente.

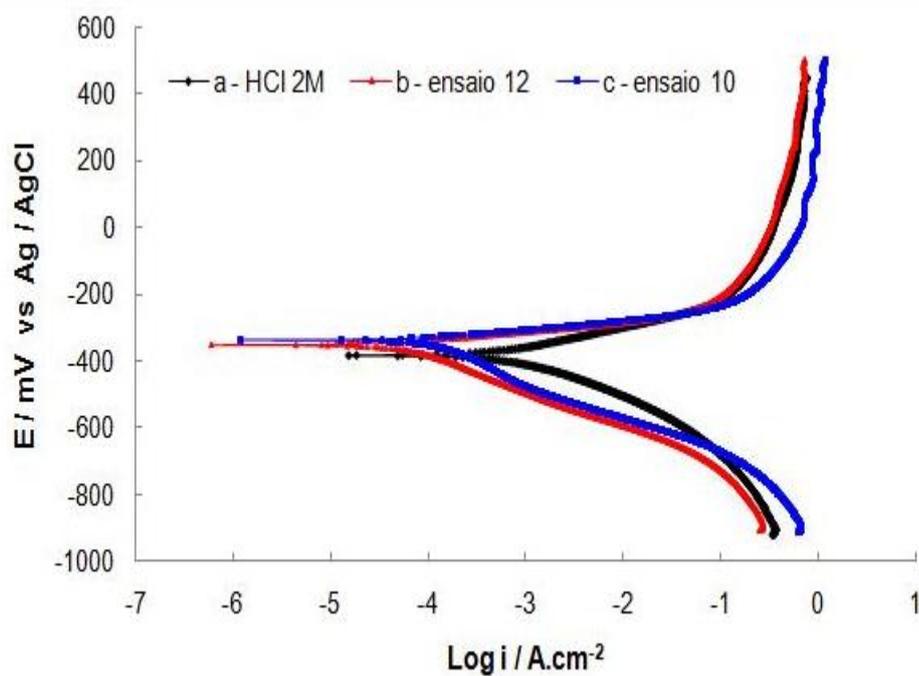


Figura 5: Curvas de polarização obtidas com: a) sem inibidor; b) ensaio n°12; c) ensaio n°10 (formulação de máxima eficiência de inibição).

