

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RENAN DE JESUS ALVES

**ATERRAMENTO ELÉTRICO EXPERIMENTAL UTILIZANDO
CONCRETO E SERRAGEM DE MADEIRA COMO AGREGADO**

São Carlos
2014

RENAN DE JESUS ALVES

ATERRAMENTO ELÉTRICO EXPERIMENTAL UTILIZANDO CONCRETO E SERRAGEM DE MADEIRA COMO AGREGADO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de São
Carlos, da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em
Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim

São Carlos
2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

A472a Alves, Renan de Jesus
Aterramento elétrico experimental utilizando concreto e serragem de madeira como agregado / Renan de Jesus Alves; orientador Ruy Alberto Altafim. São Carlos, 2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

1. Aterramento elétrico experimental. 2. Aterramento com concreto. 3. Aterramento. 4. Medição de resistência de terra. 5. Concreto com serragem de madeira. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Renan de Jesus Alves

Título: "Aterramento elétrico experimental utilizando concreto e serragem de madeira como agregado"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 21/11/2014,

com NOTA 5,0 (cinco, zero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Titular Ruy Alberto Corrêa Altafim - (Orientador - SEL/EESC/USP)

Mestre Wellington Maycon Santos Bernardes - (Doutorando - SEL/EESC/USP)

Mestre Daniel Augusto Pagi Ferreira - (Doutorando - SEL/EESC/USP)

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

“Audaces Fortuna Juvat: O destino ajuda os corajosos”

Virgílio, poeta romano

Agradecimentos

Sou bastante cético, mas não ateu. Portanto, agradeço em primeiro lugar a Deus, que permitiu que as oportunidades da vida chegassem a mim e eu as agarrei.

Agradeço a minha mãe Maria Aparecida Lima Alves, que me educou muito bem e deu todo o amor do mundo. Ela é a minha sustentação na Terra, principalmente após a morte de meu pai na infância. Acredito que se vivo estaria bastante orgulhoso do filho dele. Agradeço também a minha avó Irene Gardin e demais amigos e parentes presentes em minha festa de formatura.

Vai também o meu muito obrigado ao prof. Dr. Ruy Altafim, meu orientador e professor em disciplinas, que me auxiliou neste trabalho e será o meu último professor da graduação, e também aos funcionários da prefeitura do campus e do departamento de Engenharia Elétrica (especialmente ao técnico César Domingues) que colaboraram para este trabalho.

Não menos importante são os meus amigos de São Carlos, os quais não cito nomes pois tenho certeza de que esquecerei de alguns. Foram anos maravilhosos que eu passei em São Carlos junto com eles, seja morando, estudando, festejando, trabalhando e dividindo os problemas e as alegrias da vida.

Resumo

O aterramento elétrico é um fator muito importante na proteção de sistemas elétricos de potência. Para o estudo de aterramentos é necessário entender o conceito de resistência de terra, a qual é deduzida da teoria do Eletromagnetismo, e é diferente da expressão para condutor metálico. Este trabalho aborda a instalação de um sistema de aterramento experimental com concreto e cavacos de madeira, em que será medida e comparada a resistência elétrica com um aterramento comum de uma haste, e ambos no mesmo terreno. Sabe-se que o concreto retém água por um determinado tempo e que a madeira é higroscópica, o que justifica a mistura para a preparação do concreto especial. Foram obtidos bons resultados para a resistência do aterramento, o que mostra a priori uma redução de valores para as mesmas condições de terreno.

Palavras-chave: Aterramento, Aterramento elétrico experimental, Aterramento com concreto, Concreto com serragem de madeira, Medição de resistência de terra.

Abstract

The electrical grounding is a very important factor on the electrical power systems protection. For the grounding study it is necessary understand the earth resistance concept, which is inferred from Electromagnetism theory and is not equal to metallic conductor resistance equation. This study approaches to a probationary grounding system installation with concrete and woodchips, and then the electrical resistance will be measured and compared with an ordinary grounding system of single rod, both systems on the same land. It is known that concrete retains water during a determined period and wood has the property of higroscopy, which justify the mix for the special concrete. Good results were achieved for the earth resistance, showing a reduction in a first moment for the same land conditions.

Keywords: Grounding, Experimental Electrical Grounding System, Grounding with Concrete, Concrete with Woodchips, Earth Resistance Measurement.

Lista de figuras

Figura 1 - Haste cobreada enterrada no solo e conectado ao fio terra.....	23
Figura 2 - Tensão de toque metal-metal.....	26
Figura 3 - Tensão de passo.....	27
Figura 4 - Tensão de toque.....	28
Figura 5 - Esquema da seção transversal de um condutor cilíndrico	30
Figura 6 - Sistema de coordenadas esféricas.....	33
Figura 7 - Hemisférios de terra	33
Figura 8 - Esquema das distâncias a e b da expressão de resistência de terra e elemento diferencial dr	34
Figura 9 - Resistência de aterramento versus distância.....	35
Figura 10 - Esquema de uma haste enterrada.....	36
Figura 11 - Esquema de n hastes enterradas e colineares, com $s > L$	37
Figura 12 - Zona de influência de uma haste aterrada	38
Figura 13 - Haste aterrada no solo	39
Figura 14 - Duas hastes em paralelo enterradas no solo	40
Figura 15 - Triângulo equilátero de lado e.....	42
Figura 16 - Aterramento real em triângulo equilátero.....	43
Figura 17 - Quadrado de lado a.....	43
Figura 18 - Círculo de raio R	44
Figura 19 - Relação de resistências entre solo tratado e não tratado quimicamente vs resistividade em Ωm	48
Figura 20 - Procedimento de aplicação do gel químico no tratamento do solo.....	49
Figura 21 - Megger e a ligação dos eletrodos em seus terminais no método de Wenner.....	52
Figura 22 - Esquema dos eletrodos usando Megger e o Método de Wenner	52
Figura 23 - Distribuição equipotencial da corrente no solo, em que x é a distância e I a corrente	53
Figura 24 - Esquemático de ligação e curva de potencial no solo.....	54
Figura 25 - Região de patamar e esquemático de eletrodos X e Z	55
Figura 26 - Esvaecimento da região de patamar	56
Figura 27 - Estratificação do solo	57
Figura 28 - Solo estratificado em 2 camadas	59
Figura 29 - Curvas ρ versus a para valores de K positivo e negativo	59
Figura 30 - Haste Copperweld padrão de 2,4 m de comprimento.....	61
Figura 31 - Detalhe do formato da ponta da haste Copperweld.....	62
Figura 32 - Esquemático construtivo de um megôhmetro	62
Figura 33 - Esquemático do megôhmetro em curto-circuito.....	63
Figura 34 - Esquemático de um megôhmetro com uma resistência de valor finito R_x	64
Figura 35 - Megger utilizado neste trabalho	64
Figura 36 - Detalhe do botão multiplicador da escala.....	65
Figura 37 - Detalhe dos 3 botões indicadores do valor da resistência.....	65
Figura 38 - Trado manual operado por duas pessoas que formam um binário de forças.....	66
Figura 39 - Máquina perfuratriz utilizada para grandes furos	67
Figura 40 - Cavaco de eucalipto e pinus de espessura grossa	70

Figura 41 - Cimento e pedra sendo preparados.....	70
Figura 42 - Betoneira utilizada na produção	71
Figura 43 - Produção e adição de água por funcionário da prefeitura do campus	71
Figura 44 – Preenchimento do furo.....	72
Figura 45 - Furo preenchido e haste inserida	72
Figura 46 - Terreno escolhido ao lado do prédio da Engenharia Elétrica e campo de futebol.....	73
Figura 47 - Medição com $L_1 = 2\text{ m}$ e $L_2 = 4\text{ m}$	77
Figura 48 - Detalhe da conexão do fio ao eletrodo de potencial P2.....	77
Figura 49 - Haste cravada no concreto e conectada ao fio do Megger.....	78
Figura 50 - Eletrodos com espaçamento de 3 m entre si, a 90° de distância das primeiras medições, na direção do campo de futebol.....	78
Figura 51 - Gráfico dos valores de resistência do aterramento comum em diferentes dias do mês de agosto.....	79
Figura 52 - Gráfico comparativo dos valores de resistência do aterramento comum versus aterramento experimental no mês de agosto	79
Figura 53 - Gráfico comparativo dos valores de resistência do aterramento comum versus aterramento experimental no mês de outubro	80
Figura 54 - Gráfico dos valores de resistência do aterramento experimental em duas medições em agosto e outubro	80

Lista de tabelas

Tabela 1 - Fator de redução K para múltiplas hastes paralelas	42
Tabela 2 - Resistividades dos solos.....	57
Tabela 3 - Medidas aterramento comum, em 20/08.....	74
Tabela 4 - Medidas aterramento comum, em 25/08.....	74
Tabela 5 - Medidas aterramento comum, em 28/08.....	75
Tabela 6 - Medidas aterramento concretado, em 28/08	75
Tabela 7 - Medidas aterramento comum, em 13/10.....	76
Tabela 8 - Medidas aterramento concretado, em 13/10	76
Tabela 9 - Medidas aterramento concretado, em 13/10, num ângulo de 90° das anteriores	76

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	23
2	DEFINIÇÕES E TERMOS TÉCNICOS.....	25
2.1	Haste de aterramento.....	25
2.2	Resistência de aterramento.....	25
2.3	Resistividade	26
2.4	Tensão de toque metal-metal.....	26
2.5	Tensão de passo.....	27
2.6	Elevação do potencial de terra (GPR: Ground Potential Rise).....	27
2.7	Tensão de toque.....	27
3	REVISÃO TEÓRICA	29
3.1	Densidade de corrente	29
3.2	Expressão para a resistência de um condutor metálico	30
3.3	Expressão geral para a resistência.....	31
3.4	Resistência de terra.....	32
3.4.1	Hemisfério de terra	32
3.4.2	Cálculo da expressão para resistência de terra	33
3.4.3	Curva característica da resistência de terra.....	34
3.5	Cálculo da resistência das hastes de aterramento	35
3.5.1	Expressão para uma haste aterrada	35
3.5.2	Expressão para duas hastes em paralelo aterradas.....	36
3.5.3	Expressão para múltiplas hastes aterradas	37
4	CONFIGURAÇÕES DE ATERRAMENTO	39
4.1	Resistência de uma haste vertical.....	39
4.2	Resistência de hastes em paralelo	40
4.2.1	Índice de redução.....	41
4.3	Resistência de um sistemas de hastes formando um triângulo.....	42
4.4	Resistência de um sistema de hastes formando um quadrado	43
4.5	Resistência de um sistema de hastes em circunferência.....	44
4.6	Hastes profundas	44
5	TRATAMENTO QUÍMICO DO SOLO	47
6	MÉTODO DE MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA E RESISTIVIDADE	51

6.1	Fórmula de Palmer	51
6.2	Instrumento Megger e o Método de Wenner.....	51
6.2.1	Recomendações para medição.....	53
6.3	Método dos 3 eletrodos	54
6.4	Região de patamar e zona de influência mútua das hastes	55
6.5	Resistividade do solo.....	56
6.6	Estratificação do solo	57
7	TRABALHO EXPERIMENTAL.....	61
7.1	Haste cobreada <i>Copperweld</i>	61
7.2	Megger à manivela	62
7.3	Trado	66
7.4	Concretagem	67
7.4.1	Definições.....	67
7.4.2	Agregados.....	67
7.4.3	Traço do concreto	69
7.4.4	Enchimento do furo	72
8	RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS	73
8.1	Medidas de resistência de terra comum	73
8.2	Medidas de resistência de terra após concretagem da haste.....	75
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO	81
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
11	APÊNDICE A – Croqui dos furos e das hastes no solo	85

1 INTRODUÇÃO

A proteção de Sistemas de Energia Elétrica tem como um dos elementos principais o aterramento. Para o estudo de aterramentos é necessário entender o conceito de resistência de terra, a qual não é uma função linear da tensão e corrente. A resistência de terra nada mais é do que a oposição oferecida ao fluxo da corrente elétrica do eletrodo de aterramento para a terra que o circunda. Também é necessário o entendimento da densidade de corrente elétrica e sua distribuição no solo. A qualidade do aterramento também influencia sistemas que *a priori* são independentes, mas em determinadas situações são acoplados eletricamente (CHANG, J. C. et al, 2003). Geralmente isso ocorre devido à elevação do potencial de terra no momento de escoamento de uma corrente faltosa.

Este trabalho consistirá na construção, medição e comparação de um novo aterramento, em que a haste de aterramento padrão de 2,4 m será concretada com um concreto especial, tendo como agregado serragem de madeira. Será apresentado as bases teóricas existentes na literatura de Engenharia Elétrica constituintes deste trabalho, bem como as normas que regem os procedimentos adotados na medição da resistência de terra e o método com os equipamento utilizados.

A medição será realizada em corrente contínua por meio de um Megger, não podendo, portanto, ser afirmado categoricamente que o resultado encontrado será semelhante para frequências diversas. A concretagem utilizada requer análise e cálculo estrutural dependendo de onde vier a ser aplicada.

Em suma, as seguintes características precisam ser observadas, pois afetam diretamente a qualidade e o valor da resistência de aterramento:

- Tipo da haste;
- Disposição das hastes ou geometria da malha;
- Tipo e resistividade do solo;
- Acoplamento do fio terra à haste de aterramento.

2 DEFINIÇÕES E TERMOS TÉCNICOS

Neste capítulo, serão apresentados algumas definições e termos técnicos comumente vistos na área de aterramento elétrico, bem como as normas que os regem.

2.1 Haste de aterramento

Trata-se de uma barra padronizada de aço carbono trefilado, recoberta com uma camada de cobre eletrolítico com 95% de pureza, sem traços de zinco e com espessura mínima de 0,25 mm, conforme a norma ABNT NBR 13571 (1996).

Para os ensaios deste trabalho, será usada uma haste conforme descrita por normas técnicas anteriormente. O cobre, tendo menor resistência elétrica que o aço, também poderia permitir solda exotérmica na conexão com o fio terra. Isto faz com que se obtenha uma resistência mais baixa na junção caso fosse unido com um anel de aperto. Ver figura 1.



Figura 1 - Haste cobreada enterrada no solo e conectada ao fio terra

2.2 Resistência de aterramento

É a resistência medida no terrômetro, indicando em quantos ohms a terra resiste à passagem da corrente elétrica que por ela flui. Sendo assim, precisa-se considerar a resistência:

- da haste;
- da junção com o fio terra e qualquer outra conexão presente;
- contato da haste com a terra;
- dos hemisférios de terra.

2.3 Resistividade

Grandeza física, inverso da condutividade. Sendo assim, a resistividade pode ser entendida como a relação entre o campo elétrico E e a densidade de corrente J . Sua unidade é $[\Omega m]$ e ela é diretamente proporcional ao valor da resistência elétrica.

