

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ENGENHARIA ELÉTRICA**

VALMIR ASSIS SOUZA DE ÁVILA

**AVALIAÇÃO DO RISCO DE CHOQUE ELÉTRICO EM DESCIDAS DE
ATERRAMENTO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO POR MEIO DA MEDIÇÃO DOS
POTENCIAIS DE TOQUE E PASSO**

BENTO GONÇALVES

2019

VALMIR ASSIS SOUZA DE ÁVILA

**AVALIAÇÃO DO RISCO DE CHOQUE ELÉTRICO EM DESCIDAS DE
ATERRAMENTO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO POR MEIO DA MEDIÇÃO DOS
POTENCIAIS DE TOQUE E PASSO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado na Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. André Bernardes Michel

BENTO GONÇALVES

2019

VALMIR ASSIS SOUZA DE ÁVILA

**AVALIAÇÃO DO RISCO DE CHOQUE ELÉTRICO EM DESCIDAS DE
ATERRAMENTO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO POR MEIO DA MEDIÇÃO DOS
POTENCIAIS DE TOQUE E PASSO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado na Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: ____/____/____

COMISSÃO EXAMINADORA:

Professor Me. André B. Michel (orientador) – UCS

Professor Me. Cesar Augusto Bernardi – UCS

Professor Me. Patric Janner Marques – UCS

AGRADECIMENTOS

Ao estimado professor Me. André Bernardes Michel, pela disponibilidade, paciência durante as orientações e a confiança no trabalho apresentado. Com pequenas palavras motivamos a realização de grandes projetos.

Aos colegas de trabalho pelo incentivo e apoio durante essa caminhada, sempre dispostos a contribuir com o meu desenvolvimento profissional.

Agradeço aos colegas de curso pelo apoio nos momentos difíceis e aos professores pelo profissionalismo e dedicação durante os ensinamentos.

A minha família que sempre acreditaram no meu sucesso, em especial meu filho Lucas que é a minha motivação em conquistar meus objetivos.

Por fim, agradeço a Deus que me permitiu ter saúde e energia para superar meus desafios.

RESUMO

O aterramento elétrico é indispensável em um sistema de distribuição de energia elétrica, tendo como objetivo garantir o desempenho e a segurança da instalação, por isso deve ser confiável e possuir nível de qualidade compatível com a instalação. Na rede aérea de distribuição de energia, o aterramento elétrico exige alguns cuidados que precisam ser observados em relação ao risco de choque elétrico. Por ser basicamente um condutor nu, descendo pelo poste que faz a ligação do neutro da rede a haste de aterramento, ele pode facilmente ser acessado durante uma intervenção na instalação, e no caso de uma energização acidental também causar o choque elétrico. Logo, o objetivo deste trabalho é mostrar como o aterramento se comporta durante a energização do mesmo, qual a possibilidade de permanecer nessa condição, os níveis de tensão que podem surgir e a possibilidade de choque elétrico ao se aproximar, por meio de medição das tensões de passo e toque. Também foram comparados os tipos de instalações existentes que por ventura tenham diferentes desempenhos ao controle do risco de choque elétrico ou até mesmo a sua eliminação. Foram testadas estruturas com postes de madeira, concreto com instalação do aterramento interno e externo ao poste e o novo sistema com poste autoaterrado. Com os resultados foi possível identificar a existência de risco do choque elétrico na descida do aterramento, principalmente no caso de solo úmido, ao comparar os valores medidos com os valores toleráveis pelo corpo humano. Também se identificou que os métodos preventivos adotados atualmente possuem falhas, não sendo totalmente eficiente na identificação do risco. Isso permitiu propor melhorias nos procedimentos de segurança e sugestão de novas propostas de estudo.

Palavras-chave: Aterramento. Choque Elétrico. Tensão de Passo. Tensão de Toque.

ABSTRACT

Electrical grounding is indispensable in an electric power distribution system, aiming to guarantee the good performance and safety of the installation, so it must be reliable and have a level of quality compatible with the installation. In the overhead power distribution network, electrical grounding requires some care that must be observed in relation to the risk of electric shock. Because it is basically a naked conductor coming down the post that connects the neutral to the grounding rod, it can easily be accessed during an intervention in the installation and in the event of an energization also cause the electric shock. Therefore, the objective of this work is to try to understand in detail what happens when a ground is energized, what is the possibility of remaining in that condition, the voltage levels that can arise and the possibility of electric shock when approaching, through the measurement of step and touch voltages. It will also be opportune to compare the types of installations in different structures that may have better performance in controlling the risk of electric shock or even its elimination. The structures under test will be the wooden post, concrete with installation of the internal and external grounding to the post and the new system with self-grounded post. With the results, it was possible to identify the risk of electric shock in the descent of grounding, especially in the case of humid soil, when comparing the measured values with the values tolerable by the human body. It was also identified that the preventive methods adopted currently have flaws, and are not totally efficient in identifying the risk. This allowed to propose improvements in the security procedures and suggestion of new study proposals.

Keywords: Grounding. Electric shock. Step voltage. Touch voltage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Acidentes por choque elétrico fatal no Brasil – por região 2017.....	15
Figura 2 – Acidentes fatais por profissão geral ano de 2017.....	15
Figura 3 – Sistema trifásico a quatro fios com neutro contínuo e multiaterrado	19
Figura 4 – Sistema trifásico a três fios sem neutro contínuo	19
Figura 5 – Neutro secundário contínuo	20
Figura 6 – Neutro secundário descontínuo.....	21
Figura 7 – Sistema monofilar com retorno por terra	21
Figura 8 – Aterramento simples com 1 haste de terra.....	23
Figura 9 – Aterramento simples com 3 haste de terra em linha	23
Figura 10 – Proteção da descida do aterramento com condutor externo ao poste ...	24
Figura 11 – Poste autoaterrado e posicionamento dos terminais de aterramento ...	25
Figura 12 – Rede aérea de distribuição com tensão primária e secundária.....	27
Figura 13 – Exemplo de choque dinâmico	29
Figura 14 – Demonstração de um indivíduo submetido a uma tensão de toque.....	30
Figura 15 – Demonstração de um indivíduo submetido a uma tensão de passo	31
Figura 16 – Varetas para medição de tensão.....	33
Figura 17 – Teste de ausência de tensão em descida de aterramento em poste com transformador MRT	34
Figura 18 – Instalações do Centro de Treinamento RGE em Caxias do Sul.....	36
Figura 19 – Modelos de estruturas onde será realizado ensaio	38
Figura 20 – Medição de potencial de toque pelo método 1	40
Figura 21 – Medição de potencial de passo pelo método 1	41
Figura 22 – Medição de tensão para encontrar a resistência de contato	42
Figura 23 – Medição de potencial de toque pelo método 2.....	44
Figura 24 – Medição de potencial de passo pelo método 2	45
Figura 25 – Conceito de tensão de toque.....	46
Figura 26 – Conceito de tensão de passo	47
Figura 27 – Marcação dos pontos de medição no entorno da estrutura	49
Figura 28 – Detalhe do ponto de medição através da sela instalada no poste	50
Figura 29 – Medidas de tensão de toque	51
Figura 30 – Medidas de tensão de passo.....	52
Figura 31 – Modelo de montagem para medição pelo método 2	53

