

Resistividade do Solo pelos Métodos Wenner e Schlumberger e Profundidades de Investigação

Fernando Moreira Viana
Coordenação de Projetos de Eletricidade
Saneamento de Goiás S.A.
Goiânia-GO, Brasil
fernandoviana@saneago.com.br

Antônio César Baleeiro Alves
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
Universidade Federal de Goiás – UFG
Goiânia-GO, Brasil
baleeiro@ufg.br

Resumo — A correta medição de uma grandeza exige conhecimento das características da mesma a fim de evitar interpretações equivocadas quanto ao significado dos resultados obtidos. Tal conhecimento é particularmente importante no caso da resistividade do solo. Os métodos de medição propostos por Frank Wenner e por Conrad e Marcel Schlumberger são comparados, com enfoque peculiar sobre a profundidade efetiva de investigação. Séries de medições foram efetuadas no período seco e também no chuvoso com intuito de observar as variações da resistividade do solo em diferentes locais. Os resultados mostram que a profundidade efetiva de investigação em qualquer configuração de eletrodos é determinada pela posição dos dois conjuntos de eletrodos, corrente e tensão, e não apenas pela corrente de penetração ou distribuição.

Palavras-chaves — Sondagem elétrica vertical, resistividade do solo, Wenner, Schlumberger, profundidade de investigação.

I. INTRODUÇÃO

Aterramentos elétricos estão fundamentalmente associados a dois fatores: o desempenho do sistema ao qual o aterramento está conectado e a segurança de seres vivos e de proteção de equipamentos [1].

Os solos, na sua grande maioria, não são homogêneos, mas formados por diversas camadas de resistividade e profundidades diferentes. Essas camadas, devido à formação geológica, são normalmente horizontais e paralelas à superfície do solo.

Existem casos em que as camadas se apresentam inclinadas e até verticais, devido alguma falha geológica. Entretanto, os estudos apresentados para pesquisa do perfil do solo as consideram aproximadamente horizontais, uma vez que outros casos são menos típicos.

Como resultado da variação da resistividade das camadas do solo, tem-se a variação da dispersão de corrente [2].

Dados de levantamento de resistividade são geralmente apresentados e interpretados sob a forma de resistividade aparente ρ_a , definida como a resistividade em um solo eletricamente homogêneo, isotrópico e que produz um valor medido da relação corrente aplicada e a diferença de potencial, para um arranjo de eletrodos [3].

A medição da resistividade do solo constitui o pilar para o sucesso de projetos de aterramento, especialmente as malhas para subestação. O método escolhido para medição é de soma importância no dimensionamento da malha. As duas configurações de eletrodos mais utilizadas para medição de

resistividade são as configurações de quatro eletrodos de Wenner e Schlumberger. No primeiro, os espaçamentos entre os eletrodos são mantidos iguais a cada medição. Para uma maior precisão os eletrodos devem permanecer centralizados no mesmo ponto, o que irá requerer que os quatro eletrodos sejam movidos em cada medição. No segundo, os eletrodos de potencial são em geral mantidos no mesmo espaçamento do centro de medição, sendo movidos de tempo em tempo quando o sinal torna-se fraco. Portanto, nesse método, apenas os eletrodos de corrente são movidos, o que representa uma economia significativa de tempo e trabalho.

A profundidade de penetração nos métodos Wenner e Schlumberger é determinada principalmente pela separação dos eletrodos de corrente: com o mesmo espaçamento desses eletrodos a penetração da corrente é a mesma [4] e [5]. No entanto, dessa discussão surgem as seguintes questões fundamentais: a profundidade de sondagem esperada é a mesma para os dois métodos? As resistividades aparentes obtidas com os dois métodos, para um mesmo local e em condições similares, são iguais?

Há disseminada uma ideia de que para dois eletrodos de corrente espaçados de L a profundidade efetiva de investigação corresponde a $L/3$ no arranjo de Wenner [2], [1], [6], [7] e $L/2$ no arranjo de Schlumberger. Tais suposições sobre profundidade efetiva de investigação (ou profundidade de penetração) não possuem embasamento teórico e, na prática, dado que os solos são heterogêneos podem resultar incorretas.

