

# **ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE WENNER PARA A OBTENÇÃO DE MODELOS QUE DESCREVAM OS SOLOS HOMOGÊNEOS OU ESTRATIFICADOS EM DUAS CAMADAS**

Guilherme da Silva Lima (IFMG) E-mail: guilherme.silva@ifmg.edu.br  
Alberto Luiz de Paula Junior (IFMG) E-mail: alberto.paula@ifmg.edu.br  
Heberton Luis da Silva Corrêa (IFMG) E-mail: heberton.correa@ifmg.edu.br

**Resumo:** Este trabalho avalia a influência das medições de resistividade do solo na escolha do modelo de solo homogêneo ou estratificado em duas camadas que descrevem o comportamento elétrico do solo. Para isso é utilizado o método de Wenner para se obter experimentalmente o valor da resistividade do solo em baixas frequências para profundidades diferentes de solo. Com esses valores é possível determinar uma função que relaciona a resistividade com a profundidade do solo. Percebe-se neste trabalho que, dependendo da instrumentação utilizada nas medições de resistividade do solo, considerar os eletrodos de medição espaçados a uma distância inferior a dois metros pode produzir medições de resistividade do solo com uma precisão questionável. Isso porque para essa faixa de distância, a profundidade do eletrodo de medição deve ser inferior a vinte centímetros, o que produz um contato reduzido do eletrodo de medição com o solo e por consequência imprecisões na medição. Assim, é recomendado que em abordagens de engenharia as medições utilizando o método de Wenner sejam iniciadas em distâncias superiores a dois metros para melhorar a confiabilidade nos resultados obtidos. Além disso, no momento da escolha do melhor modelo de solo que represente os dados amostrais, deve-se sempre optar pelo modelo mais simples em detrimento de modelos mais complexos, posto que dessa forma facilita-se a interpretação física dos resultados e as aplicações em engenharia. Dessa forma, se o modelo de solo mais simples apresentar um desvio percentual menor que 10,0% em relação aos dados experimentais, este modelo deve ser utilizado.

**Palavras-chave:** Aterramentos. Método de Wenner. Estratificação do Solo. Desvio Percentual.

## **ANALYSIS OF WENNER METHOD APPLICATION TO OBTAIN MODELS THAT DESCRIBE THE EARTH IN HOMOGENEOUS OR TWO-LAYERS STRATIFIED**

**Abstract:** This paper evaluates the influence of earth resistivity measurements on the choice of a homogeneous or stratified soil model in two layers that describe the electrical behavior of the earth. For this purpose, the Wenner method is used to experimentally obtain the low-frequencies earth resistivity value for different earth depths. With these values it is possible to determine a function that relates the resistivity with the earth depth. It is clear from this paper that, depending on the instrumentation used in earth resistivity measurements, considering measuring electrodes spaced at a distance of less than two meters can produce earth resistivity measurements with questionable accuracy. This is because for this distance range, the depth of the measuring electrode must be less than twenty centimeters, which produces reduced contact between the measuring electrode and the earth and, consequently, inaccuracies in the measurement. Therefore, it is recommended that in engineering approaches measurements using the Wenner method be initiated at distances greater than two meters to improve the reliability of the results obtained. Furthermore, when choosing the best earth model that represents the sample data, one should always opt for the simpler model, as this facilitates the physical interpretation of the results and the applications in engineering. Therefore, if the simplest earth model presents a percentage deviation of less than 10,0% in relation to the experimental data, this model must be used.

**Keywords:** Grounding. Wenner method. Stratification of the Earth. Percentage Deviation.

## 1. Introdução

Os sistemas de aterramento são construídos dentro do Sistema Elétrico de Potência (SEP), independentemente do nível de tensão da rede, essencialmente com a finalidade de criar um caminho de impedância reduzida para terra. Possibilitando dessa forma que correntes de falta sejam drenadas para o solo ou equipamentos de proteção sejam sensibilizados na ocorrência de algum surto (VISACRO, 2012; SALAM e RAHMAN, 2016).

Na expansão ou em melhorias realizadas no SEP, considerando os níveis de tensão utilizados para a distribuição e para a transmissão de energia elétrica, em projetos de novas linhas de transmissão, bem como na implementação de novas subestações de geração ou de distribuição é necessário a realização do estudo elétrico do terreno no qual estes empreendimentos serão realizados. Isso objetivando possibilitar a elaboração do melhor esquema de aterramento para os empreendimentos em questão, ficando a cargo da concessionária de energia elétrica este estudo e a execução do melhor projeto de aterramento para o caso concreto (COPEL, 2002; ENEL, 2020; CEMIG, 2022). Basicamente nos projetos de aterramento, busca-se obter um valor baixo para a impedância de aterramento e para tal é indispensável o conhecimento dos parâmetros elétricos do solo: resistividade e permissividade. Tipicamente, concessionárias brasileiras de energia elétrica consideram baixo o valor de  $10 \Omega$  para a resistência de aterramento a ser implementada na rede de distribuição (COPEL, 2002; ENEL, 2020; CEMIG, 2022), entretanto esse valor pode variar de projeto para projeto devido às características do solo e a inviabilidade técnica em se obter na prática este valor (VISACRO, 2012; CEMIG, 2022).

