INTERCORR2008_047

Copyright 2008, ABRACO
Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2008, em Recife/PE, no mês de maio de 2008.
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Influência do Teor de Cobre no Aço Carbono Quanto à Resistência à Corrosão dos Filmes Formados em uma Câmara de Corrosão Atmosférica

[1]Daniel Dalmau Jordà, [2]Isabel Correia Guedes

Abstract

The aim of this work is to study and characterize the films formed on two carbon steels with different copper contents (0.25% and 0.36%). The films were developed in a SO_2-containing atmosphere inside an accelerated test chamber. The steel samples were cut and their surface mechanically treated with emery papers (320, 400, 600 and 1200 grit), and polished with 3 µm and 1 µm grades diamond paste. The samples were exposed in a SO_2-containing atmosphere chamber. The time of formation of the films inside the chamber was controlled at 10, 20, 30, 40, and 50 minutes, the temperature was set at 30ºC, the relative humidity at 80%, and the SO_2 concentration was 202 ppb. With these conditions it was possible to simulate an industrial atmosphere. The electrochemical techniques used to characterize the films formed were the monitoring of the corrosion potential, polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). From the results attained it can be concluded that the films formed within the studied time ranges did not suffer significant changes. In the first minutes of exposition, the films obtained were more homogeneous and resistive and consequently more protective for carbon steel containing 0.25% and 0.36% copper. All electrochemical measurements were performed in borate buffer solution of pH 9.2.

Resumo

A literatura mostra que a primeira camada do filme formada sobre o aço ARBL é a responsável pela elevada resistência à corrosão atmosférica. Este trabalho tem como objetivo de estudar a influência do teor de cobre presente no aço e a cinética da reação com o tempo, na resistência à corrosão atmosférica. Foram estudados dois aços baixa liga; o primeiro com 0,25% de cobre e o segundo com 0,36% de cobre. Amostras dos dois aços foram tratadas em uma politriz com lixas d'água de granas 320, 400, 600 e 1200 e por fim polidos com pasta de diamante de 3 µm e 1 µm. A seguir foram expostos em uma câmara de corrosão atmosférica. As variáveis envolvidas foram mantidas nas seguintes condições: temperatura a 30ºC; a umidade relativa a 80% e concentração de SO_2 foi mantida em 202ppb. Os filmes foram produzidos por 10min, 20min, 30min, 40min e 50min. As técnicas usadas para avaliar os filmes formados foram: medidas de potencial de corrosão; espectroscopia de impedância eletroquímica e curvas de polarização anódicas e catódicas. Os resultados permitiram concluir

[1] Eng. Químico– Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e Universitat Politécnica de Catalunya.
2 Profa. Dra. Docente Dep. Eng. Química, EPUSP

que as diferenças entre os filmes formados não foram significativas. Para os menores tempos de exposição os filmes são mais homogêneos, resistivos e mais protetores contra a corrosão. Todos os ensaios foram realizados em solução de tetraborato de sódio pH = 9,2.
.

Palavras chaves: Aço ARBL, corrosão atmosférica, dióxido de enxofre, teor de cobre e resistência à corrosão.