2.4 Tensão de toque metal-metal

Diferença de potencial entre objetos metálicos ou estruturas energizadas, que poderiam formar um circuito fechado se uma pessoa tocasse com suas duas mãos cada uma das partes, ou então com mão e pé. Definição segundo IEEE 80/2000. Ver figura 2.

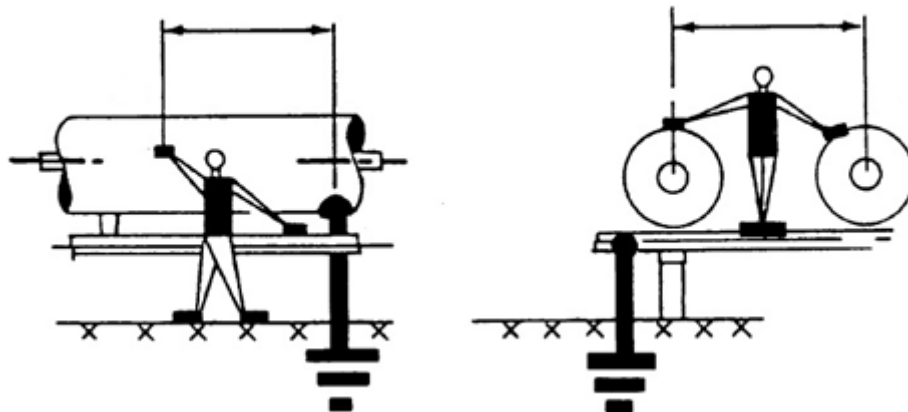


Figura 2 - Tensão de toque metal-metal

Fonte: DEPARTMENT OF DEFENSE USA (1987)

2.5 Tensão de passo

Diferença de potencial de superfície, experimentada por uma pessoa com passo maior ou igual a 1 m de distância entre suas pernas, sem tocar nenhuma parte aterrada (IEEE 80, 2000). Ver figura 3.

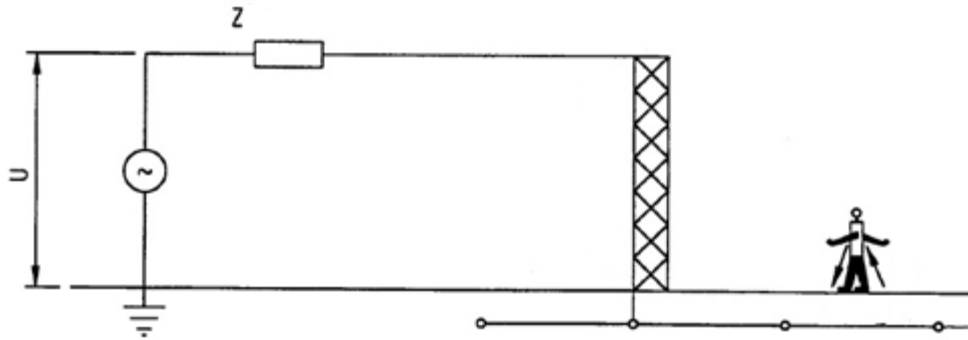


Figura 3 - Tensão de passo

Fonte: DEPARTMENT OF DEFENSE USA (1987)

2.6 Elevação do potencial de terra (GPR: Ground Potential Rise)

No momento do escoamento de uma corrente de surto, o potencial da terra é momentaneamente elevado, pois, pela lei de Ohm, resistência vezes corrente resulta numa tensão. Sendo assim, o GPR é a máxima diferença de potencial que a haste pode atingir em relação a um ponto muito remoto de terra (IEEE 80, 2000).

2.7 Tensão de toque

Diferença de potencial que uma pessoa experimenta, tocando uma parte aterrada, no momento em que uma corrente de falta é escoada (IEEE 80, 2000). Ver figura 4.

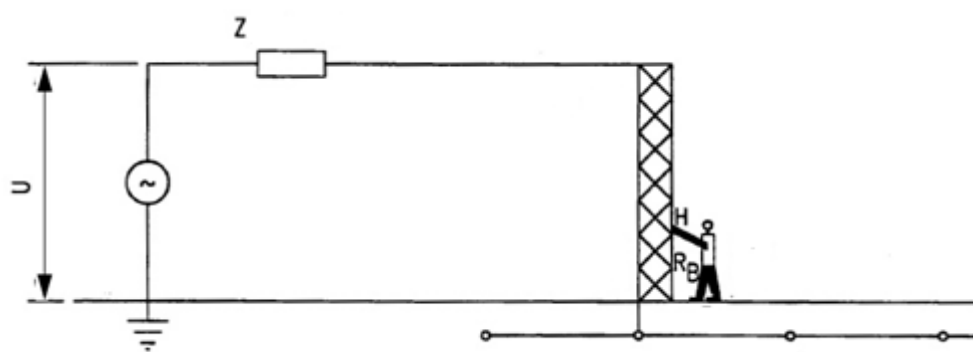


Figura 4 - Tensão de toque

Fonte: DEPARTMENT OF DEFENSE USA (1987)

3 REVISÃO TEÓRICA

Para que se possa entender melhor as bases deste trabalho, precisa-se recorrer à teoria do Eletromagnetismo para explicar e diferenciar determinadas fórmulas que se apresentarão com frequência ao longo do estudo.

3.1 Densidade de corrente

A densidade de corrente elétrica pode ser entendida como sendo quão intensa é a corrente numa determinada área de um material que a está conduzindo. É uma grandeza vetorial que tem a mesma direção do campo elétrico.

Quando aplicado um campo elétrico num material condutor, os elétrons de carga q experimentarão a força F :

$$\vec{F} = -q\vec{E} \quad (\text{eq. 1})$$

onde:

- $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ [C]
- E : campo elétrico [V/m]

Sofrendo força, a partícula será acelerada. A velocidade de deriva v_d é linearmente dependente de E pela mobilidade eletrônica μ_e :

$$\vec{v}_d = -\mu_e \vec{E} \quad (\text{eq. 2})$$

Dispensando maiores deduções, a densidade de corrente J pode ser entendida como o produto da densidade volumétrica de carga ρ_v pela velocidade dos elétrons:

$$\vec{J} = \rho_v \vec{v}_d \quad (\text{eq. 3})$$

Substituindo a equação 2 em 3, tem-se agora:

$$\vec{J} = -\rho_e \mu_e \vec{E} \quad (\text{eq. 4})$$

A equação 4 mostra que ρ_v foi trocado por ρ_e , que é a densidade de carga de elétrons livres, pois a densidade de carga total ρ_v é zero, já que as quantidades de elétrons e prótons são iguais no material neutro.

Sabe-se que $\vec{J}$ e $\vec{E}$ estão relacionados por meio da condutividade σ , como indicado na equação 5.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{eq. 5})$$

Comparando-se as equações 4 e 5, tem-se que:

$$\sigma = -\rho_e \mu_e \quad (\text{eq. 6})$$

Para obter a expressão geral para a resistência elétrica, precisa-se primeiro fazer algumas deduções importantes. É suposto que a densidade de corrente J e o campo elétrico sejam uniformes, conforme mostra a figura 5.

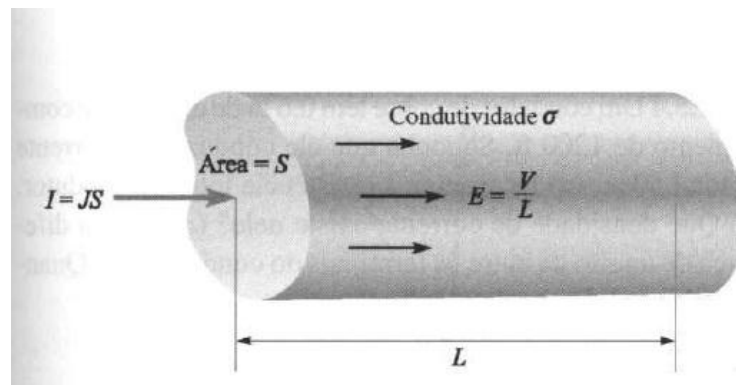


Figura 5 - Esquema da seção transversal de um condutor cilíndrico

Fonte: HAYT JR, W. H. & BUCK, J. A. (2003)

3.2 Cálculo da resistência de um condutor metálico

Fazendo a integração da densidade de corrente num determinado caminho fechado em que o fluxo seja perpendicular a área de seção reta formado por ele, a corrente será:

$$I = \int_S J \cdot dS = JS \quad (\text{eq. 7})$$

e

$$V_{ab} = - \int_b^a \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = \mathbf{E} \cdot \mathbf{L}_{ab} \quad (\text{eq. 8})$$

assim, com E substituído, vem:

$$J = \frac{I}{S} = \sigma E = \sigma \frac{V}{L} \quad (\text{eq. 9})$$

e escrevendo a equação 9 em função de V, tem-se:

$$V = \frac{L}{\sigma S} I \quad (\text{eq. 10})$$

Ora, pela lei de Ohm, que nos diz que $V=RI$, fica evidente da equação 10 que:

$$R = \frac{L}{\sigma S} \quad (\text{eq. 11})$$

Uma observação importante é que a condutividade σ é o inverso da resistividade ρ .

Para campos uniformes, pode-se achar a resistência por meio da equação 11 utilizando valores tabelados da resistividade do material em questão.

3.3 Expressão geral para a resistência

Quando não há uniformidade dos campos, uma maneira de calcular a resistência é dividindo V por I, onde V é a diferença de potencial entre duas superfícies equipotenciais e I é a corrente total que atravessa a superfície mais positiva do material.

Pelas equações 7 e 8, a expressão geral para a resistência em campos não uniformes é:

$$R = \frac{V_{ab}}{I} = \frac{- \int_b^a \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L}}{\int_S \sigma \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}} \quad (\text{eq. 12})$$

3.4 Resistência de terra

Neste item, serão apresentadas as deduções da área de um hemisfério de terra, resistência de terra e sua curva característica.

3.4.1 Hemisfério de terra

Considerando que o solo é formado por uma série de hemisférios concêntricos e de raios variáveis r (ALTAFIM, R.A.C., 2013), pode-se deduzir a expressão de cada uma dessas superfícies a partir da equação do volume da esfera. Um esquemático é mostrado na figura 7.

É evidente que um hemisfério é a metade de uma esfera, portanto a equação 13 mostra o volume da esfera, V_{esf} , e a equação 14 mostra o volume do hemisfério V_{hem} :

$$V_{esf} = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (\text{eq. 13})$$

$$V_{hem} = \frac{2}{3}\pi r^3 \quad (\text{eq. 14})$$

É sabido também que a derivada espacial do volume é a área. Então:

$$s(r) = \frac{d}{dr}V_{hem} = 2\pi r^2 \quad (\text{eq. 15})$$

Pode-se obter a mesma expressão para a área de um hemisfério a partir da integração de um elemento de área definido em coordenadas esféricas. A representação gráfica do sistema de coordenadas esféricas pode ser vista na figura 6.

$$s(r) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} r^2 \sin \theta \, d\theta \, d\varphi = 2\pi r^2 \quad (\text{eq. 16})$$

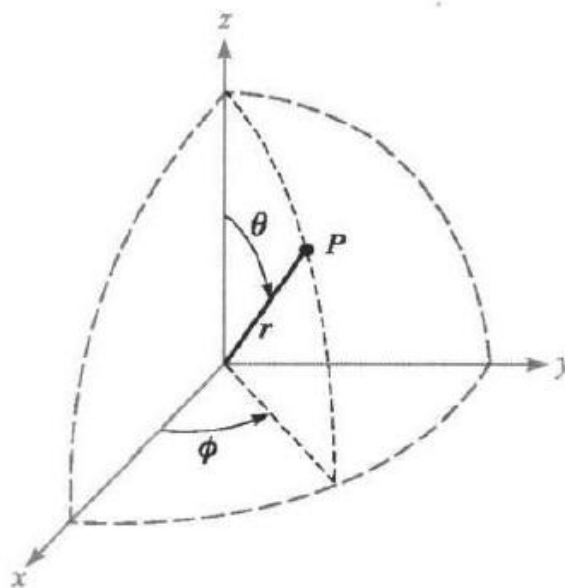


Figura 6 - Sistema de coordenadas esféricas

Fonte: HAYT JR, W. H. & BUCK, J. A. (2003)

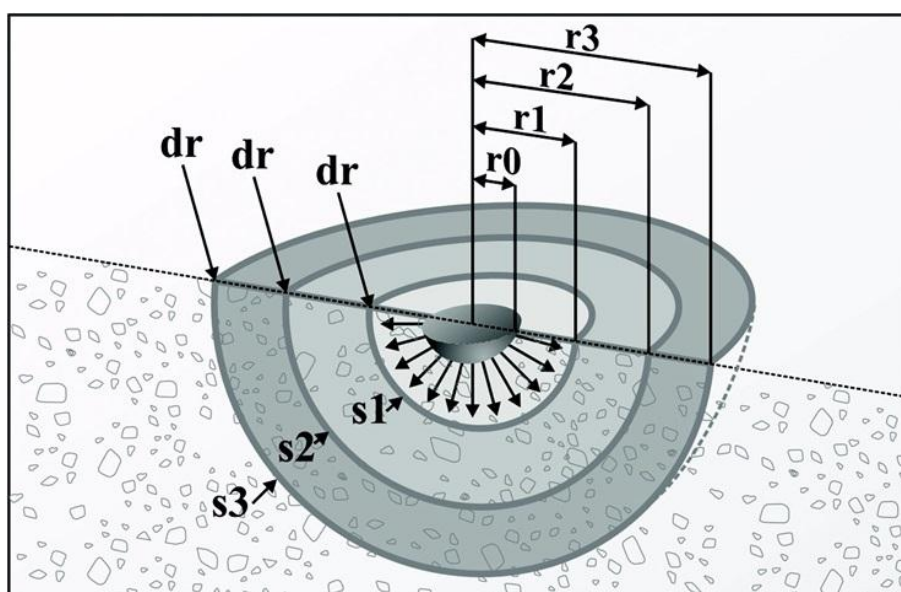


Figura 7 - Hemisférios de terra

Fonte: HAYT JR, W. H. & BUCK, J. A. (2003)

3.4.2 Cálculo da expressão para resistência de terra

A partir da equação 12 deduzida anteriormente, tem-se a fórmula simplificada:

$$R = \frac{1}{\sigma} \int_0^L \frac{dL}{S} \quad (\text{eq. 17})$$

A equação 17 pode ser utilizada para calcular a resistência de um hemisfério de terra. Porém deve-se observar que agora a área é uma função do raio de integração:

$$R = \frac{1}{\sigma} \int_a^b \frac{dr}{S(r)} = \frac{1}{\sigma} \int_a^b \frac{dr}{2\pi r^2} \quad (\text{eq. 18})$$

cujo resultado é:

$$R = \frac{1}{2\pi\sigma} \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right] \quad (\text{eq. 19})$$

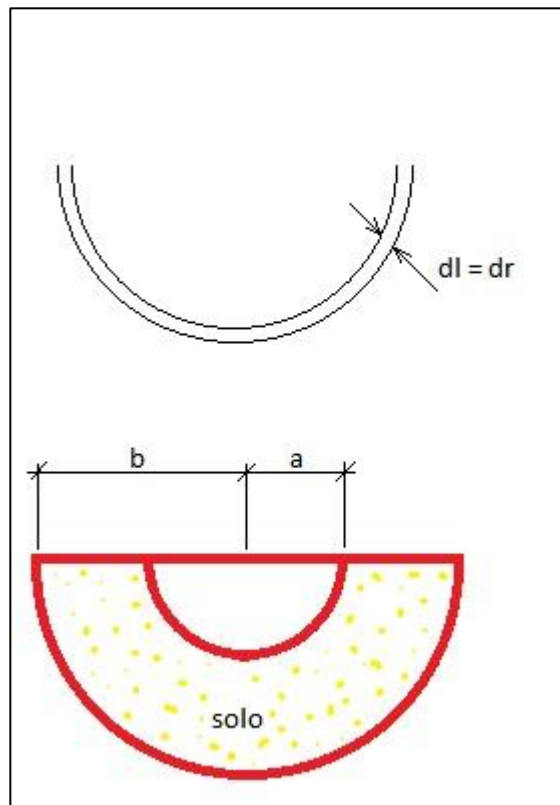


Figura 8 - Esquema das distâncias a e b da expressão de resistência de terra e elemento diferencial dr

3.4.3 Curva característica da resistência de terra

A curva da figura 9 é o gráfico da equação 19. Ela é muito importante, pois permite uma visualização rápida de qual será o valor da resistência de terra, desde que as distâncias a e b, bem como a condutividade σ do solo sejam conhecidas.

