

**Resistividade em solos: efeito dos índices físicos e condições de análise****Soil resistivity: physical indexes and analysis conditions influence**

DOI:10.34117/bjdv6n10-246

Recebimento dos originais: 08/09/2020

Aceitação para publicação: 13/10/2020

**Tiago S. Matos**

Estruturas Cívicas, 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 F. Portella**

Estruturas Cívicas, 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 L. 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 P. Bragança**

Estruturas Cívicas, 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

**Murilo P. Galvão**

Estruturas Cívicas, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Lactec)  
Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná (UFPR)  
Centro Politécnico da UFPR. R. Cel. Francisco Heráclito dos Santos, 100. Curitiba, CEP 81531-980, PR

E-mail: murilo.p.galvao@gmail.com

**Joubert W. Favaro**

Estruturas Cívicas, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Lactec)  
Rodovia BR 116, km 98, nº 8.813. Curitiba, CEP 81530-180, PR

E-mail: joubert.favaro@lactec.org.br

**Marcelo Buras**

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

**Larissa M. 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**

A resistividade elétrica é um parâmetro amplamente utilizado na avaliação da corrosividade dos solos. Entretanto, algumas metodologias de análise em laboratório têm divergência nos procedimentos e resultados obtidos, o que pode impactar na correta avaliação da propriedade e sua consequente correlação com a resistência à corrosão. Neste estudo foi realizado uma revisão dos ensaios de resistividade de solo propostos pelos procedimentos adotados pelas normas ABNT NBR 16254-1:2014 (Anexo C), ASTM G-187-15 e ASTM G-187-15 modificada pela adoção de cálculos dos índices físicos para obtenção do grau de saturação da amostra de solo. A avaliação dos resultados indicou que os procedimentos realizados pela norma ASTM-G187-15 e pelo mesmo procedimento modificado, adotando os índices físicos foram compatíveis. Já o ensaio realizado pela norma ABNT NBR 16254-1:2014 (Anexo C) não teve resultados satisfatórios.

**Palavras-chave:** Resistividade elétrica, Corrosividade, Solos, Índices físicos, Caracterização.

**ABSTRACT**

The electrical resistance is a parameter widely used in the evaluation of soil corrosivity. However, some methodologies of analysis have divergences in the procedures and, consequently, in the results obtained, which can impact the correct evaluation of the property and its correlation with the corrosion resistance. In this study, it was developed a comparative evaluation of the soil resistance tests proposed by the procedures adopted by the standards ABNT NBR 16254-1:2015 (Annex C), ASTM G-187-15 and ASTM G-187-15 modified by the application of the evaluated results of the physical indexes for saturation gradient of the soil sample. The results indicated that the procedures performed by the ASTM-G187-15 standard and modified, presented similar values for soil resistivity. Although, the test performed by standard NBR 16254-1:2014 (Annex C) did not have satisfactory results, which were related to the absence of specific procedures to calibrate and prepare the cell.

**Keywords:** Electrical resistivity, Corrosivity, Soils, Physical indexes, Characterization.

**1 INTRODUÇÃO**

O fluxo de corrente elétrica, em materiais metálicos, ocorre geralmente devido ao movimento dos elétrons. Já em soluções aquosas esse fluxo se dá pelo movimento dos íons e a velocidade que essas espécies se movem está relacionada à condutância do material no qual estão imersas. A condutância específica também conhecida como condutividade é obtida em condições padrão, ou seja, quando duas placas paralelas de exatamente 1 cm<sup>2</sup> cada, estão a uma distância de 1 cm entre si. O inverso da condutividade é conhecido como a resistividade (KREYSA, 2014).

A resistividade elétrica do solo está relacionada à quantidade de água presente nesse material, uma vez que neste meio é que estarão imersos e serão transportados os íons presentes. Além disso, depende do grau de saturação do solo, da sua permeabilidade, da concentração de íons, do tamanho de partículas e dos fluidos nos poros (SAMOUËLIAN, et al. 2005).