1. Introdução

Os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), além de uma baixa porcentagem de carbono, a eles são adicionados pequenas porcentagens de elementos de liga [1-2]. Em atmosferas poluídas com SO_2 ou SO_3, esses aços se recobrem com um filme de ferrugem que é aderente e protetor, resultante do processo de corrosão atmosférica [3-4]. Esses aços são usados principalmente quando se deseja associar resistência mecânica com resistência a corrosão. A literatura mostra a importância do tempo de exposição desses aços à atmosfera, quanto à espessura e aumento da proteção. Os primeiros instantes de formação do filme são muito importantes, pois a primeira camada é responsável pela maior aderência do filme formado nesses aços. Neste período as reações que ocorrem dentro do filme de óxido dependem das condições atmosféricas nas quais se encontra o aço [2-5]. Misawa, (1971)[6} observou que a dissolução do cobre proveniente do aço catalisa a formação de íons complexos que poderiam ser transformados em uma α-FeOOH, que é uma camada protetora amorfa. Eichhorn, (1988)[7] caracterizou o filme formado e verificou que a primeira camada é formada por óxido e a segunda apresentou espessura que depende da umidade relativa além de ser influenciada pela presença de SO_2. O efeito dos poluentes gasosos e dos parâmetros climáticos sobre a corrosão atmosférica desses aços, têm sido estudado em campo e em laboratório. Oesch (1996) [8]concluiu que o dióxido de enxofre foi reconhecido como o principal poluente gasoso corrosivo na atmosfera para o aço. O conhecimento do mecanismo de corrosão, principalmente a investigação do produto de corrosão formado sobre esses aços são fatores importantes no sentido de se prever a vida útil do material e sua aplicação. Guedes et al., (2006) desenvolveram estudo em que foram avaliadas as características semicondutoras de filmes produzidos em dois aços 1010, um contendo 0,36% de cobre e outro 0,40% de cromo. Os filmes foram produzidos por 2horas. Os autores concluíram que os filmes formados sobre esses aços são semicondutores e que a presença do SO2 influencia a resistência à corrosão. Na câmara de ensaios acelerados de corrosão, o ataque ao corpo-de-prova depende da vazão da corrente de ar poluído, ou mais propriamente, da velocidade com a qual a massa de ar poluída atinge a superfície do metal [10].
A literatura mostra que a formação das primeiras camadas formada sobre esses aços em ambiente natural lhes confere uma boa aderência. Portanto, neste trabalho pretende-se estudar a evolução da cinética de formação do filme com o tempo, além da influência do teor de cobre quanto à resistência a corrosão do aço.

2. Matérias e Métodos:

2.1 Materias:

Para este estudo foram usados dois tipos de aço carbono, isto é, com diferentes teores de cobre. Os aços estudados neste trabalho foram produzidos no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo-IPT e foram produzidos com os teores de cobre solicitados, que foram: aço com 0,25%Cu e aço com 0,36%Cu. A Tabela 1 mostra a

composição dos aços estudados. O meio usado para avaliar a resistência dos filmes formados foi solução de tetraborato de sódio pH 9.2

Tabela 1.

2.2. Metodologia

2.2.1. Formação dos filmes:

As amostras dos aços foram recebidas na forma de tarugos e o diâmetro foi reduzido para 16 mm. Foram tratadas superficialmente em uma politriz, com lixas d´água de granas 320, 400, 600 e 1200, a úmido. Em seguida foram polidas com pasta de diamante de 3µm e 1µm. A seguir, foram submetidas a uma câmara de ensaios acelerados de corrosão atmosférica com temperatura controlada a 30ºC, umidade relativa (UR) a 80% e concentração de SO_2 em 202ppb. A concentração de SO_2 foi controlada usando-se a medida da vazão com um bolhometro. A UR foi controlada com o uso de um psicrômetro de bulbo úmido e bulbo seco.
Para controle da vazão de SO_2, para obter concentração de 202ppb, foi usado um tubo de permeação de SO_2 (Fig.1), com formato cilíndrico e constituído de material polimérico e permeável ao vapor de SO_2, o qual permite fornecem uma quantidade de poluente muito uniforme, estável e fácil de calibrar, uma vez que a velocidade de difusão, através do polímero que o contém, é constante [11].

Figura 1

Para controle da umidade relativa foi usados um psicrômetro de bulbo úmido e bulbo seco [12]. O dispositivo consiste em dois termômetros, um (o seco) tem seu bulbo nu, o outro (o úmido) é recoberto com um tecido saturado com água (Figura 2). Quando em operação, a água que fica num depósito inferior, sobe através do tecido por ação capilar e possui uma temperatura menor do que a temperatura do ar registrada no bulbo seco. Conhecidas as duas temperaturas, e com ajuda de uma carta psicrométrica (Figura 3), determina-se à umidade relativa da corrente de ar. Assim, as amostras foram expostas por períodos de tempo de 10, 20, 30, 40 e 50 minutos. Os filmes produzidos foram caracterizados através do monitoramento do potencial de corrosão, E_{corr}, espectroscopia de impedância eletroquímica, EIE e curva de polarização.

Figura 2

Figura 3.

As técnicas potenciostáticas e potenciodinâmicas constituem uma base indispensável aos estudos sobre filmes de corrosão. No entanto, a medida das correntes de corrosão informa apenas sobre a cinética imposta pela etapa mais lenta do processo eletroquímico. Portanto, a técnica dinâmica de medidas de impedância completa as técnicas estacionárias tendo em vista as informações sobre os processos elementares da reação global [13-16].

