

COMPARAÇÃO ENTRE TÉCNICAS ELETROQUÍMICAS NA AVALIAÇÃO DA CORROSÃO DE UM AÇO BAIXO CARBONO EM EXTRATOS DE SOLO¹

Isabela Maria Ferreira Lopes²
Carolina Afonso Oliveira de Carvalho³
Larissa Germana Oliveira Couto⁴
Célia Regina de Oliveira Loureiro⁵
Gastón Luis Alvial Moraga⁶
Rosa Maria Rabelo Junqueira⁷

Resumo

O entendimento dos mecanismos de corrosão de metais pelo solo é extremamente importante, devido ao elevado número de estruturas enterradas. A relevância que envolve estudos nessa área, está no desenvolvimento de métodos de proteção e inspeção adequados que possam colaborar para atividades de manutenção dessas estruturas, garantindo o mínimo de riscos e danos econômicos e/ou ambientais. As razões apontadas é que deram motivação ao presente trabalho, que teve como objetivo analisar, em laboratório, a potencialidade na aplicação da impedância eletroquímica na avaliação da corrosão de um aço carbono em extratos aquosos preparados a partir de dois solos, coletados nas proximidades de torres de linhas de transmissão da Cemig. Os resultados de impedância foram comparados com os de resistência à polarização linear, que é uma técnica já empregada em trabalhos de inspeção, e indicaram vantagens na utilização da impedância como técnica complementar, principalmente pela possibilidade de avaliação dos valores das resistências do meio e do material separadamente.

Palavras-chave: Corrosão; Solo; Polarização; Impedância.

COMPARATION BETWEEN ELECTROCHEMICAL TECHNIQUES IN THE EVALUATION OF LOW CARBON STEEL CORROSION IN SOIL SOLUTIONS

Abstract

The study of corrosion process of underground metals is very important due to the high number of buried structures. The relevance in the understanding of this corrosion process is focused in the developments of inspection and maintenance methods in order to minimize the environmental and/or economics damages. The aim of the present work is to explore the potentiality of the electrochemical impedance methods for evaluation of low carbon steel corrosion in solutions prepared to begin of two soils collected in areas close to Cemig transmission electric power systems. The impedance results were compared to linear polarization resistance (LPR), which is a useful technique in inspections activities. The results obtained show advantages in the use of electrochemical impedance spectrometry (EIS) as a complementary technique mainly because it is possible do obtain individual resistances values of the metal and the electrolyte from EIS, which is essential for the comprehension of the corrosion reactions.

Keywords: Corrosion; Soil; Polarization; Impedance.

¹ Contribuição técnica ao 68^o Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Química. Pesquisador MSc. Colaborador do Instituto Senai de Inovação em Engenharia de Superfície. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

³ Graduanda Eng. Metalúrgica UFMG. Estagiária. Instituto Senai de Inovação em Engenharia de Superfície. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

⁴ Química. Analista em Tecnologia. Instituto Senai de Inovação em Engenharia de Superfície. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

⁵ Engenheira Química. Pesquisador MSc.em Tecnologia do Instituto Senai de Inovação em Engenharia de Superfície. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

⁶ Química. Pesquisador Dr. Colaborador do Instituto Senai de Inovação em Engenharia de Superfície. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

⁷ Engenheira Química. Pesquisador Dr. em Tecnologia, Dr. do Instituto Senai de Inovação em Engenharia de Superfície. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

8 1 INTRODUÇÃO

O solo é um meio constituído por minerais e matéria orgânica, originado do intemperismo das rochas e do crescimento das plantas.⁽¹⁾ O entendimento dos mecanismos de corrosão de metais pelo solo é extremamente importante devido ao elevado número de estruturas enterradas, tais como tubulações para armazenamento ou distribuição de petróleo/minério e fundações de torres de linhas de transmissão de energia elétrica. Tais estruturas estão constantemente em contato com o solo, e estão sujeitas a processos de deterioração.

