

Resistividade do solo de linhas de transmissão por espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS)

Soil resistivity of transmission lines by electrochemical impedance spectroscopy (EIS)

DOI:10.34117/bjdv6n12-013

Recebimento dos originais: 02/11/2020

Aceitação para publicação: 02/12/2020

Tiago Scheffer de Matos

Estruturas Civas, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Lactec)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais (PIPE), Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Centro Politécnico da UFPR. R. Cel. Francisco Heráclito dos Santos, 100. Curitiba, CEP 81531-980, PR
E-mail: tiago.matos@lactec.org.br

Kleber Franke Portella

Estruturas Civas, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Lactec)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais (PIPE), Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Centro Politécnico da UFPR. R. Cel. Francisco Heráclito dos Santos, 100. Curitiba, CEP 81531-980, PR
E-mail: portella@lactec.org.br

Sérgio Luiz Henke

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná (UFPR)
Centro Politécnico da UFPR. R. Cel. Francisco Heráclito dos Santos, 100. Curitiba, CEP 81531-980, PR
E-mail: henke@ufpr.br

Mariana D'Orey Gaivão Portella Bragança

Estruturas Civas, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Lactec)
Rodovia BR 116, km 98, nº 8.813. Curitiba, CEP 81530-180, PR
E-mail: mariana.portella@lactec.org.br

Larissa Medeiros de Almeida

Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), Transmissora Aliança de Energia Elétrica S.A (TAESA)
Praça XV de Novembro 20, Rio de Janeiro, CEP 20010-010, RJ
E-mail: larissa.almeida@taesa.com.br

RESUMO

Nesse estudo foi utilizado a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) para avaliar a resistividade do solo de torres de linhas de transmissão e os resultados comparados com os ensaios conduzidos pela norma ASTM G187. Também foi avaliada a variação dos resultados de resistividade com a frequência. Os resultados resistividade calculados pelo valor de impedância real na frequência onde foi encontrado o menor ângulo de fase, na faixa de kHz, foram estatisticamente iguais aos encontrados pelo método normatizado. Além disso, foram obtidos resultados estatisticamente iguais na frequência de 10 kHz, porém o mesmo não aconteceu para um dos solos na frequência de 1,0 kHz.

Palavras chave: Espectroscopia de Impedância eletroquímica, Resistividade do solo, torres de transmissão, ensaios não destrutivos.

ABSTRACT

In this study, the electrochemical impedance spectroscopy (EIS) technique was used to evaluate the soil resistivity of transmission line towers and the results compared with the tests conducted by the ASTM G187 standard. Furthermore, the variation of resistivity results with frequency was evaluated. The resistivity results calculated by the real impedance value at the frequency where the smallest phase angle was found, in the kHz range, were statistically equal to those found by the standardized method. Moreover, statistically equal results were obtained at the frequency of 10 kHz, the same did not happen for one of the soils at the frequency of 1.0 kHz.

Keywords: Electrochemical impedance spectroscopy, Soil resistivity, Transmission towers, Nondestructive testing.

1 INTRODUÇÃO

Em um estudo sobre os fatores que influenciaram a corrosão de oleodutos no solo, foi identificado que o contato do metal com o solo corrosivo representou 67% dos casos reportados. O restante foi devido a danos no revestimento, contato com metais dissimilares, correntes espúrias e outras causas não identificadas [1] [2].

Em torres de linhas de transmissão estaiadas a corrosão, devido ao contato do sistema de ancoragem com o solo corrosivo, pode levar à perda de sustentação e, até mesmo, a sua queda, podendo resultar no colapso do fornecimento de energia elétrica ocasionando custos diretos e indiretos às empresas do setor elétrico e à sociedade [3][4]. Além disso, um recente estudo evidenciou aspectos relacionados a corrosão do sistema de aterramento no setor elétrico e a suscetibilidade a corrosão dos materiais frequentemente utilizados [5]. Zhang e colaboradores desenvolveram um método para avaliar a corrosão do sistema de aterramento em solo, baseado na sua resistência e na resistividade do solo [6].

A resistência do solo à passagem de corrente elétrica, é um indicador da sua agressividade, pois geralmente está relacionada com a sua composição, umidade e teor de sais dissolvidos. Essa resistência pode ser definida pela Equação 1.

$$R = \rho \frac{d}{A} \quad (1)$$

Onde, ρ é a resistividade do solo, d é a distância entre os eletrodos e A é a área da superfície do eletrodo. Quando a área do eletrodo é igual a 1 cm² e a distância entre eles é igual a 1 cm, a resistência é chamada de resistência específica, que é mais conhecida como resistividade (ρ). Os termos resistência e resistividade, muitas vezes utilizados de forma análoga, são diferentes[7]

Quanto menor a sua resistividade (ou, maior a condutividade), mais intenso será o processo corrosivo, devido, principalmente, ao transporte de íons no meio [8].