O solo é um meio material complexo e de difícil caracterização e modelagem. Basicamente, os solos podem conter camadas heterogêneas de tipos de solos diferentes (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995; ZHANG et al., 2005; COELHO, 2019). Além disso, o solo apresenta comportamento elétrico variável com a frequência do sinal elétrico que se propaga por ele (LONGMIRE e SMITH, 1975; ALÍPIO e VISACRO, 2014). Dessa forma, o modelo elétrico dos parâmetros do solo depende das frequências dos sinais elétricos em análise, bem como da penetração que eles podem alcançar ao se propagar pelo solo.

Em projetos envolvendo o SEP, a frequência da rede, 60 Hz no Brasil, é aquela associada às falhas de curto-circuito no sistema e a dissipação dessa corrente pelos aterramentos (PEREIRA, 2014). Além disso, a distribuição de energia elétrica a um fio, com retorno de corrente pelo solo, é uma estratégia utilizada por concessionárias de distribuição de energia elétrica em ambientes rurais brasileiros (VISACRO, 2012). Assim, conhecer o comportamento elétrico do solo na frequência de operação da rede e dos aterramentos nele conectado é fundamental para a compreensão de fenômenos envolvendo sobretensões e sobrecorrentes, bem como a avaliação do desempenho de equipamentos conectados ao sistema, principalmente no que se refere às solicitações de curto circuito ou envolvendo manobras na rede (KUFFEL et al., 2000; PEREIRA, 2014; SALAM e RAHMAN, 2016), além de fornecer indícios do comportamento dos aterramentos elétricos em frequências maiores associadas a distúrbios atmosféricos (RACHIDI et al., 1996; DARVENIZA, 2007; DE CONTI et al., 2010).

Quando o sinal de solicitação do aterramento é de baixa frequência, 60 Hz, o solo pode ser caracterizado por valores de resistividade que são constantes com a frequência, o que não acontece para sinais de altas frequências (LONGMIRE e SMITH, 1975; ALÍPIO, 2013; ALÍPIO e VISACRO, 2014). Para se conhecer o comportamento do solo

em baixas frequências, o método de Wenner é amplamente utilizado para a realização da medições de resistividade do solo, sendo recomendado sua utilização pela norma técnica brasileira (ABNT 7117, 2012), por normas técnicas internacionais (IEEE, 2013), bem como pela literatura especializada na área de aterramentos elétricos (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995; VISACRO, 2012).

Este trabalho discute e analisa aspectos de engenharia relacionados à aplicação do método de Wenner para a obtenção de modelos de solos homogêneos ou estratificados em duas camadas. Identificando, assim, pontos de atenção que devem ser observados ao se aplicar o método e ao se escolher o modelo de solo que representa os dados amostrais.

## 2. Método para obtenção da resistividade do solo em baixas frequências e modelagem dos dados experimentais

Um dos métodos mais utilizados para a obtenção, em campo, do valor da resistividade do solo em baixas frequências foi proposto por Frank Wenner (WENNER, 1916), há mais de um século, entretanto, devido à relativa simplicidade do método e à praticidade em sua aplicação, ele foi e continua sendo utilizado ao longo do tempo em avaliações científicas e em aplicações de engenharia (SUNDE, 1968; VISACRO, 2012; ABNT 7117, 2012; IEEE, 2013).

A Figura 1 apresenta um esquema para a aplicação do método de Wenner. Nela é possível verificar a presença de quatro eletrodos de medição (hastes de medição), enumerados de 1 a 4, que são cravados a uma profundidade  $b$  no solo e espaçados equidistantemente, em linha reta, em distâncias  $a$ . Para essa situação, faz-se circular uma corrente,  $I_{apl}$  entre os eletrodos externos, 1 e 4, e se mede a diferença de potencial,  $V_{med}$ , que se manifesta entre os eletrodos internos, 2 e 3. Dessa forma, Wenner (1916) demonstrou que a resistividade do solo,  $\rho(a)$ , pode ser obtida através da equação (1).

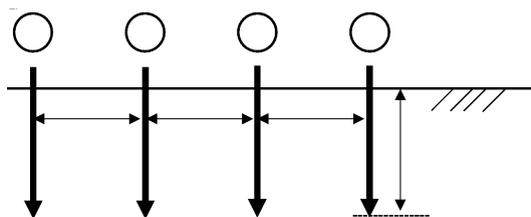


Figura 1 - Método de Wenner.

