

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ENGENHARIA ELÉTRICA

LARISSA QUEIROZ TEIXEIRA

**TRATAMENTO QUÍMICO DO SOLO PARA SISTEMAS DE
ATERRAMENTO ELÉTRICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2019

LARISSA QUEIROZ TEIXEIRA

TRATAMENTO QUÍMICO DO SOLO PARA SISTEMAS DE ATERRAMENTO ELÉTRICO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título Bacharel em Engenharia
Elétrica, do Departamento de Engenharia
Elétrica, da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Me. Marco Antonio Ferreira
Finocchio

CORNÉLIO PROCÓPIO

2019



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Larissa Queiroz Teixeira

Tratamento químico do solo para sistemas de aterramento elétrico

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 15:00hs do dia 23/04/2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Me(a). Marco Antonio Ferreira Finocchio - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Luiz Marcelo Chiesse da Silva - (Membro)

Prof(a). Esp. José Roberto Shimazaki - (Membro)

*Dedico este trabalho ao meu tio
Claudinei Assis de Oliveira
(in memoriam)
que sempre acreditou e valorizou
a busca do conhecimento.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças para continuar minha trajetória.

Aos meus pais Aline Queiroz e Luiz Teixeira pelo apoio em todos esses anos de graduação.

A meu orientador Prof. Me. Marco Antonio Ferreira Finocchio, pela sabedoria com que me guiou e disposição para me auxiliar sempre que precisei.

As minhas colegas de república: Luana Oliveira, Ariane Alves, Thaís Minichello, Isabela Nunes, Gabriela Lima e Giovana Bassetto, pelo carinho, amizade, companheirismo nos momentos de alegria e tristeza, me ajudando a amadurecer e crescer como ser humano respeitando as diferenças.

Aos meus colegas de intercâmbio Amanda Amorim, Miguel Martins, Marco Rodrigues e Eduardo Guimarães pela amizade e apoio do outro lado do oceano atlântico e em especial, meu namorado Felipe Faria, que conheci em Portugal e me acompanhou no Brasil em todas as dificuldades.

À Secretaria do Curso, pela cooperação.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

TEIXEIRA, Larissa Q. **Tratamento químico do solo para sistemas de aterramento elétrico.** 2019. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2019.

O presente estudo tem por objetivo realizar um comparativo de três modelos de tratamento químico do solo, a fim de se obter uma menor resistência de terra e, consequentemente, um bom aterramento elétrico. Este trabalho também traz uma breve explicação dos conceitos fundamentais para se compreender o aterramento, o histórico do aterramento no Brasil e os tipos de sistemas de aterramento existentes.

Palavras-chave: Aterramento. Tratamento químico. Solo.

ABSTRACT

TEIXEIRA, Larissa Q. **Chemical ground treatment for electrical grounding systems.** 2019. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2019.

The objective of this study is to perform a comparative of three models of ground chemical treatment in order to obtain the lower ground resistance and, consequently, to good electrical ground. It also provides a brief explanation of the fundamental concepts for understanding grounding, grounding history in Brazil, and types of existing grounding systems.

Keywords: Grounding. Chemical Treatment. Ground.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Modelo de aterramento.	14
Figura 2 - Distribuição geográfica dos solos no Brasil.....	15
Figura 3 - Tipo de solo encontrado na região de Londrina/PR.....	16
Figura 4 - Nitossolo e Latossolo.	16
Figura 5 - Configuração do sistema de aterramento de uma haste.....	23
Figura 6 - Distribuição do potencial no solo.....	24
Figura 7 - Método das imagens aplicado a uma fonte pontual de corrente sob o solo.....	25
Figura 8 - Haste de aterramento e sua imagem ao longo do eixo z.	26
Figura 9 - Cristal Ice.	30
Figura 10 - Terrômetro fornecido pela universidade.....	31
Figura 11- Haste auxiliar	31
Figura 12 - Alocação do terrômetro para medição.	32
Figura 13 - Método de medição da resistência de aterramento.	32
Figura 14 – Os três modelos de aterramento, objeto de estudo da pesquisa. .	33

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Efeito da umidade na resistência do solo.	18
Gráfico 2 - Efeito do tipo de concentração de sais na resistividade do solo.....	19
Gráfico 3 - Variação da resistividade em função da temperatura.....	20
Gráfico 4 - Variação da resistividade da água com a concentração de sais. ...	29
Gráfico 5 - Resistência de aterramento pelo método da queda de potencial. ..	33
Gráfico 6 - Comportamento da resistividade ao longo dos dias amostrados. ..	36
Gráfico 7 - Temperatura média durante os dias amostrados.	36
Gráfico 8 - Umidade média nos dias amostrados.....	37
Gráfico 9 - Chuva nos dias amostrados.	37
Gráfico 10 - Tratamento químico utilizando carvão e sal.	38
Gráfico 11- Comportamento da resistividade ao longo dos dias amostrados (em tamanho maior).	50
Gráfico 12 - Comportamento da resistividade ao longo dos dias amostrados - haste em terra.	51
Gráfico 13 - Comportamento da resistividade ao longo dos dias amostrados - haste com carvão e sal.	51
Gráfico 14 - Comportamento da resistividade ao longo dos dias amostrados - haste com cristais.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores típicos de resistividade de alguns solos.	15
Tabela 2 - Resistividade de um solo arenoso com concentração de umidade.	18
Tabela 3 - Influência da concentração de sais na resistividade do solo	19
Tabela 4 - Variação da resistividade em função da temperatura.	20
Tabela 5 - Dimensão das hastes.....	35
Tabela 6 - Medições da resistência de terra e cálculo da resistividade.....	44
Tabela 7 - Medições dos valores de temperatura, umidade, pH e clima.	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO GERAL	12
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	12
1.3 JUSTIFICATIVA	13
1.4 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA	13
2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS	14
2.1 RESISTIVIDADE DO SOLO	14
2.2 HASTE DE ATERRAMENTO	17
2.3 UMIDADE DO SOLO	17
2.4 CONCENTRAÇÃO DE SAIS	18
2.5 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA	19
3 ATERRAMENTO ELÉTRICO	21
3.1 HISTÓRICO	21
3.2 SISTEMAS DE ATERRAMENTO	22
3.2.1 Sistema de Aterramento com uma Haste Vertical.	23
3.2.2 Modelagem do sistema	24
4 TRATAMENTO QUÍMICO DO SOLO E METODOLOGIA	29
4.1 SISTEMAS DE UMA HASTE COM TRATAMENTO CONVENCIONAL – CARVÃO E SAL	29
4.2 SISTEMAS DE UMA HASTE COM CRISTAIS ABSORVENTES	30
4.3 METODOLOGIA	30
5 MEDIÇÃO E RESULTADOS	35
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
REFERÊNCIAS	42

APÊNDICE A – AMOSTRAS DOS DADOS COLETADOS DAS RESISTÊNCIAS DE TERRA.....	43
APÊNDICE B – AMOSTRAS DOS DADOS COLETADOS DE TEMPERATURA, UMIDADE, PH E CLIMA.....	46
APÊNDICE C – GRÁFICO PARA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA RESISTIVIDADE.....	49

1 INTRODUÇÃO

Segundo a norma brasileira NBR 5410, toda edificação deve dispor de uma infraestrutura de aterramento, chamado “eletrodo de aterramento”. A mesma deve ser concebida de modo que: seja confiável e satisfaça os requisitos de segurança das pessoas; possa conduzir correntes de falta à terra sem risco de danos térmicos, termomecânicos e eletromecânicos, ou de choques elétricos causados por essas correntes; quando aplicável, atenda também aos requisitos funcionais da instalação.

Contudo, se o sistema já está fisicamente definido e instalado, como reduzir sua resistência elétrica?

No presente estudo serão abordados os conceitos fundamentais para a compreensão do aterramento elétrico, o histórico no Brasil, os sistemas de aterramento existentes e em seguida, serão tratados métodos capazes de solucionar a questão anterior.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste estudo é obter uma menor resistência de terra e, consequentemente, um bom aterramento elétrico.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Realizar uma análise comparativa de três modelos de aterramento, sendo: sistema de uma haste cravada no solo sem tratamento químico e, outros dois modelos, utilizando o tratamento químico do solo, um com carvão e sal e outro com cristais absorventes.

Verificar a viabilidade da implantação do projeto, analisando o comportamento da resistividade do solo ao longo do tempo.

As amostras serão aferidas diretamente utilizando o terrômetro e, em seguidas, analisadas utilizando o Microsoft Office Excel.

1.3 JUSTIFICATIVA

Quando o assunto se trata de melhorias, sempre se levanta a questão do custo do projeto. Portanto, ao realizar este estudo foi analisado o melhor custo-benefício para o sistema implantado.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA

A organização desta monografia está descrita no Quadro 1.

Quadro 1 - Organização da monografia.

Capítulos	Descrição
1	Neste capítulo se encontra a introdução da monografia, o objetivo e justifica.
2	São abordados os conceitos fundamentais para a compreensão do aterramento elétrico e os fatores externos que influenciam esta variável.
3	É apresentado o histórico do aterramento, são exemplificados os tipos de sistemas aterramentos existente e a modelagem do sistema de uma haste empregado nessa dissertação.
4	É abordado o tratamento químico do solo utilizando dois métodos: sistema de uma haste com carvão e sal e sistema de uma haste com cristais absorventes. Também, será tratada a metodologia empregada para efetuar a coleta dos dados de aterramento.
5	Serão apresentados os resultados, bem como o comparativo entre o sistema de uma haste, sistema de uma haste com tratamento convencional – carvão e sal – e sistema de uma haste com cristais absorventes.
6	Considerações finais.

Fonte: Autoria própria.

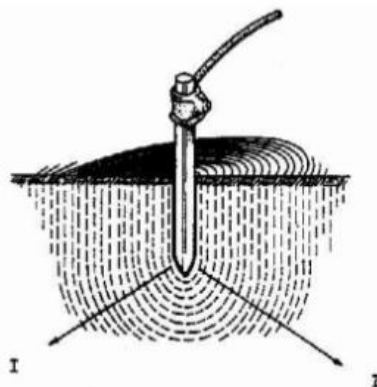
2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Um aterramento elétrico consiste em uma ligação elétrica proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo (VISACRO FILHO, 2002).

Possuem basicamente três componentes:

- Conexões elétricas que ligam o sistema aos eletrodos;
- Eletrodos de aterramento;
- Solo que envolve os eletrodos.

Figura 1 – Modelo de aterramento.



Fonte: Visacro Filho (2002).

2.1 RESISTIVIDADE DO SOLO

O solo é o meio em que os eletrodos ficam imersos. Portanto, para o estudo do aterramento elétrico é importante que suas propriedades físico-químicas sejam averiguadas.

O mesmo tem uma composição muito diversificada, sendo que o valor de sua resistividade pode variar de local para local em função do seu tipo – argila, calcário, areia, granito... – do nível de umidade, da profundidade das camadas, temperatura, salinidade, entre outros fatores.