Em obras de engenharia, as condições de interação da estrutura com o meio de exposição são de fundamental importância para a compreensão dos processos aos quais estas podem estar sujeitas, como demonstrado, em termos mecânicos, pelos estudos de Rasi e colaboradores (2020). No caso de estruturas enterradas, como fundações, parâmetros como a resistividade são utilizados para a avaliação da corrosividade, sendo que, em obras com solo mecanicamente estabilizado, a esta representa uma das propriedades mais para a seleção dos materiais aplicados no preenchimento, como forma de minimizar os efeitos de deterioração devido à corrosão, de modo a garantir a integridades e tempo de vida útil de projeto (SNAPP, et al. 2017).

Em uma pesquisa sobre corrosão de estacas metálicas de torres de energia elétrica, Vilhena et al. (2019), correlacionaram os valores de resistividade do solo com a suscetibilidade à corrosão do aço enterrado na região amazônica. Costa Filho e colaboradores (2019) fizeram estudos similares, para avaliar os efeitos da salinidade de solos do sertão alagoano, sendo correlacionada a presença de íons com a condutividade da solução extraída da pasta de solo saturada.

Embora os valores de resistividade do solo tenham importância na avaliação da sua corrosividade, existem algumas divergências entre a metodologia de ensaio laboratorial brasileira, descritos nos procedimentos da norma ABNT NBR 16254-1:2014 (Anexo C) e a norma internacional ASTM G 187-15, que podem ocasionar resultados inconsistentes e prejudicar a avaliação do material. Isso pode ocorrer, entre outras questões, devido à variabilidade de características que os solos podem apresentar, cujos parâmetros físicos tendem a afetar as demais propriedades, como reportado por Sena et al. (2020), em estudos voltados para o desenvolvimento de sensores capacitivos para a estimativa do teor de água.

Neste estudo, foram comparadas as normas de resistividade elétrica brasileira e americana, ABNT NBR 16254-1:2014 (Anexo C) e ASTM G 187-12, respectivamente, em ensaios laboratoriais. Além disso, foi avaliada a importância dos índices físicos na obtenção do grau de saturação do solo, conforme indicado pela norma brasileira, de modo a definir uma metodologia confiável, a ser utilizada como parâmetro na avaliação da corrosividade (agressividade) do material.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 MATERIAIS

Os estudos desenvolvidos foram realizados sobre quatro amostras de solo com elevada porcentagem de areia (aproximadamente 62%) e baixos teores de argila e silte (respectivamente 15% e 16%), as quais foram determinadas previamente a partir da realização de ensaios para determinação da distribuição granulométrica de solos (ABNT NBR 7181:2016), caracterizando o solo como uma areia siltosa. A massa específica dos grãos foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 6458:2016 e que teve como resultado médio o valor de 2,68 g/cm<sup>3</sup>, valor típico para solos arenosos.

As amostras foram nomeadas conforme registro interno do laboratório, de maneira a garantir a confidencialidade dos locais em que foram coletadas, sendo adotadas as nomenclaturas, conforme: 2.0213.17, 2.0011.18, 2.0012.18 e 2.0089.18. As amostras 2.0213.17, 2.0011.18 e 2.0012.18 foram classificadas, em sua composição granulométrica, como areias silto argilosas; enquanto que, a amostra 2.0089.18 foi classificada como areia argilo siltosa, haja visto que esta apresentou maior porcentagem de argila em comparação ao silte em sua composição. A preparação das amostras para os ensaios seguiu as recomendações da norma ABNT NBR 6457:2016.

### 2.2 MÉTODOS

Para a realização dos ensaios foi utilizado um regulador de tensão da marca JNG® modelo TDGC2-2kVa, com capacidade de 2000 V e 8 A, com saída de 0-250 V, sendo utilizado a faixa de 0-90 V para realização da análise.