Para caracterizar os filmes formados, iniciou-se pelo potencial de corrosão, E_{corr}, cujo tempo de estabilização foi de 1 hora. A seguir foram obtidos os espectros de impedância eletroquímica dentro de uma faixa de freqüência de 50 kHz a 10 mHz. Foram feitas dez leituras por década de freqüência e foi aplicada uma perturbação em potencial de 10 mV. As

curvas de polarização anódicas e catódicas foram obtidas após os ensaios de impedância eletroquímica. A faixa de potencial estudada foi –200 mV versus o potencial de corrosão, à +1200 mV. A velocidade de varredura usada foi de 0,5 mV s^{-1}. Para todos os ensaios eletroquímicos foi usado um Potenciostato/Galvanostato EG&G Princeton Applied Research (PAR modelo 283) interfaciado a um analisador de freqüências Solatron 1255. Todos os experimentos foram realizados em solução de tetraborato de sódio com pH de 9,2 [(H_3BO_3 (0,05M) + $Na_2B_4O_7$. 10 H_2O (0,075M))], naturalmente aerado, temperatura ambiente e meio não agitado. O eletrodo de referência utilizado foi de calomelano saturado (Hg/Hg_2Cl_2), KCl Sat e como contra-eletrodo foi usado uma folha de platina com 15 cm^2 de área exposta à solução.

3. Resultados e discussões

Os resultados obtidos neste estudo para os dois aços estudados são apresentados a seguir.

3.1. Potencial de corrosão

O estudo foi iniciado obtendo-se os resultados de potencial de corrosão, E_{corr}, para os dois aços em diferentes tempos de formação dos filmes. Esses valores são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2

Na análise dos valores dos potenciais de corrosão dos aços estudados, observa-se que: o aço com 0,25% de cobre sofreu a maior variação de potencial com o tempo de formação do filme, 163 mV, embora nos vinte minutos iniciais sejam mais positivos, estes tornam-se mais negativos para tempos maiores de exposição na câmara;
O aço com 0,36% de cobre, sofreu uma variação do potencial apenas de 28 mV, variação que é bem inferior àquela observada com o aço com 0,25% de cobre, logo, os seus valores de potencial de corrosão praticamente não são alterados. Chama-se a atenção para o fato de que embora o aço com 0,25% de cobre, tenha sofrido maior variação do potencial de corrosão, E_{corr}, os valores são mais negativos. Considerando que a camada inicial é a responsável pela boa aderência do filme, estes valores demonstram que este filme deve apresenta uma maior resistência, principalmente nos instantes iniciais, ou seja até 20 minutos [2, 5].

3.2. Espectroscopia de impedância Eletroquímica

Nas Figuras 4 e 5 são apresentados os diagramas de Nyquist e Bode que foram obtidos para os filmes produzidos sobre os aços com 0,25% de cobre e 0,36% de cobre.

Figura 4

Figura 5

A análise qualitativa dos resultados apresentados nas Figuras 4 e 5 permitem observar que o comportamento dos dois aços foi muito semelhante, principalmente nos primeiros 20 minutos.

Esta observação permite supor que o filme formado sobre os aços, nos instantes iniciais, deve estar sendo formado uniformemente sobre toda a superfície destes, logo, sendo mais homogêneo. Percebe-se também que aos 30 minutos, para os dois aços, o comportamento dos diagramas de Nyquist são menos capacitivos. Para o tempo de 40 e 50 minutos os diagramas indicam que os filmes parecem se tornar mais resistivos, com resultados semelhantes à situação inicial. Assim, pode-se concluir que o filme deve se tornar mais espesso e provavelmente mais protetor com o tempo de exposição nas condições em que foram estudados [17].

Para uma análise quantitativa, os diagramas obtidos foram ajustados ao circuito equivalente cujo modelo é o representado na Figura 6. A opção por esse modelo de circuito elétrico equivalente pode ser justificada pela presença de uma única constante de tempo [16,18]. O ajuste possibilitou obter os valores de R_{tc} e C_{dl}. O valor de |Z| foi obtido para o valor de freqüência tendendo a zero.

Figura 6

Com o auxilio da equação: $Cdl = y_o (w'. Máx.)^{n-1}$ foi possível calcular os valores de capacitância. Onde: y_o = CPE1-T; n = CPE1-P, os quais correspondem ao elemento de fase constante CPE1, $w' = f_{máx}$. $f_{máx}$. é a freqüência que corresponde ao valor máximo do arco capacitivo no eixo imaginário [19]. Na Tabela 3 são apresentados os resultados de resistência à polarização, R_{tc}, capacitância da dupla camada elétrica, C_{dl}, módulo da impedância, [Z] e ângulo de fase, θ.