A Tabela 1 mostra a resistividade típica de alguns tipos de solos.

Tabela 1 - Valores típicos de resistividade de alguns solos.

Tipos de solos	Faixa de resistividades [Ω.m]
Água do mar	Menor do que 10
Alagadiço, limo, húmus, lama	Até 150
Água destilada	300
Argila	300 – 5000
Calcário	500 – 5000
Areia	1000 – 8000
Granito	1500 – 10000
Basalto	A partir de 10000
Concreto	Molhado: 20 – 100 Úmido: 300 – 1000 Seco: 3K Ω .m – 2M Ω .m

Fonte: O Setor Elétrico (MODENA; SUETA, 2011).

Os valores de resistividade do solo do Brasil são mais elevados se comparados com valores característicos de outros países como, por exemplo, França e Alemanha (FILHO, 2002), que possuem valores usuais em torno de 50 Ω .m.

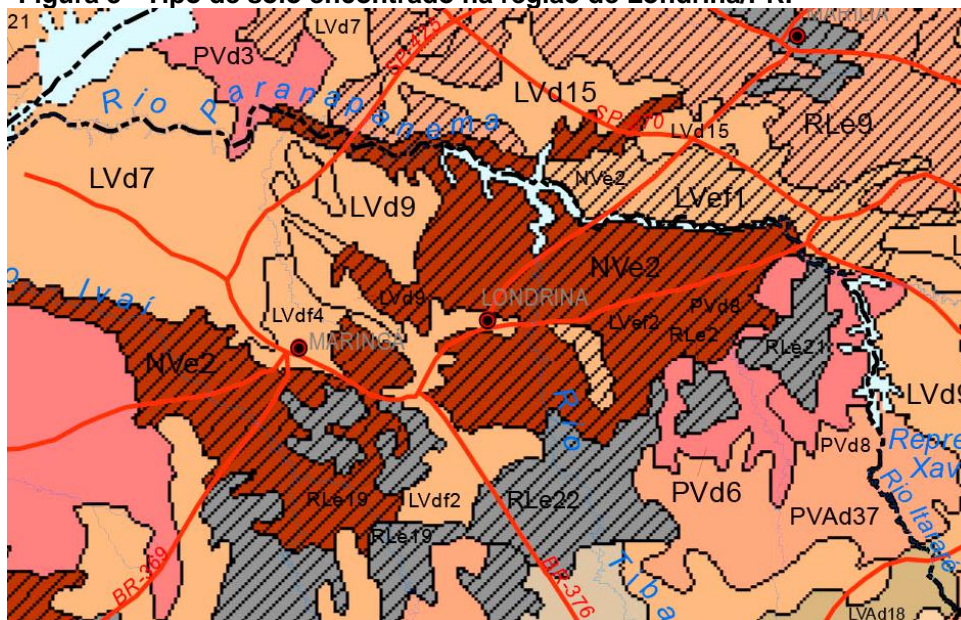
O portal da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA disponibiliza os tipos de solo presentes no território brasileiro, como é possível observar na Figura 2 uma imensa variedade.

Figura 2 - Distribuição geográfica dos solos no Brasil.

Fonte: EMBRAPA, 2019.

Cornélio Procópio está a 66km de distância de Londrina. Com isso, observando a Figura 3, pode-se afirmar que o tipo de solo encontrado na cidade onde foi aplicado o estudo possui o código NVe2 – Nitossolos Vermelhos Eutróficos + Latossolos Vermelhos Eutroféricos.

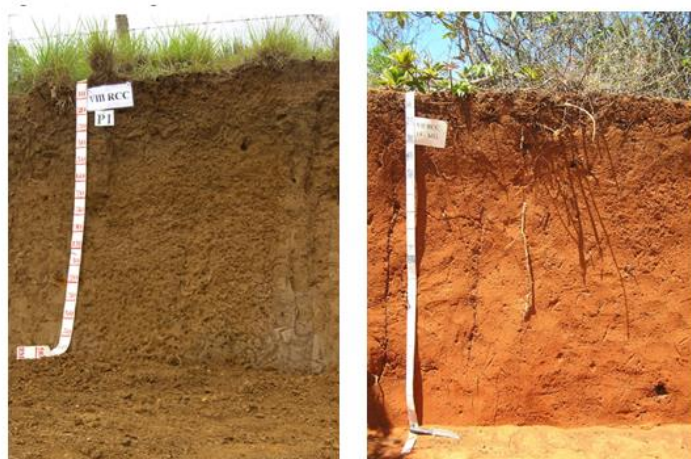
Figura 3 - Tipo de solo encontrado na região de Londrina/PR.



Fonte: EMBRAPA, 2019.

Nitossolos apresentam textura argilosa ou muito argilosa, com pouco incremento de argila em profundidade e com estrutura em blocos ou prismas. Latossolos são altamente intemperizados e sem incremento de argila em profundidade. Na Figura 4 pode-se observar um Nitossolo à esquerda e Latossolo à direita.

Figura 4 - Nitossolo e Latossolo.



Fonte: EMBRAPA, 2019.

2.2 HASTE DE ATERRAMENTO

Segundo Kindermann e Campagnolo (2011), as hastes de aterramento devem ser constituídas de um bom condutor de eletricidade, praticamente inerte às ações dos ácidos e sais dissolvidos no solo, sofrer a menor ação possível de corrosão galvânica e resistência mecânica compatível com a cravação e movimentação do solo.

A norma brasileira NBR5410 admite tais eletrodos de aterramento:

- Preferencialmente, uso das próprias armaduras do concreto das fundações;
- Uso de fitas, barras ou cabos metálicos, especialmente previstos, imersos no concreto das fundações;
- Uso de malhas metálicas enterradas, no nível das fundações, cobrindo a área da edificação e complementadas, quando necessário, por hastes verticais e/ou cabos dispostos radialmente (“pés-de-galinha”);
- No mínimo, uso de anel metálico enterrado, circundando o perímetro da edificação e complementado, quando necessário, por hastes verticais e/ou cabos dispostos radialmente (“pés de galinha”).

No presente estudo foram utilizados dois tipos de hastes de aterramento, suas características e medidas estão descritas no capítulo de medições e resultados. Tal variável será de suma importância para a validação do experimento.

2.3 UMIDADE DO SOLO

A resistividade sofre alterações com a umidade. Isso ocorre devido à condução de cargas elétricas iônicas. Os sais presentes no solo se dissolvem formando um meio eletrolítico favorável a corrente iônica.

A quantidade de água é variável com uma série de fatores, tais como o clima, época do ano, temperatura, natureza do solo, existência de lençóis subterrâneos, dentre outros (FILHO, 2002).

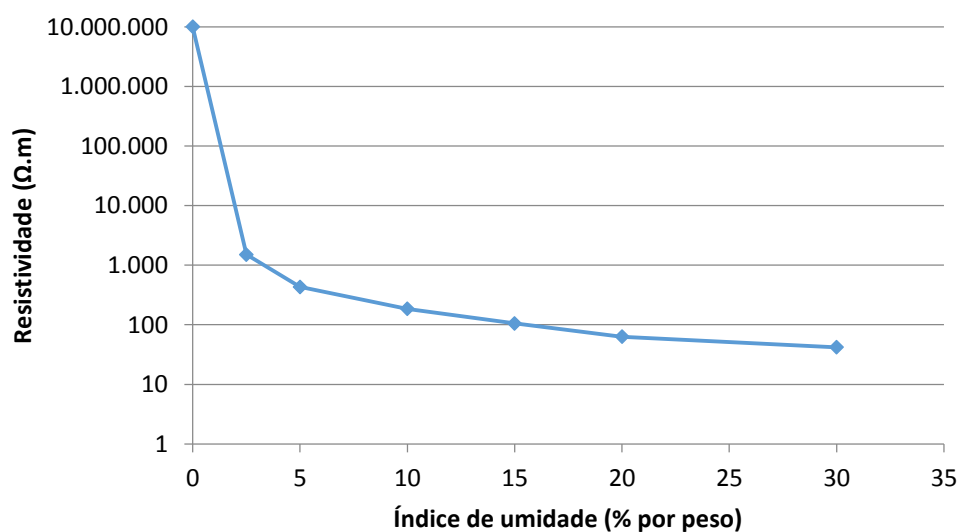
O gráfico 1 demonstra o comportamento da resistividade em função da porcentagem de umidade em um solo arenoso e, as variáveis utilizadas para a plotagem do mesmo estão dispostas na Tabela 2.

Tabela 2 - Resistividade de um solo arenoso com concentração de umidade.

Índice de umidade (% por peso)	Resistividade ($\Omega.m$) solo arenoso
0,0	10.000.000
2,5	1.500
5,0	430
10,0	185
15,0	105
20,0	63
30,0	42

Fonte: Kindermann; Campagnolo (2011).

Gráfico 1 - Efeito da umidade na resistência do solo.



Fonte: Autoria própria.

2.4 CONCENTRAÇÃO DE SAIS

Com o item umidade anteriormente analisado, fica mais fácil a compreensão da concentração de sais. Como a resistividade está associada aos sais presentes na condução eletrolítica, é possível concluir que a resistividade depende da quantidade e do tipo de sais dissolvidos na água presente no solo, visto que a areia, por exemplo, é pobre em sais minerais.

A Tabela 3 apresenta os valores da resistividade em função da concentração de sais dissolvidos no solo.

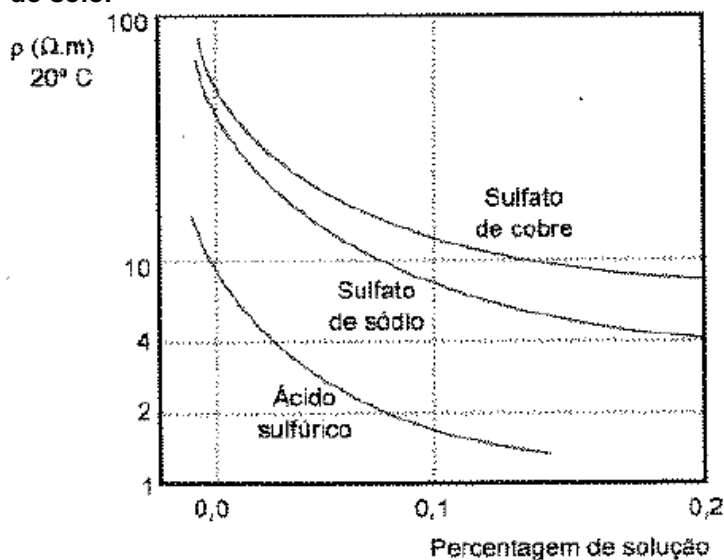
Tabela 3 - Influência da concentração de sais na resistividade do solo
Temperatura: 17°C Umidade 15%.

Sal adicionado (% por peso)	Resistividade ($\Omega.m$) solo arenoso
0,0	107
0,1	18
1,0	1,6
5,0	1,9
10,0	1,3
20,0	1,0

Fonte: Visacro Filho (2002).