No solo ocorre uma combinação do efeito da condução da partículas de solo, do fluido dos poros, além da contribuição da condução superficial dos contra íons da dupla camada difusiva da superfície das partículas conforme reportado na literatura [9].

Em um recente estudo foi destacado que na análise de resistividade a polarização em células com dois eletrodos pode interferir nas medidas de resistividade. Devido a isso foi utilizada a corrente alternada (CA) na frequência de 1,0 kHz para análises de resistividade do solo em laboratório. Nesse estudo, soluções de NaCl com diferentes concentrações foram adicionadas ao solo para aumentar a sua condutividade [10].

Uma outra maneira de obter a resistência a passagem de corrente de um material é por meio da técnica de EIS, que é baseada na aplicação de uma perturbação AC de baixa amplitude, na forma de corrente ou potencial, em determinada frequência. Geralmente são realizadas várias medidas de impedância em uma determinada faixa de frequência, e devido a isso essa técnica é chamada de espectroscopia de impedância eletroquímica. Assim é possível investigar os principais parâmetros físico-químicos tanto do material quanto da sua interface [6] [9].

Em um estudo das propriedades dos materiais cimentícios por EIS, realizado em altas frequências (acima de 10 kHz), foi possível obter a resposta dielétrica do material, visualizada no semicírculo em altas frequências. Por meio do valor da resistência em altas frequências foi calculada a resistividade do material, considerando a geometria da célula e a distância entre os eletrodos [12].

Embora, a técnica de EIS tenha sido aplicada em diversas áreas de conhecimento [13]–[18], a grande maioria desses estudos não foi desenvolvida com o objetivo de aplicação em campo.

Nesse estudo foi utilizada a técnica de EIS para obtenção da resistividade do solo em campo e os resultados foram comparados com os ensaios conduzidos no laboratório pelo método ASTM G-187 [19].

2 EXPERIMENTAL

2.1 MATERIAIS

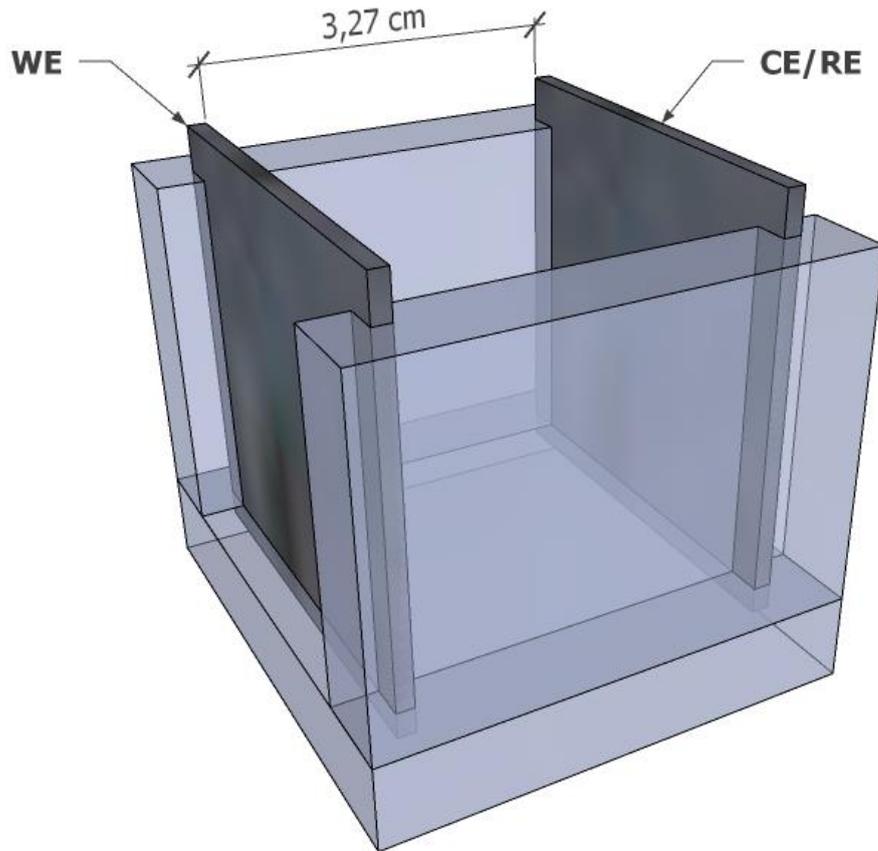
Foram utilizadas três amostras de solos de diferentes regiões de uma linha de transmissão localizada no nordeste do Brasil. As amostras foram coletadas a uma profundidade de 40 cm da superfície e enviadas ao laboratório.