Figura 32 – Limite tolerável para tensão de passo com solo úmido – 6 mA.....	57
Figura 33 – Limite tolerável para tensão de passo com solo seco – 6 mA	58
Figura 34 – Limite tolerável para tensão de toque com solo úmido – 16 mA	59
Figura 35 – Limite tolerável para tensão de toque com solo seco – 9 mA	60
Figura 36 – Limite tolerável para tensão de toque com solo seco – 10,6 mA	60
Figura 37 – Limite tolerável para tensão de toque com solo seco – 16 mA	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consequência do choque elétrico.	28
Tabela 2 – Corrente limite de largar de longa duração (I_{chld}).	46
Tabela 3 – Corrente de curto fase/terra medida na descida do aterramento.	48
Tabela 4 – Tensão de toque e tensão de passo em poste de concreto.	49
Tabela 5 – Tensão de toque e tensão de passo em poste de madeira.	50
Tabela 6 – Tensão de toque e tensão de passo em poste autoaterrado.	51
Tabela 7 – Tensão de toque e passo pelo método 2.	53
Tabela 8 – Comparação percentual entre os dois métodos.	54
Tabela 9 – Tensão de toque e passo para resistência de contato pé/solo.	55
Tabela 10 – Limites de potencial de toque e passo aceitáveis.	56
Tabela 11 – Resistência de aterramento das estruturas em teste.	62

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRADEE	Associação Brasileira das Distribuidores de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
BWG	<i>Birmingham Wire Gauge</i>
CA	Corrente Alternada
CPFL	Companhia Paulista Força e Luz
ENERSUL	Empresa Energética de Mato Grosso do Sul
EPC	Equipamento de Proteção Individual
EPI	Equipamento de Proteção Coletivo
GED	Gerenciador Eletrônico de Documentos
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
MRT	Monofilar com Retorno por Terra
MT	Média Tensão
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
NBR	Norma Brasileira
NR10	Norma Regulamentado número 10
OT	Orientação Técnica
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i>
RGE	Rio Grande Energia
SE	Subestações
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampère
cm ²	Centímetros cuadrados
Hz	Hertz
I	Corrente elétrica
kg	Quilograma
kV	Quilovolt
m	Metro
mA	Miliampère
mm	Milímetros
V	Volts
Ω	Ohm
Ø	Diâmetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVO GERAL.....	16
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.4 RESSALVAS E EXCEÇÕES.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 PADRÃO DE ATERRAMENTO NA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA.....	18
2.2 ATERRAMENTO DO NEUTRO DA REDE SECUNDÁRIA	19
2.2.1 Neutro secundário contínuo.....	20
2.2.2 Neutro secundário descontínuo.....	20
2.2.3 Sistemas monofilares com retorno por terra (MRT).....	21
2.3 SISTEMAS DE HASTES DE ATERRAMENTO.....	22
2.3.1 Aterramento simples com 1 haste de terra	22
2.3.2 Aterramento simples com 3 hastes de terra em linha.....	23
2.3.3 Aterramento com poste autoaterrado	24
2.3.4 Considerações gerais	26
2.4 CHOQUE ELÉTRICO.....	26
2.4.1 Exposição ao choque elétrico.....	27
2.4.2 Tipos de choque elétrico	29
2.5 PROCEDIMENTOS DE SEGURANÇA CONTRA CHOQUE ELÉTRICO.....	31
2.5.1 Regra geral do Manual do Eletricista Padrão RGE.....	32
2.5.2 Tarefa de testar ausência de tensão.....	33
2.5.3 Teste em transformador MRT.....	34
3 METODOLOGIA	35
3.1 REGRAS PARA ALTERAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE TRABALHO	35
3.2 LOCAL DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	36
3.3 SEGURANÇA PARA REALIZAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS	36
3.4 ESTRUTURA PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	37
3.5 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO	38

3.6 ENERGIZAÇÃO DO CONDUTOR DE ATERRAMENTO	38
3.7 MEDIÇÕES	39
3.7.1 Método de medição 1	40
3.7.2 Método de medição 2	43
3.8 POTENCIAIS DE TOQUE E PASSO TOLERÁVEIS E AVALIAÇÃO	45
3.8.1 Corrente de choque de longa duração	45
3.8.2 Máxima tensão de toque permissível pelo corpo	46
3.8.3 Máxima tensão de passo permissível pelo corpo	47
4 RESULTADOS.....	48
4.1 MEDIÇÕES REALIZADAS PELO MÉTODO 1	48
4.1.1 Poste de concreto	49
4.1.2 Poste de madeira.....	50
4.1.3 Poste autoaterrado.....	50
4.1.4 Comparação dos valores do método 1.....	51
4.2 MEDIÇÕES REALIZADAS PELO MÉTODO 2.....	52
4.3 COMPARAÇÕES ENTRE OS MÉTODOS DE MEDIÇÃO	54
4.4 RESISTÊNCIA DE CONTATO DO PÉ COM O SOLO	55
4.5 AVALIAÇÃO DO RISCO DE CHOQUE ELÉTRICO	56
4.5.1 Risco de choque elétrico para tensão de passo.....	56
4.5.2 Risco de choque elétrico para tensão de toque	58
4.6 RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO	61
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo, será apresentado uma descrição geral do trabalho com o contexto referente ao assunto que motivou a pesquisa e os objetivos gerais e específicos do conteúdo.