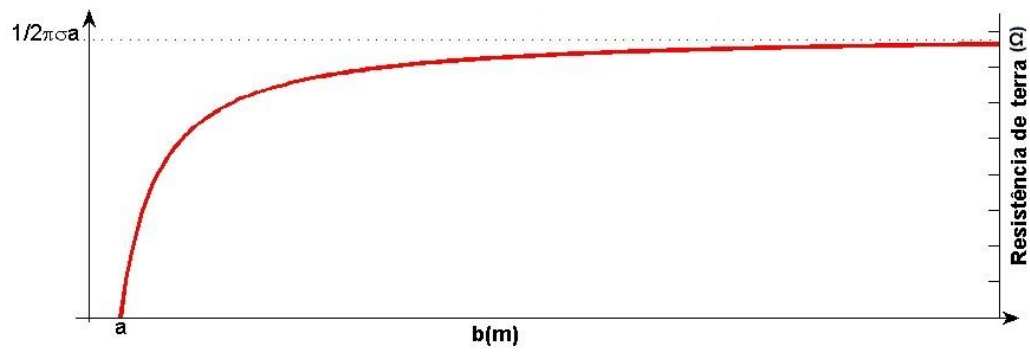


Figura 9 - Resistência de aterramento versus distância

Portanto, a expressão para a resistência de uma haste metálica dada pela equação 11 é diferente da resistência de terra calculada pela equação 19.

3.5 Cálculo da resistência das hastes de aterramento

A resistência elétrica de uma haste aterrada não é exatamente igual à equação 11 deduzida anteriormente. O motivo dessa diferença é que estando a haste aterrada, ela sofre o efeito de sua imagem, devido às cargas ali presentes. Em 1936, o prof. H. B. Dwight publicou um artigo pelo IEEE, em que apresentou uma modelagem para diferentes configurações de hastes aterradas. Foi assumido que o solo de ensaio tinha condutividade uniforme e a corrente de teste era contínua.

Toda a dedução das fórmulas foge do escopo deste trabalho e é recomendado que o artigo de H. B. Dwight (DWIGHT, H. B., 1936) seja analisado caso possíveis dúvidas venham a surgir. Além disso, as configurações de aterramento serão retomadas com mais detalhes e exemplos no capítulo 5.

3.5.1 Expressão para uma haste aterrada

Uma haste de aterramento vertical que penetra um comprimento L no solo precisa ser considerada com sua imagem na superfície da terra. A letra a representa o raio geométrico da haste, L o comprimento enterrado e ρ a resistividade do solo. Portanto, a expressão para a sua resistência é dada pela equação 20 e seu esquemático pela figura 10.

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \quad (\text{eq. 20})$$

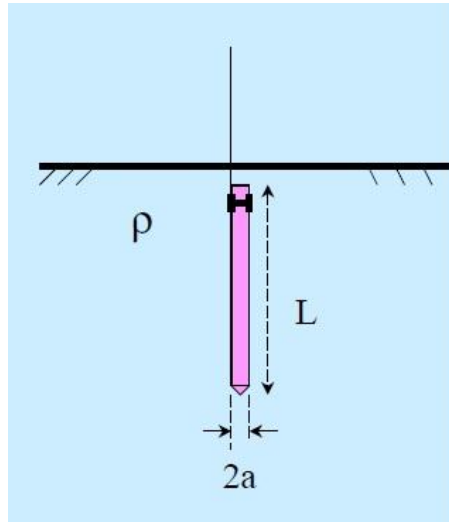


Figura 10 - Esquema de uma haste enterrada

Fonte: PAULINO, J.O.S. (2014)

3.5.2 Expressão para duas hastes em paralelo aterradas

Aqui, s representa a distância lateral entre as duas hastes e L continua sendo a profundidade em que a haste penetrou a terra. Foi considerado que $s > L$, para que uma não fique na zona de influência eletromagnética do outro. A figura 12 permite uma visualização de como se distribui os hemisférios equipotenciais no solo e a figura 11 é o esquemático ilustrativo da equação 21. Quanto mais distante da haste, menor será a densidade J de corrente elétrica.

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^4}{5s^4} \dots \right) \quad (\text{eq. 21})$$

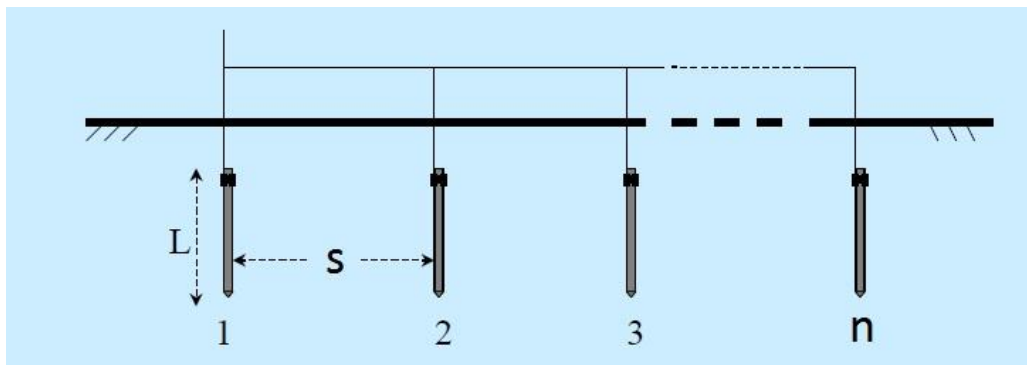


Figura 11 - Esquema de n hastes enterradas e colineares, com $s > L$

Fonte: PAULINO, J.O.S. (2014)

3.5.3 Expressão para múltiplas hastes aterradas

Para múltiplas hastes que estejam aterradas colinearmente, pode-se calcular a resistência equivalente do conjunto a partir da resistência de uma haste, multiplicada por um fator de correção e dividida pelo número de hastes. Assim:

$$R_{eq} = \frac{F}{n} R \quad (\text{eq. 22})$$

onde F é o fator corretivo e n é o número de hastes. O índice de redução K, onde $K = F/n$, é apresentado na tabela 1 do próximo capítulo com alguns valores.



Figura 12 - Zona de influência de uma haste aterrada

Fonte: PAULINO, J.O.S. (2014)

4 CONFIGURAÇÕES DE ATERRAMENTO

Neste capítulo serão apresentados os modelos de diferentes configurações geométricas de aterramentos, como hastes, anéis e cabos enterrados.

4.1 Resistência de uma haste vertical

Pela figura 13, vê-se uma haste cravada verticalmente no solo, cuja resistência é dada pela equação 23.

$$R = \frac{\rho_a}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{d}\right) \quad (\text{eq. 23})$$

sendo:

- ρ_a : resistividade aparente do solo [Ωm];
- L : comprimento da haste [m];
- d : diâmetro da haste [m].

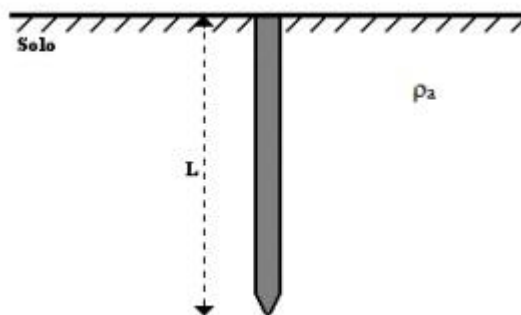


Figura 13 - Haste aterrada no solo

Fonte: ENGENHEIROS ASSOCIADOS (2014)

4.2 Resistência de hastes em paralelo

Para o cálculo da resistência equivalente de hastes paralelas, deve-se levar em conta o acréscimo de resistência ocasionado pela interferência entre as hastes. A equação 24 mostra a resistência elétrica de cada haste individualmente acrescida de um valor de resistência devido à interferência mútua entre elas. A figura 14 ilustra os termos da equação 24.

$$R_h = R_{hh} + \sum_{m=1}^n R_{hm} \quad (\text{eq. 24})$$

e,

$$R_{hm} = \frac{\rho_a}{4\pi L} \ln \left[\frac{(b_{hm} + L)^2 - e_{hm}^2}{e_{hm}^2 - (b_{hm} - L)^2} \right] \quad (\text{eq. 25})$$

onde:

- R_h : resistência da haste h no conjunto, considerando a interferência das demais [Ω];
- n: número de hastes em paralelo;
- R_{hh} : resistência própria de cada haste [Ω];
- R_{hm} : resistência incremental da haste h devido a interferência mútua da haste m [Ω];
- e_{hm} : distância entre as hastes h e m [m];
- b_{hm} : distância diagonal entre os extremos das hastes m e h [m];
- L: comprimento da haste [m].

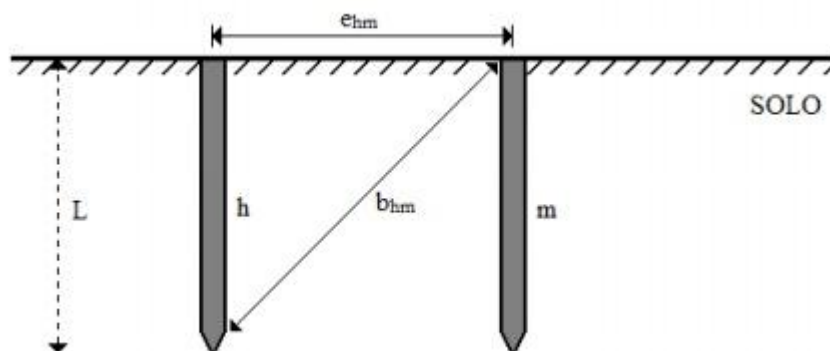


Figura 14 - Duas hastes em paralelo enterradas no solo

Fonte: ENGENHEIROS ASSOCIADOS (2014)

Determinada a resistência individual de cada haste dentro do conjunto, já considerados os acréscimos ocasionados pelas interferências, a resistência equivalente das hastes interligadas será a resultante do paralelismo destas (KINDERMANN, G. et al, 1992). Assim:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (\text{eq. 26})$$

então,

$$R_{eq} = \frac{1}{\sum \left(\frac{1}{R_i} \right)} \quad (\text{eq. 27})$$

Em termos práticos, é preferível usar hastes de dimensões iguais e de mesmas características de fabricação, o que facilita o cálculo e a manutenção do almoxarifado de uma empresa.

4.2.1 Índice de redução

O índice de redução K é definido como a relação entre a resistência equivalente do conjunto de hastes, R_{eq} , e a resistência própria de uma haste sem a interferência das demais.

$$K = \frac{R_{eq}}{R_1} \quad (\text{eq. 28})$$

que é

$$R_{eq} = K \cdot R_1 \quad (\text{eq. 29})$$

Sendo assim, nota-se pela equação 29 anterior que a resistência equivalente do conjunto está reduzida em K vezes o valor da resistência de uma única haste isolada. Os valores de K são tabelados a fim de se facilitar os cálculos, e alguns de seus valores são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Fator de redução K para múltiplas hastes paralelas

Nº de hastes	K
2	0,58
3	0,43
4	0,34
8	0,21
12	0,15
16	0,12
20	0,10
24	0,09

Vale aqui ressaltar que o acréscimo de hastes em paralelo, com o intuito de se diminuir a resistência do conjunto, não é indiscriminado. Haverá um momento em que o solo irá saturar e o esforço na instalação de hastes incrementais será em vão (KINDERMANN, G. et al, 1992).

4.3 Resistência de um sistemas de hastes formando um triângulo

Neste sistema, será analisada a instalação de hastes cuja vista superior forma um triângulo equilátero, conforme mostra figura 15.

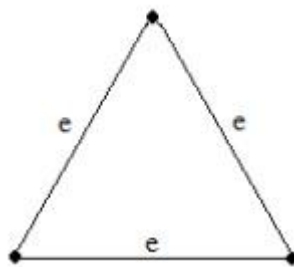


Figura 15 - Triângulo equilátero de lado e

A figura 16 apresenta um sistema real de aterramento em triângulo, em que as hastes Copperweld estão espaçadas igualmente entre si, e conectadas por meio de um fio de cobre nu.



Figura 16 - Aterramento real em triângulo equilátero

Fonte: PAULINO, J.O.S. (2014)

O dimensionamento da resistência equivalente deste sistema também utiliza o fator de redução K.

$$R_{eq\Delta} = K \cdot R_1 \quad (\text{eq. 30})$$

4.4 Resistência de um sistema de hastes formando um quadrado

O seu dimensionamento é igual ao do sistema em triângulo, com as hastes nas pontas.

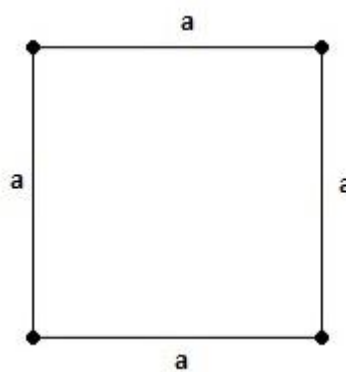


Figura 17 - Quadrado de lado a

$$R_{eq\square} = K \cdot R_1 \quad (\text{eq. 31})$$

4.5 Resistência de um sistema de hastes em circunferência

Neste sistema, as hastes são iguais e estão igualmente espaçadas, formando pela vista superior uma circunferência de raio R. Na equação 32 (DWIGHT, H. B., 1936), o que é levado em consideração é diâmetro e não o raio.