Para a realização dos ensaios de resistividade do solo foi utilizado um regulador de voltagem da marca JNG® modelo TDGC₂-2kVa, com capacidade de 2000 VA e 8 A, com saída de 0-250 V, sendo utilizado a faixa de 0-30 V. As leituras de corrente foram realizadas com um multímetro da marca Minipa.

Nos ensaios de resistividade por EIS foi utilizado um potenciostato/galvanostato modelo Reference 600+ da marca Gamry. Onde as condições de análise foram inseridas no software Gamry Framework e os dados analisados no software Gamry Echem Analyst.

Uma célula de acrílico na configuração de dois eletrodos constituídos de aço inoxidável, Figura 1, com dimensões (4,00 x 3,80) cm, ou seja, área de 14,4 cm², separados por uma distância de 3,27 cm, foi utilizada para a realização dos ensaios de resistividade pelos dois métodos. Esse modelo de célula já foi utilizada em outros estudos de resistividade [20].

Figura 1. *Soil box* utilizada nos ensaios de resistividade com a indicação dos eletrodos de trabalho (WE), contra eletrodo (CE) e de referência (RE)



2.2 MÉTODOS

Nas análises de resistividade do solo pelo método ASTM G187, pequenas porções de solo foram adicionadas a célula com posterior compactação e adição de água destilada em pequenas quantidades até o seu preenchimento.

Para o ensaio normatizado pela ASTM, foi utilizado um regulador de voltagem para obter a resistência entre os eletrodos, ao invés do equipamento que fornece o valor da resistência, chamado de “*soil resistance meter*”. Nesse caso foram executadas as curvas de corrente vs. potencial na faixa de 0-30 V, com medidas de corrente a cada 5 V e o coeficiente angular (resistência) obtido nesse ensaio foi multiplicado pelo fator da célula para obter o resultado de resistividade em $\Omega.m$, conforme Eq. 02. O fator geométrico da célula foi calculado levando em consideração a área da face do eletrodo dividido pela distância entre eles. Nesse caso o fator obtido para a célula utilizada foi de 0,044.

$$\text{Coeficiente angular } (\Omega) \times \text{Fator } (m) = \text{Resistividade } (\Omega.m) \quad (02)$$

Nos ensaios de resistividade por EIS, foi executado o mesmo procedimento de enchimento da célula conforme recomendado pela norma ASTM G187 e logo após foi realizada a análise de EIS em potencial de circuito aberto, na faixa de frequência de 5 MHz até 0,1 Hz, com uma amplitude de sinal de 25 mV (rms) e aquisição de 7 pontos por década de frequência.

A duração da análise de EIS foi de aproximadamente 4 min nas condições de análise citadas anteriormente. Caso seja utilizada a varredura de frequência de 5 MHz até 1,0 Hz esse tempo é de 1 min 38 s.

O valor de impedância real (Z_{real}) que foi utilizado no cálculo da resistividade, foi selecionado na mesma frequência onde foi encontrado o menor valor do ângulo de fase (mais próximo de zero), chamado de ângulo de fase mínimo nesse estudo, no diagrama de Bode.

Esse valor de impedância real (Z_{real}) em $\Omega.cm^2$, foi dividido pela distância entre os eletrodos (3,27 cm), onde foi obtido o valor de resistividade em $\Omega.cm$, e esse valor foi convertido $\Omega.m$ ($\Omega.cm/100$), unidade utilizada nesse estudo.

Todas as análises foram realizadas em triplicata e a concordância dos dados obtidos pelos dois métodos foi avaliada pela análise de variância anova.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

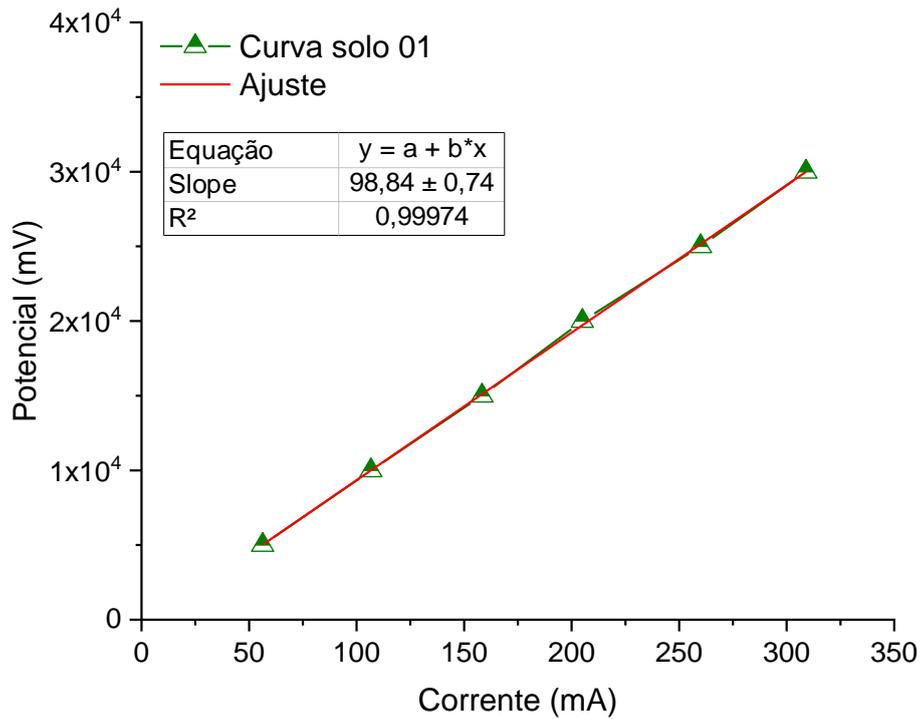
A resistividade do solo obtida pelos ensaios conduzidos em uma célula de 2 eletrodos, conforme recomendado a norma ASTM G187, foi comparada com os resultados obtidos pelos ensaios de EIS.