Na equação (1) a relação  $\frac{V_{med}}{I_{apl}}$  é a resistência de aterramento para a configuração apresentada na Figura 1 e  $\rho(a)$  é uma função que apresenta o valor da resistividade do solo em função do espaçamento entre os eletrodos de medição. Nota-se que o valor da resistividade do solo é dependente de um fator geométrico, relação que existe entre  $a$  e  $b$ , e o valor da resistência de aterramento da configuração.

$$\rho(a) = \frac{4\pi a}{1 + \left(\frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}}\right) - \left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}}\right)} \frac{V_{med}}{I_{apl}} \quad (1)$$

A propagação da corrente injetada nos eletrodos externos será tanto mais profunda no solo quanto maior for a distância  $a$  (VISACRO, 2012) utilizada entre os eletrodos de medição. Portanto, uma boa aproximação é considerar a profundidade alcançada pela corrente igual a distância entre as hastes. Dessa forma, a equação (1) passa a fornecer a resistividade elétrica do solo em função da profundidade.

Ao se realizar medições considerando diversos valores de espaçamento  $a$  obtém-se valores de resistividade para solos em diversas profundidades. A partir desse conjunto de medições é possível avaliar se o solo em estudo se comporta como um solo homogêneo ou estratificado em diversas camadas (ABNT 7117, 2012, ZHANG et al., 2005; PERREIRA et al., 2018).

É importante destacar que a equação (1) foi desenvolvida para ser válida quando  $b \ll a$  (WENNER, 1916). Em uma abordagem de engenharia é aconselhável que  $b$  seja pelo menos dez vezes menor que  $a$  para garantir a validade da equação (1) (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995). Dessa forma, é possível concluir que quando se deseja obter o valor da resistividade do solo a uma profundidade de um metro é necessário cravar os eletrodos de medição a no máximo dez centímetros de profundidade. Entretanto, dependendo da instrumentação utilizada para se obter os dados experimentais essa profundidade pode ser insuficiente para proporcionar um contato elétrico eficiente entre os eletrodos de medição e o solo. Em Visacro (2012) é sugerido que  $b$  seja maior que 50 cm para garantir o contato elétrico eficiente entre o solo e os eletrodos de medição, mas além da profundidade na qual se crava as hastes de medição, o raio delas também influencia no contato com o solo. Mostra-se que quanto maior é o raio da haste de medição, melhor é o contato dela com o solo (MEDEIROS, 1981), não devendo o valor do raio da haste ser maior que dez por cento do valor de  $a$  (VISACRO, 2012).

Neste trabalho para se obter os dados experimentais foi utilizado um termômetro de quatro hastes. O equipamento injeta uma corrente no solo através das hastes 1 e 4 (Figura 1), e mede a diferença de potencial produzida por essa corrente nas hastes 2 e 3, conforme o método de Wenner. Como resposta, o aparelho retorna um valor de resistência de aterramento,  $\frac{V_{med}}{I_{apl}}$ . As hastes de medição tem tamanho de 50 cm e raio de 7,5 mm.

É feita uma série de medições para valores distintos de  $a$ , esses dados são inseridos na equação (1) e assim é obtida a resistividade do solo de uma certa área em função da profundidade.

Com a obtenção de um conjunto de dados experimentais, a primeira hipótese a ser levantada é se os dados obtidos podem representar satisfatoriamente um solo homogêneo (IEEE, 2013). Nesse caso, a resistividade do solo homogêneo será dada pela média dos dados amostrais (IEEE, 2013).

Para se testar essa hipótese, deve-se avaliar o desvio percentual que existe entre o valor médio obtido e os pontos amostrais. Esse desvio percentual pode ser obtido através da equação (2) (TAKAHASHI e KAWASE, 1990).

$$Desvio(\%) = \left( \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \frac{|\rho(a_i)_{medido} - \rho(a_i)_{calculado}|}{\rho(a_i)_{medido}} \right) \times 100 \quad (2)$$

em que  $q$  é a quantidade de dados experimentais que foram obtidos.

Muitas vezes determinar qual é o valor adequado para o desvio percentual é de difícil predição (IEEE, 2013), entretanto na situação em que o valor do desvio percentual é considerado como inadequado, situações discutidas neste trabalho, a hipótese dos dados experimentais representarem um solo homogêneo deve ser descartada e uma nova hipótese deve ser levantada: os dados experimentais podem ser representados através de um modelo de solo estratificado em duas camadas? (ABNT 7117, 2012). Essa é uma hipótese bastante razoável, posto que a maioria dos solos estratificados podem ser caracterizados como sendo de duas camadas (VISACRO, 2012). Nesse modelo de solo é considerado que as camadas são horizontais, sendo que a primeira tem uma profundidade  $h_1$  e uma resistividade  $\rho_1$ , e que a segunda tem uma profundidade infinita e uma resistividade  $\rho_2$ , conforme Figura 2. Assim, para testar essa nova hipótese, deve-se verificar se os dados experimentais podem ser descritos por algum modelo de solo estratificado em duas camadas, neste trabalho o modelo de solo estratificado utilizado é o apresentado através da equação (3) (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

$$\rho(a) = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh_1}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh_1}{a}\right)^2}} \right] \right\} \quad (3)$$

em que  $a$  é a profundidade em que se deseja conhecer o valor da resistividade do solo e  $K$  é o índice de reflexão do solo entre as duas camadas. O índice de reflexão é determinado através da equação (4),