O gráfico 2 esboça três curvas de diferentes tipos de sais para avaliarmos o comportamento da resistividade em função da concentração dos mesmos.

Gráfico 2 - Efeito do tipo de concentração de sais na resistividade do solo.



Fonte: Visacro Filho (2002).

2.5 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

De acordo com a Tabela 4 pode-se analisar o comportamento da resistividade mantendo as demais características e variando a temperatura.

Uma temperatura elevada provoca maior evaporação, diminuindo assim a umidade. Portanto, um aumento de temperatura tende a aumentar a resistividade. Isso deve ser levado em conta em países tropicais com regiões de alta temperatura.

Com o decréscimo da temperatura e a consequente contração e aglutinação da água é produzida uma dispersão nas ligações iônicas entre os grânulos da terra no solo (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011) resultando em um maior valor da resistividade.

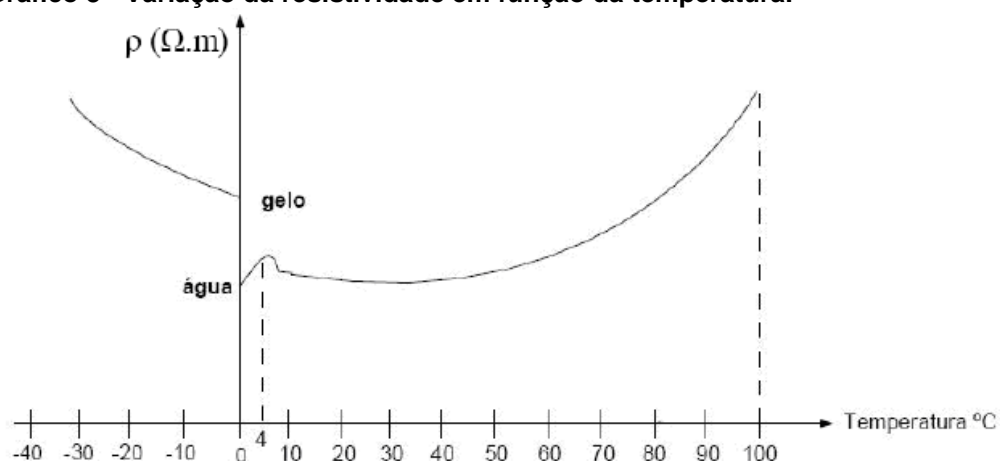
Tabela 4 - Variação da resistividade em função da temperatura.

Temperatura (°C)	Resistividade ($\Omega.m$) solo arenoso
20	72
10	99
0	138
0	300
-5	790
-15	3300

Fonte: Kindermann; Campagnolo (2011).

O Gráfico 3 esboça o comportamento da curva da resistividade em função da variação de temperatura.

Gráfico 3 - Variação da resistividade em função da temperatura.



Fonte: Arend (2009).

3 ATERRAMENTO ELÉTRICO

Neste capítulo será abordado um breve histórico do Aterramento Elétrico no Brasil, os tipos de sistemas de aterramentos existentes e como é feita a modelagem do sistema de aterramento utilizando uma haste simples aplicado ao presente estudo.

3.1 HISTÓRICO

É notável a falta de literatura brasileira nesta área ou em outras relacionas diretamente com a segurança de vidas humanas e de patrimônio. (LEITE; PEREIRA FILHO, 1996).

Contudo, com a crescente evolução tecnológica no sistema de distribuição de energia elétrica do país, esse assunto tem-se tornado cada vez mais relevante nos últimos anos.

Na segunda metade do século XIX, estudos ligados aos sistemas de proteção de instalações e edificações contra descargas atmosféricas eram pouco enfatizados. Havia, sobre o assunto, o simples para-raios Franklin que atendia às necessidades mínimas exigidas (SPOZITO JUNIOR, 2012).

Contudo, os fenômenos atmosféricos tornaram-se problemas frequentes e assim, equipamentos, dispositivos de proteção e demais acessórios interligados eram constantemente danificados. Devido a isso, iniciaram-se pesquisas sobre os modos de aterramento e seu comportamento durante as descargas atmosféricas.

Além disso, alguns pesquisadores notaram que o comportamento do aterramento se comportava de maneira diferente quando sujeito a correntes de impulso com alta intensidade e baixa intensidade e frequência.

Detectou-se ainda que o comportamento dos sistemas de aterramento apresentava efeitos contrastantes entre ensaios realizados com dados coletados nas operações em baixa frequência, comparados aos de altas intensidades, notadamente pela presença de harmônicas observadas por distorções constatadas nos resultados testados em alguns modelos propostos.

No caso de sistemas de aterramentos de grandes dimensões vale destacar que a resistência de aterramento tem valores maiores em detrimento dos medidos com corrente de baixa intensidade e baixa frequência.

Outro fenômeno também presente é a ionização do solo nas vizinhanças das hastes de aterramentos, as quais propiciam a circulação e drenagem das correntes.

Metodologia e modelos apropriados, que simulem o comportamento de um sistema de aterramento frente a uma descarga atmosférica, atualmente são de suma importância para a construção de malhas de terra mais eficientes, introduzindo um aumento na confiabilidade e segurança de operação do sistema elétrico envolvido.

3.2 SISTEMAS DE ATERRAMENTO

O tipo de sistema de aterramento a ser adotado depende da importância do sistema de energia elétrica envolvido, do local e do custo (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011).

Existem diversos tipos de sistemas de aterramento, os principais tipos são:

- Uma simples haste cravada no solo;
- Hastes alinhadas;
- Hastes em triângulo;
- Hastes em quadrado;
- Hastes em círculos;
- Placas de material condutor enterradas no solo;
- Fios ou cabos enterrados no solo, formando diversas configurações, como: estendido em vala comum; em cruz; em estrela; quadriculados, formando uma malha de terra.

Neste trabalho utilizou-se o sistema de aterramento com uma haste vertical para os três modelos de aterramento a serem estudados. Foi aplicado dois tipos de tratamento químico, a fim de comparar um sistema de

aterramento simples – sem tratamento – com outros dois modelos utilizando carvão, sal e cristais absorventes.

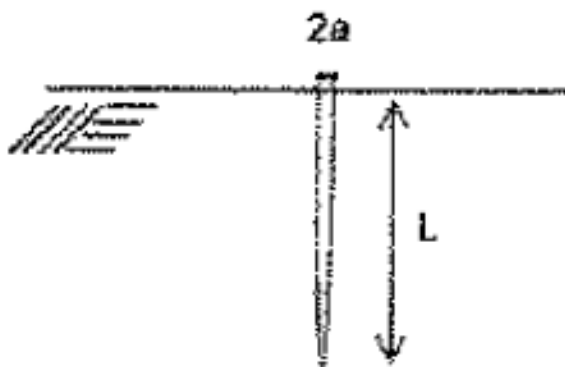
3.2.1 Sistema de Aterramento com uma Haste Vertical.

Os métodos de medição são resultados da análise de características práticas das equações de Maxwell do eletromagnetismo, aplicadas ao solo.

Tal modelagem, que será apresentada a seguir, será de suma importância para encontrarmos o valor da resistividade aparente solo representada por ρ [$\Omega.m$]. O valor da resistência de terra obtida pelo terrômetro é uma medida direta – este instrumento será tratado no próximo capítulo – como no estudo há dois tipos de hastes com diferentes dimensões, será necessário uma variável que despreze todos esses fatores para avaliar se o tratamento químico é eficaz, sendo ela a resistividade do solo.

Uma haste cravada verticalmente em um solo homogêneo tem uma resistência elétrica determinada pela Equação 1.

Figura 5 - Configuração do sistema de aterramento de uma haste.



Fonte: Visacro Filho (2002).

$$R_t = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \left(\frac{4L}{a} \right) - 1 \right) \quad (1)$$

Onde,

ρ : Resistividade aparente do solo [$\Omega.m$]

L: Comprimento da haste [m]

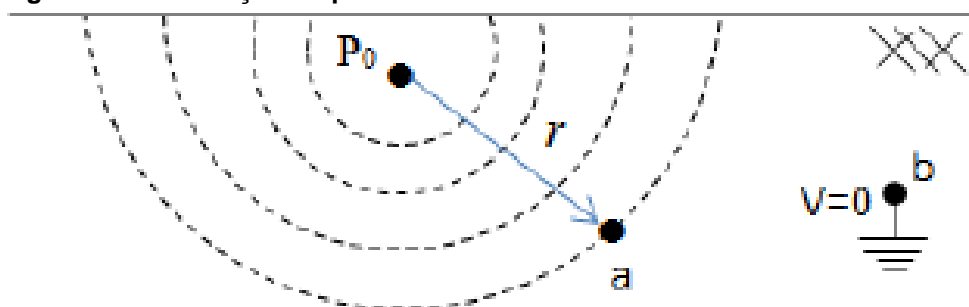
2a: Diâmetro do círculo equivalente à área da secção transversal da haste [m].

Examinando a Equação 1, pode-se determinar que os fatores que influenciam na redução do valor da resistência são: aumento do diâmetro da haste; adição de hastes em paralelo; aumento do comprimento da haste e redução da resistividade aparente do solo utilizando tratamento químico.

3.2.2 Modelagem do sistema

Para se chegar à Equação 1 disposta no item anterior pode-se considerar uma corrente, I , fluindo no solo a partir do ponto P_0 em direção ao terra remoto. Consequentemente, são estabelecidas as curvas equipotenciais neste meio, como ilustrado a seguir.

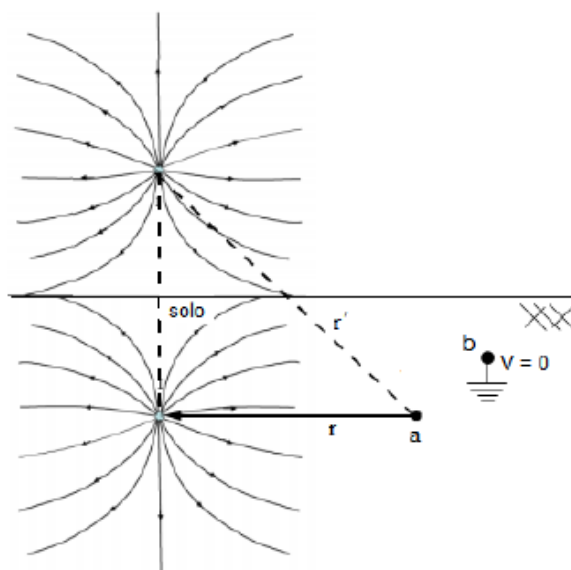
Figura 6 - Distribuição do potencial no solo.



Fonte: Lima (2010).

Em alguns casos, os problemas que envolvem condições de contorno e distribuição de cargas são de difícil solução. Neste caso, para se definir o potencial elétrico será utilizado o método das imagens, na qual qualquer configuração de carga, acima de um plano condutor perfeito e infinito, é eletricamente equivalente à combinação da configuração de carga com sua imagem posicionada a uma mesma distância em relação ao plano condutor de referência, removendo-se, contudo, esse plano.