Tabela 3

Analisando quantitativamente os parâmetros obtidos do ajuste dos resultados de impedância (Tabela 3), no geral, as respostas foram muito semelhantes mas alguns aspectos podem ser destacados. Com os valores de resistência à transferência de carga, R_{tc}, e Cdl que foram obtidos para os dois aços, percebe-se que nos 20 minutos iniciais, o filme formado sobre o aço com 0,25% de cobre é mais resistente do que sobre o aço com 0,36% de cobre, cujos valores de R_{tc} são: $9{,}3x10^5$ Ω cm^2 $6{,}8x10^5$ Ω cm^2 respectivamente. Também se pode observar pelos valores de capacitância da dupla camada elétrica, $C_{dl,}$ que são menores para o aço com 0,25% de cobre. Chama-se a atenção para o fato de que a resistência à transferência de carga e o módulo de |Z| são inversamente proporcionais à capacitância da dupla camada elétrica. Logo, quanto menor a capacitância da dupla camada elétrica maior deve ser a resistência transferência de carga e o módulo da impedância, |Z|. Este resultado indica que o filme formado nos primeiros instantes é mais resistente sobre o aço com 0,25% de cobre, logo deve ser mais homogêneo sobre este aço. Este resultado pode estar associado ao menor teor de cobre presente no aço com 0,25% de cobre, o que conduz a uma menor contaminação do óxido de ferro pelo cobre, isto talvez possa justificar a maior resistência do filme no aço com menor teor de cobre, e assim produzir filmes mais resistivos.
Os cátions de cobre na spinela do óxido de ferro podem ser substituídos tanto nos sítios tetraédricos quanto nos sítios octaédricos [22]. A influência dos íons Cu^{2+} depende do nível de energia correspondente na banda proibida. Porém, a situação é completamente diferente quando é formada uma única fase do óxido de cobre.
Na Tabela 3, se observa também que os resultados dos filmes formados por 40 e 50 minutos, apresentam comportamento inverso aquele observado nos primeiros 20 minutos, para os dois aços.

Embora o efeito do cobre não seja totalmente conhecido no processo de formação do filme, sabe-se que a substituição de um óxido tipo-n por um cátion da camada de valência aumenta a concentração de cátions intersticiais ou vazios. Logo, considerando que os íons de cobre são incorporados na spinela, a influência do cobre pode estar relacionada com a concentração de defeitos o que poderia justificar um valor menor de R_{tc} e maior valor de C_{dl} para tempos maiores de exposição. O óxido de cobre, Cu_2O apresenta propriedades eletroquímicas diferentes quando comparada com o óxido de ferro. Assim, o teor de cobre presente no aço tem influência importante na diminuição dos valores de capacitância, principalmente se os filmes foram formados em atmosfera contendo SO_2 [9].

3. 3. Curvas de polarização

Na Figura 7 são apresentadas às curvas de polarização obtidas para os dois aços com a presença dos filmes formados em diferentes tempos.

Figura 7

Analisando qualitativamente as Figuras 6a e 6b observa-se que as curvas de polarização apresentam comportamento semelhante. Para analisar quantitativamente, foram tirados os valores de densidade de corrente de corrosão, i_{corr},, e densidade de corrente de passivação, i_{pass}. e potencial de transpassivação Esses valores são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4.

Com os valores tirados das curvas de polarização para os dois aços estudados, se observa que as densidades de corrente de corrosão, i_{corr} são levemente alteradas, independente do tempo de formação dos filmes, e que esses valores encontram-se dentro da mesma ordem de grandeza. No entanto, é possível perceber que os primeiros minutos de exposição do aço com 0,25% de cobre, parecem ser mais significativos, tendo em vista a menor densidade de corrente de corrosão, provavelmente deva-se ao filme ser mais resistente o que indica que o filme formado sobre este aço deve ser mais homogêneo Esse resultado é concordante com aquele obtido da técnica impedância eletroquímica.
Para o aço com 0,36%, embora as densidades de corrente sejam ligeiramente maiores, deve ser ressaltado que estas se encontram na mesma ordem de grandeza. Quanto aos valores de potenciais de passivação e transpassivação, estes são muito próximos. O conjunto dos resultados apresentados na Tabela 4 mostra a importância da presença de cobre no aço carbono [9, 20].