Na Figura 2 é possível visualizar a curva de corrente vs. potencial para o primeiro ensaio dos três realizados no solo 01. O coeficiente angular da curva foi de $98,84 \pm 0,74 \Omega$, o que indicou a resistência do solo entre as duas placas da *soil box* para a primeira análise da triplicata. Quando esse valor foi multiplicado pelo fator da célula (0,044 m), foi encontrado o valor aproximado de $4,35 \Omega.m$. Já o resultado médio obtido após as três análises realizadas foi de $4,28 \pm 0,60 \Omega.m$.

Por meio da análise de EIS no solo 01, foi encontrado o valor de Z_{real} de $1431,9 \Omega.cm^2$ no diagrama no plano complexo, Figura 3, o que representa uma resistividade de $4,38 \Omega.m$ para a primeira análise realizada. O valor de $4,31 \pm 0,14 \Omega.m$ foi encontrado após a triplicata ter sido realizada.

As análises realizadas por EIS no solo 01, foram mais precisas que as conduzidas pelo método ASTM G187.

Figura 2. Curva de corrente versus potencial para uma das análises realizadas no solo 01 pelo método ASTM G187



Na Figura 4, é possível observar a variação do ângulo de fase para o primeiro ensaio de EIS realizado no solo 01. Na frequência de 18,7 kHz foi encontrado o menor ângulo de fase, o que indicou a maior contribuição de elementos resistivos no valor de impedância obtido.

Figura 3 - Diagrama no plano complexo da primeira análise realizada no solo 01 pela técnica de EIS, com informações do valor de Z_{real} e a frequência onde foi obtido.

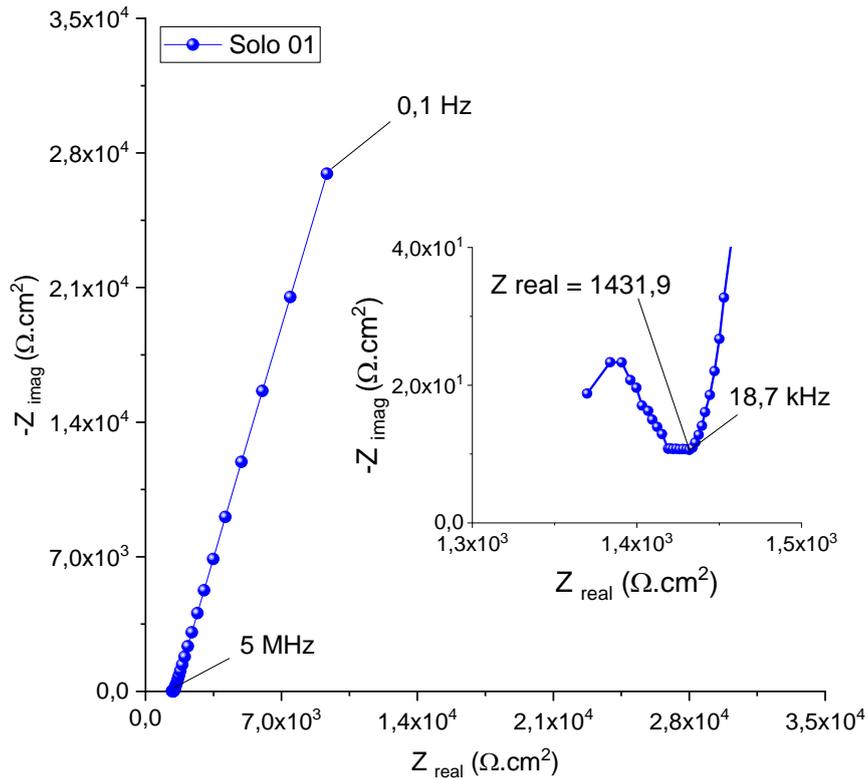
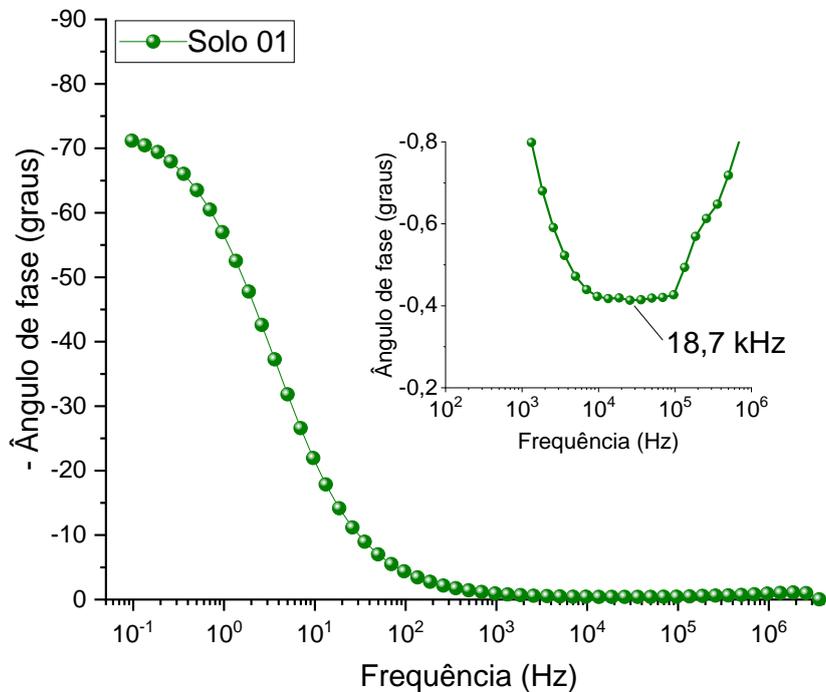