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

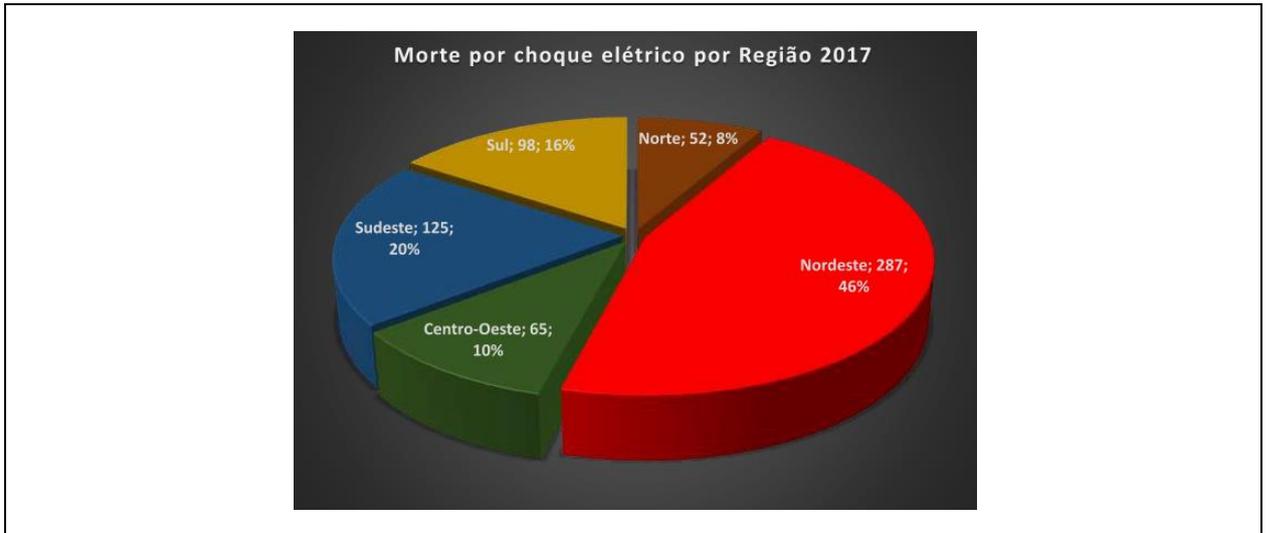
Tratando de um fator principal no sistema elétrico, o quesito aterramento merece atenção especial na especificação do projeto de um sistema de distribuição de energia. A instalação do aterramento atende parâmetros pré-fixados, considerando as possíveis condições que o sistema possa vir a ser submetido. Dentro dessas condições está previsto controlar a tensão em relação à terra dentro de limites permissíveis. Porém, esse aterramento, irá também fornecer um caminho para a circulação de corrente entre condutores vivos do circuito e a terra, produzindo o surgimento de potenciais em locais indesejados (PROCOBRE, 2018).

Quando o sistema de proteção do circuito não for capaz de sensibilizar ou venha a falhar durante o surgimento da corrente de fuga para a terra, não eliminando as tensões, expõe-se então uma situação de risco para quem esteja próximo ou ao contato do ponto de aterramento (NBR 15751, 2009).

O risco de choque elétrico nessa condição está presente, seja por tensão de toque nas partes metálicas expostas do aterramento ou por tensão de passo simplesmente ao se aproximar do eletrodo.

A estatística referente a acidentes de origem elétrica no Brasil é preocupante, números que vem crescendo ano a ano, com um aumento entre 2013 e 2017 que chegou a 33,6%, o desconhecimento dos riscos que a eletricidade oferece é um dos grandes fatores para estes números, mas pode-se afirmar que o descaso com a eletricidade se configura como o maior vilão. (Abracopel, 2018), a Figura 01 apresenta números de acidentes fatais por choque elétrico por região do Brasil.

Figura 01. Acidentes por choque elétrico fatal no Brasil – por região 2017.



Fonte: ABRACOPEL (2018)

Entre esses números destacam-se os acidentes em rede aérea de distribuição, que somam um total de 181 casos fatais no ano de 2017. A grande maioria é de pessoas inadvertidas ou com conhecimento insuficiente para evitar os riscos elétricos, mas uma parcela considerável é de profissionais capacitados, que mesmo com todo o conhecimento adquirido ainda se acidentaram de forma fatal por choque elétrico na rede aérea de distribuição (Abracopel, 2018), conforme os dados do gráfico da Figura 02.

Figura 02. Acidentes fatais por profissão geral ano de 2017.



Fonte: ABRACOPEL (2018)

Esses dados reforçam que para profissionais que interagem diretamente no Sistema Elétrico de Potência (SEP), existe um risco diferenciado de choque elétrico na realização da manutenção das redes, sendo indispensável identificar e avaliar todos os riscos, e assim tomar medidas de eliminação ou controle do mesmo (NR10, 2004).

A verificação dos níveis de potencial encontrados nas descidas de aterramento em rede de distribuição durante uma falha, em diferentes tipos e sistemas aplicados, possibilita determinar se as medidas de segurança, hoje aplicadas nos procedimentos de manutenção em redes de distribuição, são eficazes para mitigar o risco de choque elétrico.

1.2 OBJETIVO GERAL

Esse trabalho tem por objetivo principal avaliar os níveis de potencial no aterramento da rede de distribuição, durante energização acidental, identificando se o risco de choque elétrico está controlado.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para melhor avaliação durante o estudo, será abordada uma sequência de objetivos parciais, que quando finalizados responderão a hipótese levantada no objetivo geral deste trabalho, são eles:

- a) Os tipos de aterramento e tipos de estruturas de redes de distribuição;
- b) Os limites suportáveis de uma pessoa submetida a tensão de toque e tensão de passo.
- c) Medição das tensões de passo e toque nas diferentes estruturas de aterramento de rede de distribuição;
- d) Comparação dos valores medidos de tensão com os limites suportáveis.
- e) Proposta de medidas de segurança que garantam condições aceitáveis reduzindo a possibilidade de choque elétrico.

1.4 RESSALVAS E EXCEÇÕES

Devido a grande variedade de padrões de aterramento na rede de distribuição, em função das características de cada estrutura, serão analisados os modelos com apenas uma haste de aterramento, sendo esse o mais comum de ser encontrado, e que também representa uma condição favorável para a ocorrência de falhas. Ao risco de choque elétrico, por ser um assunto bastante complexo, este trabalho abordará apenas os efeitos no corpo humano resultante da passagem da corrente elétrica, capazes de provocar efeitos de importância e gravidade, bem como fatal, suficientes para responder a proposta do estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

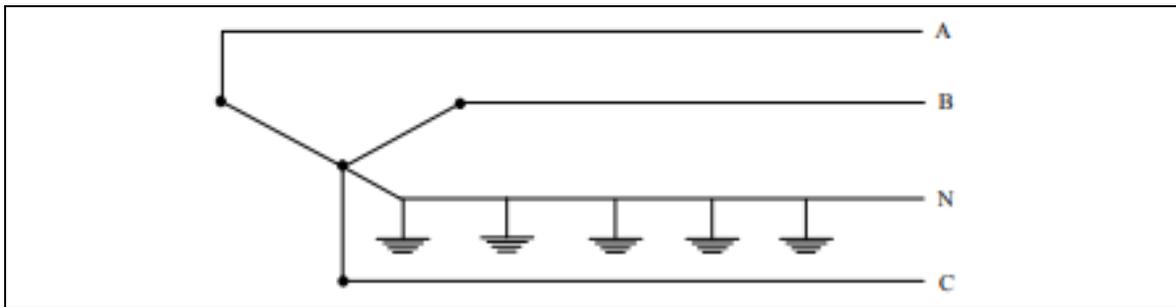
A fundamentação teórica do tema deste trabalho engloba o estudo dos tipos de aterramentos em redes de distribuição de energia com foco na descida de aterramento, em estruturas padronizadas, conforme padrões técnicos estabelecidos pelas concessionárias de energia. Além disso, será verificado o conceito de choque elétrico, limites aceitáveis de potenciais causados por tensão de toque e por tensão de passo devido à energização acidental do condutor de descida do aterramento, e assim analisar medidas de segurança hoje aplicadas durante as intervenções na rede de distribuição.