Este trabalho compara medições de resistividade utilizando os arranjos Wenner e Schlumberger e correlaciona as profundidades efetivas de investigação em cada modelo. Em seguida são apresentadas medições realizadas em campo, utilizando no eixo das abscissas a profundidade efetiva de investigação. Por último, os resultados serão analisados e contextualizados no plano da pesquisa em andamento.

II. EQUIPAMENTO UTILIZADO

As medições foram realizadas com um terrômetro digital controlado por microprocessador da Megabrás, modelo EM-4055, que permite a medição de resistência de aterramento e de resistividade do terreno.

Antes de iniciar cada medição o equipamento verifica se as condições estão dentro dos limites apropriados e notifica o operador caso haja alguma anormalidade – corrente de interferência muito alta, muita resistências nas estacas, corrente

de teste muito baixa, etc. Não havendo nenhum problema, o aparelho seleciona automaticamente a escala adequada para a medição e mostra os resultados no *display* alfanumérico.

O EM-4055 permite a medição de resistências entre 0,01 Ω e 20 k Ω e de resistividades entre 0,01 Ω m e 50 k Ω m. Conforme especificações técnicas do equipamento a frequência de operação é de 270 ± 1 Hz e a corrente de saída limitada a menos de 3,5 mA RMS [8].

O instrumento encontra-se com calibração recente e a bateria sempre recarregada ao término de cada série. As hastes de sondagem são cravadas até que estejam firmes.

III. MÉTODOS DE MEDIÇÃO

A Fig. 1 representa a vista superior da configuração utilizada neste estudo. São quatro eletrodos (hastes) de 50 cm, espaçados em linha reta e cravados no solo a uma profundidade p de aproximadamente 25 cm. Na configuração de Wenner os espaçamentos a e b são iguais. Percebe-se, portanto, que a configuração de Wenner corresponde ao caso particular da configuração de Schlumberger, quando b equivale a 1/3 do espaçamento total L .

Ambos os métodos medem indiretamente a resistividade e baseiam-se na medição da relação entre tensão e corrente, a que se designa por resistência. As medições de resistência podem ser obtidas injetando uma corrente I nos eletrodos externos (+ I em C1 e $-I$ em C2) e medindo a tensão resultante ΔV entre as duas provas de potenciais (P1 e P2), situadas entre os eletrodos de corrente. A resistência R entre os eletrodos internos, para uma dada configuração, pode ser obtida indiretamente pelo cálculo da relação $\Delta V/I$.

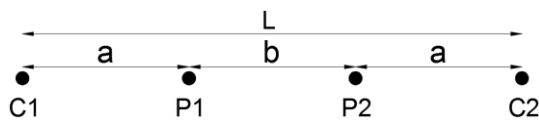


Figura 1 - Configuração de quatro eletrodos

Utilizando o método das imagens simétricas de uma fonte de corrente pontual, a resistividade aparente pode ser calculada pelas equações (1) e (3), supondo que o solo seja homogêneo e isotrópico, onde ρ_{aw} é a resistividade aparente pelo método de Wenner, ρ_{as} é a resistividade aparente pelo método de Schlumberger.

$$\rho_{aw} = K_W \cdot R \quad (1)$$

$$K_W = \frac{4\pi a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4p^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4p^2}}} \quad (2)$$

$$\rho_{as} = K_S \cdot R \quad (3)$$

$$K_S = \frac{4\pi a}{\frac{2b}{(a+b)} + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4p^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(a+b)^2 + 4p^2}}} \quad (4)$$

O termo resistividade aparente é utilizado para distinguir o valor médio da resistividade medida em campo em um solo

real do valor da resistividade que seria determinada por medições laboratoriais em diferentes amostras que compõem a crosta terrestre.