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (4)$$

De posse da equação (3) e dos dados amostrais, deve-se determinar computacionalmente os valores de  $h_1$ ,  $K$  e  $\rho_1$ , que não são conhecidos a priori, minimizando o quadrado da diferença que existe entre os dados amostrais e os resultados produzidos pela equação (3). Para isso, deve-se utilizar alguma rotina de mínimos quadrados (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

Portanto, alimentando a equação (3) com os dados experimentais fornecidos pela equação (1), é possível determinar numericamente, a resistividade elétrica de cada camada,  $\rho_1$  e  $\rho_2$ , bem como a profundidade da primeira camada  $h_1$ . E o critério para definir se o solo é estratificado será o mesmo do modelo de solo homogêneo. Calcula-se a resistividade em uma certa profundidade  $a$ , com a equação (3) e compara-se com o valor medido através da equação (2), obtendo-se dessa forma desvio percentual, se esse for considerado pequeno significa que o solo pode ser considerado como estratificado em duas camadas.

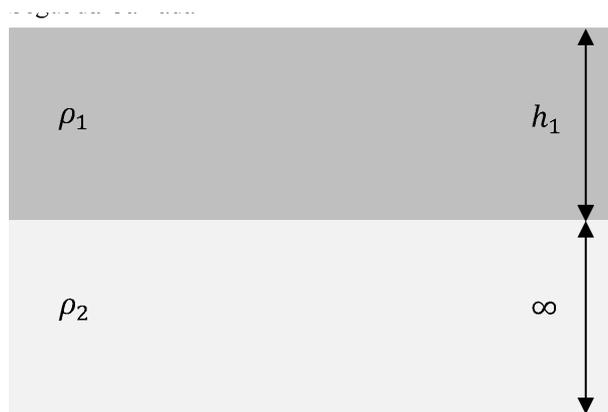


Figura 2 – Modelo de solo estratificado em duas camadas.

### 3. Resultados e análise

Este trabalho buscou determinar o modelo de solo para duas áreas diferentes localizadas dentro do terreno do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais campus Ribeirão das Neves, IFMG-RN, denominadas neste trabalho como **Área 1** e **Área 2**. As duas áreas em questão são de solos de cerrado e distantes aproximadamente cento e vinte metros uma da outra. Por serem de cerrado, os solos em análise são secos e com uma grande rigidez mecânica (EMBRAPA, 2004), essas duas características fazem com que as hastes de medição fiquem firmes no solo no momento da medição proporcionando um bom contato elétrico entre hastes e solos. As medições deste trabalho foram realizadas em um período em que não ocorreram chuvas dentro de um espaço de tempo de um mês antes de serem iniciadas as medições, isso possibilita que os resultados representem uma situação crítica do solo em que a umidade devido às chuvas não influencia nos resultados experimentais obtidos (ABNT 7117, 2012).

A Tabela 1 mostra os valores de resistividade do solo em baixa frequência, equação (1), que foram obtidos experimentalmente para as duas áreas em estudos considerando um espaçamento entre eletrodos de medição,  $a$ , que variou entre 1 m e 10 m. Nota-se que durante as medições foram considerados quatro valores de profundidade,  $b$ , para as hastes de medição: 0,1 m, 0,2 m, 0,3 m e 0,4 m. Os três primeiros valores de profundidade das hastes foram considerados para que o critério de validade da equação (1) fosse respeitado, ao passo que o valor de 0,4 m foi considerado para as demais situações.

Tabela 1 – Resistividades do solo obtidas experimentalmente.

Valores de $a$ (m)	Valores de $b$ (m)	Resistividade do Solo ( $\Omega\text{m}$ )	
		Área 1	Área 2
1	0,1	866,7	2396,8
2	0,2	731,2	1196,5
3	0,3	747,8	788,1
4	0,4	935,7	769,5
5	0,4	1003,8	848,1
6	0,4	1166,3	862,4
7	0,4	1079,3	685,6
8	0,4	1120,8	666,4
9	0,4	1220,0	868,2
10	0,4	1430,3	869,5

Fonte: Obtida pelos autores.