2.1 PADRÃO DE ATERRAMENTO NA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

Nesta seção serão apresentados os principais tipos de sistema de aterramento, suas definições e características técnicas, considerando que na elaboração do projeto específico para aterramento da rede de distribuição o tipo de sistema a ser implantado é em função das características da necessidade de infraestrutura para o fornecimento de energia elétrica. Diante das múltiplas escolhas dos tipos de aterramento, será exibido aquele que mais se aplica para melhor aproveitamento do estudo proposto, comparando as particularidades e aspectos construtivos. A análise contempla todos os aspectos técnicos envolvidos, inclusive as novas tecnologias bem como as antigas instalações existentes.

Usualmente, na distribuição se utiliza dois sistemas de configuração de aterramento em alimentadores. O primeiro é o sistema trifásico a quatro fios multiaterrados, onde o quarto fio (neutro) do alimentador deriva da malha de aterramento da subestação (SE) de origem, e ao longo do circuito o condutor possui pontos de aterramento periódicos, conforme mostrado na Figura 3. Sempre que possível o neutro é interligado a outros alimentadores proporcionando uma condição de baixa impedância, onde existe rede secundária, o neutro da baixa tensão (BT) e o neutro do alimentar se interligam formando um único condutor (NBR 16527, 2016).

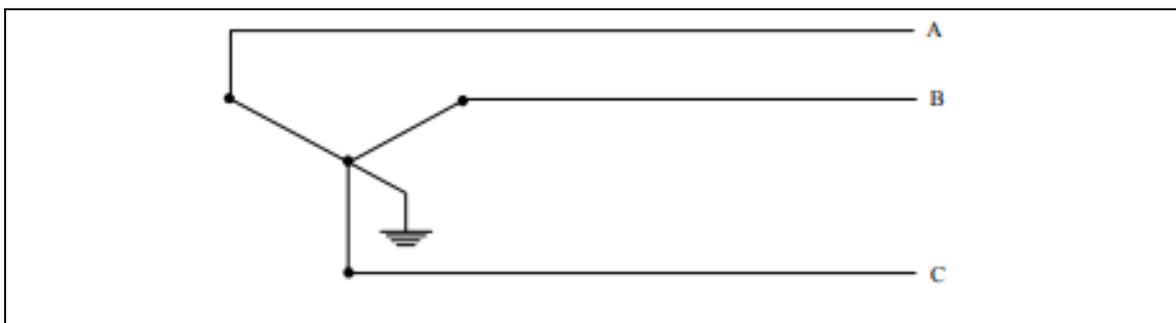
Figura 3. Sistema trifásico a quatro fios com neutro contínuo e multiaterrado.



Fonte: PIZZALI (2003)

O segundo é o sistema trifásico a três fios sem o neutro contínuo, em locais onde o alimentador é extenso e de linhas rurais não é lançado o condutor neutro, a configuração é mostrada na Figura 4. Neste caso o condutor neutro da rede secundária depende apenas do aterramento local que deve ser autossuficiente (CPFL, 2016d).

Figura 4. Sistema trifásico a três fios sem neutro contínuo.



Fonte: PIZZALI (2003)

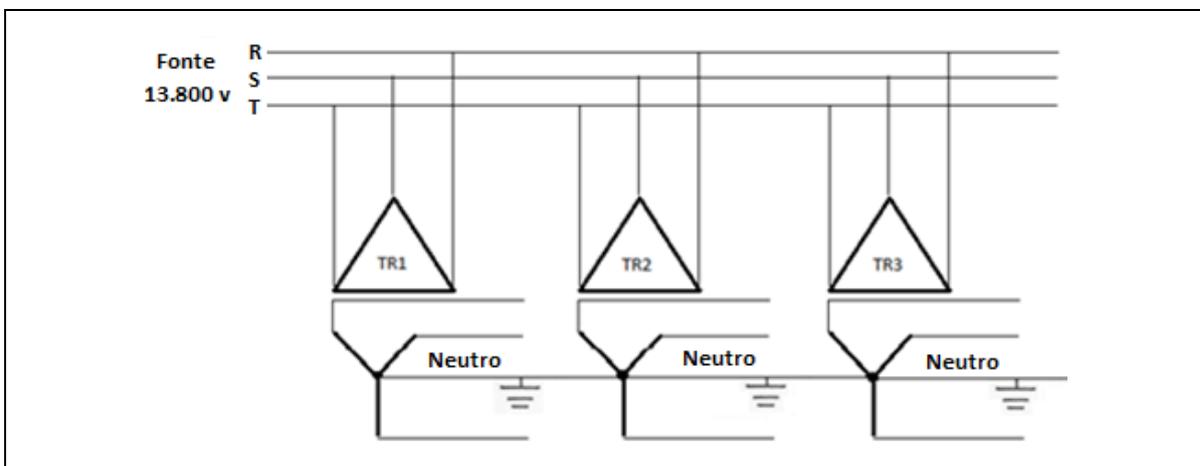
2.2 ATERRAMENTO DO NEUTRO DA REDE SECUNDÁRIO

A ligação do condutor neutro da rede secundária ocorre através de condutores nus que descem pelo poste da concessionária se conectando a hastes ou o sistema de aterramento instalado, a ligação deve ocorrer obrigatoriamente em pontos de equipamento (transformadores), final de linha e demais pontos indicados no projeto (CPFL, 2017b).

2.2.1 Neutro secundário contínuo

Nessa configuração o neutro de um circuito da rede secundária se interliga com todos os outros circuitos secundários formando um neutro contínuo, representado na Figura 5. Esse método se torna eficiente considerando que um circuito compartilha o seu sistema de aterramento com o outro, oferecendo baixa impedância. São consideradas como rede de neutro secundário contínuo, aquelas em que o neutro de baixa tensão interliga todos os transformadores de distribuição (NBR 16527, 2016).

Figura 5. Neutro secundário contínuo.

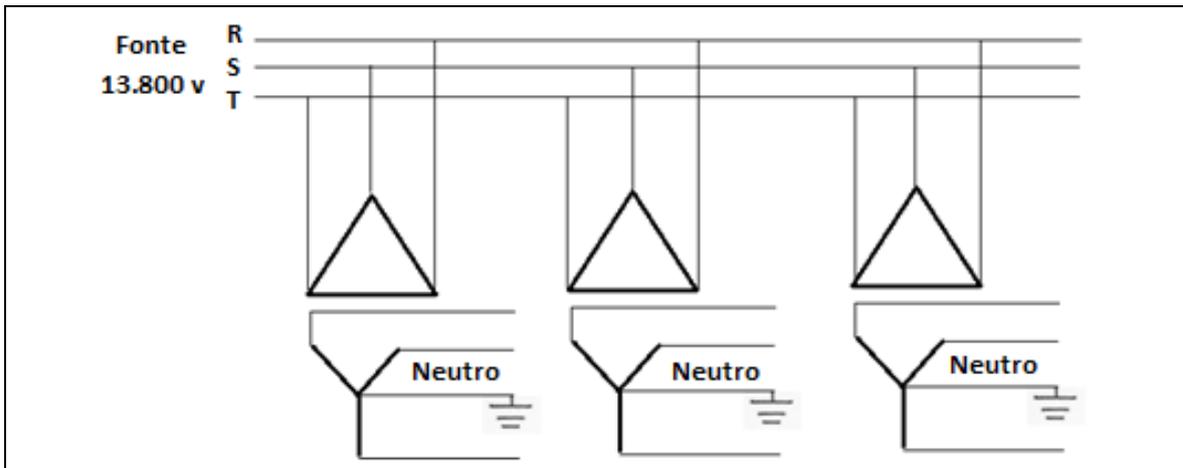


Fonte: Autor (2018)