4. Conclusões

Os resultados obtidos deste trabalho permitem tirar as seguintes conclusões:

→ Os valores de potenciais de corrosão são maiores para o aço com 0,25% de cobre.

→ independente do tempo de formação do filme o potencial de transpassivação ocorre praticamente no mesmo valor de potencial e a faixa de potencial em que os materiais permanecem passivados é praticamente a mesma, além das densidades de corrente de passivação também serem da mesma ordem de grandeza;

→ os parâmetros obtidos dos diagramas de impedância eletroquímica indicam que os vinte minutos iniciais de formação do filme parecem ser importantes para os filmes produzidos nos aços carbono com 0,25% e 0,36% de cobre.

→ Os resultados obtidos para os filmes formados sobre os dois aços, nas condições em que foram estudados, indicam que: os filmes são mais resistivos em tempos menores de formação dos filmes sobre o aço com 0,25%Cu, enquanto que os resultados obtidos para o aço com 0,36% de cobre embora sejam menos resistivos nos primeiros 20 minutos, aumentam a resistividade a partir de 40 minutos.

→ os resultados obtidos com os filmes formados sobre aço com 0,25% de cobre até 20 minutos mostram que estes devem ser mais resistivos e protetores do que com o aço com 0,36%Cu.

→ Os resultados das diferentes técnicas estudadas são concordantes entre si.

5. Referencias Bibliográficas

[1] Roberge, Pierre R. **Corrosion Basics: An Introduction**, NACE Press Book 2006, 2nd Edition.

[2]. Kihira, H.; Ito, S.; Murata, T. Quantitative classification of patina conditions for weathering steel using a recently developed instrument. **Corrosion** – v.45, n.4

[3]. Meybaum, B. R.; Ayllon, E. S.; **Corrosion,** v36, n.7, 1980.

[4]. Nolasco, C. A.; Bordignon, P.J.P.; Oliveira, E.Q. **Metalurgia - ABM**. v.32, n..p.229, 1976.

[5]. Raman, A., Razvan, A. Kuban, B., Clement, K. A., And Graves, W.E. **Corrosio**n. V.42, n.8, 1986.

[6]. Misawa, T.; Kyuno, W.; Suëtaka; Shimodaira, S.; **Corrosion Science**, v.11 p.351971.

[7]. Eichhorn, K.J.; Forker, W. **Corrosion Science**, v. 28 p. 745 1988.

[8]. Oesch S.; The effect of SO2, NO_2, NO and O_3 on the corrosion of unalloyed carbon steel and weathering steel – The results of laboratory exposures. **Corrosion Science**, v. 38, n. 8, pp. 1357-1368, 1996

[9]. Guedes, I.C.; Aoki, I.V.; Carmezim, M. J.; Montemor, M. F.; Ferreira, M.G.S.; Belo, M. C. **Thin Solid Films**, v. 515 n.4, p.2167 – 2172, 2006.

[10]. Ishino, M.; Kishimoto, M.; Matsui, K.; Mitani, S. Effect of Gas Flow Velocity on Tamish Kineticsof Contact Materials. **IEEE TCHMT**, v.3 n.1 p. 63-65. 1980.

[11].Okeefe, A. E.; Ortman, G. C. Primary Standards for Trace Gas Analysis. **Analytical Chemistry**, v.38 n.6 p.760-763, 1966.

[12].Bird, R. B.; Stewart, W. E.; Lightfoot, E. N. **Fenómenos de Transporte**, Ed. Reverté, Barcelona, 1980

[13].Pedroso Carmezim, M. J. **Filmes de Passivação: Estruta e Comportamento**. Tese (Doutorado em Engenharia)**.** Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2000

[14].Da Cunha Belo, M. Filmes de passivação dos metais e ligas metálicas, fatores com influencia na sua estrutura eletrônica e técnicas de estudo. **Corrosão e proteção dos materiais**, v.12, n.1, 1993

[15].Sculli, J.R.; Silverman, D. C.; Kending, M. W. **Electrochemical impedance: analysis and interpretation.** Philadelphia: ASTM. 1993. 480p.

[16].Melo, H. G. Impedância eletroquímica aplicada ao estudo da corrosão e de processos de proteção. São Paulo: PQI / EPUSP, 2003. / **Notas de aula da disciplina** PQI 5847/.