A primeira hipótese que deve ser levantada é se os dados experimentais podem ser modelados por um solo homogêneo. A Tabela 2 apresenta o valor da resistividade média do solo obtida quando se considera um solo homogêneo para representar a Área 1 e a Área 2, bem como o desvio percentual existente entre os dados experimentais e o modelo de solo homogêneo. Observa-se, inicialmente, que a resistividade do solo da Área 1 é de 1030,2  $\Omega\text{m}$  e da Área 2 é de 995,1  $\Omega\text{m}$ , valores que são diferentes em menos de 5,0%, o que pode ser razoável posto à proximidade entre as duas áreas, aproximadamente 120 m, assim estes valores para um modelo de solo homogêneo podem parecer coerente a primeira análise. Entretanto, ao avaliar o desvio percentual, entre o valor calculado da resistividade média do solo e os dados experimentais, nota-se que ele é de 17,8% e 28,7% para a Área 1 e a Área 2, respectivamente, apresentando um indicativo que o modelo de solo homogêneo pode não ser a melhor escolha para caracterizar essas duas áreas. Assim, pode-se inferir que avaliar somente o valor experimental da resistividade média do solo sem levar em consideração o desvio percentual pode conduzir a conclusões questionáveis sobre o comportamento elétrico do solo.

Tabela 2 – Parâmetros de ajuste para o solo homogêneo

	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Desvio (%)
Área 1	1030,2	17,8
Área 2	995,1	28,7

Fonte: Obtida pelos autores.

Antes de tentar uma estratificação do solo em duas camadas, pode-se retornar a Tabela 1 para verificar a influência da profundidades  $b$  na qual se crava as hastes de medição observando se ela pode gerar incertezas nos dados medidos. A literatura, ao discutir sobre o assunto, prever que para valores reduzidos de  $b$  o contato entre o eletrodo de medição e solo pode ser comprometido (MEDEIROS, 1981; VISACRO, 2012). Para os resultados obtidos neste trabalho existiram duas situações críticas, quando  $b$  foi de 0,1 m e 0,2 m. Nestas situações, mesmo que o solo de cerrado tenha possibilitado que as hastes de medição ficassem firmes no solo, a profundidade reduzida na qual as hastes penetraram no solo, pode ter incluído no valor da resistência de aterramento uma componente devido ao mal contato entre a haste de medição e o solo (ALIPIO, 2014). Assim, para tentar sanar este possível fator de inclusão de incerteza nos dados, a Tabela 3 modela as duas áreas como solos homogêneos sem considerar na obtenção do modelo os dados da Tabela 1 que foram obtidos considerando  $b$  igual à 0,1 m e 0,2 m.

Na Tabela 3, percebe-se que o valor da resistividade média do solo da Área 1 é de 1088,0  $\Omega\text{m}$  e da Área 2 é de 794,7  $\Omega\text{m}$ , sendo que o desvio percentual obtido foi de 14,4% para a Área 1 e 8,8% para a Área 2. Comparando a Tabela 2 com a Tabela 3 é possível verificar uma significativa modificação no valor previsto para a resistividade do solo da Área 2, e uma leve modificação no valor da resistividade da Área 1. Considerando o desvio percentual, percebe-se que ele reduziu significativamente para a Área 2, e levemente para a Área 1. Assim a Área 2, desconsiderando os dados obtidos quando  $b$  é igual à 0,1 m e igual à 0,2 m, tende a se comportar como um solo homogêneo de resistividade de 794,7  $\Omega\text{m}$ . Ao passo que para a Área 1, o modelo de solo homogêneo ainda não é capaz de descrever os dados experimentais obtidos de maneira satisfatória.

Tabela 3 – Parâmetros de ajuste para o solo homogêneo, desconsiderando os dados para profundidades das hastes de 0,1 m e 0,2 m.

	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Desvio (%)
Área 1	1088,0	14,4
Área 2	794,7	8,8

Fonte: Obtida pelos autores.

Para investigar melhor o comportamento dos solos das Áreas 1 e 2, a próxima hipótese a ser levantada é se eles podem ser modelados como estratificados em duas camadas, equação (3). Nessa situação, espera-se que os resultados da modelagem tenham desvios percentuais, entre os dados experimentais e as curvas ajustadas pela equação (3), menores que os obtidos quando se modelou as áreas como modelos de solo homogêneos. Na Tabela 4 é possível notar claramente que o modelo de solo estratificado em duas camadas conduz a desvios percentuais menores quando comparado aos modelos de solo homogêneo. Isso é razoável e esperado, pois quanto maior a quantidade de camadas consideradas no modelo de solo estratificado melhor é a aproximação dos dados amostrais ao modelo de solo estratificado (ZHANG et al., 2005; PERREIRA et al., 2018).

Tabela 4 – Parâmetros de ajuste do solo estratificado em duas camadas

	$\rho_1$ ( $\Omega\text{m}$ )	$\rho_2$ ( $\Omega\text{m}$ )	$h$ (m)	$K$	Desvio (%)
Área 1 – Dados completos	779,9	2609,9	4,85	0,5399	7,14
Área 2 – Dados completos	4010,0	752,0	0,70	-0,6842	8,65
Área 1 – Sem $b = 0,1$ e $b = 0,2$	513,6	1723,2	1,93	0,5408	5,43
Área 2 – Sem $b = 0,1$ e $b = 0,2$	782,0	829,0	5,50	0,0292	8,61

Fonte: Obtida pelos autores.