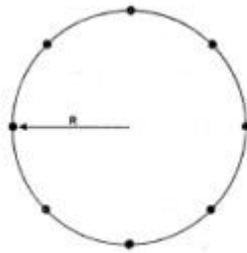


Figura 18 - Círculo de raio R

$$R_{eq\ o} = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{s} \right) \quad (\text{eq. 32})$$

onde:

- L: comprimento da haste [m];
- D: diâmetro da circunferência de raio R [m];
- d: diâmetro de uma haste [m];
- s: distância até a respectiva imagem [m].

4.6 Hastes profundas

Na instalação de hastes profundas, procura-se diminuir o valor da resistência de terra, aumentando-se o comprimento da haste. O aumento do comprimento da haste faz com que na instalação do sistema apareçam outros fatores que ajudam a melhorar ainda mais a qualidade do aterramento (GOMES, D.F.S. et al, 1990). Estes fatores são:

- Aumento do comprimento longitudinal da haste;
- Menor resistividade do solo em camadas mais profundas;
- Condição de água estável no decorrer do tempo;
- Condição de temperatura constante no decorrer do tempo;
- Geração de gradientes de potencial maiores em solo profundo, o que torna os potenciais de passo na superfície quase desprezíveis.

A instalação de hastes profundas pode ser executada por meio de:

- Bate estaca: as hastes são emendadas por luvas roscadas, e são cravadas no solo uma a uma por bate estacas. Dependendo do terreno, é possível chegar-se a 18 metros de profundidade com este método.

- Moto perfuratriz: é cavado um buraco, onde é introduzida uma única haste soldada a um fio longo que a interliga com o sistema a ser aterrado. Recomenda-se também introduzir no buraco, juntamente com a haste, limalha de cobre. A limalha, ao penetrar no solo, facilita a dispersão da corrente, fazendo com que a resistência elétrica do sistema seja menor. É possível, dependendo das características do solo, chegar a uma profundidade de até 60 metros.

5 TRATAMENTO QUÍMICO DO SOLO

O tratamento químico higroscópico de solos onde se deseja fazer o aterramento elétrico visa aumentar a condutividade do terreno, ou seja, diminuir sua resistividade. Esta alternativa não é para ser usada indiscriminadamente, mas sim após a constatação de que o aumento do número de hastes é insuficiente. Além disso, outra desvantagem é que a terra, com o passar do tempo, absorve os elementos adicionados, e a resistência de terra volta a aumentar.

Sabe-se também que a resistividade decresce com o aumento da presença de sais no solo. Por exemplo, apesar da adição de cloreto de sódio apresentar bons resultados imediatos, possui a desvantagem de oxidar os materiais metálicos utilizados no aterramento e a diluição em água. Logo, seu uso não é recomendado.

Produtos como bentonita, gel composto de sais ou Earthron® podem ser aplicados antes ou após a instalação das hastes. De qualquer forma, o produto a ser utilizado precisa apresentar as seguintes características (CAPELLI, A., 2000):

- Higroscopia;
- Não ser tóxico;
- Reter umidade;
- Promover boa condutividade elétrica;
- Ter pH alcalino (não corrosivo);
- Estabilidade química;
- Ter efeito de longa duração.

O gel não deverá ser aplicado em eletrodos compostos de materiais ferrosos, pois eles sendo de potencial eletricamente mais negativo, irão se combinar mais facilmente com água presente no solo. Isto resulta na corrosão do material, adicionando ao sistema de aterramento uma resistência de contato considerável.

Este tipo de tratamento tem vida útil determinada, pois não é perene mesmo tendo como requisito o efeito de longa duração. Portanto, é necessário fazer um acompanhamento frequente da variação da resistência de terra e ser realizado um novo tratamento quando observado mudança significativa.

A relação entre a resistência do solo medida após o tratamento químico e o valor obtido antes deste tratamento é chamada de coeficiente de redução K_t . Este valor pode ser previsto para o gel, considerando a faixa provável, determinada pela figura 19.

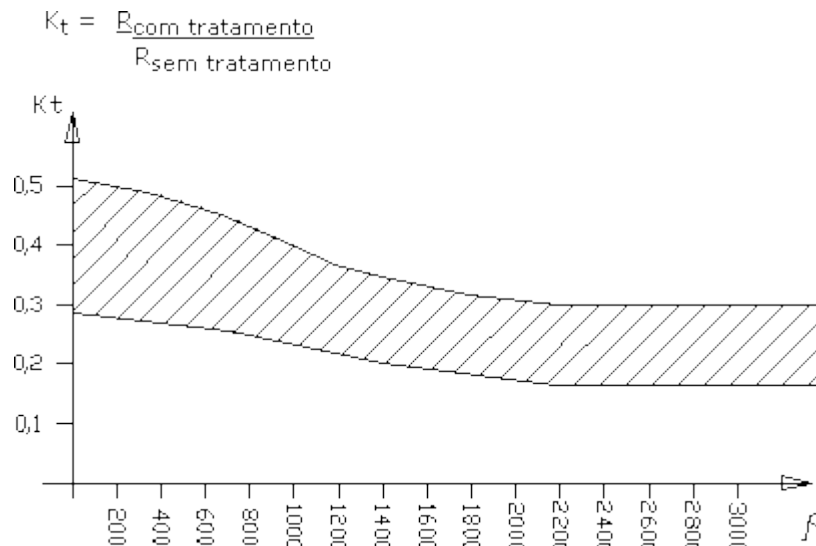
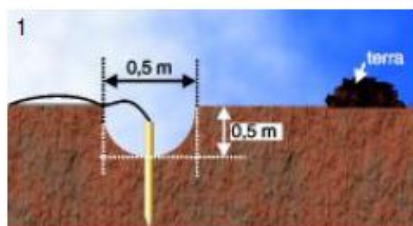


Figura 19 - Relação de resistências entre solo tratado e não tratado quimicamente vs resistividade em Ωm

Fonte: ENGENHEIROS ASSOCIADOS (2014)

Sabendo que a função principal do tratamento químico é reter a água para diminuir a resistência da terra, épocas de secas podem alterar significativamente a atuação do tratamento. Nestas épocas recomenda-se molhar a terra que contém a malha.

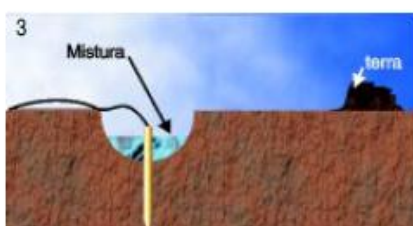
Em terrenos extremamente secos, pode-se concretar o aterramento. O concreto tem a propriedade de manter a umidade e é o objeto de estudo deste trabalho. A figura 20 mostra como é o procedimento de aplicação do gel químico.



1º passo : Cavar um buraco com aproximadamente 50 cm de diâmetro, por 50 cm de profundidade ao redor da haste.



2º passo : Misturar metade da terra retirada , com Erico – gel.



3º passo : Jogar a mistura dentro do buraco.



4º passo : Jogar, aproximadamente , 25 l de água na mistura que está no buraco.

Figura 20 - Procedimento de aplicação do gel químico no tratamento do solo

Fonte: INSTALAÇÕES ELÉTRICAS II (2014)

Para mais informações, é necessário consultar o catálogo do fabricante, pois não necessariamente o método de aplicação de um é semelhante a outros, pois trata-se de uma tecnologia patenteada.

6 MÉTODO DE MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA ELÉTRICA E RESISTIVIDADE

Antes de medir a resistência do aterramento com a concretagem, é necessário determinar a resistência e resistividade do solo para fazer algumas ponderações. A composição química, teor de umidade, temperatura, tamanho e distribuição dos grãos, compactação e pressão são fatores que afetam a resistividade do solo (ZENG, R. et al, 2002). Em poucos casos o solo é considerado homogêneo, e sua resistência varia em profundidades diferentes, pois em camadas mais fundas é de se esperar que haja mais umidade.

6.1 Fórmula de Palmer

A resistividade pode ser calculada a partir da Fórmula de Palmer, que é utilizada no método de Wenner. Sua dedução foge deste contexto, e pode facilmente ser consultada na bibliografia deste trabalho. Ela está denotada pela equação 33.

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4p^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4p^2}}} \quad (\text{eq. 33})$$

Recomenda-se que: diâmetro da haste $\leq 0,1a$.

Para um afastamento entre as hastes relativamente grande, isto é, $a > 20p$, a Fórmula de Palmer denotada pela equação 33 se reduz a:

$$\rho = 2\pi aR \quad (\text{eq. 34})$$

6.2 Instrumento Megger e o Método de Wenner

O Megger é um instrumento de medida de resistência elétrica. Possui 4 terminais, sendo 2 terminais de corrente e 2 terminais de potencial. Através de sua fonte interna, o Megger faz circular uma corrente I entre as duas hastes C1 e C2. As duas hastes P1 e P2 são ligadas nos terminais, que são de potencial. Ver figura 21.

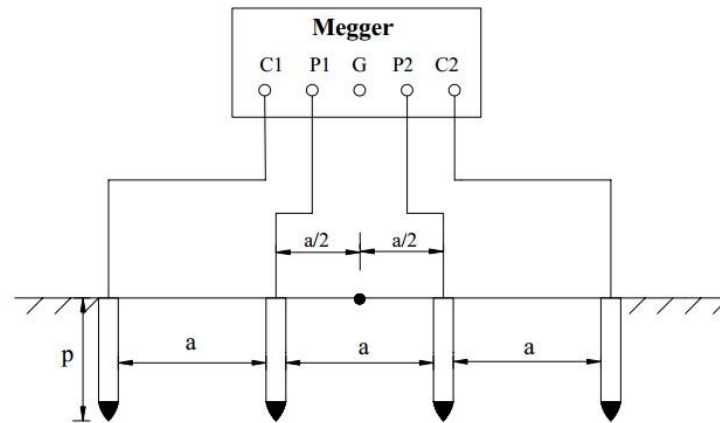


Figura 21 - Megger e a ligação dos eletrodos em seus terminais no método de Wenner

Fonte: DEPARTMENT OF DEFENSE USA (1987)

O método de Wenner é o mais utilizado na determinação da resistividade do solo, também o mais simples e encontra-se de acordo com a ABNT NBR 7117 (1981) adaptada da IEEE 80/2000. Ele consiste em cravar 4 hastes de 50 cm cada, dispostas em linha reta e de espaçamento igual, conforme mostra a figura 22. Se o diâmetro das hastes não exceder 10% da distância a , então vale a equação simplificada de Palmer, expressa na equação 34 anterior.

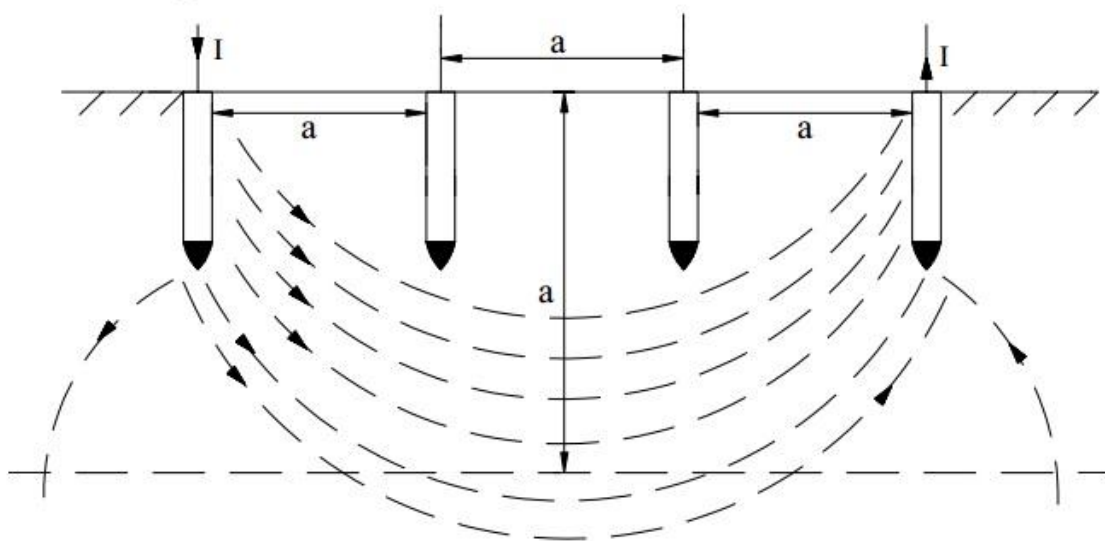


Figura 22 - Esquema dos eletrodos usando Megger e o Método de Wenner

Fonte: DEPARTMENT OF DEFENSE USA (1987)

A resistência necessária para se calcular a resistividade do solo (equação 34), pode ser expressa por:

$$R = \frac{V_{P1/P2}}{I} \quad (\text{eq. 35})$$

Aproximadamente 58% da distribuição de corrente que passa entre as hastes mais externas C1 e C2 ocorre a uma profundidade igual ao espaçamento entre as hastes (ENGENHEIROS ASSOCIADOS, 2014). A parcela de corrente que atinge profundidades maiores, com uma correspondente maior área de dispersão, pode então ser desprezada. Portanto, o método de Wenner considera que o valor de resistência lido no aparelho é relativo a uma profundidade p do solo, bem como o Megger é calibrado com essas premissas. Ver figura 23.

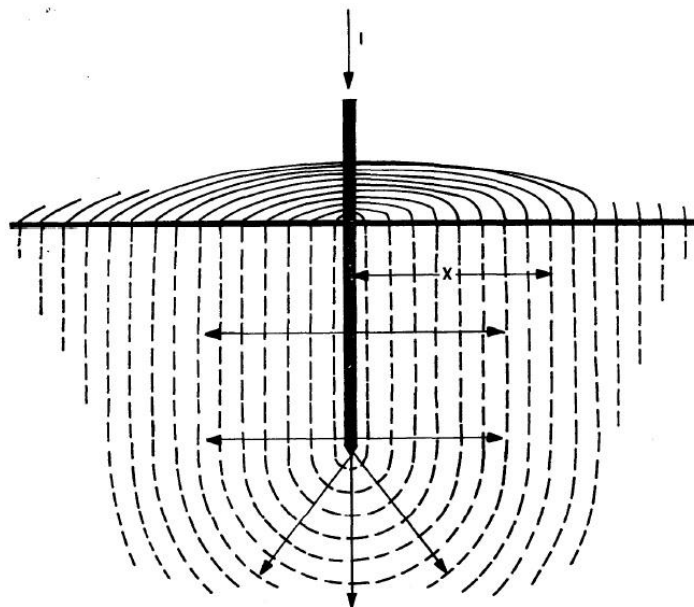


Figura 23 - Distribuição equipotencial da corrente no solo, em que x é a distância e I a corrente

Fonte: DEPARTMENT OF DEFENSE USA (1987)

As medições também podem ser feitas por meio de um voltímetro e amperímetro, conforme IEEE 80/2000.