Para o arranjo de Schlumberger, à medida que b se aproxima de zero, o valor da razão $\Delta V/b$ se aproxima do valor do gradiente de potencial no ponto médio do arranjo. Na prática, a sensibilidade do equipamento limita a razão de L para $2b$, usualmente mantida entre os limites de 3 e 30 [3].

$$6 < \frac{L}{b} < 60 \quad (5)$$

Ainda para o arranjo de Schlumberger, durante operações de campo, é comum que os eletrodos internos (de potencial) permaneçam fixos enquanto os eletrodos externos (de corrente) são ajustados para variar a distância a . O espaçamento b é ajustado quando necessário devido à diminuição de sensibilidade da medição e jamais deve ser maior que $0,2 \cdot L$, ou o gradiente de potencial assumido não será válido [3].

$$b < 0,2 \cdot L \quad (6)$$

Considerando as restrições (5) e (6), visando garantir a sensibilidade necessária às leituras obtidas em campo, foram utilizados os seguintes pares de espaçamentos para Schlumberger: $(a, b) = (1,25; 0,5)$, $(4; 1)$, $(9; 1,5)$ e $(18; 1,5)$. Para o arranjo de Wenner foram utilizados os espaçamentos: $(a) = (1; 2; 4; 8 \text{ e } 16)$. Configurações estas que exigiram terrenos com espaços lineares livres de aproximadamente 100 metros. Tal exigência restringe que sejam efetuadas medições de resistividade do solo em centros urbanos com edificações próximas e inviabiliza medições em arranjos com espaçamentos totais superiores a este valor.

IV. PROFUNDIDADE EFETIVA DE INVESTIGAÇÃO

O conceito de profundidade de investigação em medições de resistividade foi proposto por Conrad e Marcel Schlumberger em 1932 e foi subsequentemente discutido por vários autores para uma variedade de configurações de eletrodos e estruturas de solo [9].

Em 1938 Evjen definiu profundidade de investigação como sendo a profundidade na qual uma fina camada faz a máxima contribuição para o sinal total medido na superfície [9].

Posteriormente, Roy e Apparao introduziram em [5] o conceito de profundidade característica de investigação, do inglês *Depth of Investigation Characteristic (DIC)*, para resistividade de arranjos sobre um solo homogêneo. Ao invés de discutirem a distribuição de corrente nas camadas subterrâneas eles examinaram a contribuição de cada volume elementar de solo para o sinal total ($\Delta V/I$) observado na superfície.

Considerando que na Fig. 1 o plano xy coincide com a superfície do solo, que o eletrodo C1 está na origem deste plano e que o eixo z aponta para baixo, tem-se a equação (7), onde $V(x,y,z)$ representa o potencial em qualquer ponto na superfície do solo, gerado pela corrente I injetada no eletrodo pontual localizado em C1.

$$V(x,y,z)=\frac{\rho I}{2\pi}\left\{\frac{1}{(x^2+y^2+z^2)^{1/2}}-\frac{1}{[(x-2a-b)^2+y^2+z^2]^{1/2}}\right\} \quad (7)$$

Integrando a contribuição dessa fina camada na superfície do solo, e normalizando de modo que o sinal total seja igual à unidade, Roy e Apparao em [5] construíram curvas normalizadas de profundidade característica de investigação, do inglês *Normalized Depth of Investigation Characteristic (NDIC)* para vários arranjos. Em cada caso, foi demonstrado que a contribuição máxima surge a partir de uma camada a uma profundidade definida.

$$DIC=\int_{x=y=-\infty}^{x=y=+\infty} dV_{P_1P_2} \quad (8)$$

$$NDIC=\frac{DIC}{\int_{z=-\infty}^{z=+\infty} DIC} \quad (9)$$

$$\int_0^{z_{max}} NDIC = 1 \quad (10)$$

Posteriormente, Edwards sugeriu que o valor da profundidade de investigação poderia ser fornecido pelo valor médio da curva DIC de Roy e não pelo valor máximo [9]. As curvas NDIC não são simétricas em relação ao máximo, mas são enviesadas em direção a profundidades maiores. Motivo pelo qual Edwards sugeriu intuitivamente que o valor máximo talvez não fosse a melhor escolha para a profundidade de investigação e que o valor médio seria preferível [10].

A fim de distinguir as duas definições, Edwards referiu à sua medida como sendo a profundidade efetiva de investigação.

$$\int_0^{z_{med}} NDIC = 1/2 \quad (11)$$

Barker demonstrou em [9] que a definição proposta por Edwards produz, claramente, resultados mais precisos.