A partir dos dados da Tabela 4 e da equação (3) é possível obter a Figura 3 que mostram as curvas ajustadas e os pontos experimentais (equação (1)). Esta figura fornece a resistividade elétrica da Área 1 em função da profundidade do solo.

A comparação entre a Tabela 3 e a Tabela 4, mostra uma diminuição significativa no desvio percentual para a Área 1, principalmente quando se desconsidera os dados para  $b$  igual a 0,1 m e igual a 0,2 m. Na Figura 3 mostra-se que o modelo de solo estratificado em duas camadas, considerando ou não os dados para  $b$  igual a 0,1 m e igual a 0,2 m representa muito bem os dados experimentais. Assim, o desvio percentual de 7,14% ou 5,43% se mostram igualmente aceitáveis para aplicações de engenharia. Entretanto, a decisão de se escolher quais dados da Tabela 4, devem ser utilizados para uma dada área impacta no valor da resistividade do solo que o modelo irá apresentar. Nota-se que existe uma diferença significativa nos valores das resistividades da primeira camada e da segunda camada de solo, bem como da profundidade da primeira camada de solo quando se avalia a Figura 3. Considerando que os dados da Figura 3(a) podem apresentar incertezas maiores na medição que os dados da Figura 3(b), deve-se escolher como modelo do solo para a Área 1 aqueles que deram origem a Figura 3(b) e que tem seus valores compilados na Tabela 4.

É válido observar que os desvios percentuais inferiores a 10,0% produziram resultados de modelos de solos que representam com boa precisão os dados experimentais para as duas áreas. Assim, em aplicações de engenharia, quando um modelo de solo apresentar um desvio percentual inferior a 10,0% este modelo pode ser considerado satisfatório. Por outro lado, quando o desvio percentual for superior a 10,0% um modelo de solo estratificado em mais camadas deve ser utilizado para representar o solo em questão.

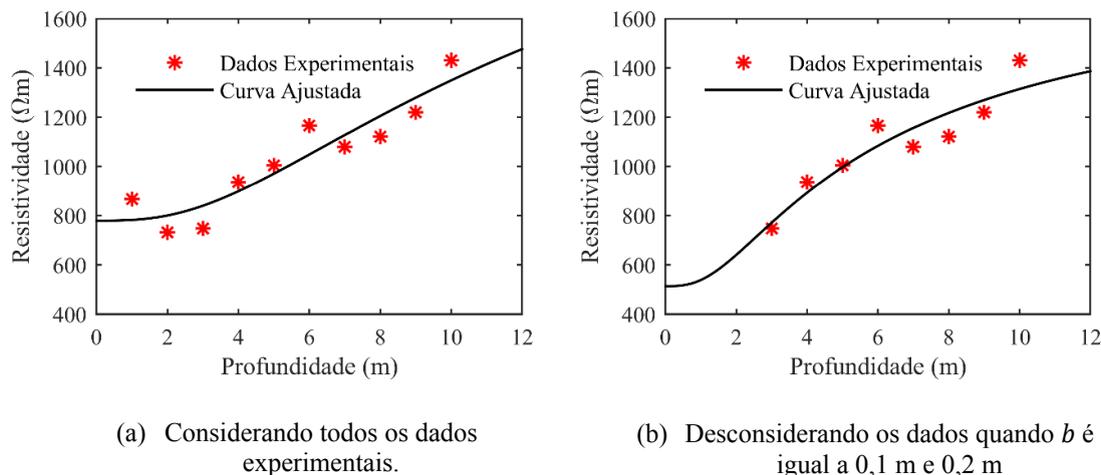


Figura 3 – Modelo de solo estratificado em duas camadas para Área 1.

Considerando a Área 2, a Figura 4 mostra o modelo de solo estratificado em duas camadas para os dados experimentais. Nota-se através da Tabela 4 que os desvios percentuais para a Figura 4(a) e para a Figura 4(b) são praticamente os mesmos. Além disso, eles são praticamente iguais ao desvio percentual apresentado para um solo homogêneo, Tabela 3. Entendendo que modelos utilizados em engenharia devem ser o mais simples possível para viabilizar a sua reprodução em ambientes não acadêmicos, o modelo de solo homogêneo deve ser o utilizado para caracterizar o solo da Área 2.