2.2.2 Neutro secundário descontínuo

Diferente do sistema contínuo, nesse modelo de configuração apresentado na Figura 6, o neutro do circuito secundário do transformador não necessita estar conectado ao neutro do circuito secundário dos demais transformadores. No entanto, o aterramento do neutro deverá ser autossuficiente, uma vez que não tem o auxílio do aterramento do neutro dos demais circuitos (CPFL, 2016d). Esse é o modelo característico utilizado na rede de distribuição da Rio Grande Energia (RGE), e também o pior caso possível encontrado no sistema de distribuição, logo será considerado para o estudo do objetivo desse trabalho.

Figura 6. Neutro secundário descontinuo.



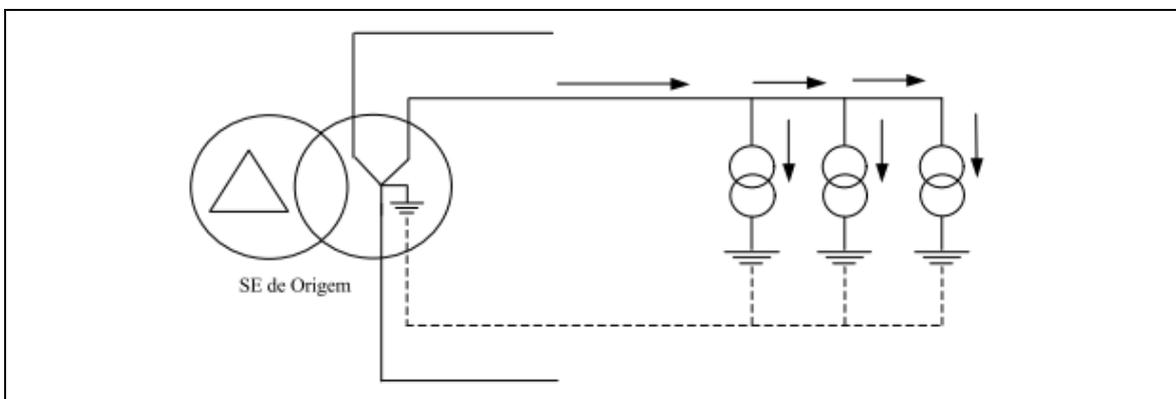
Fonte: Autor (2018)

2.2.3 Sistemas monofilares com retorno por terra (MRT)

Buscando ao máximo reduzir os investimentos em construção de redes elétricas e com uma avaliação prévia das características das cargas a serem atendidas é oportuno a utilização de redes monofilares com retorno por terra (MRT) na distribuição de energia (ENERSUL, 2001).

Constitui-se de um único condutor ligado diretamente a uma das fases de uma linha trifásica, sendo o solo um caminho de retorno da corrente. Os transformadores de distribuição por ele alimentados têm seus enrolamentos primários ligados entre o condutor e o solo, conforme se observa na Figura 7 (RIBEIRO et al., 2003).

Figura 7. Sistema monofilar com retorno por terra.



Fonte: PIZZALI (2003)

Para sistemas em MRT deve ser adotado aterramento com redundância, ou seja, duas descidas dos condutores de aterramento. Para postes de concreto circular uma descida é realizada externamente ao poste e a outra internamente, em postes de madeira as duas descidas são realizadas externamente ao poste (CPFL, 2017b).

2.3 SISTEMA DE HASTES DE ATERRAMENTO

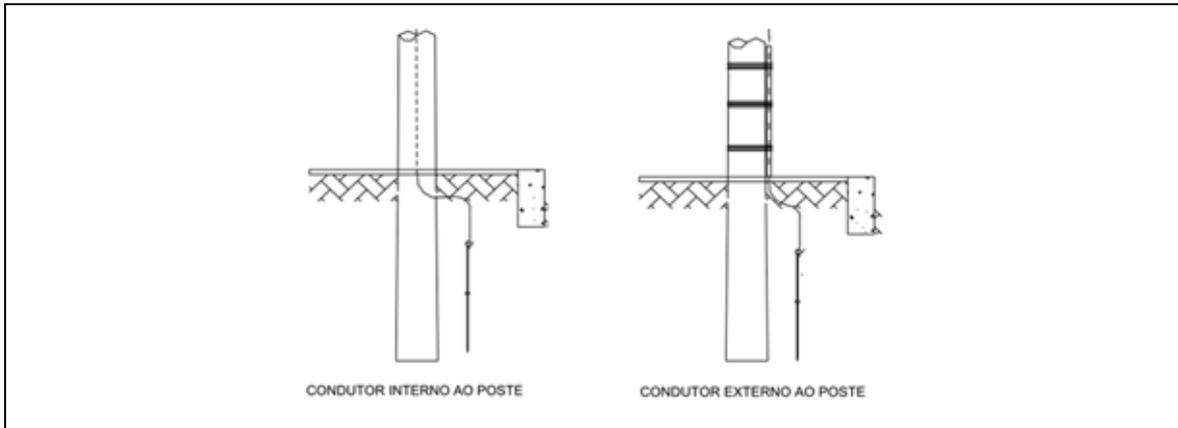
Os aterramentos utilizados pelas concessionárias de energia apresentam várias configurações, quantidades de hastes utilizadas, assim como os materiais empregados. A seguir serão destacadas as duas principais malhas adotadas na rede de distribuição das empresas do grupo CPFL ENERGIA, que englobam a maioria dos casos encontrados na rede de distribuição. Ainda, será visto o modelo com poste autoaterrado que passa a ser uma nova tecnologia implantada no sistema.

2.3.1 Aterramento simples com 1 haste de terra

Este tipo de aterramento deve ser instalado em pontos de rede de distribuição urbana em estruturas com transformadores, em seccionamento e fim de linha definitivo de rede secundária e sempre a cada 300m, aproximadamente, de modo que nenhum ponto de rede fique a mais de 200m sem um ponto de aterramento (CPFL, 2016d).

O condutor de aterramento consiste basicamente de um determinado comprimento de arame de aço zincado de 6,05mm de diâmetro (4 BWG), conectado a uma haste cantoneira perfilada de aço zincado de 2,40m de comprimento, conforme mostrado na Figura 8 (CPFL, 2016d).