Figura 4 - Diagrama Bode da primeira análise realizadas no solo 01 pela técnica de EIS, com informações da frequência onde foi encontrado o ângulo de fase mínimo.



Nas Figuras 5 e 6 é possível observar os diagramas no plano complexo para as amostras de solo 02 e solo 03, com a indicação do valor de Z_{real} e a frequência onde foi obtido o menor ângulo de fase na região em altas frequências (kHz).

O solo 03, foi a amostra com a maior resistividade entrada pelos métodos utilizados, na faixa de $200 \Omega.m$. Por meio do ensaio de EIS, foi possível observar a presença de um semicírculo em altas frequências, possivelmente devido as características dielétricas do material. Além disso, o tamanho desse semicírculo foi menor no solo 02 e 01, com menores resistividade, o que corrobora com essa hipótese, além do reportado com outros materiais na literatura [12].

Os resultados das análises realizadas nas três amostras de solo pelos dois métodos podem ser visualizados na Tabela 1. Esses valores foram considerados estatisticamente iguais segundo a análise de variância.

Figura 5 - Diagrama no plano complexo da primeira análise realizada no solo 02 pela técnica de EIS, com informações do valor de Z_{real} e a frequência onde foi obtido.

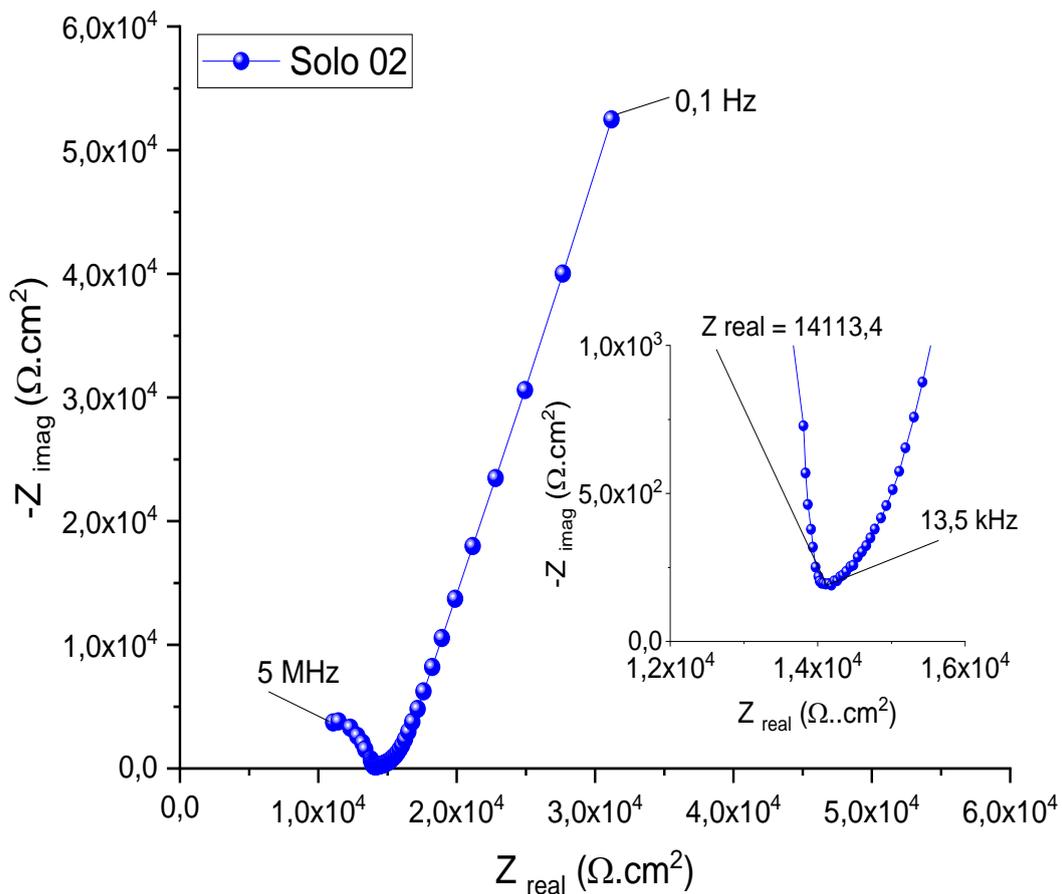


Figura 6 - Diagrama no plano complexo da primeira análise realizada no solo 03 pela técnica de EIS, com informações do valor de Z_{real} e a frequência onde foi obtido

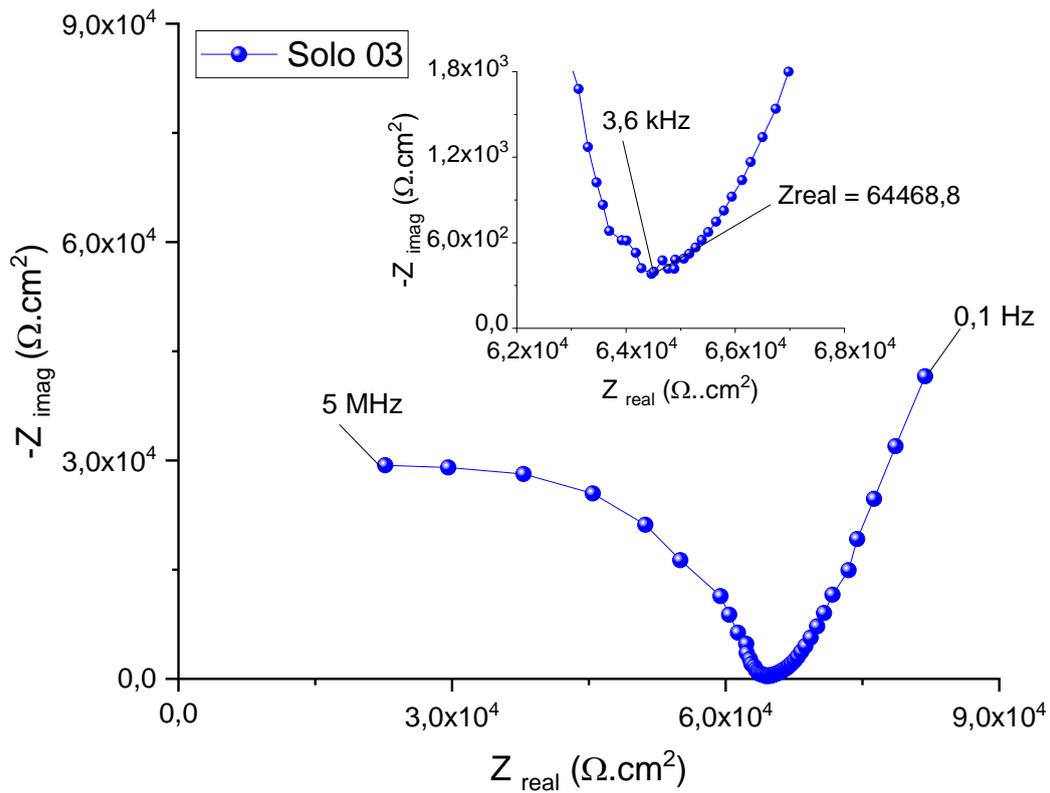


Tabela 1 - Resultados de resistividade de 3 amostras de solo pelo método ASTM G187 e pelo método proposto por EIS.