[17].Itzhak, D.; Peled, P. The Effect of Cu Addition on the Corrosion Behaviour of Sintered Stainless Steel in H_2SO_4 Environment. **Corrosion Science,** v. 26, n. 1, p. 49-56, 1986

[18].Bonora, P. L.; Deflorian, F.; Fedrizzi, L. Electrochemical Impedance Spectroscopy as a Tool for Investing Underpaint Corrosion. **Electrochemical Acta**, v.41, n.7/8, p. 1073-1082, 1996

[19].Van Schaftenghen, T.; Le Pen, C.; Terryn, H.; Hörzenberger, F. Investigation of the Barrier Properties of Silanes on Cold Rolled Steel, **Electrochemical Acta** v.49, 2004

[20]. Keiser, Joseph T., Brown, Chris W., Characterization of the Passive Film Formed on Weathering Steels, **Corrosion Science.** V.23 nº 3, p.251-259, 1983.

[21]. Melendéz, H. A. V. **Tese de Doutoramento**, EPUSP- São Paulo, 153p. 2000.

[22]. Kroger, F.A. **The Chemistry of Imperfections**, North-Holland Publ. Co., 1964, p.839.

Tabelas

Materiais	C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu	Fe
Aço 1010	0.10	0.46	0.21	0.008	0.015	<0.01	0.022	Bal.
Aço com 0,25% Cu	0.16	0.94	0.38	0.015	0.010	0.052	0.25	Bal.
Aço com 0,36% Cu	0.12	0.49	0.22	0.008	0.016	<0.01	0.36	Bal.

Tabela 1. Composição química dos aços em % (IPT).

Tempo de formação dos filmes / min	Aço + 0,25% de Cu	Aço + 0,36% de Cu
10	-148	-196
20	-228	-242
30	-311	-231
40	-269	-230
50	-235	-232

Tabela 2. Potencial de corrosão dos aços para os filmes formados em diferentes tempos.

	Aço + 0,25% Cu				Aço com 0,36% de Cu			
Tempo/minutos	R_{tc} ($\Omega.cm^2$)	C_{dl} (μFcm^2)	$\|Z\|_{máx}$	$\theta_{máx}$	R_{tc} ($\Omega.cm^2$)	C_{dl} (μFcm^2)	$\|Z\|_{máx}$	$\theta_{máx}$
10	$9,3x10^5$	19	$2,9x10^5$	-83	$6,8x10^5$	70	$2,3x10^5$	-80
20	$9,0x10^5$	24	$2,5x10^5$	-83	$7,5x10^5$	67	$2,3x10^5$	-83
30	$6,6x10^4$	62	$6,2x10^4$	-80	$5,3x10^5$	65	$2,3x10^5$	-83
40	$3,5x10^5$	50	$1,6x10^5$	-80	$1,4x10^6$	36	$2,0x10^5$	-83
50	$6,6x10^5$	59	$2.5x10^5$	-83	$6,6x10^5$	45	$2,5x10^5$	-83

Tabela 3. Resultados quantitativos de impedância eletroquímica para os filmes formados sobre os dois aços em diferentes tempos.

	Aço + 0,25% Cu tempo em minutos					Aço com 0,36% de Cu tempo em minutos			
	10	**20**	**30**	**40**	**50**	**10**	**20**	**30**	**40**
E_{corr} / mV	-148	-228	-311	-269	-235	-196	-242	-231	-230
i_{corr}/A cm^{-2}	$1,0x10^{-8}$	$1,4x10^{-8}$	$1,8x10^{-8}$	$5,8x10^{-8}$	$1,9x10^{-8}$	$4,5x10^{-8}$	$1,7x10^{-8}$	$2,0x10^{-8}$	$1,7x10^{-8}$
$E_{transp.}$/mV	909	907	912	912	913	910	909	914	922

Tabela 4. Resultados de E_{corr}, i_{corr}, E_{pass} e E_{transp}, obtidas das curvas de polarização para os filmes produzidos sobre os dois aços estudados.