Figura 7 - Método das imagens aplicado a uma fonte pontual de corrente sob o solo.



Fonte: Lima (2010).

Sendo agora o meio homogêneo e com dimensões infinitas a corrente real que deixa a fonte estabelece curvas de equipotenciais em formato esférico que aumentam de raio à medida que se afasta da fonte. Desta forma, a densidade de corrente no ponto a é definida pela relação entre a corrente I e a área superficial da esfera, definida pela Equação 2.

$$J = \frac{I}{4\pi r^2} \quad (2)$$

A diferença de potencial entre os pontos a e b é obtida integrando o campo elétrico no percurso entre os pontos, tendo em conta que $E = \rho J$. Assim, estando o ponto b no “infinito”, o potencial no ponto a é definido pela Equação 3.

$$V = \frac{\rho I}{4\pi r} \quad (3)$$

A mesma análise é feita para a inclusão do efeito relativo à corrente-imagem, já que esta também deve ser contemplada, sendo a densidade de corrente e o potencial no ponto a definidos igualmente pelas expressões 2 e 3 devendo-se observar que, neste caso, o raio r deve ser substituído por r'

relativo à imagem. Assim, considerando a superposição dos efeitos, o potencial no ponto a é definido pela seguinte Equação 4.

$$V_a = \frac{\rho I}{4\pi r} + \frac{\rho I'}{4\pi r'} \quad (4)$$

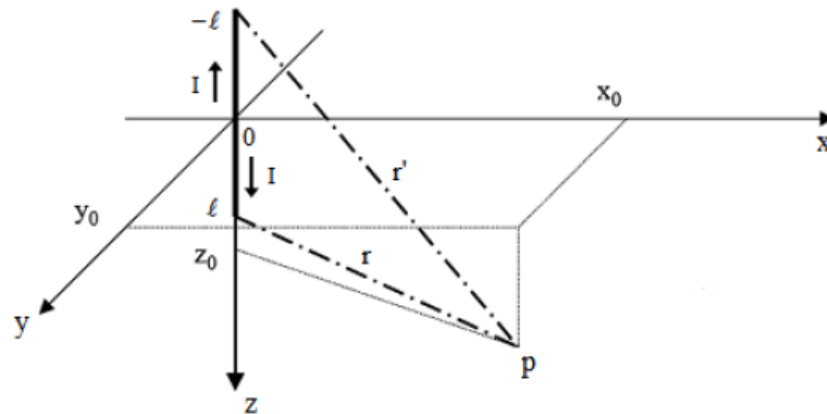
Como $I = I'$, pode-se escrever a Equação 4 como:

$$V_a = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right) \quad (5)$$

Este conceito pode ser aplicado a uma haste vertical sob o solo posicionada ao longo do eixo z , nesta modelagem será considerado comprimento 1 para facilitar os cálculos. Sendo os parâmetros concentrados, a corrente que deixa o eletrodo e se dissipa no solo é a mesma em qualquer posição. Assim, para calcular o potencial em um ponto p qualquer em relação ao terra remoto, cada um dos segmentos de comprimento Δz do eletrodo corresponde a uma fonte de corrente e tem influência neste ponto (superposição).

Por fim, observa-se que considerando a interface solo-ar (superfície do solo) como estando na posição $z = 0$ e o eletrodo de aterramento no sentido positivo do eixo, z^+ , sua imagem é, consequentemente, no sentido negativo, z^- , como ilustra a figura 8.

Figura 8 - Haste de aterramento e sua imagem ao longo do eixo z .



Fonte: Lima (2010).

Como a corrente transversal que deixa o eletrodo é a mesma qualquer que seja o ponto considerado ao longo de sua extensão, as correntes elementares são definidas por $I/1$. Assim, o potencial no ponto p pode ser calculado pela seguinte Equação 6.

$$V_p = \int_0^1 \frac{\rho I}{4\pi 1} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right) dz \quad (6)$$

Onde, $r = (0 - x_0)^2 + (0 - y_0)^2 + (0 - z_0)^2$ e $r' = (0 - x_0)^2 + (0 - y_0)^2 + (0 - z_0)^2$.

Considerando $b^2 = x_0^2 + y_0^2$, tem-se que:

$$V_p = \frac{\rho I}{4\pi 1} \int_0^1 \left(\frac{1}{\sqrt{b^2 + ((z - z_0))^2}} + \frac{1}{\sqrt{b^2 + ((z + z_0))^2}} \right) dz \quad (7)$$

Após a integração que é tabelada chega-se a seguinte expressão:

$$V_{(p)} = \frac{\rho I}{4\pi 1} \left(\sinh^{-1} \left(\frac{1 - z_0}{b} \right) + \sinh^{-1} \left(\frac{1 + z_0}{b} \right) \right) \quad (8)$$

Onde, o primeiro termo entre parênteses corresponde à contribuição da haste real e o segundo termo corresponde à contribuição da haste imagem.

A resistência paralela total (condutância) é definida pela relação entre o potencial médio na superfície do eletrodo e a corrente total aplicada. Como a distância entre a superfície do eletrodo e o seu eixo central corresponde ao seu raio, faz-se $b = r$ e integra-se z_0 de 0 à 1, sendo obtida a Equação 9 para o potencial médio.

$$V_m = \frac{1}{1} \int_0^1 V_{(p)} dz_0 \quad (9)$$

Após a integração e simplificação, se obtém a Equação 10.

$$V_m = \frac{\rho l}{2\pi 1} \left(\sinh^{-1} \left(\frac{2l}{r} \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2l} \right)^2} + \frac{r}{2l} \right) \quad (10)$$

Finalmente, como $\sinh^{-1}(x) = \ln(x + \sqrt{x^2 + 1})$, fazendo a substituição na equação acima, tem-se que:

$$V_m = \frac{\rho l}{2\pi 1} \left(\ln \left(\frac{2l}{r} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2l} \right)^2} \right) \right) - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2l} \right)^2} + \frac{r}{2l} \right) \quad (11)$$

A Equação 11 pode ainda ser simplificada nos casos em que o comprimento do eletrodo é muito maior que o raio, resultando na Equação 12.

$$R = \frac{\rho}{2\pi 1} \left(\ln \left(\frac{4l}{r} \right) - 1 \right) \quad (12)$$

4 TRATAMENTO QUÍMICO DO SOLO E METODOLOGIA

O tratamento químico do solo visa à diminuição da resistência de terra de um sistema que já está fisicamente definido e instalado.

É importante que os materiais a serem utilizados possuam boa higroscopia, sejam não lixiviáveis, não corrosivos, tenham baixa resistividade elétrica, sejam quimicamente estáveis no solo, não sejam tóxicos e não causem danos a natureza.

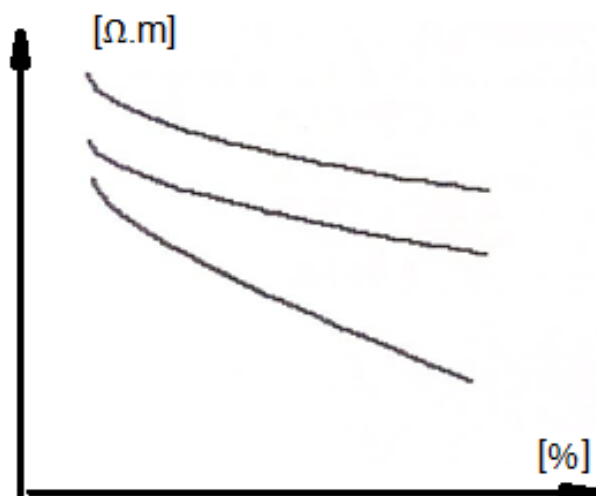
Há diversos tipos de tratamento químico do solo, porém neste trabalho será discutido o método convencional – carvão e sal – e cristais absorventes.

4.1 SISTEMAS DE UMA HASTE COM TRATAMENTO CONVENCIONAL – CARVÃO E SAL

É comum o emprego de cloreto de sódio e carvão mineral em um aterramento para diminuir sua resistividade. Nesse tratamento, é importante que os mesmos não entrem em contato direto com os eletrodos para evitar a corrosão.

A quantidade de sais presente no solo influencia muito na resistividade, uma vez que a resistividade da água pura é quase infinita, ou seja, um isolante perfeito. Devido à ionização, permite a condução de corrente elétrica.

Gráfico 4 - Variação da resistividade da água com a concentração de sais.



Fonte: Leite; Pereira Filho (1996).

4.2 SISTEMAS DE UMA HASTE COM CRISTAIS ABSORVENTES

O cristal é constituído de uma mistura de diversos tipos sais que, em presença da água, formam o agente ativo do tratamento. Suas propriedades são: quimicamente estáveis, não solúveis em água, higroscópico, não corrosivo, não atacado por ácidos contidos no solo e seu efeito são de longa duração.

Para esse experimento foi feito o uso de cristais absorventes de líquido colocados em contato com o solo ao redor da haste aterrada, também chamado de *crystal ice*.

O mesmo é revestido por uma membrana semipermeável que, quando mergulhados em solução líquida, retêm água chegando ao seu volume máximo (FANTINI, 2009) como é mostrado na Figura 9.

Quando as esferas hidratadas são colocadas ao redor da haste sobre o solo, perdem líquido para o local pelo processo de osmose. Com isto tem-se a alteração na umidade da terra circunvizinha do eletrodo, um parâmetro que influencia na resistividade.

Figura 9 - Cristal Ice.



Fonte: Fantini (2009).

4.3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desse trabalho utilizou-se o método das imagens para o cálculo da resistividade contendo a informação da resistência de terra obtida pelo Terrômetro.

Esse importante instrumento, mostrado na Figura 10, realiza a medição direta da resistência de aterramento e é a técnica mais adequada e utilizada. O

método da queda de potencial - MQP - consiste na aplicação de uma corrente no sistema de aterramento no eletrodo de teste (T). Assim, faz-se circular uma corrente através do eletrodo (C) pela haste auxiliar exibida na Figura 11. Devido à passagem desta corrente, surge uma queda de tensão (potenciais na superfície do solo). Estes potenciais são medidos através dos eletrodos (P) por meio de outra haste auxiliar.

Figura 10 - Terrômetro fornecido pela universidade.



Fonte: Autoria própria.