Figura 8. Aterramento simples com 1 haste de terra.



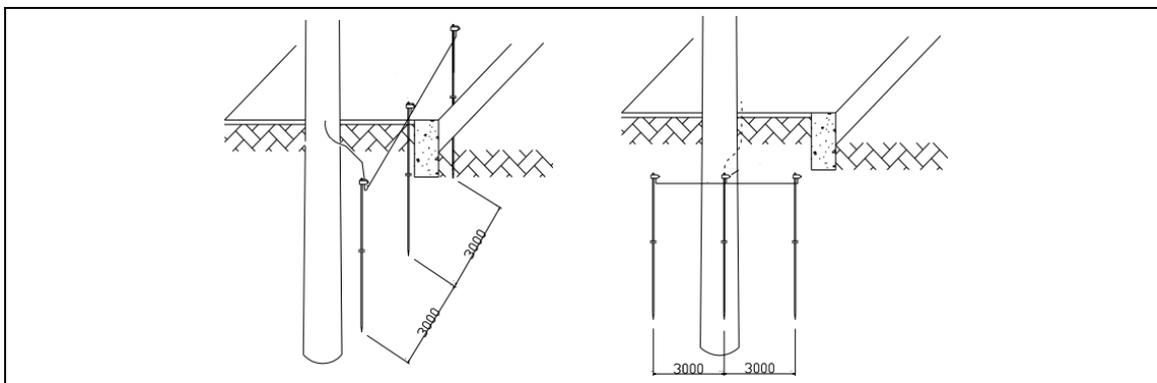
Fonte: CPFL (2017b)

2.3.2 Aterramento simples com 3 hastes de terra em linha

Essa configuração se aplica em estruturas de rede de distribuição urbana de fim de linha onde existem transformadores. Constitui-se basicamente de um determinado comprimento de arame de aço zincado de 6,05mm de diâmetro (4 BWG) conectado a três hastes cantoneira perfiladas de aço zincado de 2,40m de comprimento em linha, conforme mostrado na Figura 9 (CPFL, 2016d).

A posição das hastes adicionais pode ser do mesmo lado do poste ou distribuídas igualmente uma para cada lado, respeitando a distância entre hastes de, no mínimo, o comprimento delas (CPFL, 2017b).

Figura 9. Aterramento simples com 3 haste de terra em linha.

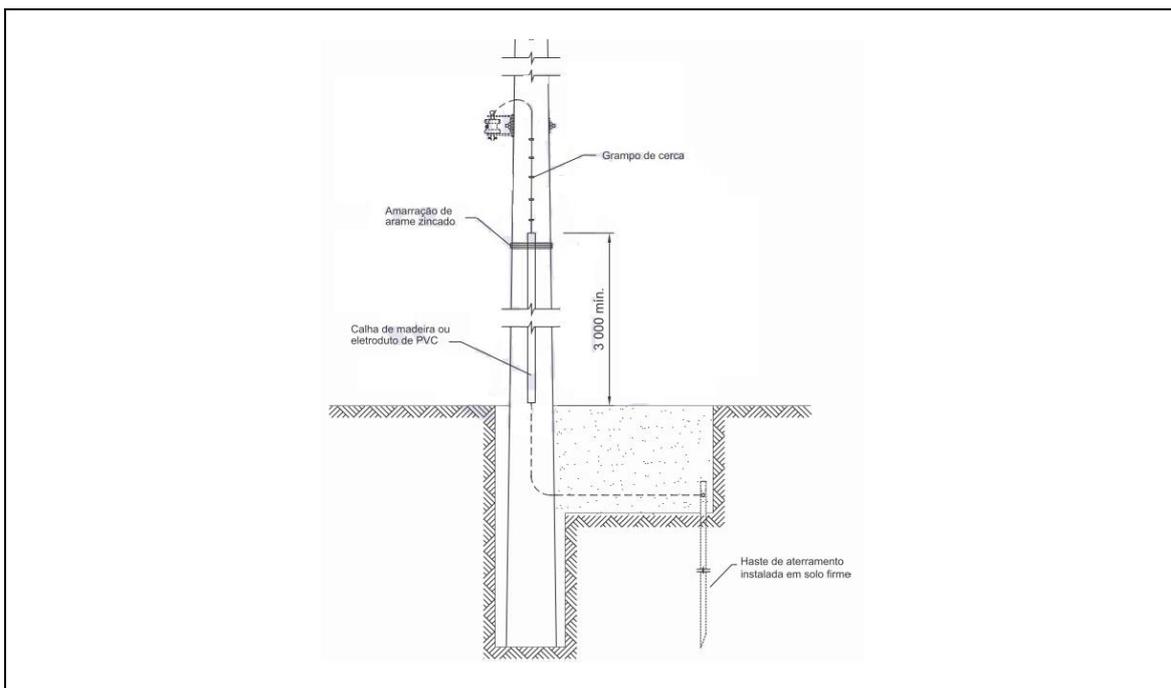


Fonte: CPFL (2017b)

A haste do tipo cantoneira pode ser substituída por haste de aço cobreada $\text{Ø}5/8'' \times 2,40\text{m}$ nos dois tipos de aterramento anteriores, utilizando o mesmo critério de montagem (CPFL, 2016d).

Em estruturas com poste de madeira, o fio de descida do aterramento fica obrigatoriamente externo ao poste e em algumas situações com poste de concreto também, devido a características da estrutura a ser montada, devendo esse ser protegido por calha de madeira ou eletroduto de PVC com no mínimo 3,00m de altura (NBR 15688, 2012), conforme mostrado na Figura 10. Essa medida visa evitar um contato acidental de quem circula nas proximidades da estrutura com o fio de descida do aterramento, mas durante uma intervenção na rede elétrica, onde seja necessário escalar o poste, o profissional fica exposto ao contato com o condutor de descida do aterramento.

Figura 10. Proteção da descida do aterramento com condutor externo ao poste.



Fonte: NBR 15688 (2012)