Atualmente, modelos estatísticos de previsão da corrosão têm sido desenvolvidos para avaliar quantitativamente, a partir de parâmetros do solo, os danos causados pela corrosão subterrânea. No entanto, essas avaliações requerem análises químicas altamente sofisticadas desse meio e, levando-se em conta a dimensão da variabilidade dos parâmetros do mesmo, tais avaliações resultam em elevados custos. Para satisfazer esses requisitos, vários estudos têm focado em relacionar um número restrito de critérios como pH, resistividade, potencial redox, umidade e concentração de íons, com a agressividade dos solos.⁽²⁾

As técnicas eletroquímicas também podem ser empregadas na avaliação da corrosividade dos solos. As principais vantagens na utilização dessas técnicas são baixo tempo requerido para as análises, sensibilidade relativamente elevada e possibilidade de monitoramento contínuo.⁽³⁾

Nos últimos anos, as técnicas que vem sendo mais utilizadas em estudos de laboratório, que visam a avaliação da corrosão pelo solo são: extrapolação das tangentes de Tafel, resistência à polarização linear (RPL) e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE),⁽⁴⁻¹⁵⁾ sendo as duas últimas abordadas nesse trabalho. A resistência à polarização linear é uma técnica de corrente DC que é relativamente simples. Ela envolve a medida da corrente (i) que responde a um potencial de baixa magnitude ($\pm 10 - 50\text{mV}$ do potencial de corrosão) aplicado. A resistência à polarização (R_p) é obtida diretamente pela inclinação da reta i versus E .⁽¹⁶⁾

A utilização da impedância no estudo de sistemas eletroquímicos envolve a aplicação de potenciais alternados da ordem de 5-10mV, obtendo-se uma resposta senoidal, que pode diferir em fase e amplitude do sinal aplicado. As medidas da diferença de fase e de amplitude permitem a análise de processos eletroquímicos em relação à contribuição por fenômenos de difusão, de adsorção, de cinética, da dupla camada, entre outros.⁽¹⁷⁾ A impedância oferece uma vantagem importante no estudo da corrosividade dos solos quando comparada com as técnicas de polarização. A técnica apresenta um nível menor de dificuldades quando se trata do estudo de solos muito resistivos (areias, por exemplo) ou pela formação de produtos de corrosão como películas de óxidos.⁽¹⁸⁾

A complexidade do solo como meio corrosivo faz com que suas condições reais sejam dificilmente reproduzidas em laboratório, pois parte das características que contribuem para agressividade do mesmo, como potencial redox e quantidade de bactérias, por exemplo, são alteradas nos processos de transporte e armazenamento. Desta forma, a quantidade de trabalhos que utilizam o solo diretamente como eletrólito é limitada, e a utilização de soluções aquosas sintéticas representativas da composição do solo, ou preparados a partir do solo em estudo, são abundantes em trabalhos que envolvem a avaliação da corrosão pelo solo. Os também chamados extratos de solos preservam os principais íons solúveis, que contribuem para o processo de corrosão.

Nesse trabalho, foi avaliado o desempenho frente à corrosão do aço baixo carbono em dois extratos aquosos, preparados a partir de dois solos distintos de regiões próximas a torres de transmissão de energia elétrica da Cemig. Visto que a técnica de polarização linear já tem sido empregada em inspeções de campo, para avaliar o estado de degradação de estruturas enterradas, esse trabalho teve como objetivo principal comparar essa técnica com a impedância eletroquímica, e avaliar as potencialidades na aplicação da última como técnica complementar em trabalhos de inspeção.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Preparação e Caracterização dos Extratos dos Solos

A preparação dos extratos aquosos dos dois solos (Solo A e Solo B) foi realizada de acordo com o procedimento seguido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – Cepel,⁽¹⁹⁾ que consistiu basicamente em manter o solo em contato com água purificada por osmose reversa e sob agitação, tempo suficiente para que as espécies de interesse pudessem ser dissolvidas. A solução foi decantada, e posteriormente submetida à filtração a vácuo em membrana de 150 mm. O extratos aquosos resultantes dos solos A e B foram caracterizados pela composição química (Tabela 1) e por medidas de condutividade e de pH (Tabela 2).

Tabela 1 - Composição química dos extratos dos solos A e B

Ânion/ Elemento	Solo A (mg/L)	Solo B (mg/L)
SO ₄ ²⁻	0,79	0,29
S ²⁻	0,02	0,09
Cl ⁻	0,29	0,32
NO ₃ ⁻	0,23	0,19
Mg	0,83	0,01
Ca	0,59	0,13
Na	0,36	0,16
K	1,58	0,29
Fe	6,36	0,22
Zn	0,05	0,22