Parâmetro	Solo 01	Solo 02	Solo 03
Resistividade ASTM G-187 ($\Omega.m$)	$4,28 \pm 0,60$	$42,79 \pm 1,42$	$202,52 \pm 2,31$
Resistividade EIS ($\Omega.m$)	$4,31 \pm 0,14$	$43,25 \pm 0,83$	$198,91 \pm 11,80$

No solo 01 e 02 foi encontrado a menor dispersão nos resultados de resistividade pela técnica de EIS, entretanto no solo 03 o ensaio realizado pela técnica ASTM teve a menor dispersão. Isso se deve principalmente devido a menor amplitude utilizada na técnica de EIS (25 mV) em relação a técnica ASTM, o que pode levar a dificuldade da passagem de corrente em solo mais resistivos.

A influência da escolha de frequências específicas (10,0 kHz e 1,0 kHz) para a análise de resistividade foi avaliada, por meio dos resultados que foram obtidos a partir Z_{real} no menor ângulo de fase, e nessas frequências, como pode ser visualizado Tabela 2.

Os resultados de resistividade do solo 02 foram considerados estatisticamente diferentes segundo a análise de variância, e por meio do teste de Tukey, foi identificado que o resultado na frequência de 1,0 kHz foi considerado diferente em relação aos resultados na frequência de 10,0 kHz

e na frequência do menor ângulo de fase (13,5 kHz). Já no solo 01 e 03 os resultados foram estatisticamente iguais para as frequências de menor ângulo de fase, 10,0 e 1,0 kHz.

Esse resultado não corrobora com aquele encontrado pelo estudo da referência [9], que utilizou a frequência de 1,0 kHz para análise de resistividade do solo [10]. Essa diferença nos resultados obtidos pode ser devida a diferença na geometria da célula utilizada e a forma de condução da corrente elétrica no solo, que é distinta de soluções aquosas, utilizadas para a escolha da frequência de 1,0 kHz no referido estudo.

Tabela 2 - Resultados de resistividade de 3 amostras de solo por EIS com o cálculo utilizando o valor de Z_{real} no ângulo de fase mínimo e na frequência de 10,0 e 1,0 kHz.

Parâmetro	Z real	Solo 01	Solo 02	Solo 03
Resistividade EIS ($\Omega.m$)	ângulo mínimo	4,31 ± 0,14	43,25 ± 0,83	198,91 ± 11,80
Resistividade EIS ($\Omega.m$)	10,0 kHz	4,32 ± 0,15	43,63 ± 0,69	197,80 ± 11,01
Resistividade EIS ($\Omega.m$)	1,0kHz	4,37 ± 0,16	44,59 ± 0,70	199,49 ± 10,40

A contribuição da dupla camada elétrica formada na superfície dos eletrodos pode explicar o aumento nos valores de resistividade no solo 02 na frequência de 1,0 kHz, visto que esse fenômeno é dependente da frequência. Isso corrobora com a literatura que indica frequências na ordem de kHz ou superiores para minimizar os efeitos dos eletrodos nas medidas de resistividade do solo [9].

4 CONCLUSÕES

Por meio da avaliação dos resultados conclui-se que é possível utilizar a técnica de EIS para avaliar a resistividade de solos na faixa de 4,0 -200,0 $\Omega.m$. Sendo que os resultados obtidos foram estatisticamente iguais aos encontrados pelo método normatizado ASTM G187.

Também foi constatado que os resultados, obtidos por meio de Z_{real} no menor ângulo de fase em altas frequências (kHz), foram estatisticamente iguais a aqueles obtidos na frequência de 10 kHz. Já o resultado de resistividade do solo 02, na frequência de 1,0 kHz, foi considerado estatisticamente diferente ao resultado encontrado na frequência de 10,0 kHz e na frequência do menor ângulo de fase para esse solo (13,5 kHz).

Com a utilização de potenciostatos/galvanostatos portáteis com módulo de EIS, em conjunto com uma *soil box* será possível avaliar a resistividade do solo em campo de maneira rápida e precisa. Sendo que essa avaliação da agressividade do solo, por meio da sua resistividade, pode ser utilizada na