Figura 11- Haste auxiliar

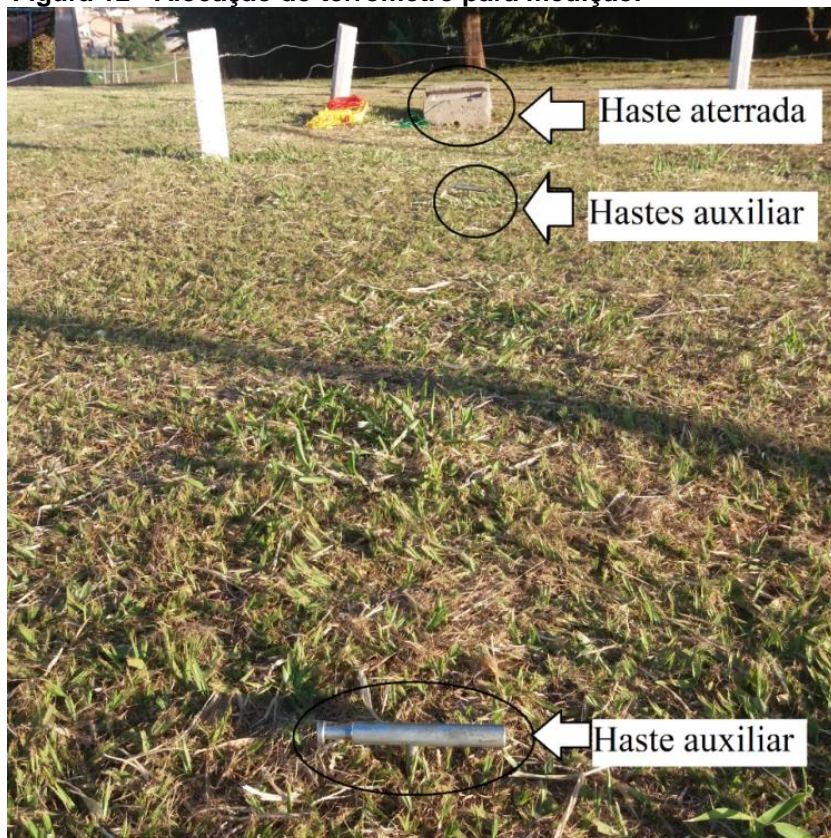


Fonte: Autoria própria.

As hastes estão dispostas como mostra as Figuras 12 e 13.

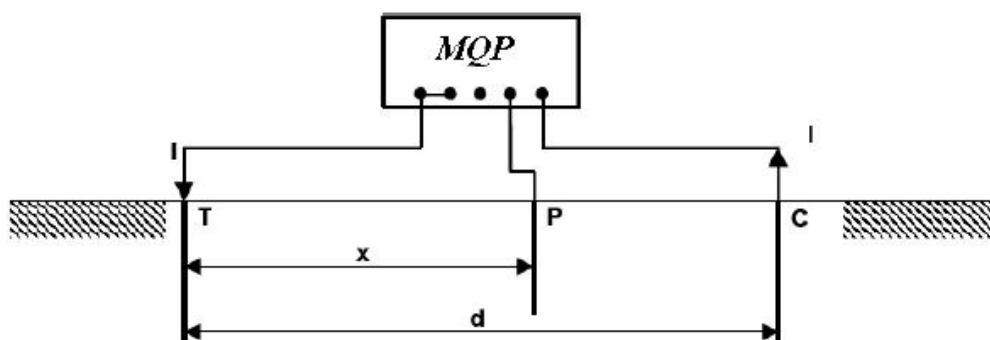
Com a variação da distância (x) entre os eletrodos P e T, tem-se a medição da resistência em cada ponto escolhido. O gráfico 5 exemplifica como é obtida essa distancia.

Figura 12 - Alocação do terrômetro para medição.



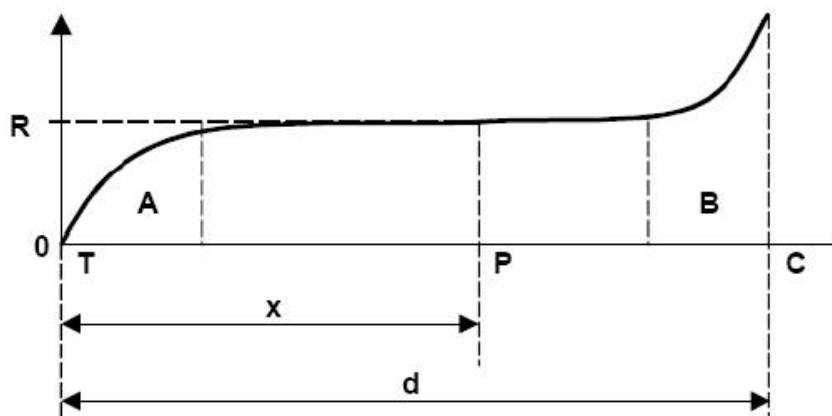
Fonte: Autoria própria.

Figura 13 - Método de medição da resistência de aterramento.



Fonte: Arend (2009).

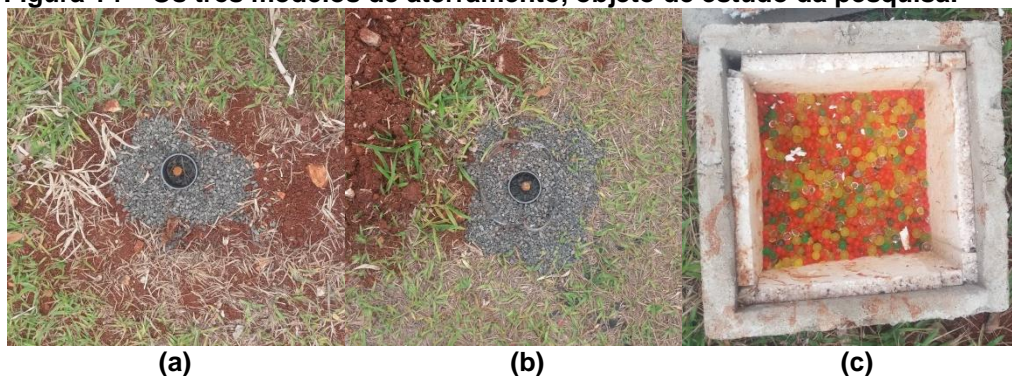
Gráfico 5 - Resistência de aterramento pelo método da queda de potencial.



Fonte: Arend (2009).

Na região A o potencial é crescente, pois 90% da resistência de aterramento que envolve um eletrodo nele enterrado se encontra geralmente dentro de um raio de 1,8 a 3,5 metros. Entre A e B é considerada a região patamar de potencial, ou seja, a área de condução é muito ampla e a densidade de corrente tende a ser mínima, havendo assim, uma queda de tensão desprezível. Portanto, caso a curva de potencial não tenha a porção horizontal, significa que o aterramento auxiliar P está muito próximo do aterramento de medição. Em relação à região B, conforme o eletrodo auxiliar P começa a se aproximar do eletrodo C, ocorre uma diminuição de área de condução forçando a passagem de uma corrente. Consequentemente se a área tende a diminuir, a resistência aumenta com esta proximidade, ocorrendo assim, uma curva também crescente na região B.

Figura 14 – Os três modelos de aterramento, objeto de estudo da pesquisa.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 14, é possível ilustrar (a) o sistema de uma haste cravada ao solo sem tratamento químico, (b) o sistema de uma haste aterrada no solo contendo carvão e sal e (c) o sistema de uma haste com cristais absorventes.

Durante os meses de agosto, setembro e outubro foram aferidas as resistências de aterramento e realizadas as análises que serão descritas na próxima seção.

5 MEDIÇÃO E RESULTADOS

Para construção do gráfico comparativo – ferramenta utilizada neste trabalho para evidenciar os resultados – será obtido o valor da resistividade utilizando a Equação 1.

A dimensão das hastes utilizadas para o cálculo de cada tipo de aterramento é mostrada na tabela a seguir.

Tabela 5 - Dimensão das hastes.

Sistema de aterramento	Dimensão
Sistema de uma haste sem tratamento químico	Hastes 1 C=2,40m D=5/8"
Sistema de uma haste com carvão e sal	Haste 2 C=60cm D=3/4"
Sistema de uma haste com cristais absorventes	Hastes 3 C=2,40m D=5/8"

Fonte: Autoria própria.

As Tabelas 6 e 7 se encontram nos Apêndices A e B, contêm as amostras coletadas nos meses de Agosto, Setembro e Outubro.

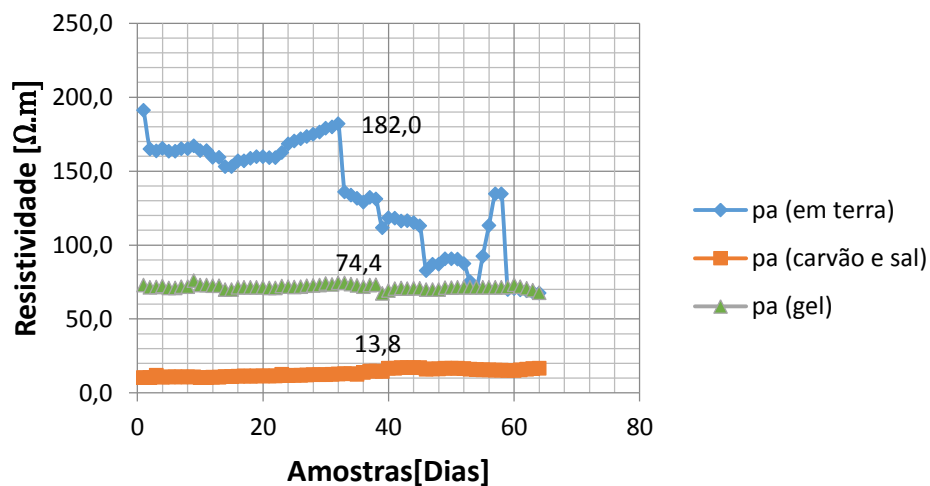
As mesmas também apresentam os valores médios, desvio padrão, valores máximos e mínimos de cada sistema. Estes valores serão explanados no desenvolvimento da dissertação.

Na Tabela 6, há informação da data, horário, resistência de terra aferida e cálculo da resistividade. Já o segundo apêndice contém as informação de temperatura, umidade, pH e clima do dia em que foi colhida a amostra.

Para melhor exibir o resultado do experimento, foram construídos gráficos no *software* Microsoft Office Excel onde é realizado o estudo do comportamento da resistividade ao longo do tempo.

O Gráfico 6, apresenta as três curvas com o comportamento da resistividade ao longo dos dias amostrados. Este mesmo gráfico se encontra em tamanho maior no apêndice C.

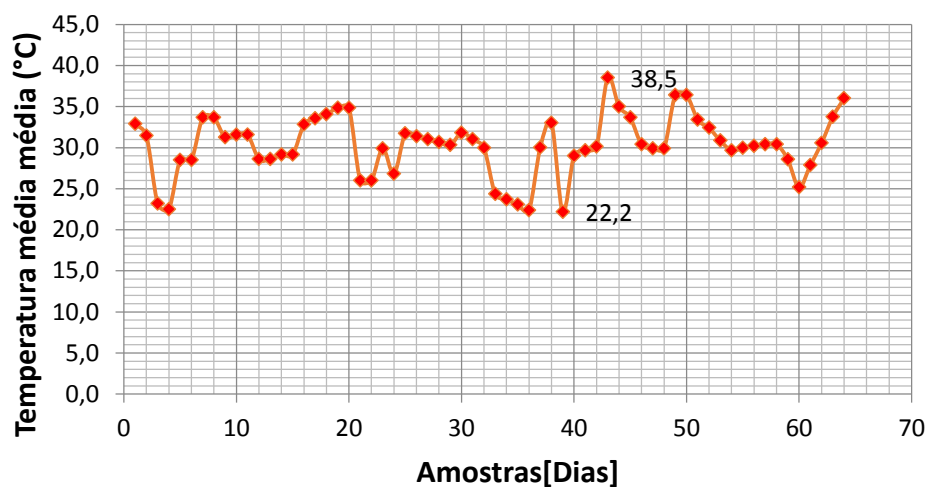
Gráfico 6 - Comportamento da resistividade ao longo dos dias amostrados.



Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 7 exibe a variação da temperatura média nos dias amostrados.

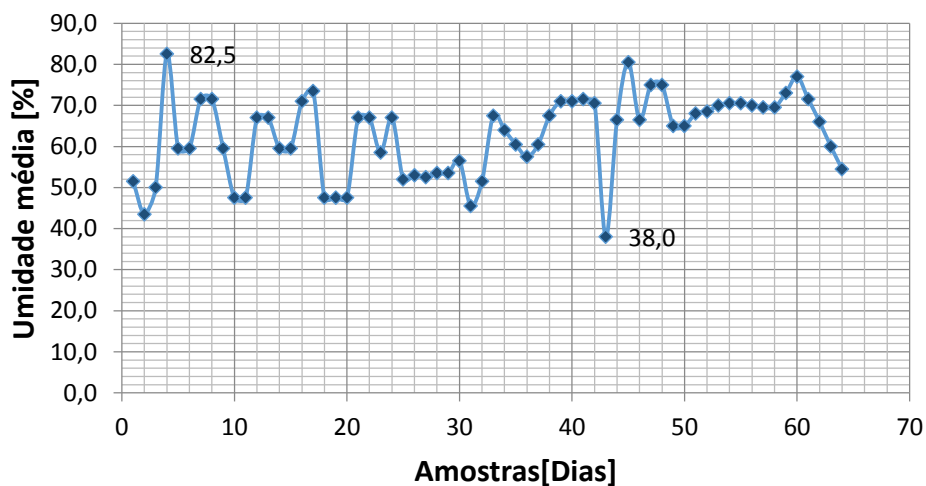
Gráfico 7 - Temperatura média durante os dias amostrados.



Fonte: Autoria própria.

A temperatura média nos dias amostrados foi de 30,27°C com desvio padrão de 3,63.

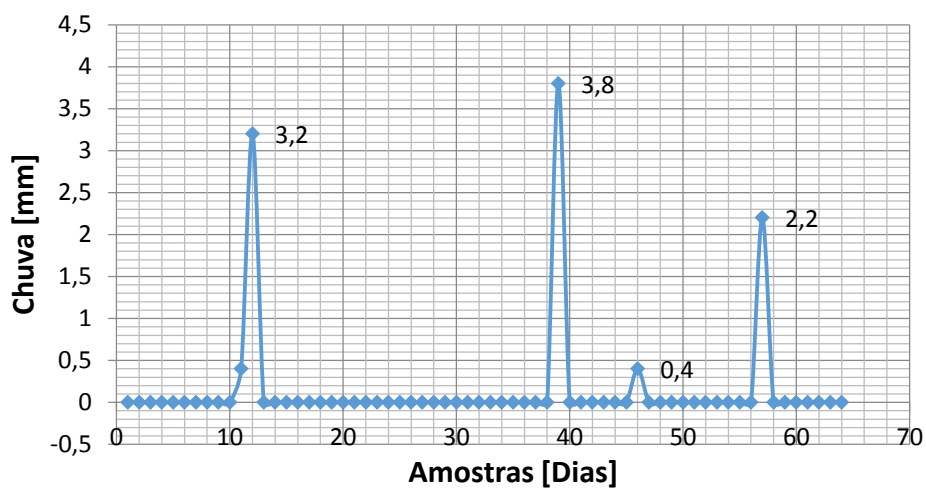
O Gráfico 8 mostra a variação da umidade durante o período de medição.

Gráfico 8 - Umidade média nos dias amostrados.

Fonte: Autoria própria.

A umidade média nos dias amostrados foi de 62,70% com desvio padrão de 9,87%.

O Gráfico 9 mostra a quantidade de chuvas, em milímetros, durante o período de medição.

Gráfico 9 - Chuva nos dias amostrados.

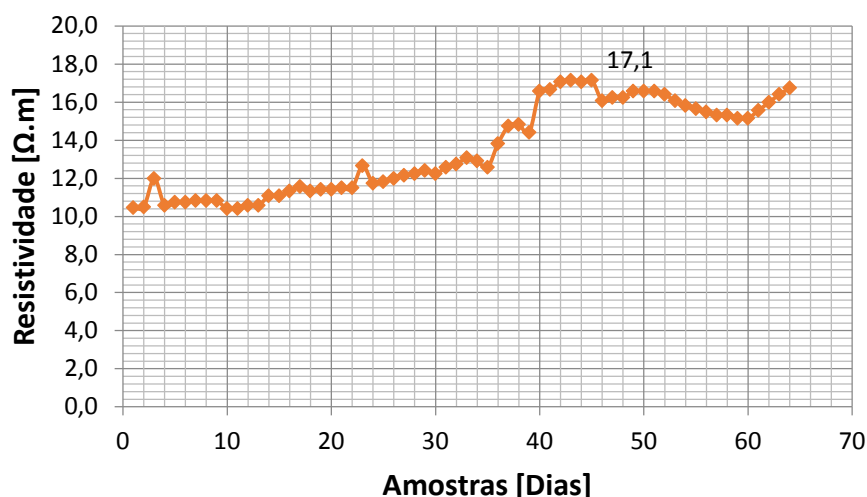
Fonte: Autoria própria.

Pode-se perceber que a resistividade do sistema de carvão e sal é a menor entre os três modelos analisados. Contudo, ainda que de grande uso entre alguns profissionais, não apresenta efeitos esperados, principalmente

pela curta duração de sua eficiência e também pela agressão corrosiva atuante nos eletrodos de terra (MAMEDE FILHO, 2006).

Analisando as amostras do tratamento químico utilizando carvão e sal mais especificamente, como mostra o Gráfico 10, o mesmo se encontra em tamanho maior no Apêndice C, pode-se notar que há um aumento progressivo do seu valor, não há estabilidade.

Gráfico 10 - Tratamento químico utilizando carvão e sal.



Fonte: Autoria própria.

Segundo Visacro Filho (2002) essa prática pode ser muito eficiente para aterramentos de pequena dimensão, apesar da redução da resistividade ser eficaz apenas nas proximidades dos eletrodos. É justamente esta porção do solo que é responsável pela maior parcela da resistência de aterramento.

Reduções superiores a 50% do valor da resistência de aterramento podem ser obtidas, se a dimensão do sistema é muito pequena (por exemplo, umas poucas hastes). Entretanto, no caso de aterramentos extensos, como é o caso de malhas de subestações, raramente se alcança a redução superior a 15% no valor da resistência com o tratamento químico (VISACRO FILHO, 2002).

O sistema de uma haste que não foi aplicado tratamento algum teve uma diminuição progressiva da resistividade, isso se dá ao fato da sua proximidade com a haste onde foi aplicado o tratamento de carvão e sal. Logo, com a chuva e umidade locais, os efeitos da haste tratada acabaram se ramificando para a haste próxima e causando o efeito indesejado.

A haste tratada com cristais absorventes estava localizada longe dos outros dois sistemas. Com isto, pode-se afirmar que o uso dos cristais retentores de líquido hidratados frequentemente, atuou na umidade do solo local, diminuindo a resistência de terra.

Contudo, comparando com o sistema de carvão e sal, este teve maior estabilidade nos valores aferidos, visto que a diferença do valor final para o inicial foi de apenas 12% e do sistema de carvão e sal 64%, mesmo os cristais absorventes possuindo um alto valor médio de resistividade em relação ao carvão e sal.

O valor médio da resistividade na haste sem tratamento é de 113,86 $\Omega.m$, sendo o da haste de carvão e sal 13,52 $\Omega.m$ e da haste tratada com cristais absorventes 71,65 $\Omega.m$, este teve uma diminuição de 37%, mínima comparada ao tratamento com carvão e sal que reduziu 88%.

Apesar do tratamento utilizando carvão e sal ter diminuído consideravelmente a resistividade do solo média, a ação corrosiva e o aumento progressivo da resistividade contribuíram para que o sistema utilizando cristais absorvente fosse mais vantajoso.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a elaboração do projeto e com base nos valores medidos, foi feita uma análise comparativa dos três modelos verificando qual método trouxe maior viabilidade técnica.

Comparando a haste em condições normais com os outros dois modelos de tratamentos químicos, pode-se notar que as duas hastes tratadas possuem mais eficiência na diminuição da resistência de terra de acordo com os índices dispostos nos resultados.

Também foi possível constatar claramente que os usos dos cristais retentores de líquido hidratados frequentemente atuaram na umidade do solo local diminuindo a resistência de terra. Conclui-se que é um método vantajoso para locais de clima secos e quentes. Não houve danificações, alteração de cor ou formação de outras substâncias (visíveis a olho nu). Este tratamento apresentou uma curva característica com maior estabilidade ao longo do tempo.

Contudo, o tratamento efetuado com carvão e sal resultou em uma diminuição na resistividade aparente do solo considerável, apesar dos pontos negativos descritos no capítulo de medição e resultados.

Dos fatores climáticos observados, os que tiveram maior influência foram as ocorrências de chuvas e as variações de temperaturas, que implicaram diretamente, não por sua quantidade local (em um dia), mas pela ocorrência após dias consecutivos. Isso ocorreu na forma de uma sequência de dias chuvosos, acompanhados de altas temperaturas e umidade do ar elevada, resultando em índices de resistividade e resistência de terra menor. Nos períodos de dias quentes e secos, associados à baixa umidade do ar, as resistências e resistividades foram elevadas.

Notou-se que o aterramento sem tratamento também sofreu alterações devido aos eventos climáticos. Contudo, devido a sua proximidade com a haste tratada resultou em uma diminuição linear na resistividade ao longo do tempo.

Portanto, considerando todos os desvios amostrais e fatores externos, o tratamento químico utilizando cristais absorventes se tornou o mais vantajoso método experimentado.

Para os trabalhos futuros, propõe-se adotar uma distância maior entre as hastes amostradas e, para facilitar a obtenção dos dados, pode-se adotar uma técnica automática de obtenção diária e armazenamento dos dados.

REFERÊNCIAS

AREND, Emílio Rodolfo. **Estudo de aterramento em baixas frequências usando a formulação eletrocinética associada ao método de elementos finitos**. 2009. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

EMBRAPA. (Org.). **Os solos do Brasil**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros/solos-do-brasil>>. Acesso em: 18 mar. 2019.

FANTINI, Leandro. **Cristais de água (Osmose)**. Disponível em: <<http://pontociencia.org.br/experimentos/visualizar/cristais-de-agua-osmose/187>>. Acesso em: 11 fev. 2009.