Tabela 2 - Parâmetros pH e condutividade medidos nos extratos dos solos A e B

Parâmetro	Solo A	Solo B
pH	7,0±0,2	7,0±0,2
Condutividade (µS/cm)	117±9	76±3

2.2 Ensaios Eletroquímicos

Os ensaios eletroquímicos foram realizados em um potenciostato Autolab PGSTAT 302N acoplado a uma célula eletroquímica convencional de três eletrodos. Como eletrodo auxiliar foi utilizado um fio de platina. Como eletrodo de referência foi adotado também um fio de platina, com o objetivo de diminuir qualquer tipo de

contaminação externa, devido à baixa condutividade do meio em estudo. Os eletrodos de trabalho utilizados foram aço baixo carbono ASTM A572 G50⁽²⁰⁾ com 4mm de espessura, cortados e tratados com lixas de granulometria de 600 mesh. As amostras foram cobertas com cera de abelha artificial, obtendo-se uma área exposta de 1,0 cm². Essa montagem foi empregada em todos os ensaios eletroquímicos realizados e descritos a seguir (determinação do potencial de circuito aberto, impedância e polarização). Todos os experimentos foram conduzidos em gaiola de Faraday.

A primeira etapa dos ensaios consistiu na medição do potencial de estabilização (potencial de circuito aberto – PCA) do aço carbono em contato com os extratos de solo, durante 19800 segundos (intervalo estabelecido por estudos prévios). Esse ensaio, também chamado de cronopotenciometria, baseou-se em medir a variação do potencial desse material em relação ao eletrodo de referência, sem que o mesmo fosse submetido a qualquer tipo de potencial ou perturbação externa.

As medidas de impedância foram feitas, em seguida, na faixa de frequência de 10⁴ a 10⁻² Hz, sendo aplicados potenciais com amplitude de ±10mV do potencial de circuito aberto (PCA). Os resultados obtidos foram ajustados no programa *ZSimpWin* V3.21 a um circuito elétrico equivalente, que foi utilizado para obter os parâmetros eletroquímicos tais como, resistência ôhmica da solução (R_1), resistência à transferência de carga (R_2) e elemento de constante de fase (Q), que permitem inferir sobre o comportamento do aço carbono nos extratos de solo. A qualidade do ajuste foi analisada pelo valor de Qui-quadrado (χ^2), que avalia a proximidade entre os valores medidos e calculados pelo ajuste.

Nos ensaios de resistência à polarização linear, foram aplicados potenciais na faixa de -10mV a +10mV do valor do PCA, com velocidade de varredura de 0,1667mV/s. Os resultados dessa etapa foram avaliados pela reta adquirida i versus E, sendo i , a corrente medida e E, o potencial aplicado. A resistência à polarização (R_p) foi obtida pela inclinação da reta.

Cada ensaio eletroquímico foi conduzido em cinco amostras e a comparação entre os valores obtidos para os dois meios em estudo (extrato dos solos A e B) foi realizada por análise de variância (ANOVA) para $\alpha=0,05$. Nos resultados, os gráficos são apresentados em triplicatas (A_1 , A_2 e A_3), visando exemplificar os perfis em cada extrato de solo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 mostra os diagramas de Nyquist típicos obtidos para os extratos dos solos A e B. Como pode ser observado, não existem diferenças expressivas no comportamento do diagrama do aço carbono nos dois meios, e ambos apresentaram apenas um semicírculo capacitivo distorcido. Essa conduta indica que o processo corrosivo é predominantemente controlado pela dissolução anódica do ferro.⁽²¹⁾

Os ajustes dos resultados de impedância nos dois extratos foram feitos para o mesmo circuito elétrico equivalente ($R_1(QR_2)$) (Figura 2), onde R_1 representa a resistência ôhmica dos extratos de solo; Q representa o elemento de constante de fase (Q), que é um componente que descreve capacitâncias não ideais, geralmente relacionadas a superfícies heterogêneas^(11,22) e R_2 representa a resistência à transferência de carga do material, que tem relação direta com o desempenho frente à corrosão do mesmo no meio em estudo.