6.2.1 Recomendações para medição

É importante observar e seguir as seguintes recomendações para medição:

- Os eletrodos devem ter 50 cm de comprimento e diâmetro entre 10 e 15 mm;
- Os eletrodos devem estar alinhados;

- Os eletrodos devem estar igualmente espaçados;
- Os eletrodos devem estar cravados em profundidades iguais;
- Os eletrodos devem estar limpos, inoxidados e isentos de gorduras.

6.3 Método dos 3 eletrodos

Trata-se de mais uma técnica de medição de resistência de terra remota de um sistema de aterramento. Esta técnica usa o eletrodo sob teste, um eletrodo de referência e um eletrodo auxiliar, dispostos em linha reta.

A figura 24 ilustra a conexão do circuito e ainda mostra a curva de potencial, que será discutida adiante. Na prática, os bornes C1 e P1 do Megger são curto-circuitados e fica-se com 3 terminais para a ligação nos eletrodos.

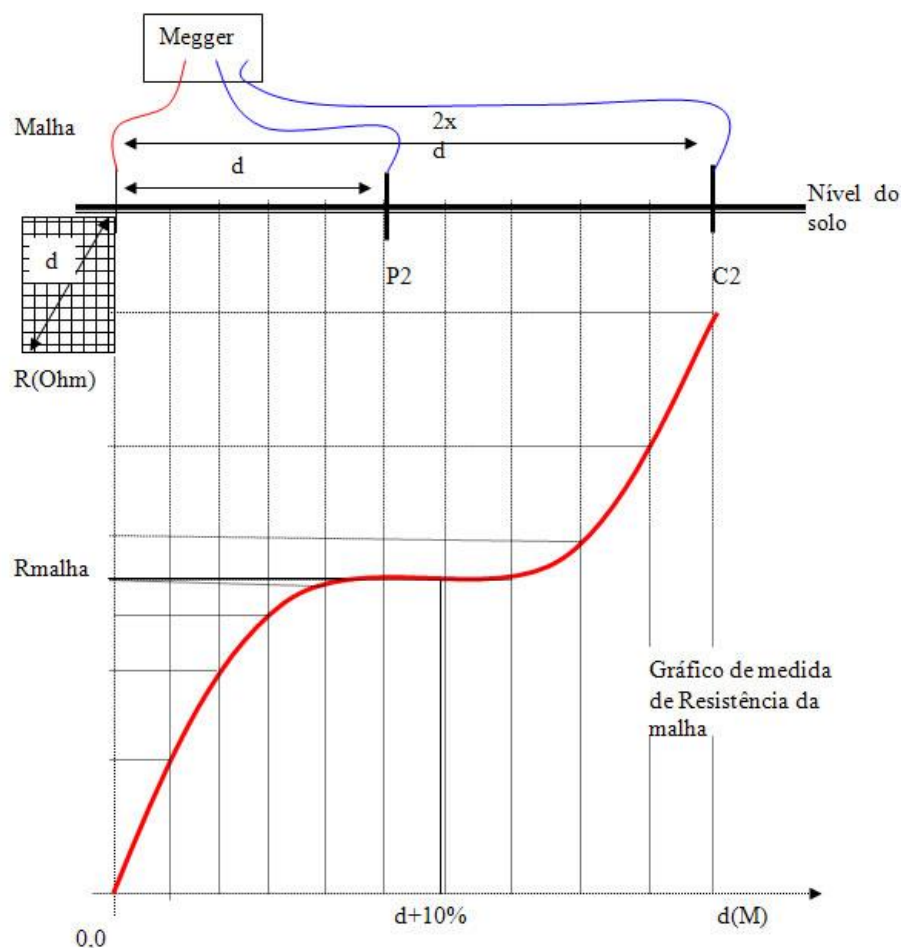


Figura 24 - Esquemático de ligação e curva de potencial no solo

Fonte: LEON (2014)

Após a aplicação de uma tensão no circuito, a corrente entre a haste de teste e o eletrodo de corrente C2 é medida, como também é medida a tensão entre a haste de teste e o eletrodo de potencial P2. Usando a lei de Ohm, a resistência é determinada.

Ainda na figura 24, é possível perceber que as leituras de resistência R são traçadas em função da distância d . O segmento da curva que está paralelo ao eixo horizontal representa a região de potencial constante – portanto, resistência constante –, também conhecido como região de patamar. A dimensão do patamar varia com o afastamento entre os eletrodos de aterramento e com suas respectivas resistências de terra (GESUALDO, E. L., 2012).

6.4 Região de patamar e zona de influência mútua das hastes

Trata-se de mais uma técnica de medição de resistência de terra remoto de um sistema de aterramento. Esta técnica usa o eletrodo sob teste, um eletrodo de referência e um eletrodo auxiliar.

A figura 26 mostra a redução da região de patamar a medida em que X e Y da figura 25 ficam mais próximos. Observa-se que na figura 26, a distância entre X e Y fica reduzida a um ponto e, a partir daí, para distâncias menores, os eletrodos passam a ter influência um sobre o outro. Pode-se entender então que o patamar é a região em que não há influência mútua de uma haste sobre a outra.

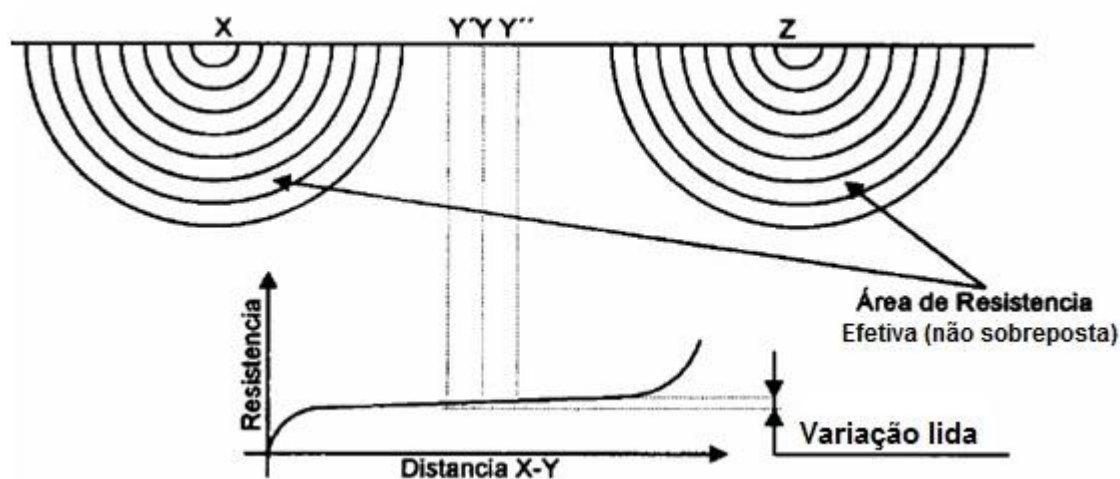


Figura 25 - Região de patamar e esquemático de eletrodos X e Z

Fonte: PAULINO, J.O.S. (2014) – modificado

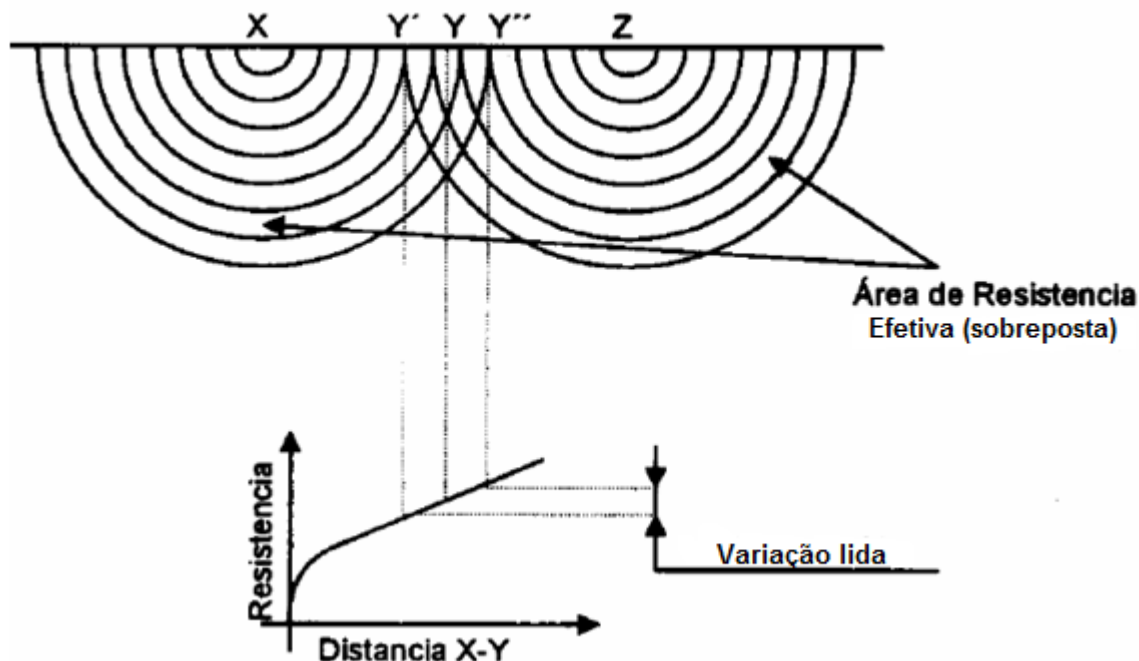


Figura 26 - Esvaecimento da região de patamar

Fonte: PAULINO, J.O.S. (2014) – modificado

A região de patamar deve ser determinada experimentalmente, variando-se o eletrodo P2 de distância d , e o eletrodo C2 de distância $2d$, como na figura 24, em diferentes distâncias. Na detecção de linhas de transmissão próximas ou outros sistemas de aterramento, é sugerido fazer uma nova série de medições a 90° das iniciais.

Portanto, a região de patamar da curva de Resistência *versus* distância é também é um indicador dos valores da resistência de terra livre de influência das hastes.

6.5 Resistividade do solo

Não é aconselhável classificar um solo pela sua resistividade catalogada, pois esta premissa pode gerar erros consideráveis na aplicação das fórmulas anteriores (DUNKI-JACOBS, J. R., 2006). Portanto, é necessária a realização de testes reais no terreno, em que ele pode ser classificado como homogêneo ou heterogêneo. Além disso, as medições mostram como é a variação da resistividade para diferentes desníveis. São mostrados na tabela 2 alguns valores médios das resistividades de diferentes tipos de solos (GESUALDO, E.L., 2012).

Tabela 2 - Resistividades dos solos

Tipo de solo	ρ [Ωm]
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Lama	5 a 100
Terra de jardim com 50% de umidade	140
Argila com 40% de umidade	80
Argila com 20% de umidade	330
Areia com 90% de umidade	1300
Areia comum	3.000 a 8.000
Calcário fissurado	500 a 1.000
Calcário compacto	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000
Basalto	10.000 a 20.000

6.6 Estratificação do solo

Considerando as características que os solos normalmente apresentam, em virtude da sua própria formação geológica ao longo dos anos, a modelagem em camadas estratificadas, isto é, em camadas horizontais de diferentes resistividades, tem produzido excelentes resultados comprovados empiricamente. A figura 27 mostra o solo com uma estratificação em camadas horizontais.

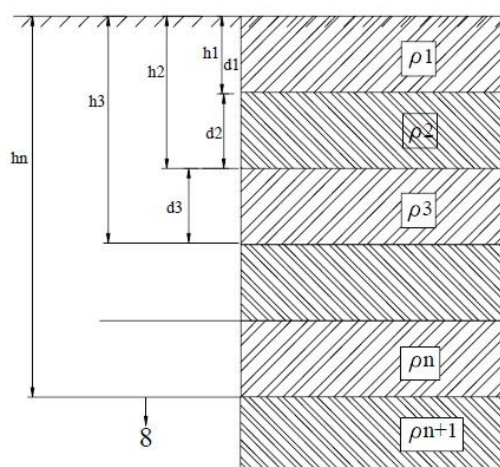


Figura 27 - Estratificação do solo

A resistividade de cada camada, bem como a sua profundidade podem ser determinadas através de diversos métodos de estratificação do solo (SVERKO, E. R., 1999). Como o método da estratificação do solo em duas camadas é o mais empregado, ficam dispensados os demais. A figura 28 mostra a estratificação do solo em duas camadas.

Com base no processo de medição de resistividade do solo estabelecido pelo Método de Wenner, pode-se chegar a expressão que relaciona a resistividade do solo para uma distância "a" entre os eletrodos com a resistividade do solo da primeira camada, conforme segue:

$$\frac{\rho(a)}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a}\right)^2}} \right] \quad (\text{eq. 36})$$

onde:

- $\rho(a)$: resistividade para eletrodos a uma distância a;
- ρ_1 : resistividade da primeira camada de solo;
- ρ_2 : resistividade da primeira camada de solo;
- h: profundidade da primeira camada de solo;
- a: distância entre os eletrodos;
- K: coeficiente de reflexão, definido pela equação 37.

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (\text{eq. 37})$$

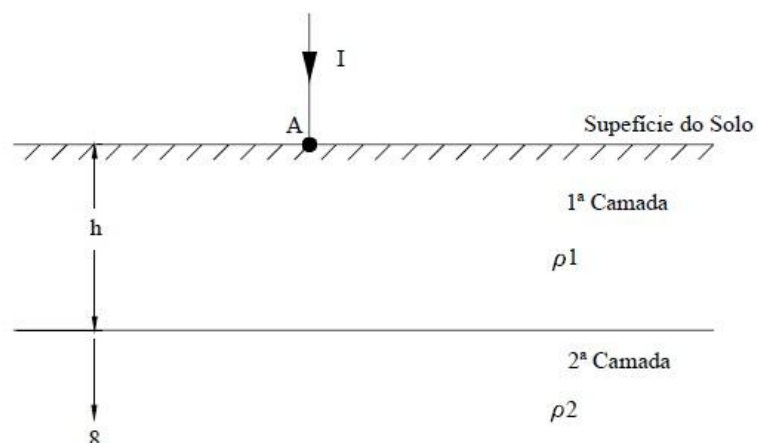


Figura 28 - Solo estratificado em 2 camadas

Fonte: ENGENHEIROS ASSOCIADOS (2014)

Analisando a equação 37, verifica-se que a variação do coeficiente de reflexão é limitado entre -1 e +1.