Figuras

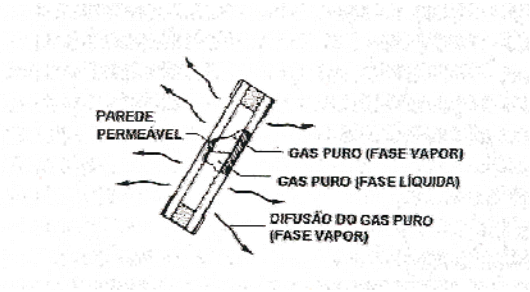

Figura 1 – Esquema de um tubo de permeação

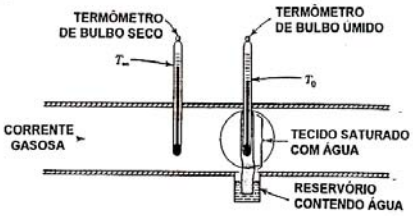

Figura 2.- Esquema de um higrômetro de bulbo seco e bulbo úmido

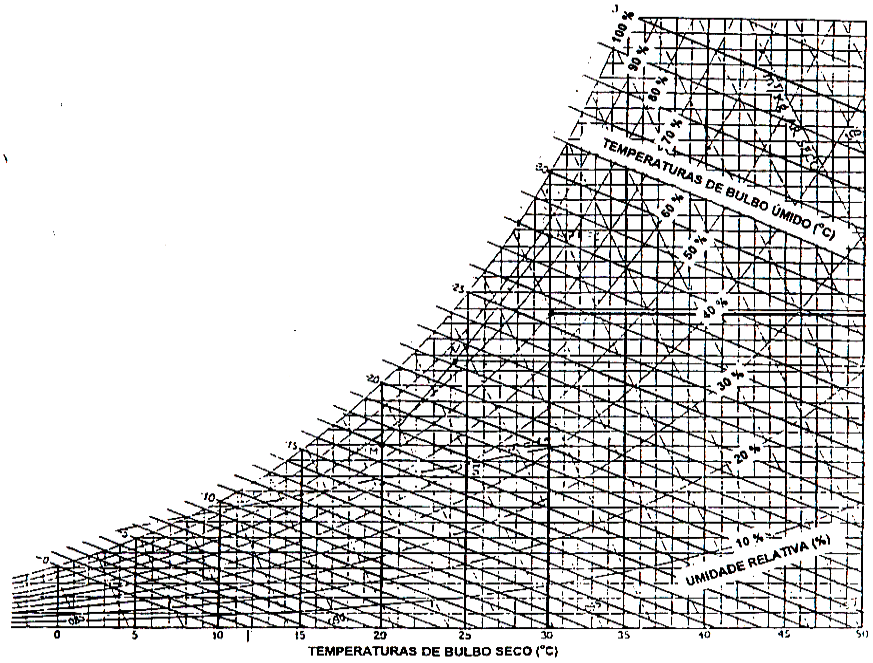

Figura **3**. Carta psicrométrica para a Cidade de São Paulo

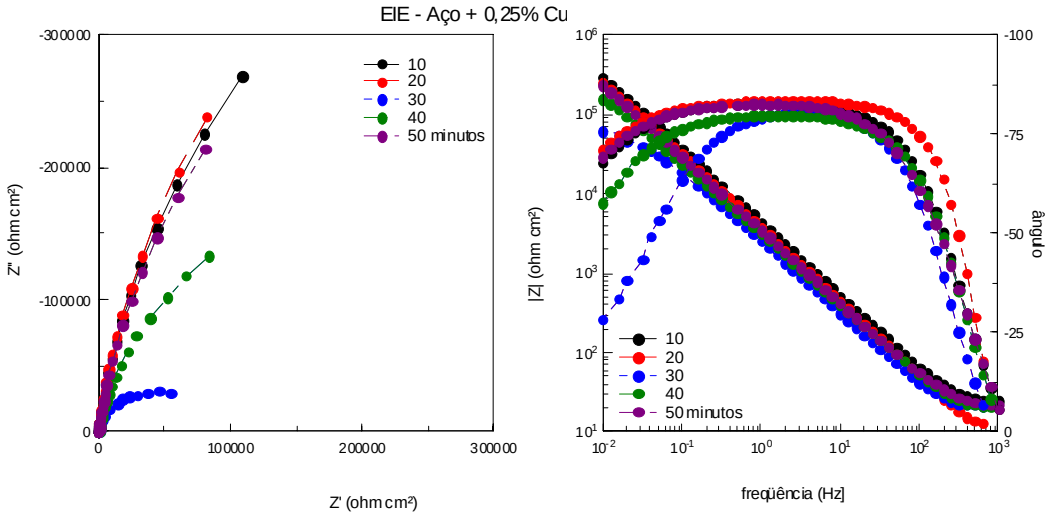

Figura 4. Diagramas de impedância eletroquímica para os filmes formados sobre o aço com 0,25% de cobre. a) Diagrama de Nyquist. b) Diagrama de Bode.