Considerando o arranjo proposto na Fig. 1 e desenvolvendo as equações apresentadas em (7), (8) e (9) obtém-se a expressão (12) para o NDIC, onde k corresponde à razão b/L .

$$NDIC=\frac{dz}{L} \cdot \frac{(1-k^2)}{k} \cdot \left[\frac{\left(\frac{z}{L}\right)}{\left\{\frac{1}{4}(1-k)^2+4\left(\frac{z}{L}\right)^2\right\}^{3/2}} - \frac{\left(\frac{z}{L}\right)}{\left\{\frac{1}{4}(1+k)^2+4\left(\frac{z}{L}\right)^2\right\}^{3/2}} \right] \quad (12)$$

Nota-se, com base na equação (12), que para cada valor de k haverá uma curva NDIC correspondente. Ou seja, no arranjo de Schlumberger haverá razões z_{med}/L variáveis, a depender do espaçamento utilizado na configuração de eletrodos, ao contrário do arranjo de Wenner, onde a razão é fixa. As curvas correspondentes ao segundo e ao terceiro termo da equação proposta em (12) são apresentadas na Fig. 2.

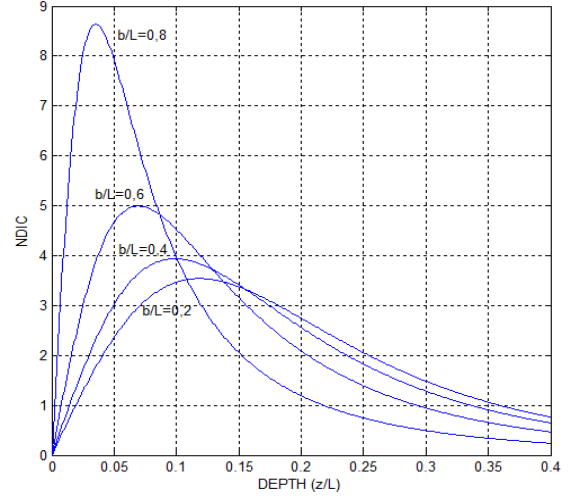


Figura 2 – Profundidade efetiva de investigação normalizada

Desenvolvendo a expressão (11), conforme a profundidade de investigação definida por Edwards, para o arranjo de eletrodos proposto na Fig. 1 obter-se-á a equação (13).

$$\frac{1}{\left[\frac{1}{4}(1-k)^2+4\left(\frac{z}{L}\right)^2\right]^{1/2}} - \frac{1}{\left[\frac{1}{4}(1+k)^2+4\left(\frac{z}{L}\right)^2\right]^{1/2}} = \frac{2k}{(1-k^2)} \quad (13)$$

O conjunto de soluções (b/L , z/L) para a igualdade (13) é apresentado na Fig.3.

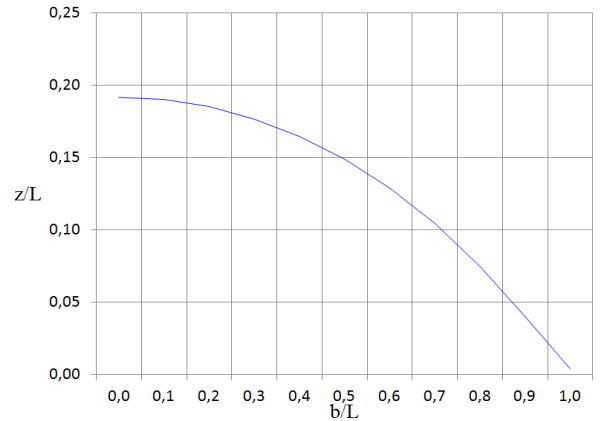


Figura 3 – Profundidade efetiva de investigação versus relação b/L

A modelagem apresentada neste tópico permite determinar a profundidade efetiva de investigação alcançada em cada conjunto de espaçamentos indicado na Fig.1 no decorrer das medições. Esta valiosa informação é utilizada nas próximas seções, onde foram apresentadas medições de campo efetivamente realizadas em dois locais com solos distintos.