As análises foram realizadas em uma célula de acrílico com distância entre os eletrodos de 12,05 cm, eletrodos de cobre (ABNT NBR 16254-1:2014 (Anexo C)) e de aço inoxidável (ASTM G 187-12) com dimensões de (4,02 X 3,92) cm, ou seja, uma área total de 15,76 cm<sup>2</sup>. O fator geométrico da célula foi calculado levando em consideração a área da face de um eletrodo (ASTM G 187-12) dividido pela distância entre eles. No caso da norma ABNT NBR 16254-1:2014 (Anexo C), esse cálculo considera a área de ambas as faces dos eletrodos.

A célula de resistividade foi calibrada com um padrão de cloreto de potássio 0,01 M e 0,001 M com condutividade, a 25 °C, de 1408,8 µS/cm e 146,93 µS/cm respectivamente, ou seja, com resistividade de 7,09 Ω.m e 68,05 Ω.m. Essas soluções foram preparadas em laboratório segundo a norma ASTM D 1125-14, e os valores de condutividade verificados em um condutivímetro, sendo que os ensaios foram conduzidos em temperatura de (23 ± 2) °C.

As curvas de resistividade foram realizadas conforme recomendações da norma ABNT NBR 16254-1:2014 (Anexo C).

A verificação da célula foi realizada no início dos testes conduzidos conforme as recomendações da norma ASTM G187-12, sendo utilizados os eletrodos de aço inoxidável. Entretanto a célula contendo os eletrodos de cobre também foi verificada, para posterior comparação.

Nos ensaios realizados pela norma (ASTM G-187-15), após cada adição de solo a célula (soil box), foi adicionado pequenas quantidades de água com o intuito de deixa-lo saturado. Após o preenchimento, foi adicionado água até o aparecimento de um filme na superfície, o que indicou que o solo estava saturado, conforme recomendação da norma.

Para confirmar a saturação da amostra, foi calculado o grau de saturação (S) a partir dos dados do índice de vazios e dos resultados dos ensaios que determinam o teor de umidade e a massa específica dos grãos da amostra. Um grau de saturação de 100% indica que a amostra está completamente saturada, ou seja, todos os seus vazios estão preenchidos por água.

De forma análoga, os índices físicos foram calculados a partir de uma amostra de solo com massa e volume conhecidos. Os parâmetros para o cálculo dos índice físicos das amostras foram obtidos por meio de ensaios e seguiram as recomendações e os procedimentos das normas ABNT NBR 6458:2016, ABNT NBR 6457:2016, ABNT NBR 12004:1990 e ABNT NBR 12051:1991.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 CALIBRAÇÃO DA CÉLULA

Os resultados obtidos na célula com as placas de cobre e de aço inox estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultado da calibração da célula de resistividade em diferentes condições.

Condições de calibração			Padrão de resistividade ( $\Omega.m$ )	
Método	Eletrodo	Fator da célula	7,09	68,05
NBR 16254-1(Anexo C)	Cobre SEM polimento	2 faces	23,22	302,40
NBR 16254-1(Anexo C)	Cobre SEM polimento	1 face	11,61	151,20
NBR 16254-1(Anexo C)	Cobre POLIDO	2 faces	15,04	146,60
NBR 16254-1(Anexo C)	Cobre POLIDO	1 face	7,52	73,30
ASTM G 187	Aço inoxidável	1 face	7,51	69,57
ASTM G 187	Aço inoxidável	1 face	7,40*	69,10*

\* Calibração realizada com novo lote de padrão.

Por meio dos resultados dos ensaios foi constatado que os eletrodos de cobre devem ser polidos antes da realização dos testes, caso contrário, os valores de resistividade podem ser superiores em cerca 54% na faixa de 7  $\Omega$ .m e 106% na faixa de 68  $\Omega$ .m.