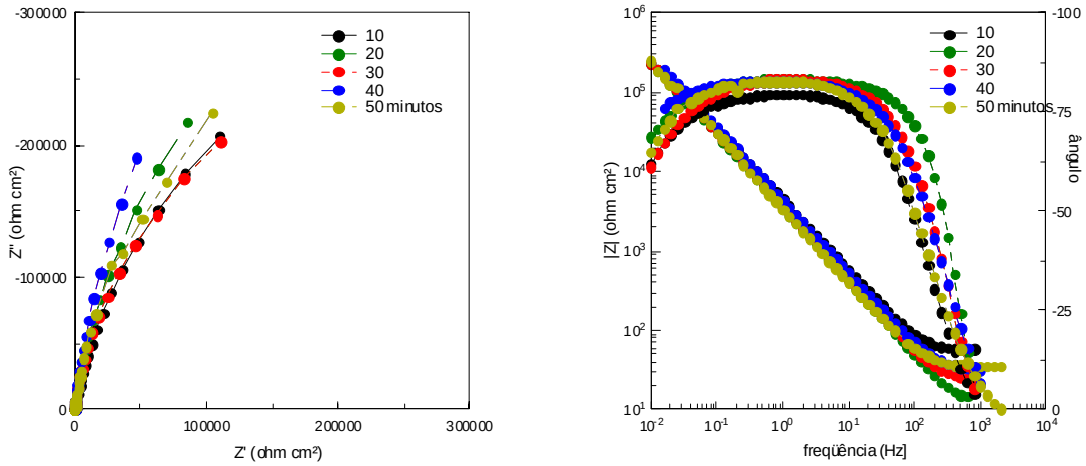

Figura 5. Diagramas de impedância eletroquímica para os filmes formados sobre o aço carbono com 0,36% de cobre. a) Diagrama de Nyquist. b) Diagrama de Bode.

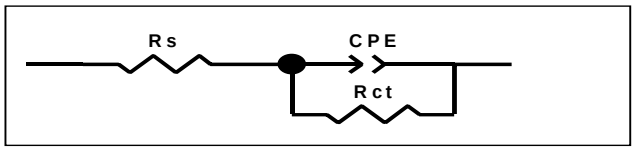

Figura 6. Circuito equivalente usado para ajuste dos resultados de EIE

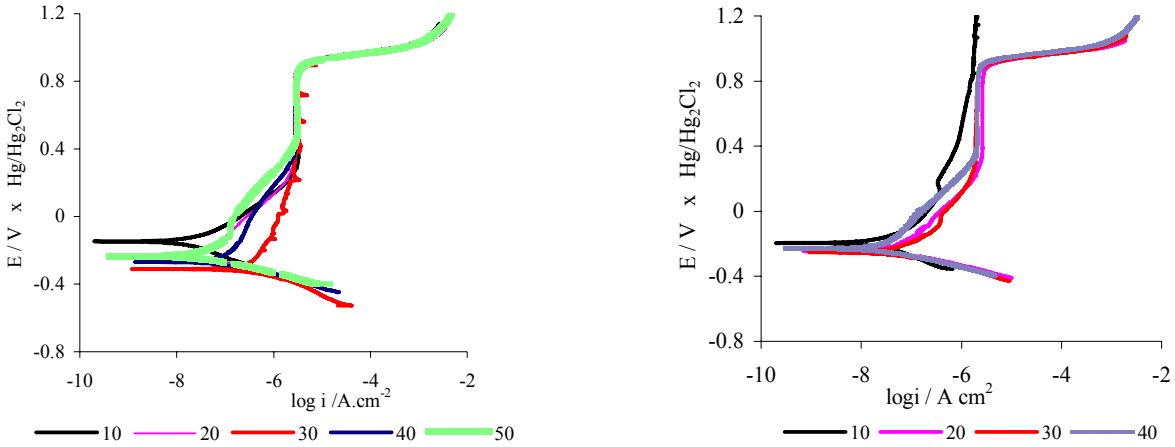

Figura 7. Curvas de polarização para os aços estudados. a) com 0,25%Cu. b) com 0,36%Cu.