Tendo em vista a pequena variação de valores do coeficiente de reflexão K , é possível traçar uma família de curvas teóricas em função de valores das relações $\rho(a)/\rho_1$ e h/a . Serão apresentadas as curvas traçadas para K variando na faixa negativa, isto é, curva $\rho(a)$ vs a descendente e para K variando na faixa positiva, com curva $\rho(a)$ vs a ascendente.

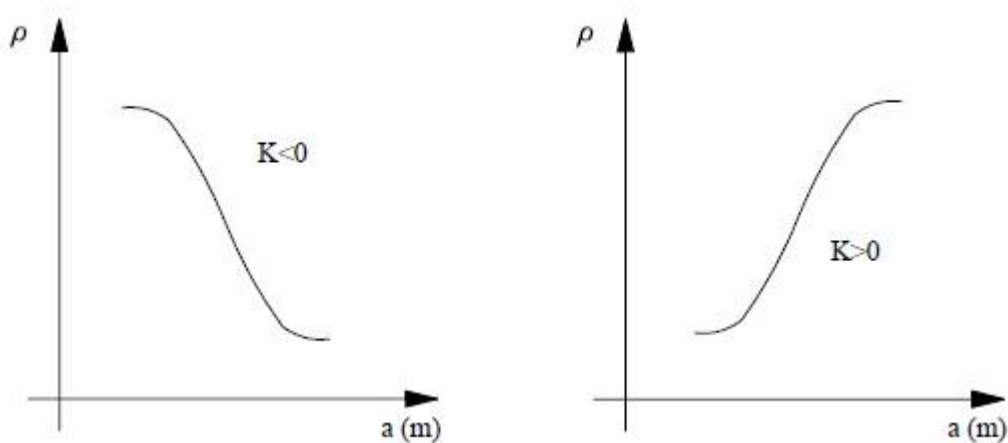


Figura 29 - Curvas ρ versus a para valores de K positivo e negativo

Fonte: ENGENHEIROS ASSOCIADOS (2014)

7 TRABALHO EXPERIMENTAL

Como o foco principal deste trabalho reside na construção, medição e comparação de um novo aterramento, que consiste de uma haste de aterramento padrão de 2,4 m concretada com um concreto especial, tendo como agregado serragem de madeira, neste capítulo serão mostradas e explicadas algumas ferramentas indispensáveis para a execução do furo, preparo do concreto e medição do aterramento.

7.1 Haste cobreada *Copperweld*

As hastes utilizadas neste trabalho seguem a norma ABNT NBR 13571 (1996), conforme descrito na seção 3.1. Segue as especificações:

- Comprimento: 2,4 m
- Diâmetro: 5/8"
- Número: 2 hastes



Figura 30 - Haste Copperweld padrão de 2,4 m de comprimento



Figura 31 - Detalhe do formato da ponta da haste Copperweld

7.2 Megger à manivela

O megôhmetro à manivela, também conhecido como Megger, é um equipamento destinado a realizar medições de resistências elétricas de terrenos ou equipamentos. Ele é constituído basicamente de um galvanômetro envolto numa caixa com seus bornes de conexão. A figura 32 a seguir mostra a construção de um megôhmetro.

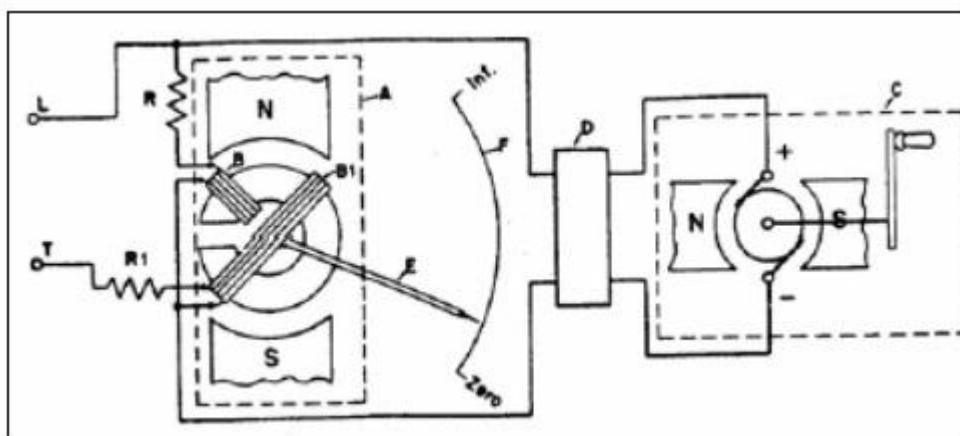


Figura 32 - Esquemático construtivo de um megôhmetro

Fonte: SENAI & ARCELOR (2014)

As suas partes constituintes são:

- Bobinas cruzadas – A
- Bobinas móveis cruzadas – B e B1
- Regulador de tensão
- Ponteiro
- Escala graduada
- Bornes para conexões externas – L e T

- Resistores de amortecimento – R e R1

O funcionamento do megôhmetro é baseado no princípio eletrodinâmico com bobinas cruzadas, tendo como pólo fixo um ímã permanente, e como pólos móveis as bobinas B e B1.

Quando a manivela do gerador CC é girada obtém-se uma tensão de valor variável, de acordo com a velocidade impressa à manivela. Essa tensão é enviada ao regulador de tensão que a estabiliza em 500 ou 1000 V, sendo enviada aos bornes L e T.

Se os bornes L e T estiverem abertos, haverá circulação de corrente somente pela bobina B, que recebe tensão através do resistor de amortecimento R.

O campo magnético criado por essa bobina B faz um deslocamento do conjunto de bobinas móveis, levando o ponteiro para o ponto infinito da escala graduada. Se os bornes L e T estiverem fechados em curto circuito haverá circulação de corrente também pela bobina B1, que receberá tensão através do resistor de amortecimento R1. A figura 33 ilustra o esquemático construtivo do Megger, particularmente quando seus terminais estão curto-circuitados.

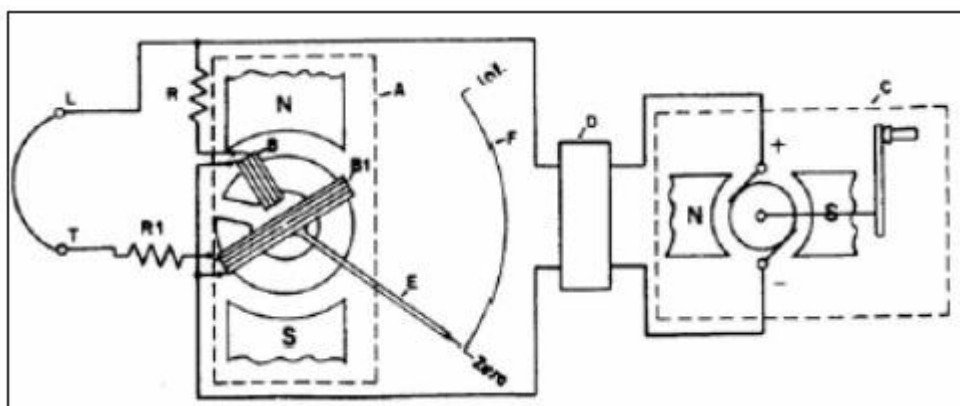


Figura 33 - Esquemático do megôhmetro em curto-circuito

Fonte: SENAI & ARCELOR (2014)

O campo magnético criado pela bobina B1 será forte e oposto ao criado pela bobina, o que fará com que o conjunto de bobinas móveis se desloque para outro lado, levando o ponteiro para o ponto zero da escala graduada.

Se os bornes L e T forem fechados através de um resistor Rx de valor elevado, a corrente que fluirá pela bobina B1 terá uma intensidade menor, ocasionada pela queda de tensão no resistor Rx, conforme mostra figura 34.

O campo magnético criado pela bobina B1 terá uma intensidade menor, porém ainda em oposição ao campo criado pela bobina B. Nessa situação o conjunto móvel se deslocará levando o ponteiro para um ponto intermediário da escala graduada (SENAI & ARCELOR, 2014). Esse ponto intermediário é o valor da resistência ôhmica do resistor R_x . A leitura da escala graduada do megômetro é direta, ou seja, basta localizar a posição do ponteiro sobre a escala graduada e fazer a leitura.

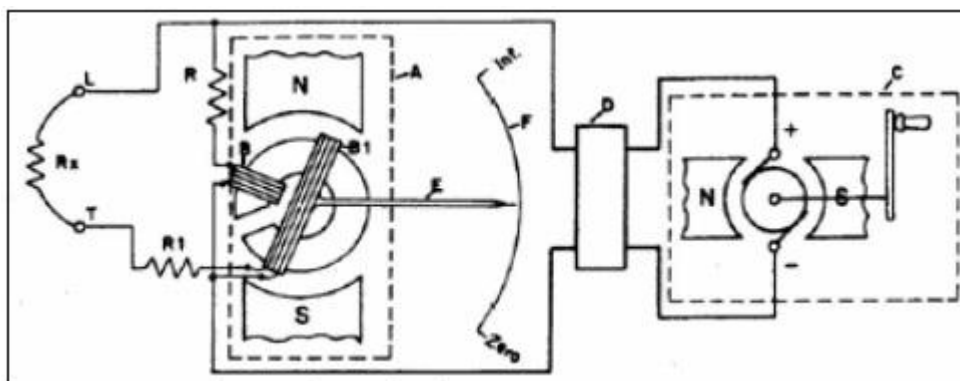


Figura 34 - Esquemático de um megômetro com uma resistência de valor finito R_x

Fonte: SENAI & ARCELOR (2014)

No caso do Megger utilizado neste trabalho, mostrado na figura 35, não existe uma escala graduada onde se faz a leitura visual. Ele é do tipo zero central, ou seja, por meio de botões e multiplicador do valor da resistência, é possível efetuar a leitura quando a agulha estiver em equilíbrio no centro do visor. Quando o equilíbrio não é atingido, o ponteiro pende para um dos lados, necessitando fazer os ajustes nos botões. O detalhe do botão multiplicador da escala de resistência pode ser visualizado na figura 36.



Figura 35 - Megger utilizado neste trabalho



Figura 36 - Detalhe do botão multiplicador da escala

Como é possível ver na figura 37, há 3 botões giratórios alinhados e um mais acima. Este último é o botão multiplicador da escala, que define o múltiplo em que deve ser multiplicado os números selecionados pelos botões de baixo. Por exemplo, na figura 37, da esquerda para a direita, os botões indicam os números 2, 6 e 5, tendo a posição 1 no botão multiplicador. Isto indica que o valor da resistência seria de 265Ω caso a agulha se equilibrasse no centro do visor. Mudando-se o botão multiplicador para 10, deve-se multiplicar por 10 o valor anterior, tendo agora 2650Ω de resistência elétrica lida.



Figura 37 - Detalhe dos 3 botões indicadores do valor da resistência

7.3 Trado

O trado é uma ferramenta que pode ser manual ou motorizada, constituída de uma ponta cortante para perfuração do solo. Seu formato pode ser helicoidal, semelhante a uma broca comum utilizada em máquinas-ferramentas, ou apenas a ponta perfurante, que contenha um alojamento para captação de terra (LEON, 2014).

Nos trados manuais, a ponta cortante é ligada a um binário manual de forças por meio de hastes extensoras, que estão conectadas por luvas roscadas. Já para os trados mecanizados, existe um motor, geralmente movido à gasolina, que faz o trabalho de giro da ferramenta para dentro do solo. Há ainda os trados especiais, denominados de perfuratrizes, que são construídos em veículos dedicados ou adaptados a caminhões. Na figura 38 um trado manual é operado por duas pessoas e na figura 39 o trabalho de perfuração é executado por uma máquina perfuratriz.



Figura 38 - Trado manual operado por duas pessoas que formam um binário de forças

Fonte: LEON (2014)



Figura 39 - Máquina perfuratriz utilizada para grandes furos

Fonte: LEON (2014)

7.4 Concretagem

Serão definidos alguns termos e as condições de preparo do concreto.

7.4.1 Definições

- Pasta: cimento mais água;
- Argamassa: agregado miúdo mais pasta;
- Concreto: agregado graúdo mais argamassa.

7.4.2 Agregados

Agregados são materiais que, no início do desenvolvimento do concreto, eram adicionados à pasta, para dar-lhe consistência e volume, tornando-a mais econômica. Hoje eles representam cerca de 80% do peso do concreto e 20% do custo. Além de sua influência benéfica quanto à retração e à resistência, o tamanho, a densidade e a forma dos seus grãos podem definir várias das características desejadas em um concreto. Deve-se ter em mente que um bom concreto

não é o mais resistente, mas o que atende as necessidades da obra com relação à peça que será moldada. Portanto, é muito importante conhecer o seu traço e segui-lo fielmente.

A influência das propriedades dos agregados em concretos e argamassas afetam a resistência, estabilidade dimensional e durabilidade. Podem ter origem natural, como as rochas ígneas, areias extraídas de rios e barrancos, e artificial, como as areias e pedras provenientes do britamento de rochas, pois necessitaram da ação humana para modificar o tamanho dos seus grãos (UTFPR, 2014).

Outro fator que define a classificação dos agregados é sua massa específica aparente, onde são divididos em leves (argila expandida, pedra-pomes, vermiculita), normais (pedras britadas, areias, seixos) e pesados (hematita, magnetita, barita).

Sua dimensão é classificada em graúdos e miúdos pela ABNT NBR 7211 (2009).

Agregado graúdo

Material granular, com pelo menos 95% em massa de grãos retidos na peneira de 4,8 mm, mas passam pela peneira de 75 mm.

Agregado miúdo

Material granular, com pelo menos 95% em massa de grãos que passam pela peneira de 4,8 mm e ficam retidos na peneira de 0,075 mm.

Serragem de madeira

Para os fins deste trabalho, foi escolhido utilizar cavacos de eucalipto e pinus, de grossa espessura, cedidos pelo Laboratório de Madeira e Estruturas de Madeiras da EESC-USP.

As indústrias madeireiras e de base florestal geram grande quantidade de resíduos desde sua extração até confecção do produto final. Estima-se que cerca de 50% das árvores cortadas tornam-se resíduos.

A massa volúmica e a porosidade são propriedades físicas de grande relevância na descrição da madeira. A massa volúmica de um material é definida como a quantidade de matéria

correspondente a um dado volume. No caso da madeira, material bastante higroscópico, a massa volúmica é dependente do grau de umidade da amostra, o que causa problemas na sua determinação.

A densidade média do eucalipto é de 245 kg/m^3 e umidade de 13% (SOUZA, F.R., 2010).

7.4.3 Traço do concreto

O traço é a proporção da mistura que compõe a argamassa ou o concreto. Foi decidido fazer um concreto com mais serragem e pedra do que argamassa.

Os agregados leves usados na produção de concretos leves geralmente são materiais porosos, cuja absorção de água é usualmente mais alta em relação ao agregado normal, fato que influencia a microestrutura da pasta de cimento endurecido.