Em relação ao fator da célula, quando foi utilizado no cálculo, a área das duas faces como recomenda a norma ABNT NBR 16254-1:2014 (Anexo C) foi observado que os valores não foram condizentes com o padrão de calibração, sendo estes, aproximadamente, 208% a 312% superiores aos resultados encontrados no eletrodo de cobre polido, utilizando a área de uma face, como recomenda a norma ASTM G 187-12.

Os valores de calibração, tanto para o eletrodo de cobre polido quanto para o de aço inoxidável, estavam dentro da variação da norma ASTM G 187-12, em aproximadamente, 10%, para os resultados do ensaio, quando considerado apenas 1 face para o cálculo.

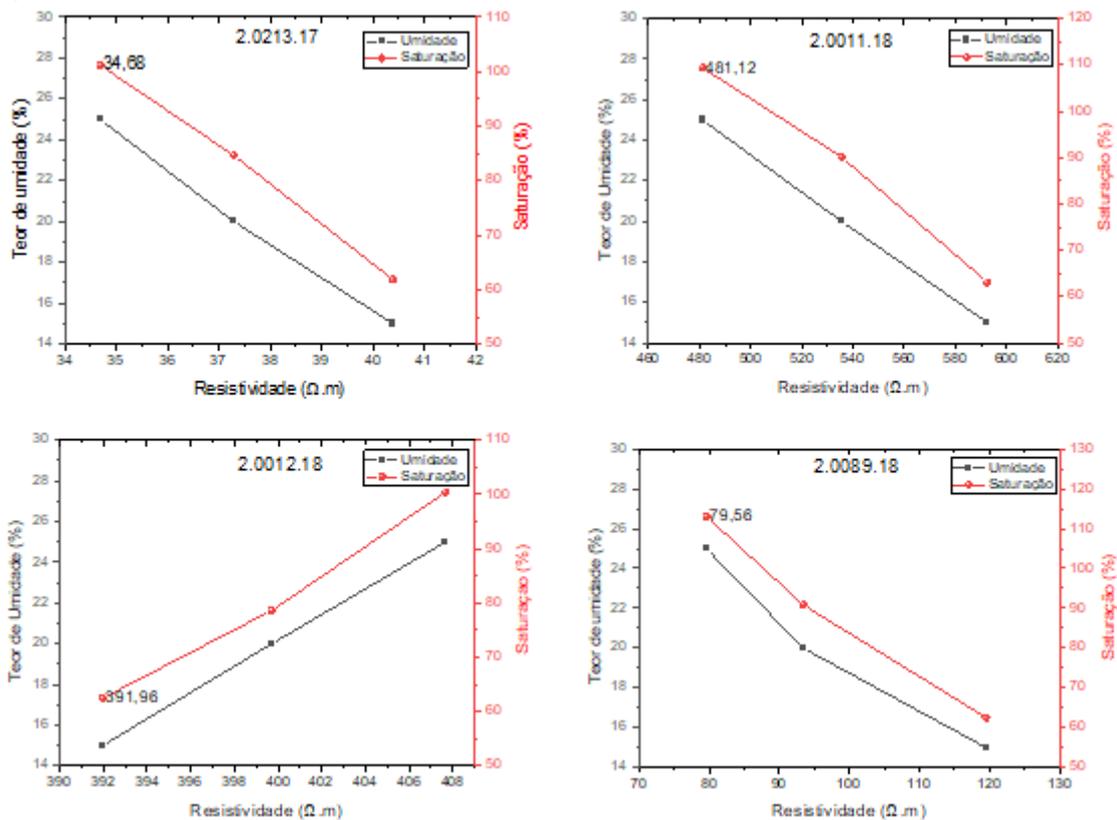
A calibração da célula de resistividade foi realizada após uma semana de utilização, e os valores encontrados, mesmo com um lote diferente de padrão, estavam dentro da variação permitida pela norma.