definição da periodicidade de inspeção ou medidas adicionais de proteção para estruturas enterradas em solo com baixa resistividade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à infraestrutura e ao apoio em recursos humanos e financiamento à TAESA, projeto P&D 07130-0045/2016, à ANEEL, aos Institutos LACTEC, ao CNPq Lei 8010/90 (LI 15/2187214-1; LI 14/4695814-5; LI14/3410726-9), ao P&D COPEL 6491-0301/2013, ao CNPq/PIBIT e de bolsa DT, processo 302672/2016-8 e à Universidade Federal do Paraná - PIPE/UFPR.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Wasim, S. Shoaib, N. M. Mubarak, Inamuddin, and A. M. Asiri, "Factors influencing corrosion of metal pipes in soils," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 16, no. 3, pp. 861–879, 2018, doi: 10.1007/s10311-018-0731-x.
- [2] A. I. M. Ismail and A. M. El-Shamy, "Engineering behaviour of soil materials on the corrosion of mild steel," *Appl. Clay Sci.*, vol. 42, no. 3–4, pp. 356–362, 2009, doi: 10.1016/j.clay.2008.03.003.
- [3] M. Krishnadev, M. Larouche, V. I. Lakshmanan, and R. Sridhar, "Fracture of high carbon high strength anchor rods," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 15, no. 8, pp. 1009–1018, 2008, doi: 10.1016/j.engfailanal.2007.11.021.
- [4] L. M. de A. Assiel. A. Adada, Tiago S. de Matos, Mariana D'Orey Gaivão Portella Bragança, Luiz A. de Lacerda, "Corrosion Grade on Anchor Rods of Guyed Transmission Towers Applying Machine Committee," *Braz. J. of Develop.*, vol. 6, no. 10, pp. 88988–83003, 2020.
- [5] A. Ghavamian, M. R. Maghami, S. Dehghan, and C. Gomes, "Concerns of corrosive effects with respect to lightning protection systems," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 57, pp. 434–443, 2015, doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.08.019.
- [6] Z. Zhang, D. Mei, Y. Dan, J. Zou, G. Liu, and C. Gao, "Novel method for diagnosing corrosion of grounding electrodes in soil," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 178, no. July 2019, p. 106049, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2019.106049.
- [7] G. Kreysa, *Encyclopedia of Applied Electrochemistry*. 2014.
- [8] L. Lazzari, "Corrosion in Water, Soil and Air," *Eng. Tools Corros.*, pp. 81–100, 2017, doi: 10.1016/B978-0-08-102424-9.00005-7.
- [9] K. A. Klein and J. C. Santamarina, "Electrical Conductivity in Soils: Underlying Phenomena," vol. 8, no. 4, pp. 263–273, 2003.
- [10] A. S. P. Peixoto, M. T. Yamasaki, and P. C. Lodi, "Evaluation of electrical resistivity in a tropical sandy soil compacted," *Electron. J. Geotech. Eng.*, vol. 19 C, pp. 629–644, 2014.
- [11] A. Lasia, *Electrochemical Impedance Spectroscopy and its Applications*. London: Springer International Publishing, 2014.
- [12] X. R. Nóvoa, "Electrochemical aspects of the steel-concrete system. A review," *J. Solid State Electrochem.*, vol. 20, no. 8, pp. 2113–2125, 2016, doi: 10.1007/s10008-016-3238-z.
- [13] M. Yan, C. Sun, J. Dong, J. Xu, and W. Ke, "Electrochemical investigation on steel corrosion in iron-rich clay," *Corros. Sci.*, vol. 97, pp. 62–73, 2015, doi: 10.1016/j.corsci.2015.04.013.
- [14] M. C. Santos, C. L. Pinheiro, and J. C. A. C. De Filho, "Investigação do processo de corrosão causado pela polpa de bauxita em mineroduto de aço carbono," *Rev. Mater.*, vol. 20, no. 1, pp. 178–184, 2015, doi: 10.1590/S1517-707620150001.0018.

- [15] F. Batmanghelich, L. Li, and Y. Seo, "Influence of multispecies biofilms of *Pseudomonas aeruginosa* and *Desulfovibrio vulgaris* on the corrosion of cast iron," *Corros. Sci.*, vol. 121, pp. 94–104, 2016, doi: 10.1016/j.corsci.2017.03.008.
- [16] Y. Yan, Q. Fang, L. Blum, and W. Lehnert, "Performance and degradation of an SOEC stack with different cell components," *Electrochim. Acta*, vol. 258, pp. 1254–1261, 2017, doi: 10.1016/j.electacta.2017.11.180.
- [17] J. Tedim, M. L. Zheludkevich, A. C. Bastos, A. N. Salak, A. D. Lisenkov, and M. G. S. Ferreira, "Influence of preparation conditions of Layered Double Hydroxide conversion films on corrosion protection," *Electrochim. Acta*, 2014, doi: 10.1016/j.electacta.2013.11.111.
- [18] F. Shi and J. F. Kolb, "Enhanced resolution impedimetric analysis of cell responses from the distribution of relaxation times," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 157, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.bios.2020.112149.
- [19] ASTM, "Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method," *Astm*, vol. 06, no. Reapproved, pp. 1–6, 2015, doi: 10.1520/G0057-06R12.
- [20] Tiago S. Matos; Kleber F. Portella ; Sérgio L. Henke ; Mariana P. Bragança ; Murilo P. Galvão ; Joubert W. Favaro ; Marcelo Buras ; Larissa M. de Almeida, "Resistividade em solos_ efeito dos índices físicos e condições de análise," *Braz. J. of Develop.*, vol. 6, no. 10, pp. 77433–77442, 2020.