V. MEDIÇÕES DE CAMPO

A escolha de locais para medições em campo, utilizando métodos com hastes de sondagem verticais colineares espaçadas horizontalmente, é difícil, haja vista as grandes dimensões exigidas para o espaçamento L. Soma-se a isto o conhecimento adquirido na seção anterior, especialmente resumido na Fig.3, onde foi demonstrado que a profundidade efetiva de investigação é inferior a 20% do comprimento total L medido entre os eletrodos de corrente C1 e C2. Devido a indisponibilidade de grandes áreas foram adotadas configurações de eletrodos para espaçamento L de aproximadamente 100 metros, no máximo, o que corresponde a profundidades efetivas de investigação inferiores a 20 metros.

Medições de resistência, e posterior cálculo da resistividade aparente do solo, em profundidades maiores às apresentadas neste trabalho exigem espaçamentos também maiores, o que torna rara a disponibilidade de espaços livres de interferências, especialmente em grandes centros urbanos.

Definidos os locais para medição, identificados de agora em diante como local #1 e local #2, foi esticado um cordão de nylon e cravadas estacas de madeira em suas extremidades e também no ponto central, garantindo assim que as hastes de sondagem são instaladas sempre no mesmo alinhamento e sempre nos mesmos locais. As estacas de madeira, às quais são chamadas de estacas testemunhas, permanecem fixadas no solo, garantindo que as séries de medições sejam sempre realizadas no mesmo alinhamento e local. Com o intuito de facilitar os trabalhos em campo e garantir precisão no posicionamento das hastes de sondagem foram utilizadas duas trenas de 50 metros, sendo esticada uma para cada lado e tendo cada uma o ponto zero coincidente como ponto central do espaçamento L.

Ambos os locais escolhidos são planos, recobertos com grama batatais, tipo comum, com existência de árvores nas proximidades. Com auxílio de uma escavadeira realizou-se furos para coleta de amostras de solo com aproximadamente 60 centímetros de profundidade e 20 centímetros de diâmetro, sendo um em cada local e próximos ao ponto central de L. Embora a profundidade de investigação máxima seja de quase 20 metros, 60 centímetros é a profundidade provável de instalação dos condutores de aterramento em sistemas de aterramentos, como malhas e eletrodos horizontais. No local #1 observou-se um solo amarelo ocre, de granulometria siltosa, com presença de pisólitos de concreções ferruginosas e fragmentos centimétricos subarredondados de quartzo e presença acentuada de matéria orgânica. No local #2 observou-se um solo salte argiloso de coloração amarelo ocre, com presença de matéria orgânica. É importante ressaltar que ambos os locais, por estarem próximos de áreas onde já foram executadas grandes obras, os terrenos não são virgens e

provavelmente tenham sofrido compactação e até mesmo acréscimo ou retirada de material, similaridade esta totalmente compatível com áreas onde malhas de aterramento são geralmente implantadas.

Monitorar as interferências climáticas na resistividade aparente do solo é também um dos objetivos das séries de medições, motivo pelo qual foi definida periodicidade de dois meses para repetição das mesmas. Até o presente momento foram realizadas cinco séries de medições em quatro locais diferentes, porém este trabalho apresenta somente os resultados de duas séries e em dois locais.

Na primeira série de medições, realizada nos dias 6 e 7 de janeiro de 2016, o solo estava muito úmido, típico do período chuvoso. Já na segunda série, realizada nos dias 16 e 18 de março de 2016, já no fim do período chuvoso, o solo estava com características normais, ou seja, nem muito seco e nem encharcado. Estes fatos podem ser observados na Fig. 4.

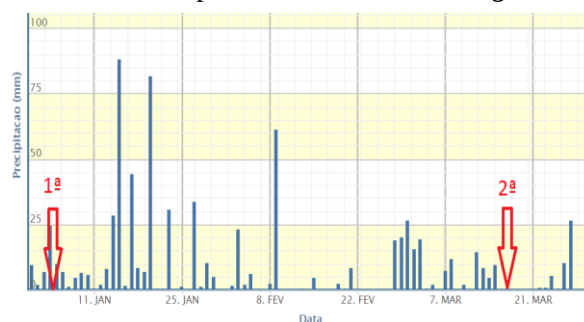


Figura 4 – Histórico de precipitação: 01/01 à 30/03/2016 [12]

Os valores obtidos em campo para a resistividade aparente dependem da geometria dos eletrodos e também da resistividade do solo. Como a geometria dos eletrodos foi mantida em todas as séries, as variações observadas ao longo do tempo foram atribuídas apenas aos efeitos climáticos. Vários fatores determinam a resistividade do solo, como por exemplo: tipo de solo, umidade, concentração e tipos de sais dissolvidos na água, compactação do solo, granulometria, temperatura e estrutura geológica (estratificação). Estes parâmetros não serão individualmente analisados no trabalho, tendo sido observado apenas a resultante das modificações produzidas na resistividade aparente do solo ao longo do tempo (séries de medições).