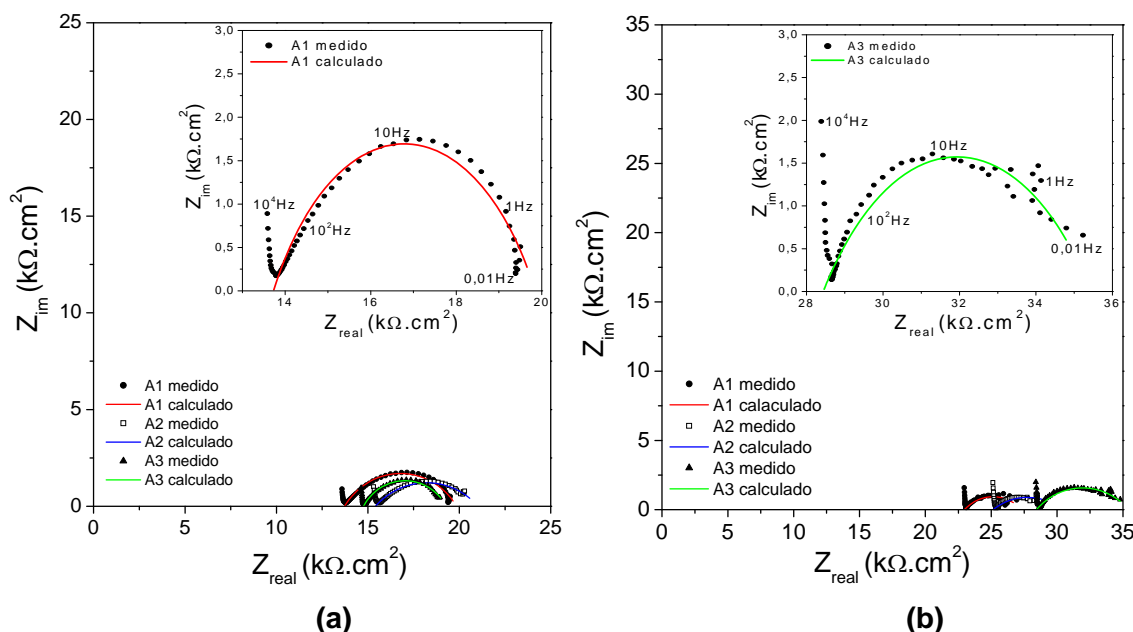


Figura 1 - Diagramas de Nyquist típicos dos ensaios de impedância realizados nos extratos dos solos (a)A e (b) B. As curvas ampliadas são apresentadas em destaque visando a melhor visualização dos semicírculos.

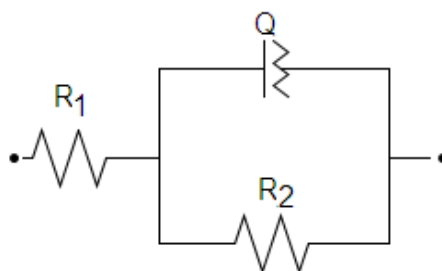


Figura 2 - Circuito elétrico equivalente proposto para o ajuste dos resultados de impedância obtidos para os extratos dos solos A e B.

A primeira observação quantitativa importante que pode ser feita pelos diagramas de Nyquist (Tabela 3), são os valores da resistência no eixo real em altas frequências, que fornecem informações a respeito da resistência ôhmica dos extratos dos solos A e B. O valor calculado, a partir do ajuste, para esse parâmetro (definido como R_1 no circuito equivalente) foi significativamente menor ($p < 0,05$) no solo A ($14,4 \pm 2,6 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$) quando comparado com o solo B ($26,7 \pm 3,4 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$).

Tabela 3 - Resultados encontrados para os ensaios de impedância realizados nos extratos dos solos A e B

Extrato de solo	PCA (V)	R_1 ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$)	C (F/cm^2)	R_2 ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$)	χ^2
Solo A	$-0,866 \pm 0,039$	$14,4 \pm 2,6$	$3,79 \times 10^{-4} \pm 5,04 \times 10^{-4}$	$5,9 \pm 1,5$	$2 \times 10^{-4} \pm 6 \times 10^{-5}$
Solo B	$-0,902 \pm 0,049$	$26,7 \pm 3,4$	$2,87 \times 10^{-4} \pm 2,88 \times 10^{-4}$	$6,8 \pm 2,9$	$5 \times 10^{-4} \pm 8 \times 10^{-5}$