KINDERMANN, Geraldo; CAMPAGNOLO, José Mario. **Aterramento Elétrico**. 4. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 2011. 214 p.

LIMA, Alexander Barros. **Método para cálculo de impedância de malhas de aterramento de torres de linha de transmissão**. 2010. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

LEITE, Carlos Moreira; PEREIRA FILHO, Mario Leite. **Técnicas de Aterramento: Cálculos, Projetos e Softwares para Aterramentos Elétricos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Mydia, 1996. 215 p.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2006. 932 p.

MODENA, Jobson; SUETA, Hélio. Medição da resistividade do solo. **O Setor Elétrico**, [s.i], p.30-35, nov. 2011. Mensal.

SPOZITO JUNIOR, José Saverio. **Sistema de aterramento com cabo contrapeso representado por linhas de transmissão implementado em matlab com circuitos em cascata de π** . 2012. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia – Unesp, Ilha Solteira, 2012.

VISACRO FILHO, Silvério. **Aterramentos Elétricos: Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento**. São Paulo: Artiber, 2002. 159 p.

**APÊNDICE A – AMOSTRAS DOS DADOS COLETADOS DAS
RESISTÊNCIAS DE TERRA**

Tabela 6 - Medições da resistência de terra e cálculo da resistividade.

Amostra	Data	Hora	Em terra		Carvão e sal		Gel	
			pa	R(Ω)	Pa	R(Ω)	pa	R(Ω)
1	13/ago	14:30	191,2	77,3	10,4	12,6	73,0	29,5
2	14/ago	16:00	164,9	66,7	10,5	12,6	71,5	28,9
3	15/ago	16:00	163,7	66,2	12,0	14,4	71,7	29,0
4	16/ago	14:10	165,4	66,9	10,6	12,7	72,2	29,2
5	17/ago	14:05	163,5	66,1	10,7	12,9	71,0	28,7
6	18/ago	14:05	163,5	66,1	10,7	12,9	71,0	28,7
7	19/ago	16:00	165,2	66,8	10,8	13,0	72,0	29,1
8	20/ago	16:00	165,2	66,8	10,8	13,0	72,0	29,1
9	21/ago	16:00	167,2	67,6	10,8	13,0	75,9	30,7
10	22/ago	15:00	164,0	66,3	10,4	12,5	73,0	29,5
11	23/ago	15:00	164,0	66,3	10,4	12,5	73,0	29,5
12	24/ago	14:25	159,3	64,4	10,6	12,7	72,5	29,3
13	25/ago	14:25	159,3	64,4	10,6	12,7	72,5	29,3
14	26/ago	16:00	153,1	61,9	11,1	13,3	70,0	28,3
15	27/ago	16:00	153,1	61,9	11,1	13,3	70,0	28,3
16	28/ago	15:30	157,0	63,5	11,3	13,6	71,5	28,9
17	29/ago	14:00	157,0	63,5	11,6	13,9	71,5	28,9
18	30/ago	14:55	158,8	64,2	11,3	13,6	71,5	28,9
19	31/ago	16:20	159,8	64,6	11,4	13,7	71,5	28,9
20	01/set	16:20	159,8	64,6	11,4	13,7	71,5	28,9
21	02/set	14:30	159,0	64,3	11,5	13,8	71,0	28,7
22	03/set	14:30	159,0	64,3	11,5	13,8	71,0	28,7
23	04/set	15:40	162,5	65,7	12,7	15,2	72,2	29,2
24	05/set	14:10	168,4	68,1	11,7	14,1	72,0	29,1
25	06/set	14:15	170,4	68,9	11,8	14,2	71,7	29,0
26	07/set	16:00	171,9	69,5	12,0	14,4	72,0	29,1
27	08/set	16:00	173,4	70,1	12,2	14,6	72,5	29,3
28	09/set	16:00	174,8	70,7	12,2	14,7	72,7	29,4
29	10/set	14:15	176,3	71,3	12,4	14,9	73,0	29,5
30	11/set	15:40	179,0	72,4	12,2	14,7	73,9	29,9
31	12/set	16:00	179,8	72,7	12,6	15,1	73,4	29,7
32	13/set	16:00	182,0	73,6	12,7	15,3	74,4	30,1
33	14/set	16:25	136,0	55,0	13,1	15,7	74,4	30,1
34	15/set	16:00	133,8	54,1	12,9	15,5	73,7	29,8
35	16/set	16:00	131,6	53,2	12,6	15,1	72,7	29,4
36	17/set	14:15	129,1	52,2	13,8	16,6	72,0	29,1
37	18/set	14:00	132,3	53,5	14,7	17,7	73,0	29,5
38	19/set	15:45	131,1	53,0	14,8	17,8	73,2	29,6
39	20/set	17:30	111,8	45,2	14,4	17,3	67,3	27,2
40	21/set	14:15	118,5	47,9	16,6	19,9	69,2	28,0
41	22/set	15:00	118,2	47,8	16,6	20,0	70,5	28,5
42	23/set	15:00	116,2	47,0	17,1	20,5	71,0	28,7

43	24/set	14:10	116,5	47,1	17,1	20,6	70,5	28,5
44	25/set	14:20	115,2	46,6	17,1	20,5	70,7	28,6
45	26/set	16:00	113,0	45,7	17,1	20,6	70,7	28,6
46	27/set	15:20	82,6	33,4	16,1	19,3	70,0	28,3
47	28/set	16:00	87,0	35,2	16,2	19,5	70,0	28,3
48	29/set	15:00	87,0	35,2	16,2	19,5	70,0	28,3
49	30/set	15:10	90,8	36,7	16,6	19,9	71,2	28,8
50	01/out	16:00	90,8	36,7	16,6	19,9	71,2	28,8
51	02/out	15:35	90,5	36,6	16,6	19,9	71,5	28,9
52	03/out	16:00	87,5	35,4	16,4	19,7	71,5	28,9
53	04/out	15:20	75,4	30,5	16,1	19,3	71,5	28,9
54	05/out	14:20	71,2	28,8	15,8	19,0	71,5	28,9
55	06/out	15:30	92,5	37,4	15,6	18,8	71,5	28,9
56	07/out	16:10	113,3	45,8	15,5	18,6	71,5	28,9
57	08/out	14:20	134,5	54,4	15,3	18,4	71,5	28,9
58	09/out	14:35	134,5	54,4	15,3	18,4	71,5	28,9
59	10/out	15:10	70,0	28,3	15,2	18,2	71,7	29,0
60	11/out	15:18	70,5	28,5	15,2	18,2	73,2	29,6
61	12/out	16:00	69,7	28,2	15,6	18,7	72,0	29,1
62	13/out	14:00	69,0	27,9	16,0	19,2	70,7	28,6
63	14/out	15:00	68,3	27,6	16,4	19,7	69,5	28,1
64	15/out	14:40	67,5	27,3	16,7	20,1	67,8	27,4
Média			133,9	54,1	13,5	16,2	71,7	29,0
Desvio padrão			37,2	15,0	2,4	2,9	1,5	0,6
Valor mínimo			67,5	27,3	10,4	12,5	67,3	27,2
Valor máximo			191,2	77,3	17,1	20,6	75,9	30,7

Fonte: Autoria própria.

**APÊNDICE B – AMOSTRAS DOS DADOS COLETADOS DE
TEMPERATURA, UMIDADE, PH E CLIMA**

Tabela 7 - Medições dos valores de temperatura, umidade, pH e clima.