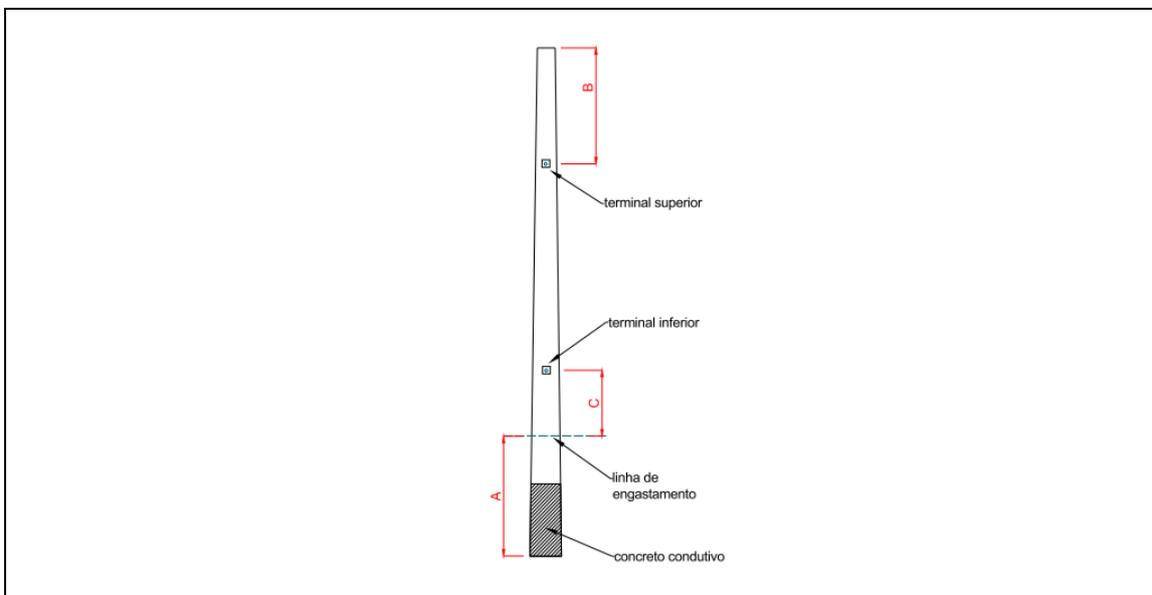
2.3.3 Aterramento com poste autoaterrado

Este tipo de aterramento é executado pelo próprio poste de rede fabricado com dispositivos de aterramento estrutural, no qual a ferragem do poste executa a função de eletrodo de aterramento da instalação elétrica. Este tipo de poste é denominado Poste Autoaterrado (CPFL, 2016d).

Para realizar a interligação dos condutores de aterramento com os vergalhões de aço da armação do poste de concreto, e o mesmo funcionar como eletrodo de aterramento da instalação, existe pontos de conexão especiais ligados na barra mestre do poste autoaterrado. São dois os pontos de conexão à terra, um ponto na parte inferior e outro na parte superior do poste (CPFL, 2017a).

O dispositivo de conexão à terra superior tem a função de possibilitar a ligação do condutor de descarga do condutor neutro da rede, o dispositivo de conexão à terra inferior permite a medição da resistência de aterramento do poste, a conexão de aterramento temporário durante serviços na rede e a interligação de malhas de terra complementares, se necessário. O poste possui uma área composta com concreto condutivo, uma massa onde os agregados de alta resistividade elétrica como a brita e a areia foi substituído por carvão coque, um subproduto do carvão mineral, que vai da base até a altura de 1 metro, essa parte do corpo do poste que possui a mesma resistência à compressão que o restante do poste, faz o desempenho de eletrodo de aterramento (CPFL, 2017a). A Figura 11 mostra o poste autoaterrado com seus pontos de conexão.

Figura 11. Poste autoaterrado e posicionamento dos terminais de aterramento.



Fonte: CPFL (2017a)

Um poste auto aterrado substitui com vantagem uma instalação de aterramento de até 3 hastes de terra alinhadas. Isto significa dizer que um poste auto aterrado poderá ser utilizado em qualquer dos pontos convencionais de aterramento

da rede de distribuição onde hoje se utiliza o aterramento simples com 1 ou 3 hastes de terra (CPFL, 2016d).

2.3.4 Considerações gerais

O aterramento deve atender requisitos básicos independente do sistema implantado e garantir o adequado escoamento dos surtos. Para isso, a resistência de aterramento deve se situar em uma faixa de tolerância de acordo com a característica da rede (NBR 16527, 2016).

As concessionárias de energia definem critérios para se realizar as medições e quais os valores admissíveis de resistência de aterramento em função do tipo de aterramento, porém como o objetivo não é avaliar a condição da resistência do aterramento, será considerado que o aterramento atende o estabelecido em norma. Na CPFL o sistema de aterramento simples, que será o objeto do estudo desse trabalho, deve atender um valor de 50Ω com tolerância de $+ 25 \Omega$ (CPFL, 2016d).

Outra consideração importante que o aterramento deve garantir em condições normais de operação é a conservação do condutor neutro em um potencial seguro. Para uma condição de segurança o potencial do neutro deve ser inferior a 10 V em relação à terra, com isso não será possível alcançar o limite de 10 mA no caso de ocorrer um eventual toque no condutor neutro (NBR 16527, 2016).

2.4 O CHOQUE ELÉTRICO

É indispensável ressaltar a importância da energia elétrica nos dias atuais, e cada vez mais o uso dos benefícios proporcionados pela eletricidade. Para que isso ocorra, as redes de energia necessitam estar presente nos locais onde a população habita, e com isso acaba expondo milhares de pessoas a um risco inerente do sistema elétrico, o choque elétrico (ABRADEE, 2018).

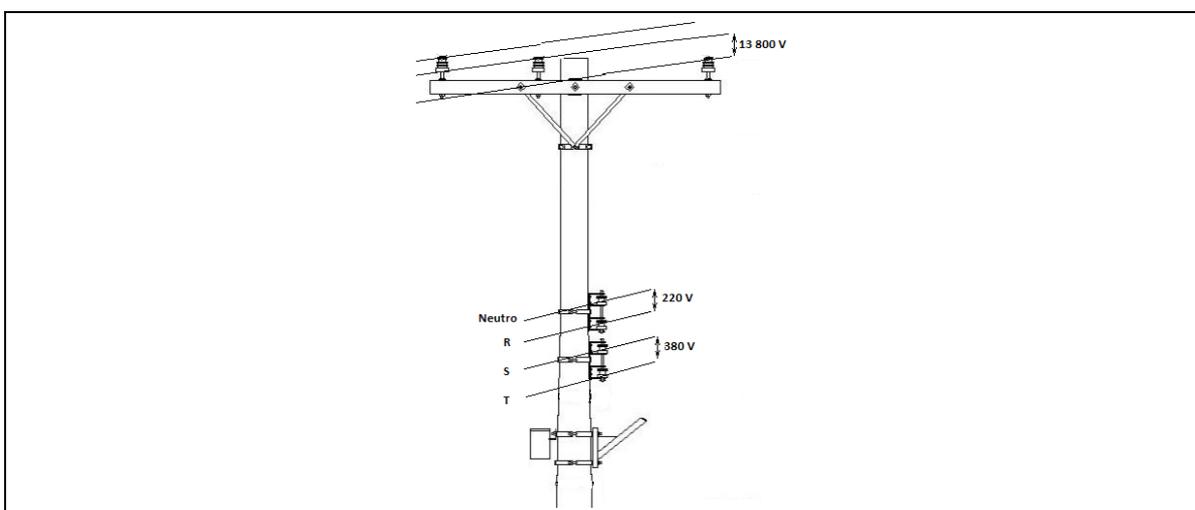
Nesta seção serão tratados os conceitos do choque elétrico, como ele ocorre, os principais tipos de choque, assim como fatores que determinam sua gravidade. Direcionando o conteúdo para o objetivo deste trabalho, será analisado o choque elétrico em virtude do seu efeito e consequência no corpo humano.