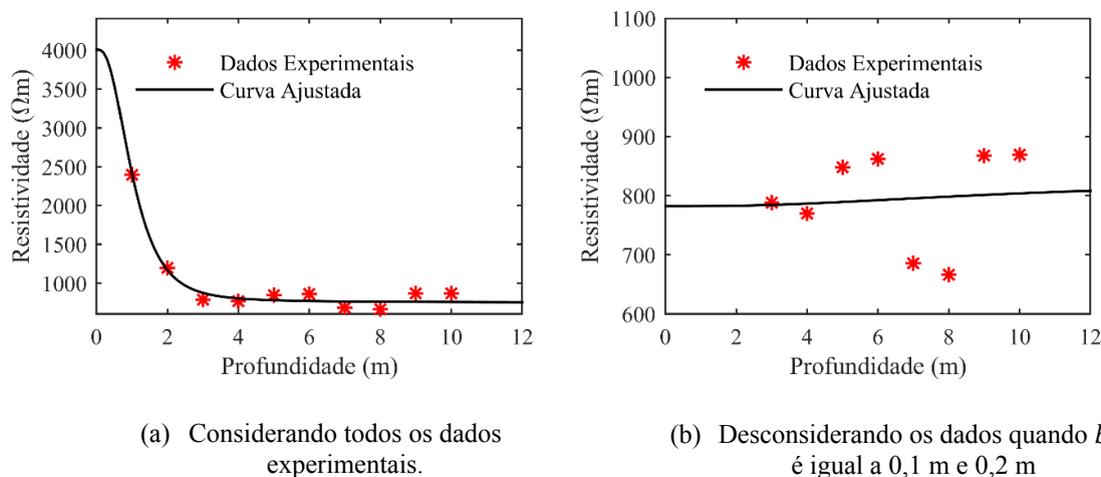


Figura 4 – Modelo de solo estratificado em duas camadas para Área 2.

A Figura 5 apresenta os perfis de solos para a Área 1, Figura 5(a), e para a Área 2, Figura 5(b). Esses perfis são comumente utilizados em projetos de engenharia por mostrarem aos projetistas as características do solo essenciais para a elaboração dos projetos. Através das informações apresentadas na Figura 5 é possível determinar se a instalação de uma malha de aterramento mais profunda pode diminuir o valor da resistência de aterramento ou pode aumentá-la. O esperado, muitas vezes, é que para solos mais profundos as resistividades dos solos sejam menores, devido à umidade (VISACRO, 2012), indicando que instalar uma haste ou uma malha de aterramento mais profundamente diminui o valor da resistência de aterramento, entretanto, como pode ser visto na Figura 5(a) isso não necessariamente é sempre verdadeiro. Assim, mostra-se novamente ser fundamental uma modelagem do solo para que se execute

qualquer técnica para melhoria do valor da resistência de aterramento.

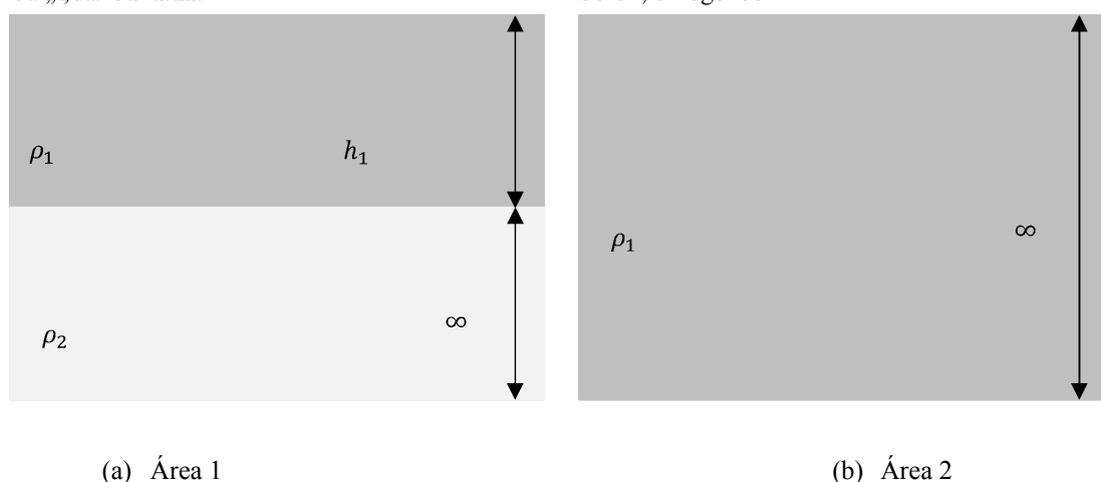


Figura 5 – Perfis dos solos.

#### 4. Considerações finais

Este trabalho utilizou o método de Wenner para investigar a obtenção de modelos de solos homogêneos ou estratificados em duas camadas para duas áreas situadas no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais campus Ribeirão das Neves.

Percebeu-se que o contato elétrico existente entre a haste de medição e o solo pode fazer com que os dados experimentais se tornem questionáveis. Observou-se que para solos de cerrados, que são tipicamente secos e com elevada rigidez física, o contato elétrico entre haste medição e o solo pode ser considerado satisfatório para profundidades das hastes de medições superiores a trinta centímetros. Dessa forma, é aconselhável que para solos secos e com boa rigidez física, como os solos do cerrado brasileiro, as medições de resistividade do solo sejam iniciadas considerando um espaçamento entre hastes de três metros.