Traço utilizado

- 1,5 lata de 18 litros de cimento Votorantim CP II-Z-32 de 1400 kg/m^3 ;
- 1,5 lata de 18 litros de areia fina;
- 4,5 latas de 18 litros de pedra (brita);
- 3 latas de 18 litros de serragem de eucalipto de espessura grossa;
- 1,5 lata de 18 litros de água.

Escrito de outra forma para se ter outra visualização do traço, vem:

- 27 L de cimento – 12,5%
- 27 L de areia – 12,5%
- 121,5 L de pedra – 37,5%
- 81 L de serragem – 25%
- 27 L de água – 12,5%

Como é possível notar, o traço utilizado apresenta quantidades dos agregados pedra e serragem maior do que a argamassa. A mistura foi colocada numa betoneira e batida por aproximadamente 10 minutos, onde a água foi sendo colocada aos poucos até dar o ponto de consistência do concreto sem encharque.

Preparação do concreto

O concreto foi preparado numa das oficinas de manutenção da prefeitura do campus da USP São Carlos, conforme mostram as figuras 40, 41, 42 e 43.



Figura 40 - Cavaco de eucalipto e pinus de espessura grossa



Figura 41 - Cimento e pedra sendo preparados



Figura 42 - Betoneira utilizada na produção



Figura 43 - Produção e adição de água por funcionário da prefeitura do campus

7.4.4 Enchimento do furo

Após a produção do concreto, este foi despejado numa bandeja e transportado de caminhonete até o local do furo. No local, o enchimento foi imediato e também com a supervisão dos funcionários.



Figura 44 – Preenchimento do furo



Figura 45 - Furo preenchido e haste inserida

8 RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS

O terreno escolhido para se realizar o aterramento experimental foi o barranco ao lado do prédio da Engenharia Elétrica, nas imediações do campo de futebol do campus I da USP São Carlos.

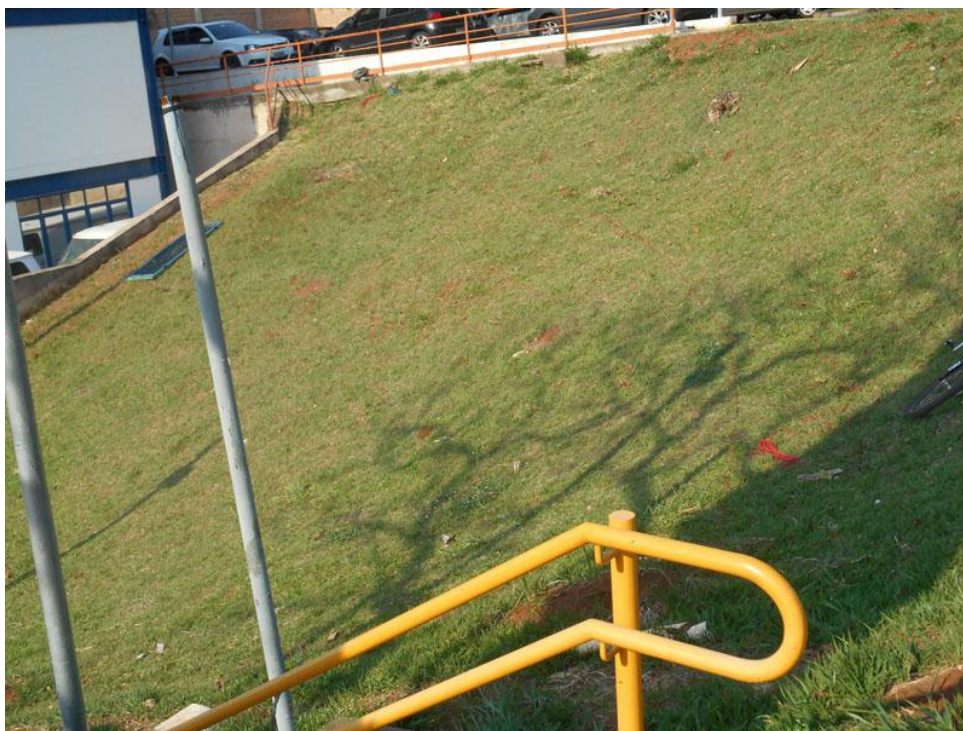


Figura 46 - Terreno escolhido ao lado do prédio da Engenharia Elétrica e campo de futebol

Primeiramente, foi instalada uma haste padrão cobreada, conforme descrição na lista dos materiais e equipamentos utilizados, diretamente na terra. Com isso, foi possível medir a resistência de terra para comparação com o aterramento objeto deste estudo.

8.1 Medidas de resistência de terra comum

As medidas da tabela 3 foram tomadas no dia 20/08, por volta das 16 horas, com temperatura ambiente de 28° C e com solo seco.

Tabela 3 - Medidas aterramento comum, em 20/08

	L_1 (m)	L_2 (m)	$R(\Omega)$
Med. 1	1	2	1200
Med. 2	2	4	1310
Med. 3	2,5	5	1310
Med. 4	4	8	1250
Med. 5	5	10	1300
Med. 6	6	12	1280
Med. 7	10	20	1290
Med. 8	15	30	1300
Média			1280

Uma nova medição, conforme mostra os dados da tabela 4, foram tomadas no dia 25/08, por volta das 15h, com temperatura ambiente de 31° C e solo seco.

Tabela 4 - Medidas aterramento comum, em 25/08

	L_1 (m)	L_2 (m)	$R(\Omega)$
Med. 1	1	2	1240
Med. 2	2	4	1280
Med. 3	4	8	1310
Med. 4	5	10	1320
Med. 5	6	12	1300
Med. 6	7	14	1300
Med. 7	8	16	1300
Med. 8	10	20	1300
Média			1294

Em algumas medidas o eletrodo de potencial foi deslocado 1 metro para frente e para trás de seu ponto inicial. Por exemplo, na medida 4 do dia 20/08, o eletrodo de potencial P2, localizado a $L_1 = 4$ m do eletrodo P, teve sua distância mudada para $L_1 = 3$ m e $L_1 = 5$ m e mais duas novas medições realizadas. O intuito era certificar de que de fato a resistência de terra naquela condição era de 1250 Ω . Como não houve mudança, foi considerado o valor inicial com $L_1 = 4$ m no ponto médio.

8.2 Medidas de resistência de terra após concretagem da haste

Após a concretagem, aguardou-se 48 horas para secagem parcial do concreto. Com isso, foram feitas novas medidas no aterramento comum para verificar se não houve variação da resistência de terra do solo de estudo. Elas ocorreram no dia 28/08, as 14h30, com temperatura ambiente de 29° C e solo parcialmente seco.

Tabela 5 - Medidas aterramento comum, em 28/08

	L_1 (m)	L_2 (m)	$R(\Omega)$
Med. 1	2	4	1290
Med. 2	4	8	1300
Med. 3	5	10	1300
Med. 4	6	12	1310
Med. 5	8	16	1300
Média	1300		

A concretagem do furo com a haste padrão ocorreu na tarde do dia 26/08, as 14h45. Aproximadamente 1 hora depois choveu granizo, durante 15 minutos. Devido a isto, o solo 48 horas depois estava com sua camada mais superficial parcialmente seca. As primeiras medidas seguem na tabela 6.

Tabela 6 - Medidas aterramento concretado, em 28/08

	L_1 (m)	L_2 (m)	$R(\Omega)$
Med. 1	1	2	258
Med. 2	2	4	284
Med. 3	3	6	276
Med. 4	4	8	269
Med. 5	5	10	265
Med. 6	8	16	265
Med. 7	10	20	265
Média	269		

A segunda série de medições foi realizada no dia 13/10, às 15 horas, com temperatura ambiente de 36° C. As medições no aterramento comum e no concretado seguem nas tabelas 6 e 7 adiante.

Tabela 7 - Medidas aterramento comum, em 13/10

	L ₁ (m)	L ₂ (m)	R(Ω)
Med. 1	3	6	1230
Med. 2	5	10	1240
Med. 3	6	12	1240
Med. 4	8	16	1240
Med. 5	10	20	1240
Média	1238		

Tabela 8 - Medidas aterramento concretado, em 13/10

	L ₁ (m)	L ₂ (m)	R(Ω)
Med. 1	1	2	215
Med. 2	2	4	235
Med. 4	4	8	223
Med. 5	5	10	223
Med. 6	8	16	225
Med. 7	14	28	220
Média	223		

Após a sequência de medidas mostradas na tabela 8, foram realizadas outras a aproximadamente 90°, na direção do campo de futebol.

Tabela 9 - Medidas aterramento concretado, em 13/10, num ângulo de 90° das anteriores

	L ₁ (m)	L ₂ (m)	R(Ω)
Med. 1	3	6	215
Med. 2	6	12	220
Média	218		

As figuras 47, 48, 49 e 50 exibem algumas das medições realizadas, detalhes das distâncias e direções tomadas e conexão das hastes com seus fios.



Figura 47 - Medição com $L_1 = 2\text{ m}$ e $L_2 = 4\text{ m}$



Figura 48 - Detalhe da conexão do fio ao eletrodo de potencial P2



Figura 49 - Haste cravada no concreto e conectada ao fio do Megger



Figura 50 - Eletrodos com espaçamento de 3 m entre si, a 90° de distância das primeiras medições, na direção do campo de futebol

Os gráficos mostrados nas figuras 51, 52, 53 e 54 permitem a visualização das medidas obtidas com suas respectivas distâncias. Por exemplo, no gráfico da figura 51 estão os valores de

três diferentes medições de resistência no aterramento comum, representadas por suas datas. O eixo das abscissas mostra a distância L_2 , pois o valor de L_1 como demonstrado nas tabelas anteriores é sempre metade de L_2 .

Já na figura 52, bem como na figura 53 e 54, a distância é exibida logo acima do ponto representativo do valor de resistência, para que não haja dúvida quanto a escala dos eixos.

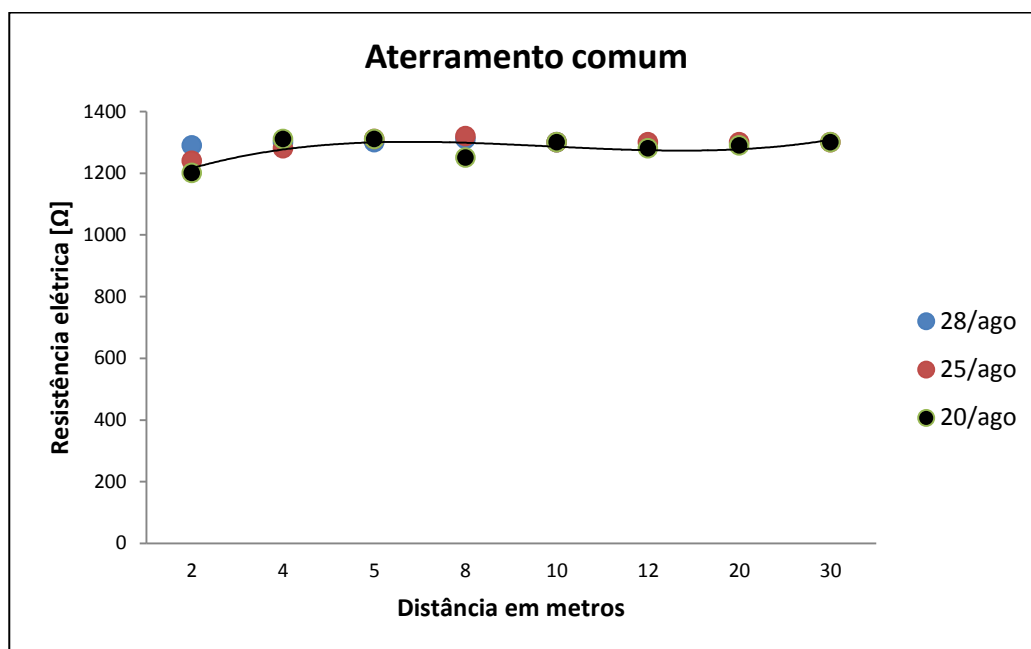


Figura 51 - Gráfico dos valores de resistência do aterramento comum em diferentes dias do mês de agosto

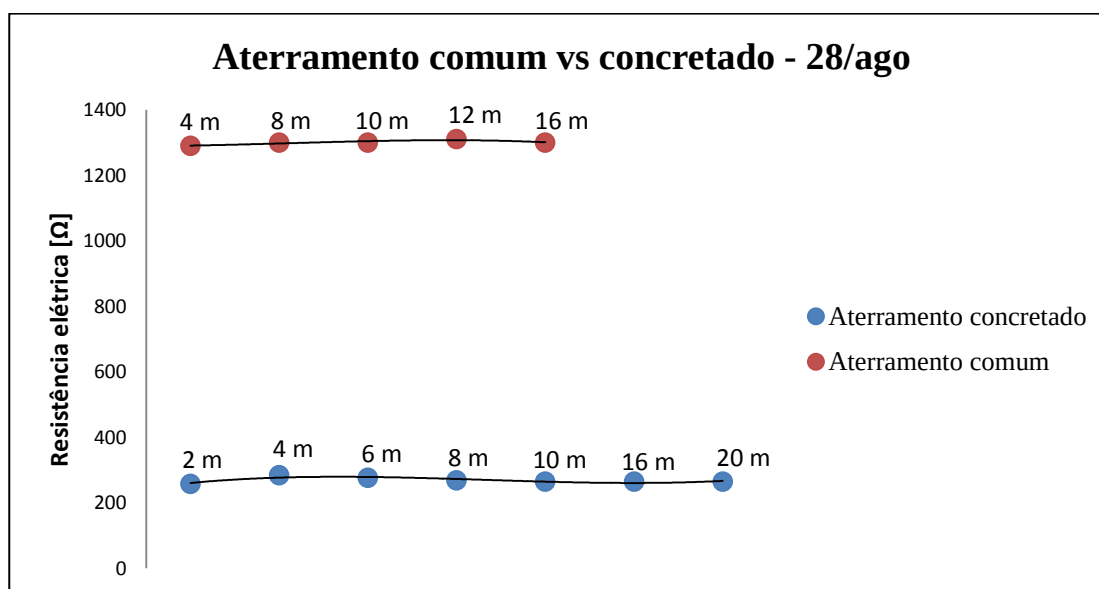


Figura 52 - Gráfico comparativo dos valores de resistência do aterramento comum versus aterramento experimental no mês de agosto