### 3.2 RESISTIVIDADE MÍNIMA PELA NORMA ABNT NBR 16254-1:2014 (ANEXO C)

As curvas de resistividade podem ser úteis na avaliação desse parâmetro com o teor de umidade do solo. Entretanto, para o conhecimento do grau de saturação das amostras, foi necessário a realização das análises do índice de vazios e da massa específica dos grãos.

As curvas de resistividade obtidas pelas análises realizadas sob a norma ABNT NBR 16254-1:2014 (Anexo C), podem ser visualizadas nos gráficos Figura 1, que correlacionam a resistividade com o teor de umidade e grau de saturação das amostras.

Figura 1 - Curvas de resistividade mínima obtidas pelas análises realizadas sob a norma ABNT NBR 16254-1:2014 (Anexo C).



Nas amostras 2.0213.17, 2.0011.18 e 2.0089.18 ocorreu a redução da resistividade com o aumento do teor de umidade e consequentemente, a saturação, até que esta atingiu o valor de  $S=100\%$ . Porém, na amostra 2.0012.18 ocorreu um comportamento inverso, o que pode ser devido a diluição dos sais dissolvidos no solo com o aumento do teor de umidade. Todavia, a variação nos resultados nessa amostra foi da ordem de 2% a cada adição de água, o que pode indicar que a resistividade permaneceu praticamente constante a partir da primeira adição de água. Além disso, a norma ASTM G187-12 indica que a variabilidade para essa faixa de resistividade é de 10%.

### 3.3 ENSAIOS REALIZADOS PELA NORMA ASTM G187-15

Os resultados obtidos pelos ensaios executados segundo a norma ASTM G187-15 foram realizados após a calibração da célula com os eletrodos de aço inoxidável. A comparação desses resultados com os obtidos pela norma da ABNT pode ser visualizada na Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação dos resultados encontrados pelas normas utilizadas.

Amostra	Resistividade ( $\Omega$ .m) ASTM G187	Resistividade mínima ( $\Omega$ .m) NBR 16254-1 (Anexo C)	Diferença (%)
2.0213.17	8,26	34,68	+319,8
2.0011.18	158,00	481,12	+204,5
2.0012.18	106,94	391,96	+266,5
2.0089.18	25,93	79,56	+206,8

As diferenças observadas entre os ensaios realizados pela norma ABNT NBR 16254-1:2014 (Anexo C) e ASTM G 187-15, foi de 206-320% nas amostras analisadas conforme resultados presentes na Tabela 2. Essas diferenças podem ser atribuídas a falta de polimento dos eletrodos de cobre e o cálculo do fator da célula no procedimento adotado pela norma brasileira. Variações dos resultados, entre os dois procedimentos, dessa mesma ordem (208-312%) foram encontrados na calibração da célula, conforme apresentado na Tabela 1.

### 3.4 ÍNDICES FÍSICOS E SUA INFLUÊNCIA NA RESISTIVIDADE

Uma das questões levantadas na execução dos testes pela norma ASTM G 187-12 está relacionada ao grau de saturação do solo. Devido a isso, foram executados testes pareados em 2 amostras seguindo a norma ASTM G 187-12 e o procedimento onde foi realizado o cálculo do grau de saturação por meio dos índices físicos, para a obtenção de 100% de saturação nas amostras de solo. Para tal, foi realizada a homogeneização da amostra de solo com água previamente, ou seja, em um recipiente externo a célula. Os resultados dos ensaios podem ser visualizados no Tabela 3, onde os ensaios realizados com os procedimentos citados foram comparados entre si.

Tabela 3 - Resultados de resistividade obtidos pela norma ASTM G187 e pela norma ASTM G 187 utilizando os índices físicos para obtenção de 100% de saturação.

Amostra	Resistividade ( $\Omega$ .m) ASTM G187	Resistividade ( $\Omega$ .m) ASTM G187 modificada	Diferença (%)
2.0011.18	158,00	158,52	+0,33
2.0012.18	106,94	101,26	-5,31

As diferenças encontradas entre os ensaios realizados pela norma ASTM G 187 e ASTM G 187 modificada foram menores que a variabilidade da norma, de aproximadamente 10% nessa faixa de leitura.