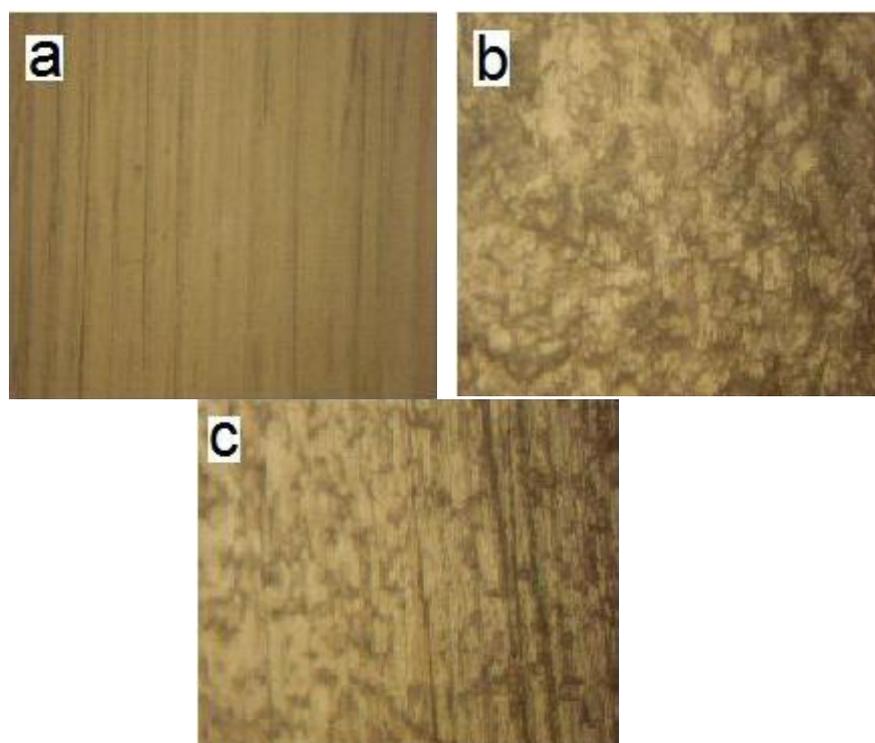
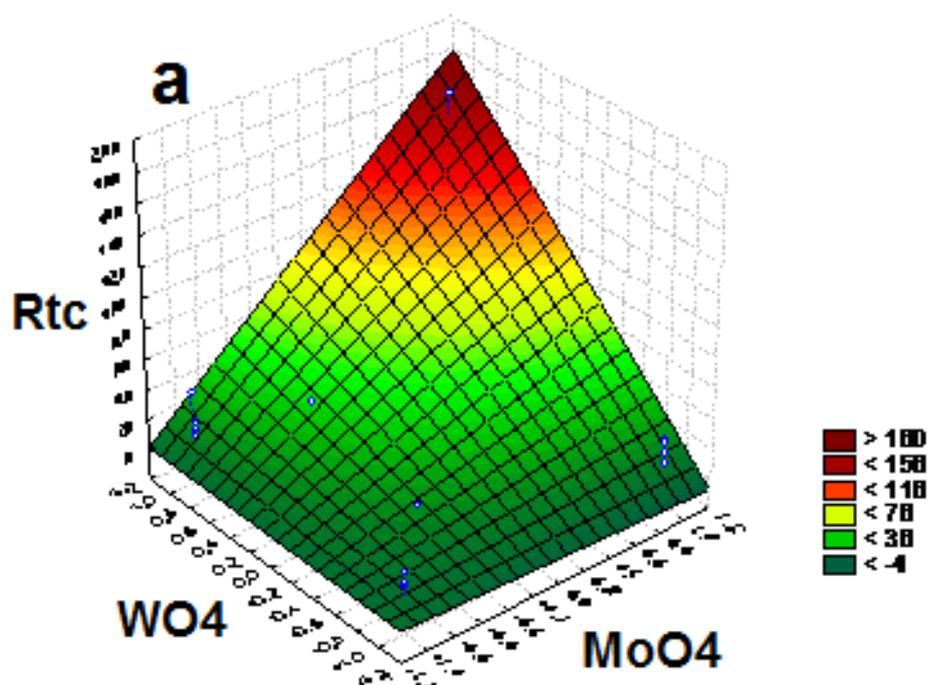


Figura 6: Micrografias do aço ABNT 1010, com aumento de 100x. a) tratado superficialmente; b) imerso em HCl 2,0 M e c) na formulação de máxima eficiência (ensaio nº 10.).