Esse comportamento mostra que o extrato do solo A é menos resistivo do que o extrato do solo B, o que já havia sido demonstrado pelas médias de condutividade (Tabela 2), que é um parâmetro inversamente proporcional à resistência, e apresentou valores menores para o solo B ($76 \pm 3 \mu\text{S}/\text{cm}$) quando comparado com o solo A ($117 \pm 3 \mu\text{S}/\text{cm}$). Os diagramas de Bode (impedância total em função da

frequência) para os solos A e B (Figura 2), mostraram o mesmo comportamento descrito acima, onde os valores maiores de impedância puderam ser observados para o extrato do solo A, na região de alta frequência (10^4 Hz). É válido ressaltar que embora a resistência ôhmica dos meios seja um parâmetro que não deve mudar entre as réplicas, deve-se considerar que o meio em estudo é altamente resistivo e heterogêneo (devido ao elevado número de partículas em suspensão contidas no mesmo). Isso justifica as variações de 2,6 e $3,4\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ no valor de R_1 nos extratos dos solos A e B, respectivamente, e variação do mesmo parâmetro ainda maior no extrato do solo B, que é mais resistivo.

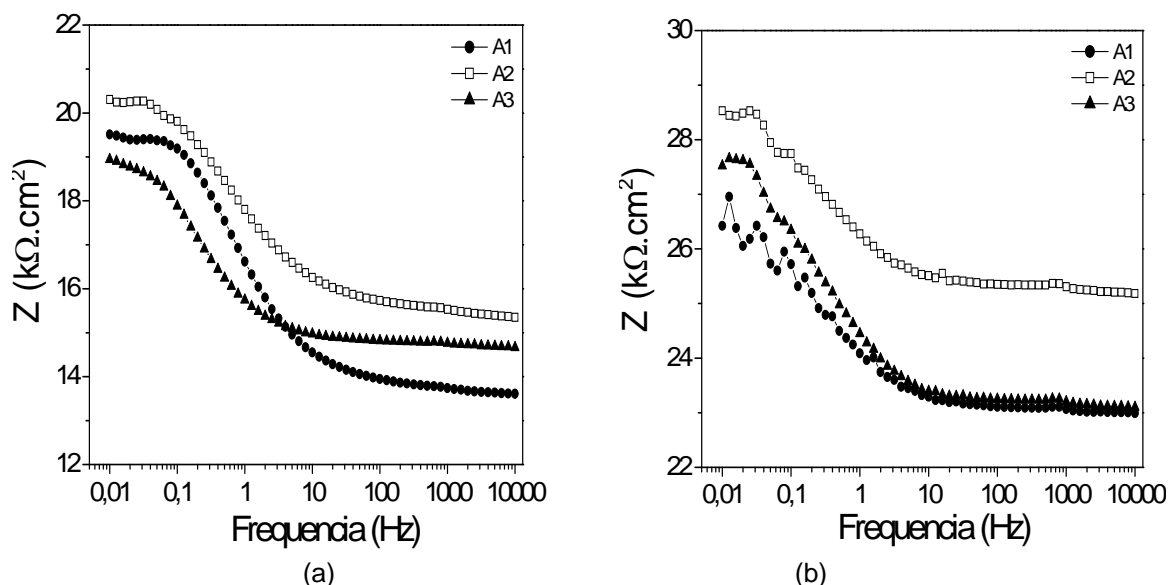


Figura 2 - Diagramas de Bode típicos do aço carbono em contato com o (a) solo A e com o (b) solo B.

No que se refere aos valores de resistência à transferência de carga (R_2) encontrados, a média para o extrato do solo A foi $5,9\pm 1,5\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ e para o extrato do solo B foi $6,8\pm 2,9\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$. A análise estatística mostrou que ambos os valores são iguais ($p>0,05$). Esses resultados indicam que embora exista uma diferença entre as resistências ôhmicas dos extratos dos dois solos, tal diferença não interfere expressivamente no desempenho frente à corrosão do aço carbono nos dois meios, o que se deve provavelmente, à alta resistividade de ambas as soluções.

Os valores de capacitância (C) calculados a partir dos elementos de constante de fase e mostrados na Tabela 3, apresentaram elevados desvios. Isso ocorre, provavelmente, devido à formação de óxido/hidroxidos de ferro, que não é um processo controlado em que se pode garantir que a quantidade desses produtos de corrosão seja a mesma entre as réplicas. Uma amostra de aço carbono que ficou em contato com o extrato de solo A durante os ensaios de impedância e polarização foi analisada por microscopia eletrônica de varredura. A imagem de elétrons retroespalhados está apresentada na Figura 3, onde pode ser observado claramente o produto de corrosão formado na superfície. Foram feitas medidas da composição química do produto de corrosão com o detector de energia dispersiva (EDS), e foi constatada a presença dos elementos oxigênio (22%), ferro (75%), alumínio (1%) e silício (2%), indicando a predominância de óxidos/hidróxidos de ferro, e de partículas dos solos em menor quantidade, devido à presença dois dos últimos elementos.