**4 CONCLUSÃO**

Por meio da avaliação dos resultados contidos neste estudo, foi possível concluir que:

- as divergências entre resultados de resistividade elétrica no solo foram principalmente devido à falta de polimento do eletrodo de cobre e ao fator da célula ausentes como recomendações na norma brasileira, o que foi constatado pela calibração da célula.

- As análises pela norma americana não necessitaram do prévio conhecimento dos índices físicos para o cálculo do grau de saturação do solo, sendo assim de execução mais simples e rápida.

- Os resultados dos testes pareados executados entre a norma ASTM G 187-12 e a ASTM modificada (cálculo da saturação do solo pelos índices físicos) evidenciaram uma variação menor que o limite de variabilidade na norma de 10%, o que indicou que o procedimento de avaliação visual da saturação do solo está correto como recomendado.

Por fim recomenda-se uma revisão da norma brasileira [ABNT NBR 16254-1:2014 (Anexo C)], nos aspectos referentes ao cálculo do fator da célula e procedimentos de limpeza e polimento dos eletrodos e calibração. Tais parâmetros e procedimentos se mostraram essenciais para a realização dos ensaios, com resultados com repetibilidade e reprodutibilidade, critérios essenciais para a obtenção de dados confiáveis para inferências acerca da corrosividade dos solos.

**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**

American Society for Testing and Materials, ASTM D 1125: Standard Test Methods for Electrical Conductivity and Resistivity of Water. 2015.

American Society for Testing and Materials, ASTM-G187: Standard test method for measurement of soil resistivity using the two-electrodes. 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 12004. Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não-coesivos – Método de ensaio. 1990.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 12051. Solo – Determinação do índice vazios mínimo de solos não-coesivos – Método de ensaio. 1991.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 16254-1. Materiais para sistemas de aterramento. 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 6457. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. 2016

Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 6458. Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 7181. Solo – Análise granulométrica. 2016.

COSTA FILHO, W. S. SOUZA, M. A. GOMES, T. C. A. SANTOS, A. F. PAVÃO, J. M. S. COSTA, J. G. Caracterização de solos adjacentes ao Canal do Sertão Alagoano quanto à Salinidade. *Braz. J. of Develop.*, v. 5, n. 9, p. 15726-15737 sep. 2019.

KREYSA, G. *Encyclopedia of Applied Electrochemistry*. 2014.

RASI, J. R. SERAFIN, J. A. MAZER, W. BROETTO, J. F. Análise das reações nas estacas em bloco de concreto considerando a interação solo-estrutura. *Braz. J. of Develop.*, v. 6, n. 6, p. 41410-41425 jun. 2020.

SAMOUËLIAN, I. COUSIN, A. TABBAGH, A. BRUAND, G. RICHARD, Electrical resistivity survey in soil science: A review. *Soil Tillage Res.*, vol. 83, no. 2, pp. 173–193, 2005.

SENA, C. C. R. ALVES JUNIOR, J. DOMINGOS, M. V. H. ANTUNES JUNIOR, E. J. BATTISTI, R. EVANGELISTA, A. W. P. CASAROLI, D. Calibração do sensor capacitivo de umidade do solo EC-5 em resposta a granulometria do solo. *Braz. J. of Develop.*, Curitiba, v. 6, n.4,p.17228-17240 apr. 2020.

SNAPP, M. TUCKER-KULESZA, S. KOEHN. W. Electrical resistivity of mechanically stabilized earth wall backfill. *J. Appl. Geophys.*, vol. 141, pp. 98–106, 2017.

VILHENA, R. E. RODRIGUES, R. G. PINTO, R. REIS, M. D. S. PICANÇO, A. N. MACÊDO. Corrosão em estacas metálicas de torres de energia elétrica. *Materia*, vol. 24, no. 1, p. e-12277, 2019.