Nas tabelas I, II, III e IV são apresentados os valores obtidos em campo, já calculados utilizando (1) e (3).

TABELA I
RESISTIVIDADE APARENTE POR WENNER – LOCAL #1

Espaçamentos [m]				06/01/2016		18/03/2016	
b	L	z_{med}	K_w	R [Ω]	ρ_{aw} [Ωm]	R [Ω]	ρ_{aw} [Ωm]
1	3	0,5	6,9	68,1	471	75,4	521
2	6	1,0	12,9	39,3	507	42,1	543
4	12	2,1	25,3	21,1	534	17,4	441
8	24	4,2	50,4	17,6	888	8,5	429
16	48	8,3	100,6	7,7	774	5,0	501

TABELA II
RESISTIVIDADE APARENTE POR SCHLUMBERGER – LOCAL #1

Espaçamentos [m]				06/01/2016		18/03/2016	
b	L	z_{med}	K_s	R [Ω]	ρ_{as} [Ωm]	R [Ω]	ρ_{as} [Ωm]
0,5	3	0,6	14,9	36	536	39,4	587
1	9	1,7	63,4	14,1	892	5,1	321
1,5	19,5	3,7	198	11,1	2.207	7,6	1.510
1,5	37,5	7,2	735	12,4	9.135	4,7	3.486

TABELA III
RESISTIVIDADE APARENTE POR WENNER – LOCAL #2

Espaçamentos [m]				07/01/2016		16/03/2016	
b	L	z_{med}	K_w	R [Ω]	ρ_{aw} [Ωm]	R [Ω]	ρ_{aw} [Ωm]
1	3	0,5	6,9	103,3	714	109	752
2	6	1,0	12,9	69	890	65,6	846
4	12	2,1	25,3	38,7	979	33,2	840
8	24	4,2	50,4	8,7	439	3,2	160
16	48	8,3	100,6	3,8	381	3,4	345

TABELA IV
RESISTIVIDADE APARENTE POR SCHLUMBERGER – LOCAL #2

Espaçamentos [m]				07/01/2016		16/03/2016	
b	L	z_{med}	K_s	R [Ω]	ρ_{as} [Ωm]	R [Ω]	ρ_{as} [Ωm]
0,5	3	0,6	14,9	47,5	707	52,7	218
1	9	1,7	63,4	18,5	1.174	7,9	125
1,5	19,5	3,7	198	23,4	4.641	13,2	646
1,5	37,5	7,2	735	22,0	16.182	8,1	1.481

Os resultados apresentados nas Tabelas I à IV mostram discrepância para os valores de resistividade aparente medidos pelos dois arranjos de eletrodos (Wenner e Schlumberger) para um mesmo local e data. Tais discrepâncias e a necessidade de representar graficamente os resultados em um sistema de eixos coordenados é que motivou a pesquisa, a qual ainda se encontra em desenvolvimento.

VI. ANÁLISE DE RESULTADOS E CONCLUSÕES

A interpretação das medições de resistividade do solo é a parte mais difícil do programa de medição. A escolha do modelo que pode representar com mais aproximação o solo real não é um trabalho fácil. As razões dessa difícil tarefa decorrem de solos onde a resistividade varia significativamente com a profundidade e de variações sazonais. Assim, a possibilidade de que o modelo do solo combine perfeitamente com o estado real do mesmo é bastante improvável, conforme consta em [11].

Este trabalho limita-se ao programa de medição e a aplicação da proposta do conceito de profundidade efetiva, para o qual espera que os resultados obtidos pelos dois métodos de medição apresentem coerência. Modelagem e estratificação do solo serão apresentadas em etapas futuras da pesquisa que ora encontra-se em desenvolvimento.