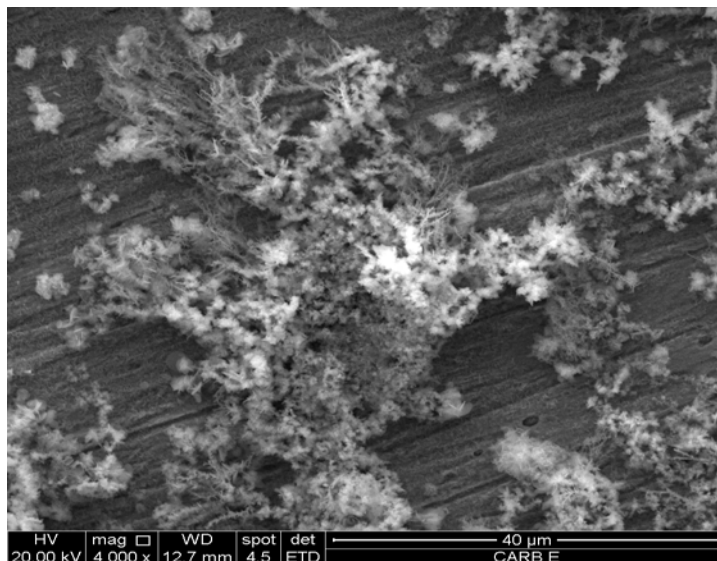


Figura 3 - Micrografia eletrônica de varredura da superfície de uma amostra de aço carbono submetida a ensaios de impedância e polarização no extrato do solo A.

Os valores encontrados para as capacitâncias (Tabela 3), não foram significativamente diferentes ($p > 0,05$). Como esse é um parâmetro que também tem relação com o desempenho do material em um meio específico, e como os dois meios em estudo são muito semelhantes e altamente resistivos, é coerente que esses valores sejam equivalentes, mesmo levando-se em consideração que os desvios encontrados foram relativamente altos.

Os ensaios de resistência à polarização linear (RPL) (Tabela 4 e Figura 4) confirmaram os resultados obtidos por impedância. Os valores de resistência à polarização (R_p), calculados pela inclinação da reta E versus i , mostram ser significativamente diferentes ($p < 0,05$) para os dois extratos de solos. No extrato do solo A foi encontrada uma média de $20,9 \pm 2,3 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ e para o solo B, uma média de $34,1 \pm 4,2 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ (Tabela 3). Esses resultados são condizentes visto que a técnica de polarização linear é uma técnica de corrente contínua, e o parâmetro R_p fornecido pela mesma representa a soma de todas as resistências do sistema, ao contrário da impedância eletroquímica, que utiliza corrente alternada e tem como principal característica a possibilidade de obtenção do valor de cada resistência separadamente.⁽⁸⁾ Desta forma, pode-se inferir que o valor de R_p foi maior para o solo B devido a uma maior contribuição ôhmica dessa solução, já que a mesma apresenta menor condutividade (Tabela 2) e maior resistência, como confirmado nos ensaios de impedância, pelo valor de R_1 . Esses resultados podem ainda ser confirmados pela soma entre as resistências ($R_1 + R_2$) encontradas na técnica de impedância, que por análise estatística mostraram ser iguais ($p > 0,05$) aos valores de R_p , encontrados pela técnica de RPL (Tabela 3).

Tabela 4 - Resultados encontrados para os ensaios de polarização linear nos extratos dos solos A e B

Extrato de solo	R_p Linear ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$)	$R_1 + R_2$ ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$)
Solo A	$20,9 \pm 2,3$	$20,3 \pm 1,8$
Solo B	$34,1 \pm 4,2$	$33,5 \pm 4,9$