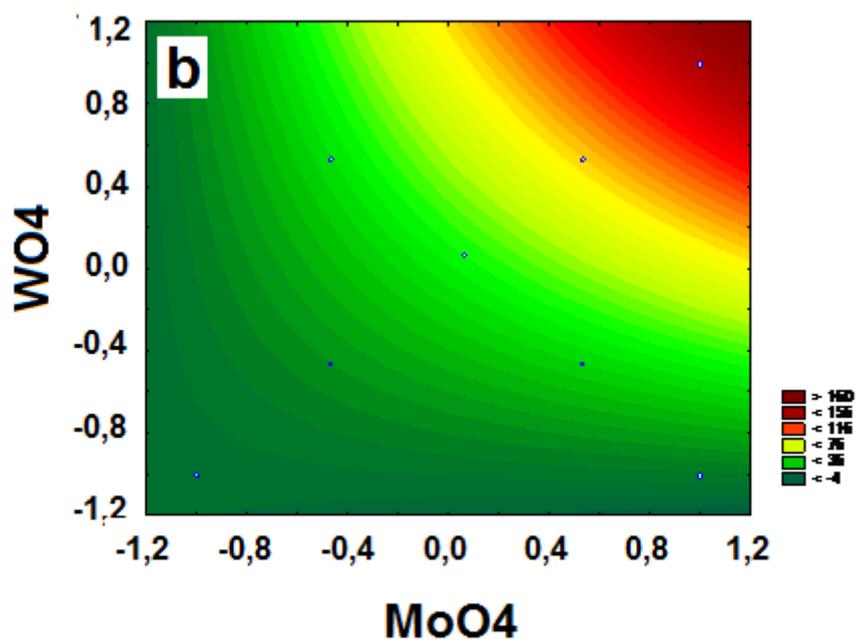


Figura 7: a) Curvas de níveis de R_{tc} em função de MoO_4 e WO_4 , com máximo de $5,0 \times 10^{-4}$ M de Ft-Cu; b) Linhas de contorno para R_{tc} , em função de MoO_4 e WO_4 , com máximo de $5,0 \times 10^{-4}$ M de Ft-Cu.

Referências bibliográficas

- (1) GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 1996. 345p.
- (2) GUEDES, I.C. **Eficiência dos Inibidores de Corrosão Benzotriazol, N-Feniltiouréia e Cloreto de Hexadeciltrimetil Amônio Quaternário para Ferro Puro, Aço Carbono e Aço ARBL em meio de Ácido Sulfúrico**. 1996. 178p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 1996.
- (3) GRANERO, M.F.L., MATAI, P.H.L.S., AOKI, I.V., GUEDES, I.C. Dodigen 213-N as corrosion inhibitor for ASTM 1010 mild steel in 10% HCl. **Journal of Applied Electrochemistry**, 2009.
- (4) SHANBHAG, A.V., VENKATESHA, T.V., PRABHU, R.A., KALKHAMBKAR, R.G., KULKARNI, G.M. Corrosion inhibition of mild steel in acidic medium using hydrazide derivatives. **Journal of Applied Electrochemistry**, 2007
- (5) SHIBLI, S.M.A., SAJI, V.S. Co-inhibition characteristics of sodium tungstate with potassium iodate on mild steel corrosion. **Corrosion Science**, 2004
- (6) MU, G., LI, X., QU, Q., ZHOU, J. Molybdate and tungstate as corrosion inhibitors for cold Rolling steel in hydrochloric acid solution. **Corrosion Science** 48, 2006
- (7) DOEDY, J.; HOAGLAND, J.; HIPPS, K.W. Infrared and Raman Spectroscopic Study of Ultra thin Cooper Phthalocyanine Films Vapor Deposited on Oxidized Alumina, **Journal of Physical-Chemistry**, vol. 95, pp. 3751-3755, 1991.
- (8) HETTIARACHCHI, S.; CHAN, Y.W.; WILSON, JR. R.B.; AGARWALA, V.S. Macrocyclic Corrosion Inhibitors for Steel in Acid Chloride Environments, **Corrosion Science**, vol. 45, no.1 pp.30-34, 1989.
- (9) AOKI, I.V., GUEDES, I.C., MARANHÃO, S.L.A. Copper phtalocyanine as corrosion inhibitor for ASTM A606.4 steel in 16% hydrochloric acid, **Journal of Applied Electrochemistry**, 2002.
- (10) BUENO, G. V. **Formulação e otimização de uma mistura de inibidores de corrosão para aço carbono em meio de água de resfriamento industrial usando planejamento estatístico**. 2008. 122 p. (Dissertação de Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- (11) GUEDES, I. C.; AOKI, I. V.; TAQUEDA, M. E. S. Polarisation curves and experiment design as tools in the search of optimised inhibitors mixture formulation for HSLA steel in hydrochloric acid. **Materials Science Forum**, v. 289 – 292, p. 1237 – 1244, 1998.