Para as próximas medições avaliaremos o recurso disponível no aparelho para medições com configuração de eletrodos igualmente espaçados (Wenner), no qual o operador informa o espaçamento e o próprio equipamento estima a resistividade aparente. Este valor será comparado com o calculado pela equação (1). Avaliaremos também a possibilidade de empregar fontes de tensão de valor mais elevado, proporcionando assim correntes adequadas à sensibilização dos circuitos de medição e em último caso, práticas de umedecimento do solo nas proximidades das hastes de corrente.

Entretanto, a abordagem aqui exposta permite-nos gerar gráficos da resistividade aparente medida em campo (ordenadas) versus a profundidade efetiva de investigação (abscissas). Informação central para a correta modelagem e estratificação do solo, cuja compreensão do significado e dos fenômenos envolvidos, conforme expostos nas seções precedentes, garantem êxito no dimensionamento de malhas de aterramento.

Com auxílio da Fig.3 é possível projetar a grandeza b/L , na curva de profundidade efetiva de investigação e obter o valor de z/L . Uma vez conhecido L , segunda coluna das tabelas, é possível determinar a profundidade efetiva de investigação z_{med} e gerar as curvas de resistividade aparente.

Os resultados obtidos são apresentados nas Fig. 5 à 8.

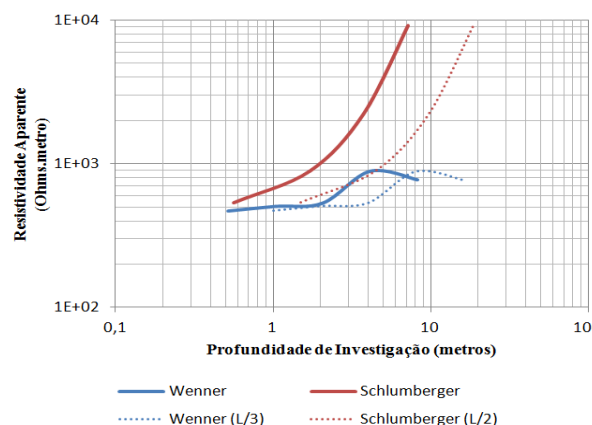


Figura 5 – Resistividade aparente no local #1 dia 06/01/2016

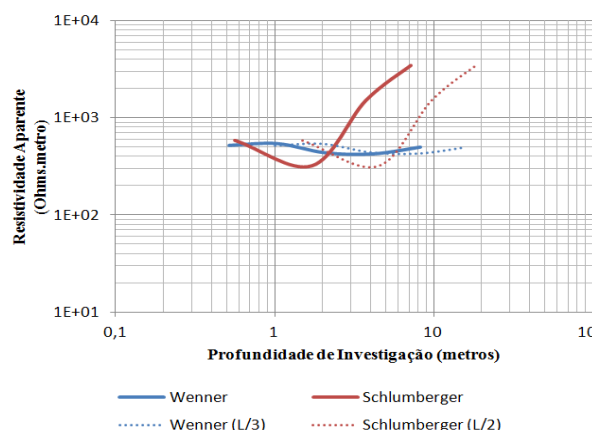


Figura 6 – Resistividade aparente no local #1 dia 18/03/2016

As linhas pontilhadas correspondem à forma intuitiva de profundidade de investigação, sendo $L/3$ no arranjo Wenner e $L/2$ no arranjo de Schlumberger, e permitem comparação com os resultados gerados pela teoria de profundidade efetiva de investigação.

É importante destacar a necessidade de compreensão dos fenômenos envolvendo solo e malhas de aterramento. O entendimento dos conceitos é a questão fundamental para capacitar o projetista na definição de práticas apropriadas de projeto, consoantes às particularidades de aplicação [1].