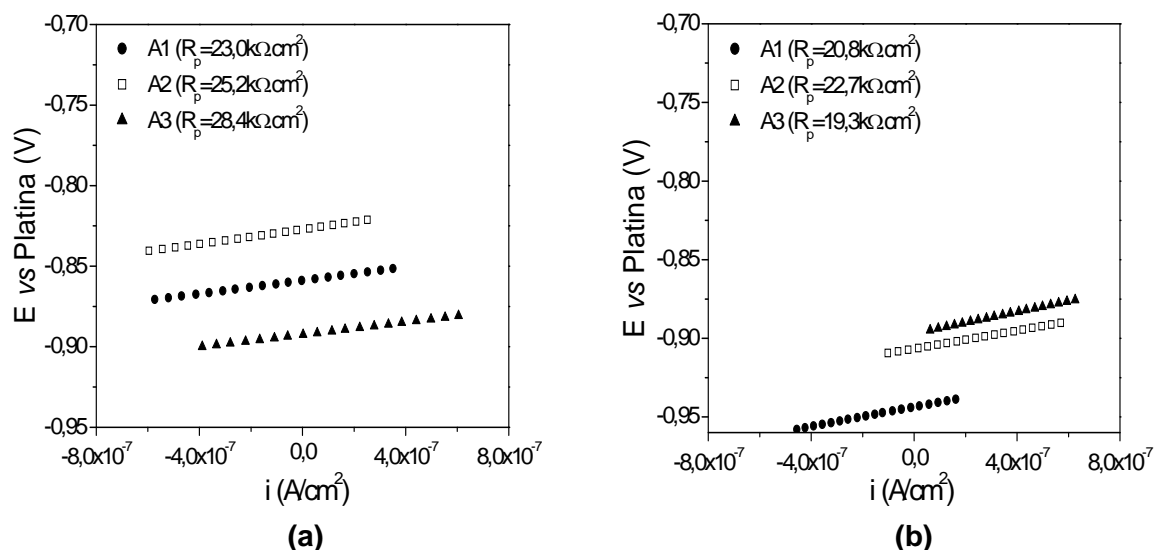


Figura 4 - Retas típicas i versus E obtidas nos ensaios de resistência a polarização linear realizados nos extratos dos solos (a) A e (b) B.

4 CONCLUSÕES

- Os resultados de impedância mostram a versatilidade da técnica em separar as resistências do sistema, o que permitiu constatar que embora exista uma pequena diferença entre os dois meios estudados, essa diferença não interfere expressivamente no desempenho frente à corrosão do aço carbono;
- Os dois meios em estudo mostraram ser bastante semelhantes e pouco agressivos, devido à elevada resistência à transferência de carga do aço carbono obtida para os dois extratos de solo, que por sua vez apresentaram elevada resistência ôhmica;
- Embora a técnica de resistência à polarização linear seja mais rápida e direta do que a impedância eletroquímica, que requer análises mais sofisticadas, a mesma deve ser aplicada com critério, principalmente em meios muito resistivos, já que fornece a soma de todas as resistências do sistema;
- Os resultados mostraram que a impedância eletroquímica é uma técnica potencialmente promissora em atividades de inspeção, podendo fornecer valores complementares à técnica de resistência à polarização linear;
- Visto que os mecanismos de corrosão de estruturas metálicas enterradas são considerados extremamente complexos, esse estudo, realizado em laboratório, pode contribuir para trabalhos futuros que serão realizados em campo. Entretanto, para aplicação das técnicas eletroquímicas no solo “*in natura*”, estas devem ser adaptadas, considerando condições de resistividade ainda mais elevada do solo em relação ao extrato de solo, presença de possíveis sinais interferentes e a elevada heterogeneidade desse tipo de meio.

Agradecimentos

Os autores do trabalho agradecem ao apoio financeiro recebido da CEMIG GT e ANEEL pelo programa “P&D ANEEL”, projeto GT340.