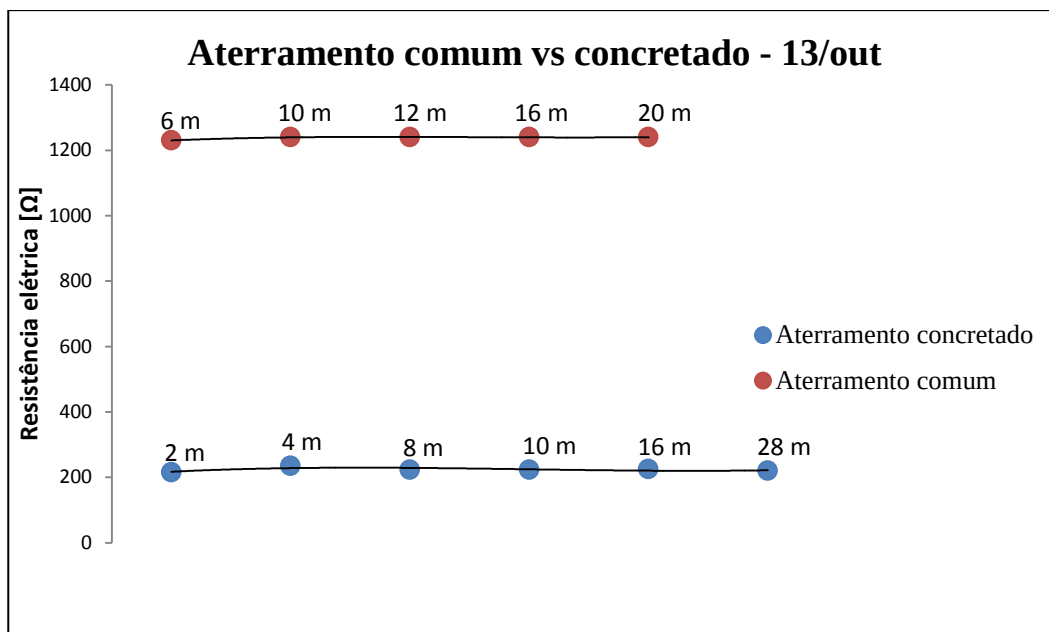


Figura 53 - Gráfico comparativo dos valores de resistência do aterramento comum versus aterramento experimental no mês de outubro

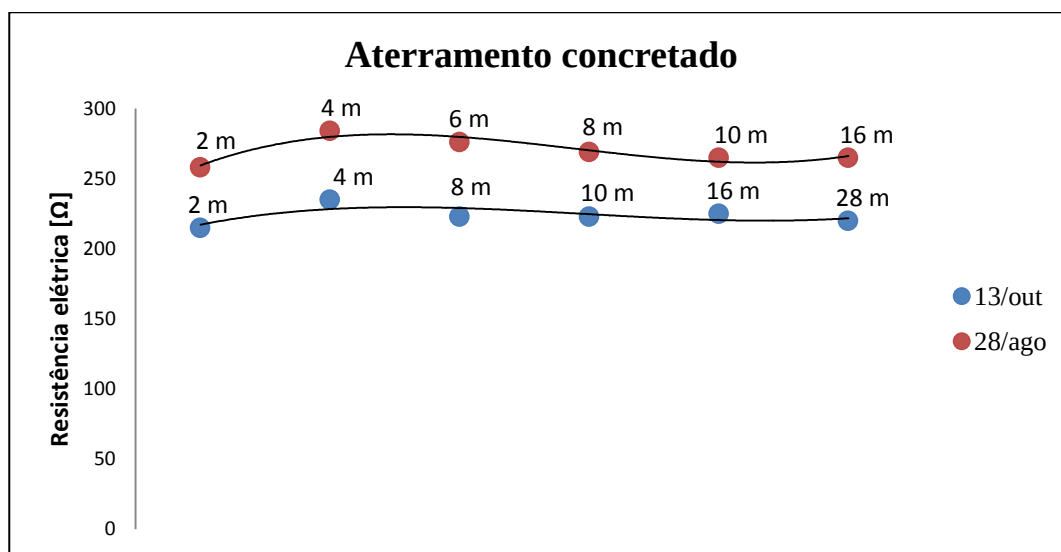


Figura 54 - Gráfico dos valores de resistência do aterramento experimental em duas medições em agosto e outubro

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo investigar a resistência de terra de um aterramento experimental feito com concreto e serragem de madeira. Para isto, foi feita toda uma revisão teórica dos conceitos do Eletromagnetismo, como densidade de corrente, resistência de um condutor e de hemisfério de terra, bem como artigos que tratam especificamente sobre aterramento elétrico, as publicações do IEEE, que é referência mundial no assunto e, por fim, o preparo e a composição do concreto empregado.

Foi necessário também aprender como operar um megôhmetro, e como sua conexão estava relacionada com os métodos existentes. A maioria dos catálogos disponíveis na internet era de aparelhos digitais, o que exigiu uma busca e atenção maior para o equipamento analógico utilizado.

As medições que se iniciaram em agosto no aterramento comum permitiram obter a base de comparação, ou *benchmark*, para o aterramento experimental. Como é possível notar no capítulo 8, os valores das três séries de medições que ocorreram em agosto no aterramento comum, com média de 1291 Ω , foi reduzido no aterramento experimental para 269 Ω , ou seja, decréscimo de 79,2%. Na medição de outubro, quando já passaram 48 dias, a média das medições foi de 223 Ω , que implica numa redução de 82,8% de 1300 Ω que o valor do aterramento comum com apresentou em 13 de outubro.

Para verificar a consistência dos valores lidos no megôhmetro, em algumas medições o eletrodo de potencial P2 era afastado um ou dois metros para trás e para frente, a fim de se ter certeza de que ainda permanecia a zona de patamar, conforme descrito no capítulo 6, seção 6.4. Além disso, uma das medições foi feita a 90° de distância angular da linha inicial de medidas, e mostrou que a variação foi desprezível, cerca de 2%. Ver dados na tabela 9.

Uma das razões que explicam a visível redução da resistência elétrica com o aterramento experimental é a higroscopia do concreto aliada aos cavacos de eucalipto. Higroscopia é a propriedade de que certos materiais possuem de reter água. É sabido que em solos úmidos a resistividade diminui, conseqüentemente diminuindo a resistência elétrica – ver tabela 2 e equação 19. Esta variação ocorre em virtude da variação de cargas elétricas ser predominantemente iônica. Umidade a mais faz com que os sais presentes no solo se dissolvam, formando um meio eletrolítico favorável a passagem da corrente.

Foi possível concluir neste trabalho de que o aterramento experimental concretado com serragem de madeira, que envolveu o furo da haste cobreada, apresentou valores de resistência elétrica menores e se mostra, *a priori*, como uma alternativa para projeto de aterramento eficiente, que é fundamentalmente aquele que oferece a menor resistência para a passagem de correntes faltosas.

Quanto ao custo, não foi possível levantar o valor monetário dessa instalação, pois foi feito em caráter experimental sem a preocupação financeira. Mas é possível dizer que trata-se de uma solução relativamente barata, pois no momento da construção civil de um imóvel, onde também é executado o aterramento elétrico, basta executar um furo de 30 cm de diâmetro que comporte o comprimento da haste e utilizar um volume de concreto adaptado ao traço apresentado neste trabalho. Vale lembrar que a serragem de madeira é tida como contaminante por inúmeras indústrias, o que faz com que seu custo seja bastante reduzido ou até mesmo nulo.

Como trabalhos futuros, sugere-se a continuidade das medições para confirmação dos resultados obtidos, verificação de alteração das composições do concreto e também do tamanho das partículas de madeira.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 7117: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo**, 1981

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**, 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 13571: Haste de aterramento aço-cobreada e acessórios – Especificação**, 1996

ALTAFIM, R. A. C. **Material de aula e apoio**, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013

CAPELLI, A. **Aterramento Elétrico**, Saber Eletrônica nº 329, 2000

CHANG, J. C. & LIN, Y. C. & LEI, S. C. & KUO, K. C. & CHEN, J. R. **Electrical Power and Ground System Study and Improvement at TLS**, 2003

DEPARTMENT OF DEFENSE USA **Military Handbook – Grounding, Bonding and Shielding for Electronic Equipments and Facilities vol. 1**, 1987

DWIGHT, H. B. **Calculation of Resistances to Ground**, 1936

DUNKI-JACOBS, J. R. **The function and Composition of the Global Industrial Grounding System**, IEEE article, 2006

ENGENHEIROS ASSOCIADOS. **EA Engenheiros Associados**. Disponível em: <http://www.engenheirosassociados.com.br/artigos/info_aterramento.php> Acesso em: 26.Jul.2014

GESUALDO, E. L. **Medição de Resistência de Terra**, material de aula da disciplina SEL-305 Medidas Elétricas e Eletrônicas II, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012

GOMES, D. S. F & MACEDO, F. F. & GUILLIOD, S. M. **Aterramento e Proteção contra Sobretensões em Sistemas Aéreos de Distribuição volume 7**, Eletrobrás, Editora Universitária UFF, 1990

HAYT JR, W. H. & BUCK, J. A. **Eletromagnetismo 6ª edição**, Editora LTC, 2003

INSTALAÇÕES ELÉTRICAS II. **Blog de Instalações Elétricas II**. Disponível em: <<http://instalacoeseletricasii.blogspot.com.br/2013/03/aula-05-tratamento-quimico-do-solo.html>> Acesso em: 04.Ago.2014

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE **Guide for Safety in AC Substation Grounding**, std. 80, 2000

KINDERMANN, G. & CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico 3ª edição**, Editora Sagra-DC Luzzatto Editores, 1992

LEON. VM **Leon Engenharia e Construções LTDA**. Disponível em: <<http://www.leonengenharia.com.br>> Acesso em: 26.Jul.2014

PAULINO, J. O. S. **Conceitos básicos sobre aterramentos, Estudo técnico 2: aterramento de cercas e currais**. Disponível em: <<http://www.feng.pucrs.br/~fdosreis/ftp/medidas/FSR04Aterramento.pdf>> Acesso em: 4.Ago.2014

SOUZA, F. R. **Compósito de lodo de estação de tratamento de água e serragem de madeira para uso como agregado graúdo em concreto**, 209 p. Dissertação de Mestrado, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010

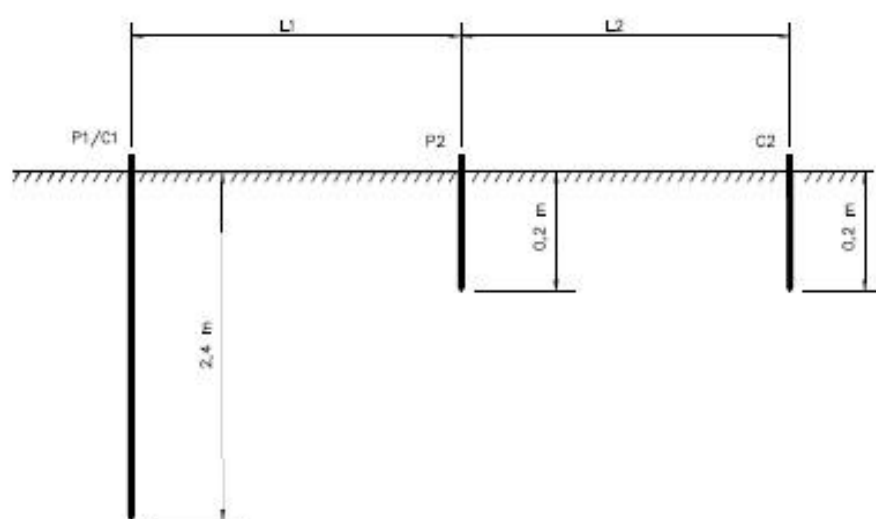
SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL – SENAI & ARCELOR BRASIL **Gradezas Físicas, Instrumentos e Equipamentos de Medição e Teste**, apostila de apoio, 2014

SVERKO, E. R. **Ground Measuring Techniques: Electrode Resistance to Remote Earth & Soil Resistivity**, Erico Inc. USA, 1999

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ – UTFPR **Agregados para concreto de cimento Portland**, material de aula, 2012

ZENG, R. & LU, G. & LUO, B. **The Theory and Implementation of Corrosion Diagnosis for Grounding System**, IEEE article, 2002

11 APÊNDICE A – Croqui dos furos e das hastes no solo



LEGENDA

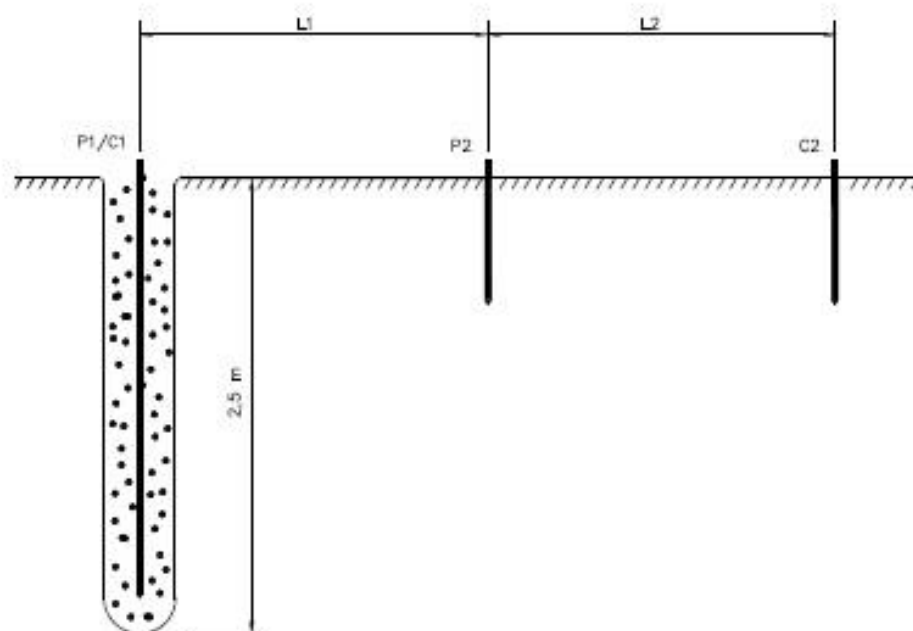
- P1/C1: eletrodo de terra a ser medido
 P2: eletrodo de potencial
 C2: eletrodo de corrente ou terra auxiliar

NOTAS:

1. INSTRUMENTO UTILIZADO: MEGGER À MANIVELA
2. MEDIDAS EM METROS.

MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE TERRA - TCC

ALUNO	PROFESSOR	DATA	ESCALA
RENAN DE JESUS ALVES	DR. RUY ALTA FIM	08/08/2014	1:230
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS		DESENHO	REVISÃO
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO		TCC_DES1	0
DEPARTAMENTO ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO			



LEGENDA

- P1/C1: eletrodo de terra a ser medido
 P2: eletrodo de potencial
 C2: eletrodo de corrente ou terra auxiliar

NOTAS:

1. INSTRUMENTO UTILIZADO: MEGGER À MANIVELA
2. MEDIDAS EM METROS.

MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE TERRA - TCC

ALUNO

RENAN DE JESUS ALVES

PROFESSOR

DR. RUY ALTA FIM

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO

DATA

20/08/2014

ESCALA

1:230

DESENHO

TCC_DES2

REVISÃO

0