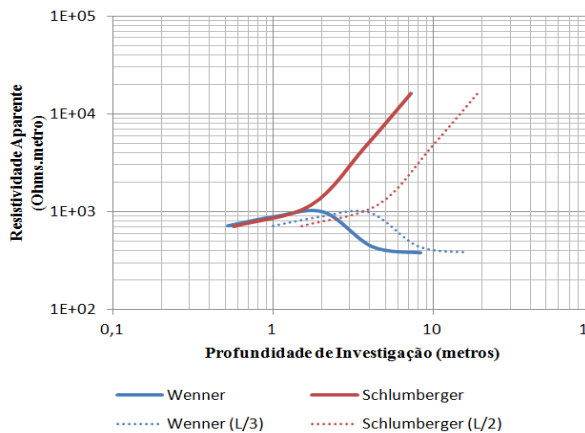


Figura 7 – Resistividade aparente no local #2 dia 07/01/2016

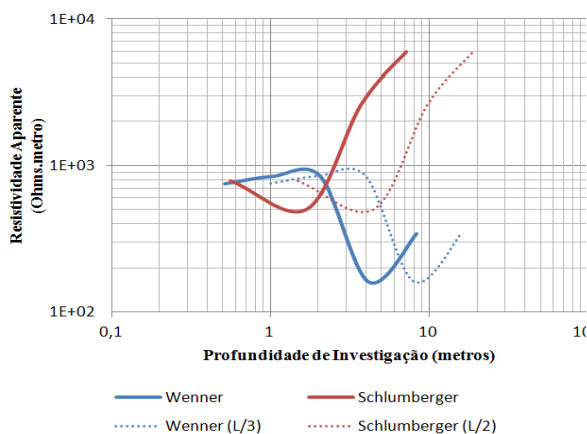


Figura 8 – Resistividade aparente no local #2 dia 16/03/2015

Apesar de não se observar concordância dos gráficos dos resultados, as medições são coerentes.

Esperava-se que as curvas de resistividade para os métodos de Wenner e Schlumberger concordassem, o que não foi observado nas Fig. 5 à 8. Tal discrepância ainda não foi compreendida e continuará a ser objeto de estudo dentro do projeto de pesquisa ora em andamento.

Sendo o programa de medições a etapa inicial do projeto, garantir assertividade nos métodos e interpretação clara dos resultados é premissa ao bom desenvolvimento do mesmo.

A grande contribuição deste trabalho consiste na consolidação da abordagem matemática apresentada, enfatizando a profundidade efetiva de investigação, dando-lhe

tratamento científico embasado, ao invés de conceitos disseminados sem fundamentação plausível.

A pesquisa continua e novos desenvolvimentos estão sendo realizados tanto no que se refere às medições de campo quanto na área das deduções matemáticas aplicadas ao tema.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] Visacro, Silvério, “Aterramentos Elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento”, São Paulo: Artliber Editora, 2002.
- [2] G. Kinderman, J. M. Campagnolo, “Aterramento Elétrico”, 5ª Edição, Florianópolis: UFSC, 2002.
- [3] Engineer Manual 1110-1-1802, US Army Corp of Engineering, “Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations”, 1995.
- [4] W. Ruan, R. D. Southey, S. Fortin, F. P. Dawalibi, “Effective Sounding Depths for HVDC Grounding Electrode Design: Wenner versus Schlumberger Methods”, Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES. Dalian, China.
- [5] A. Roy and A. Apparao, “Depth of Investigation in Direct Current Methods”, Geophysics, Vol. 36, 943-959, 1971.
- [6] Norma Técnica Celg 60, “Critérios para Projetos e Procedimentos para Execuções de Aterramentos de Redes Aéreas e Subestações de Distribuição”, Celg Distribuição S. A., 2008.
- [7] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012, “Medição da Resistividade e Determinação da estratificação do solo”, NBR 7117, Rio de Janeiro.
- [8] Manual do Usuário - Terrômetro digital controlado por microprocessador – EM-4055
- [9] R. D. Barker, “Depth of Investigation of Collinear Symmetrical four-electrode Arrays”, Geophysics, Vol. 54, 1031-1037, 1989.
- [10] L. S. Edwards, “A Modified Pseudosection for Resistivity and IP”, Geophysics, Geophysics, Vol. 42, 1020-1036, 1977.
- [11] L. Massimiliano, “Accurate Evaluation of the Ground Impedance of Real Earthing Systems”, Università Degli Studi di Padova, Facoltà di Ingegneria, Anno Accademico 2011/2012.
- [12] Site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf, acessado dia 04/04/2016 às 22:06 horas.