REFERÊNCIAS

- 1 BRADFORD, S. A. *Practical Handbook of Corrosion Control in Soil*. CAST Publications, Canada, 2002.
- 2 BARBALAT, M.; LANARDE, L.; CARON, D.; MEYER, M.; VITTONATO, J.; CASTILLON, F. E FONTAINE, S.; REFAIT, PH. *Electrochemical Study of the Corrosion Rate of Carbon Steel in Soil: Evolution With Time and Determination of Residual Corrosion Rates Under Cathodic Protection*. *Corrosion Science*, v.55, p.246–253, 2012.
- 3 LORENTZ E MANSFELD. *Determination of Corrosion Rates by Electrochemical DC and AC Methods*. *Corrosion Science*, v.21, n.9, p.647-672, 1981.
- 4 BENMOUSSA, A.; HADJEL, M.; TRAISNEL, M. *Corrosion Behavior of API 5L X-60 Pipeline Steel Exposed to Near-Neutral pH Soil Simulating Solution*. *Materials and Corrosion*, v.57, n.10, p.771-777, 2006.
- 5 OLIVEIRA, J. R. *Aplicação de Métodos Eletroquímicos para a Análise da Corrosividade do Solo*. 2007. 187 folhas. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007*.
- 6 BUENO, H. A. S. *Avaliação Integrada de Mecanismos de Falha por Corrosão em Dutos*. 2007. 295 folhas. *Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2007*.
- 7 WU, Y. H.; LIU, T. M.; LUO, S. X.; SUN, C. *Corrosion Characteristics of Q235 Steel in Simulated Yingtan Soil Solutions*. *Mat.-wiss. u.Werkstofftech*, v.41, n.3, p.142-146, 2010.
- 8 NIE, X. H.; LI, X. G.; DU, W. C.; CHENG, Y. F. *Temperature Dependence of the Electrochemical Corrosion Characteristics of Carbon Steel in a Salty Soil*. *Journal Applied Electrochemical*, n.39, p.277–282, 2009.
- 9 LIU, T. M.; WU, Y. H.; LUO, L; X.; SUN, C. *Effect of Soil Compositions on the Electrochemical Corrosion Behavior of Carbon Steel in Simulated Soil Solution*. *Mat.-wiss. u.Werkstofftech*, v.41, n.4, p.228-233, 2010.
- 10 PINHEIRO, C. L.; SANTOS, M. C. e FILHO, J. C. C. *Estudo da Corrosão por Solos Amazônicos Através de Técnicas Eletroquímicas*. In: *INTERCORR, 2010, Fortaleza, Brasil*.
- 11 NOOR, E . A. *Comparative Analysis for the Corrosion Susceptibility of Cu, Al, Al–Cu and C-steel in Soil Solution*. *Materials and Corrosion*, v.62, n.8, p.786-795, 2011.
- 12 LINS, V. F.; FERREIRA, M. L. M.; SALIBA, A. P. *Avaliação da Corrosão de Aços Carbono Baixa Liga pelo Solo*. In: *11^a Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos – XI COTEQ, 2011, Porto de Galinhas, Brasil*.
- 13 YAHAYA, N.; NOOR, N. M.; OTHMAN, S. R.; SING, L. K.; MAT DIN, M. *New Technique for Studying Soil – Corrosion of Underground Pipeline*. *Journal of Applied Sciences*, v.11, n.9, p.1520-1518, 2011.
- 14 ALKHATEEB, E.; ALI, R.; POPOYSKA-LEIPERTZ, N.; VIRTANEN, S. *Long-Tterm Corrosion Study of Low Carbon Steel Coated With Titanium Boronitride in Simulated Soil Solution*. *Electrochimica Acta*, v.76, p.312– 319, 2012.
- 15 REN, C. Q.; XIAN, N.; WANG, X.; Liu, L.; ZHENG, Y. P. *Susceptibility of Welded X80 Pipeline Steel to Corrosion in Simulated Soil Solution*. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, v.47, n.6, p.441-445, 2012.
- 16 FRANKEL, G. S. *Electrochemical Techniques in Corrosion: Status, Limitations, and Needs*. *Journal of ASTM International*, v.5, n.2, p.1-27, 2008.
- 17 BRETT, A. M. O. e BRETT, C, M, A. *Electroquímica: Princípios Métodos e Aplicações*. Coimbra: Almedina, 1996. 471p.
- 18 PERNICE, P.; ARPAIA, M. e COSTANTINI, A. *Steel Corrosion Rate in Soil by AC e DC Electrochemical Methods*. *Material Chemistry and Physics*, v.23, p.323-330, 1990.
- 19 SERRA, E. T. *Corrosão e Proteção Anticorrosiva dos Metais no Solo*. Rio de Janeiro: CEPTEL, 2006. 169p.
- 20 *ASTM A 572/A 572M – 07 Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel*.

- 21 HARRINGTON, D. A.; DRIESSCHE, P. V. D. Mechanism and Equivalent Circuits in Electrochemical Impedance Spectroscopy. *Electrochimica Acta*, v.56, p.8005–8013, 2011.
- 22 LEBRINI, M.; TRASNEL, M.; GENGEMBRE, L.; FONTAINE, G.; LERASLE, O.; GENET, N. Electrochemical Impedance Spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy study of the Corrosion Behavior of Galvanized Steel and Electroplating Steel. *Applied Surface Science*, v.257, p.3383–3387, 2011.