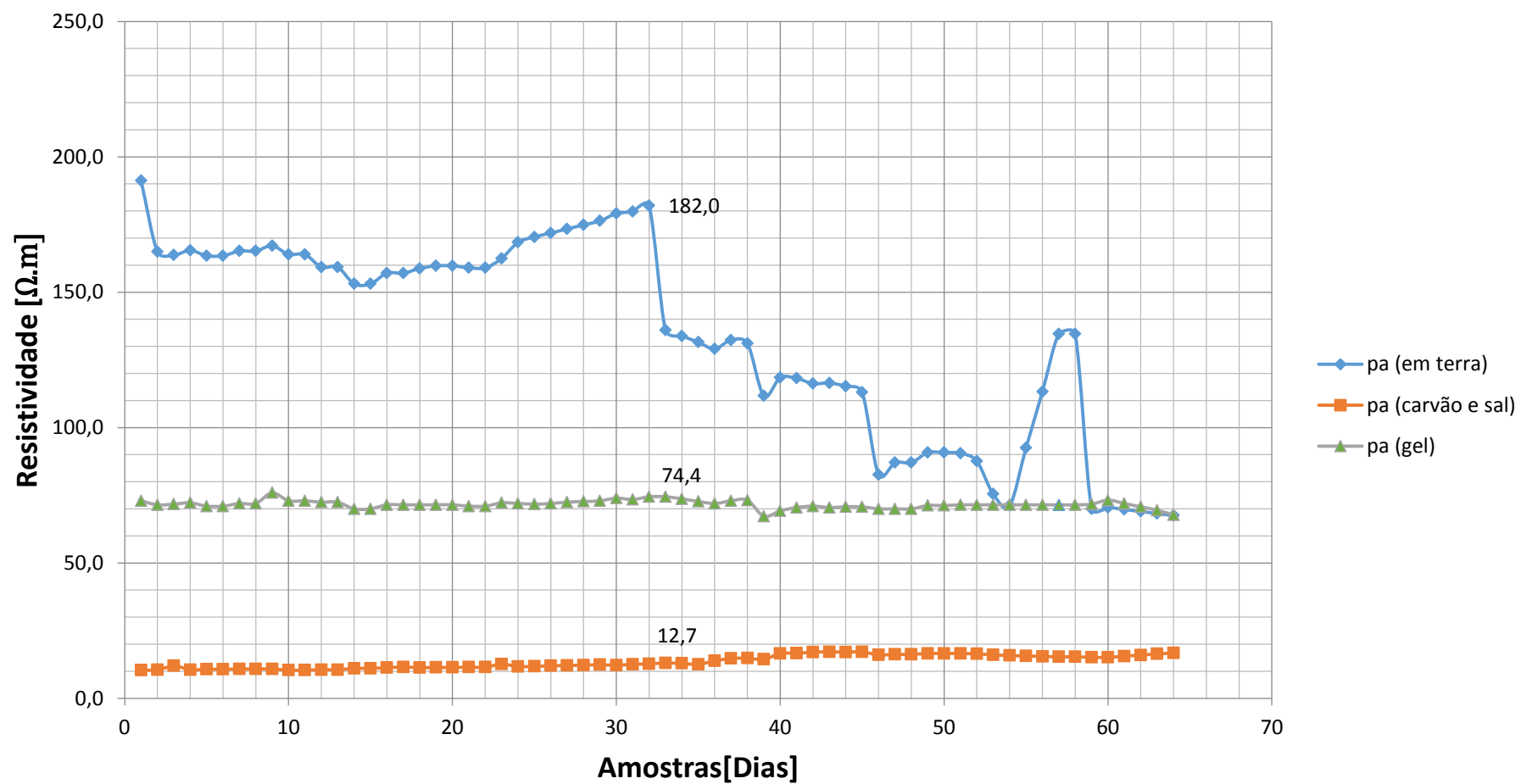
Amostra	T (°C) Min	T (°C) máx	T (°C) méd	U (%) min	U (%) máx	U (%) méd	pH	Clima
1	32,9	32,9	32,9	47,0	56,0	51,5	6,5	sol
2	27,3	35,6	31,5	36,0	51,0	43,5	6,5	sol
3	22,5	23,9	23,2	44,0	56,0	50,0	5,5	nublado
4	21,4	23,6	22,5	82,0	83,0	82,5	7,0	nublado
5	20,8	36,2	28,5	55,0	64,0	59,5	4,0	sol
6	20,8	36,2	28,5	55,0	64,0	59,5	4,0	sol
7	26,5	40,8	33,7	50,0	93,0	71,5	5,0	sol
8	26,5	40,8	33,7	50,0	93,0	71,5	5,0	sol
9	27,3	35,2	31,3	51,0	68,0	59,5	5,0	nublado
10	27,2	35,9	31,6	45,0	50,0	47,5	6,5	chuva
11	27,2	35,9	31,6	45,0	50,0	47,5	6,5	nublado
12	23,8	33,4	28,6	52,0	82,0	67,0	4,0	chuva
13	23,8	33,4	28,6	52,0	82,0	67,0	7,0	nublado
14	24,8	33,5	29,2	49,0	70,0	59,5	4,0	sol
15	24,8	33,5	29,2	49,0	70,0	59,5	6,5	sol
16	25,8	39,8	32,8	60,0	82,0	71,0	5,5	sol
17	27,4	39,7	33,6	69,0	78,0	73,5	7,0	sol
18	26,8	41,3	34,1	28,0	67,0	47,5	5,5	sol
19	30,7	39,0	34,9	67,0	28,0	47,5	5,0	sol
20	30,7	39,0	34,9	67,0	28,0	47,5	5,0	sol
21	18,9	33,1	26,0	57,0	77,0	67,0	5,5	nublado
22	18,9	33,1	26,0	57,0	77,0	67,0	5,5	nublado
23	23,4	36,4	29,9	50,0	67,0	58,5	7,0	sol
24	21,5	32,1	26,8	57,0	77,0	67,0	6,5	sol
25	23,7	39,7	31,7	49,0	55,0	52,0	6,5	sol
26	24,9	37,8	31,4	50,0	56,0	53,0	6,5	sol
27	26,1	35,9	31,0	50,0	55,0	52,5	6,5	sol
28	27,3	34,0	30,7	51,0	56,0	53,5	7,0	sol
29	28,5	32,1	30,3	52,0	55,0	53,5	7,0	sol
30	25,8	37,8	31,8	51,0	62,0	56,5	7,0	sol
31	28,0	34,0	31,0	45,0	46,0	45,5	6,5	sol
32	26,2	33,7	30,0	49,0	54,0	51,5	7,0	nublado
33	21,7	27,0	24,4	59,0	76,0	67,5	6,0	nublado
34	21,4	26,0	23,7	57,0	71,0	64,0	6,0	nublado
35	21,1	25,0	23,1	56,0	65,0	60,5	5,5	nublado
36	20,9	23,8	22,4	55,0	60,0	57,5	5,5	nublado
37	27,0	33,0	30,0	47,0	74,0	60,5	5,0	nublado
38	29,2	36,8	33,0	58,0	77,0	67,5	6,0	nublado
39	20,1	24,2	22,2	66,0	76,0	71,0	5,0	chuva
40	23,2	34,8	29,0	67,0	75,0	71,0	5,5	sol
41	21,1	38,2	29,7	67,0	76,0	71,5	5,5	sol
42	21,3	38,9	30,1	66,0	75,0	70,5	5,5	sol
43	38,0	39,0	38,5	10,0	66,0	38,0	5,5	sol
44	28,8	41,2	35,0	64,0	69,0	66,5	6,5	sol

45	29,4	37,9	33,7	71,0	90,0	80,5	6,0	sol
46	27,3	33,5	30,4	65,0	68,0	66,5	6,0	sol
47	27,0	32,8	29,9	65,0	85,0	75,0	5,5	sol
48	27,0	32,8	29,9	65,0	85,0	75,0	5,5	sol
49	35,1	37,7	36,4	65,0	65,0	65,0	5,5	sol
50	35,1	37,7	36,4	65,0	65,0	65,0	5,5	sol
51	31,4	35,4	33,4	67,0	69,0	68,0	5,5	nublado
52	30,5	34,3	32,4	67,0	70,0	68,5	5,5	nublado
53	28,5	33,2	30,9	68,0	72,0	70,0	5,5	nublado
54	27,8	31,5	29,7	68,0	73,0	70,5	5,5	nublado
55	27,5	32,4	30,0	66,0	75,0	70,5	5,5	nublado
56	27,1	33,3	30,2	64,0	76,0	70,0	6,0	sol
57	26,8	34,0	30,4	61,0	78,0	69,5	6,0	chuva
58	26,8	34,0	30,4	61,0	78,0	69,5	6,0	nublado
59	27,2	29,9	28,6	64,0	82,0	73,0	6,5	nublado
60	24,2	26,1	25,2	69,0	85,0	77,0	6,0	nublado
61	26,2	29,5	27,9	64,0	79,0	71,5	6,0	nublado
62	28,2	32,9	30,6	59,0	73,0	66,0	6,0	nublado
63	30,1	37,4	33,8	54,0	66,0	60,0	5,5	sol
64	32,1	39,9	36,0	50,0	59,0	54,5	5,5	sol

Fonte: Autoria própria.

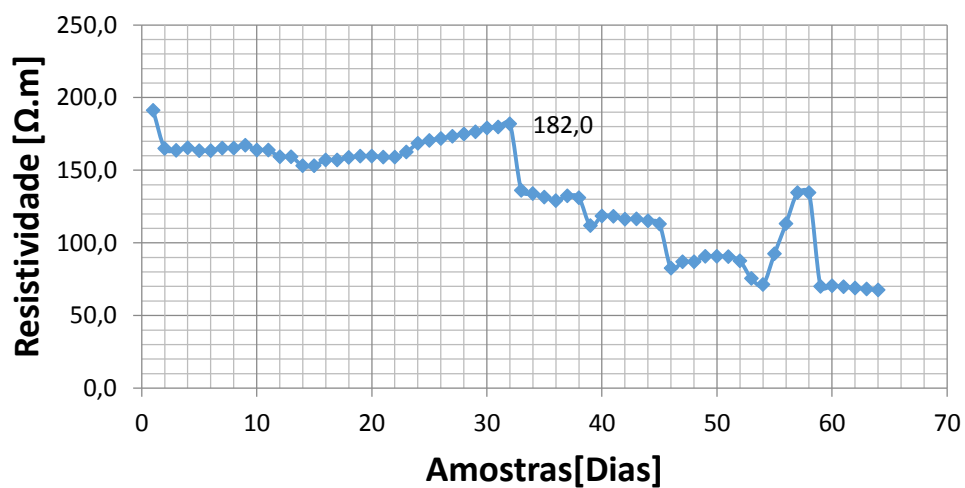
**APÊNDICE C – GRÁFICO PARA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO
DA RESISTIVIDADE**

Gráfico 11- Comportamento da resistividade ao longo dos dias amostrados (em tamanho maior).



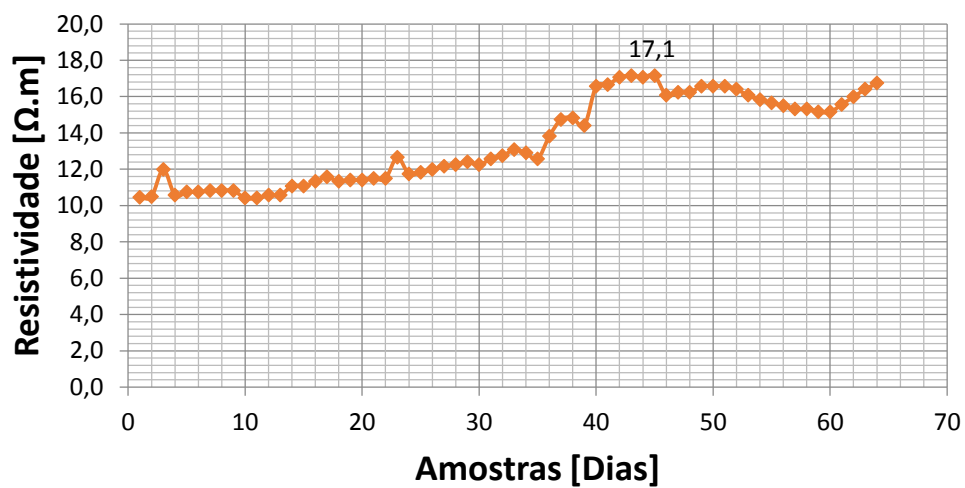
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 12 - Comportamento da resistividade ao longo dos dias amostrados - haste em terra.



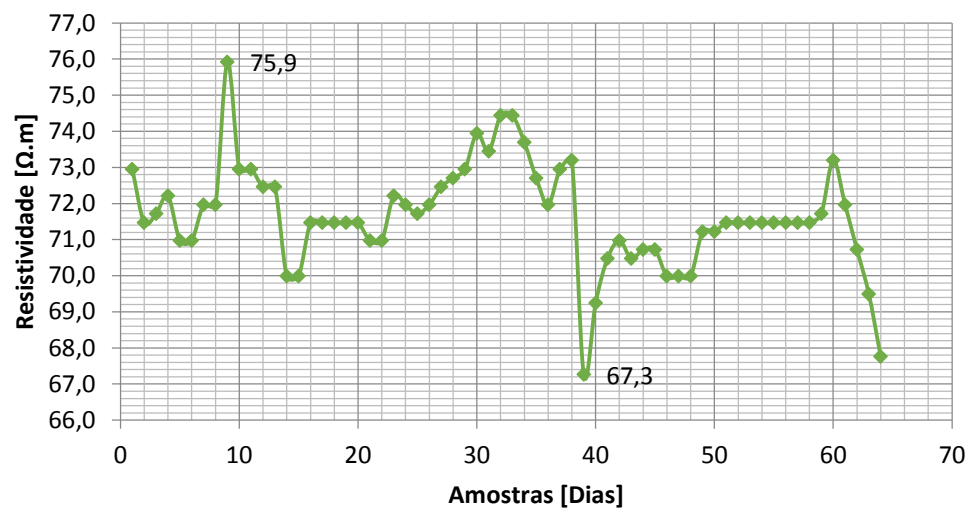
Fonte: Autoria própria.

Gráfico 13 - Comportamento da resistividade ao longo dos dias amostrados - haste com carvão e sal.



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 14 - Comportamento da resistividade ao longo dos dias amostrados - haste com cristais.



Fonte: Autoria própria.