Observou-se também que para a escolha de um modelo que caracterize o comportamento elétrico do solo deve-se avaliar o desvio percentual que existe entre o modelo de solo considerado e os dados experimentais obtidos. Percebeu-se que desvios percentuais inferiores a 10,0% conduzem a bons resultados para a modelagem dos solos homogêneos ou estratificados em duas camadas, ao passo que desvios maiores que 10,0% conduziram a modelos de solos menos representativos, assim, é aconselhável que na modelagem de solos para aplicações de engenharia o desvio percentual não seja maior que 10,0%.

#### Referências

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Medição da Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo*. ABNT NBR 7117, Rio de Janeiro, 2012.

ALIPIO, Rafael S., *Dependência da Frequência dos Parâmetros do Solo: Efeito no Comportamento Impulsivo de Aterramentos Elétricos*, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2013.

ALIPIO, Rafael. VISACRO, Silvério, *Modeling the Frequency Dependence of Electrical Parameters of*

Soil, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 56, no. 5, pag. 1163-1171, Outubro, 2014.

**CEMIG, COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS.** *Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão Rede de Distribuição Aérea ou Subterrânea.* Norma de Distribuição, ND-5.3, Belo Horizonte, 2022.

**COELHO, Rafael S.,** Uma Contribuição à Análise de Sistemas de Aterramento em Meios Horizontalmente Estratificados, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2019.

**COPEL, COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA.** *Fornecimento de Tensão Primária de Distribuição.* Normas técnicas da COPEL, NTC 903100, Curitiba, 2002.

**DARVENIZA, M.** *A practical extension of Rusck's formula for maximum lightning-induced voltages that accounts for ground resistivity.* IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 1, pp. 605-612, Jan. 2007.

**DE CONTI, A. R., E. PEREZ, E. SOTO, F. H. SILVEIRA, S. VISACRO e H. TORRES.** *Calculation of lightning-induced voltages on overhead distribution lines including insulation breakdown.* IEEE Trans. Power Del., vol. 25, no. 4, pp. 3078-3084. 2010.

**EMBRAPA, EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS.** *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 63. Mapeamento de Solos e Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais.* Rio de Janeiro, 2004.

**ENEL, ENEL BRASIL.** *Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária de Distribuição até 34,5 kV.* Norma CNC-OMBR-MAT-20-0942-EDBR, São Paulo, 2020.

**IEEE, INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS.** *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,* Std 80™, 2013.

**KINDERMANN, Geraldo; CAMPAGNOLO, José Mário.** *ATERRAMENTO ELÉTRICO.* 3ª Edição. Porto Alegre: Sagra DC-Luzzatto, 1995.

**KUFFEL, E., W.S. ZAENGL e J. KUFFEL.** *Highvoltage engineering fundamentals,* 2nd ed., Butterworth-Heinemann. 2000.

**LONGMIRE, C. L., K. S. SMITH,** *A Universal Impedance for Soils,* Defense Nuclear Agency, Alexandria, VA, USA, Topical Report for Period Jul. 1 1975–Sep. 30 1975, 1975.

**PEREIRA, C.** *Redes Elétricas no Domínio da Frequência. Técnicas de Análise, Modelos de Componente, Técnicas Computacionais.* Artliber Editora Ltda, São Paulo, SP. 2014.

**PERREIRA, A. M., ALVES, A. C. B., MARINHO, R. P.,** Estratificação de Solo Multicamada através da função Kernel e do algoritmo genético, Revista de Engenharia e Tecnologia, vol. 10, no. 1, pp. 229-247, 2018.

**MEDEIROS, S. F.,** Fundamentos de Medidas Elétricas, Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1981.

**RACHIDI, F., C.A. NUCCI, M. IANOZ e C. MAZZETTI.** *Influence of a lossy ground on lightning-induced voltages on overhead lines.* IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol. 38, No. 3, pp. 250-264. 1996.

**SALAM, A., RAHMAN, Q.** Power Systems Grouding. 1ª Edição. Springer, 2016.

**SUNDE, E.,** Earth Conduction Effects in Transmission Systems, 2 edição, New York: Dover, 1968.

**TAKAHASHI T., KAWASE T.,** Analysis of apparent resistivity in a multi-layer structure, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 5, no. 2, pp. 604- 612, 1990.

**VISACRO, Silvério.** *ATERRAMENTOS ELÉTRICOS: Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação e Filosofias de Aterramento,* Artliber Editora Ltda, São Paulo, SP. 2002.

**WENNER, F.,** Method of measuring earth resistivity, Bulletin of the national bureau of standards, Washington D. C., vol. 12, 1916.

**ZHANG B., CUI X., LI L., HE J.,** Parameter estimation of horizontal multilayer earth by complex image method, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 20, no. 42, pp. 1394-1401, 2005.