O choque elétrico ocorre quando uma determinada corrente elétrica percorre o corpo humano. Dependendo da situação, o choque pode causar apenas um pequeno formigamento, queimaduras de terceiro grau ou até mesmo levar a pessoa a óbito. Para que o choque ocorra, deve haver uma diferença de potencial entre dois pontos distintos do corpo humano, ou seja, quanto maior for a diferença de potencial, maior será a corrente elétrica e como consequência, o choque também será maior. Geralmente, um dos pontos de ligação são os pés, que estão em contato com o solo, e o outro ponto é o que de fato entra em contato com alguma parte da instalação energizada (JÚNIOR, 2018).

2.4.1 Exposição ao choque elétrico

Atendendo a demanda, as concessionárias de distribuição de energia possuem redes com níveis de tensão necessários ao fornecimento, operando linhas de média e baixa tensão, também chamadas de redes primárias e secundárias, respectivamente. A média tensão (MT) apresenta tensão elétrica entre 2,3 kV e 44 kV, e as redes de baixa tensão (BT) podem variar entre 110 V e 440 V, ambas fixadas em postes que são fáceis de serem vistos em ruas e avenidas das cidades. A Figura 12 ilustra um poste com redes de baixa e média tensão com seus níveis de tensão (ABRADEE, 2018).

Figura 12. Rede aérea de distribuição com tensão primária e secundária.



Fonte: Autor (2018)

Nessa condição de exposição, a única garantia de separação entre a tensão elétrica e as pessoas é a isolação, sendo esta indispensável no processo de transporte da eletricidade. Os isolantes estão sujeitos a falhas e defeitos como fissuras e rompimentos, deixando o potencial da rede acessível ao contato humano, contato esse que muitas vezes acaba ocorrendo devido à exposição com a rede elétrica.

Ao fazer o contato com um ponto energizado, o corpo humano acaba permitindo a passagem da corrente elétrica, que em função da intensidade tem efeitos e consequências diversas que precisam ser entendidas para prevenção do choque elétrico. Para haver choque elétrico não basta apenas ter contato com um material energizado. Devem existir, também, condições para que a corrente tenha um caminho de retorno à rede. Este retorno pode se dar através da terra ou de material energizado com tensão distinta (KINDERMANN, 2000).

As perturbações que o corpo humano sofre ao receber um choque elétrico estão ligadas a diversos fatores, como: percurso da corrente elétrica pelo corpo humano, intensidade da corrente elétrica e a tensão elétrica. As consequências do choque elétrico são inúmeras, mostrada na Tabela 1, que vão de pequenas sensações desagradáveis em situações de baixa intensidade de corrente, passando por parada cardíaca e respiratória, queimaduras em tensões mais elevadas, chegando à morte nos casos mais graves.

Tabela 1 – Consequência do choque elétrico.

Intensidade da corrente elétrica	Consequências no ser humano
1 - 10 mA	Sensação de formigamento;
10 - 20 mA	Sensação dolorosa;
10 mA < ou < 20 mA	Dificuldades na respiração pode causar morte por asfixia;
100 mA >	Fibrilação cardíaca;
200 mA >	Graves queimaduras e parada cardíaca;
1 A >	Queimaduras extremamente graves, necrose dos tecidos, morte é instantânea;

Fonte: Santos (2018)

A limiar da sensação de corrente alternada para o corpo humano é de 1 mA. Correntes de 9 a 25 mA já são quase dolorosas e podem resultar em descontrole muscular, suficiente para dificultar a retirada de objetos energizados agarrados pelas mãos. Ainda no intervalo de 9 a 25 mA podem ocorrer problemas respiratórios, que

podem desaparecer quando a corrente for interrompida, ou, quando a contração for mais severa, verifica-se a interrupção respiratória. O limiar para fibrilação ventricular varia de 50 a 100 mA (KINDERMANN ; CAMPAGNOLO, 1995).

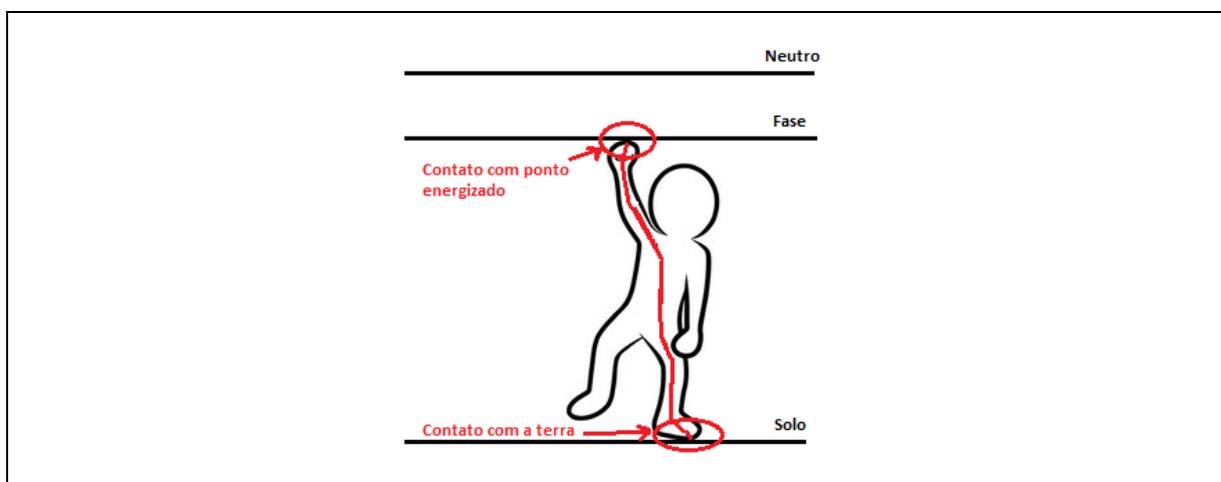
O tipo de contato com a tensão da rede é de extrema importância nesse estudo. No contato direto, todas as manifestações podem ocorrer, porém para os choques devido à tensão de toque e passo, imposta pelo sistema de aterramento durante defeito na rede elétrica, a manifestação mais importante a ser considerada é a fibrilação ventricular do coração (KINDERMANN, 2000).

2.4.2 Tipos de choque elétrico

Os tipos de choque que podem ocorrer estão divididos em estático, dinâmico e por descarga atmosférica. Como este trabalho avalia o risco de choque em descidas de aterramento em redes de distribuição, apenas o comportamento do choque dinâmico será visto.

Choque dinâmico é o choque tradicional, obtido ao tocar um elemento energizado da rede de energia elétrica, como mostrado na Figura 13. Este é o tipo de choque mais perigoso porque a rede de energia elétrica mantém a pessoa energizada, ou seja, a corrente de choque persiste continuamente. Dá-se devido a toque acidental na parte viva de condutores energizados (GERALDO KINDERMANN, 2000).

Figura 13. Exemplo de choque dinâmico.

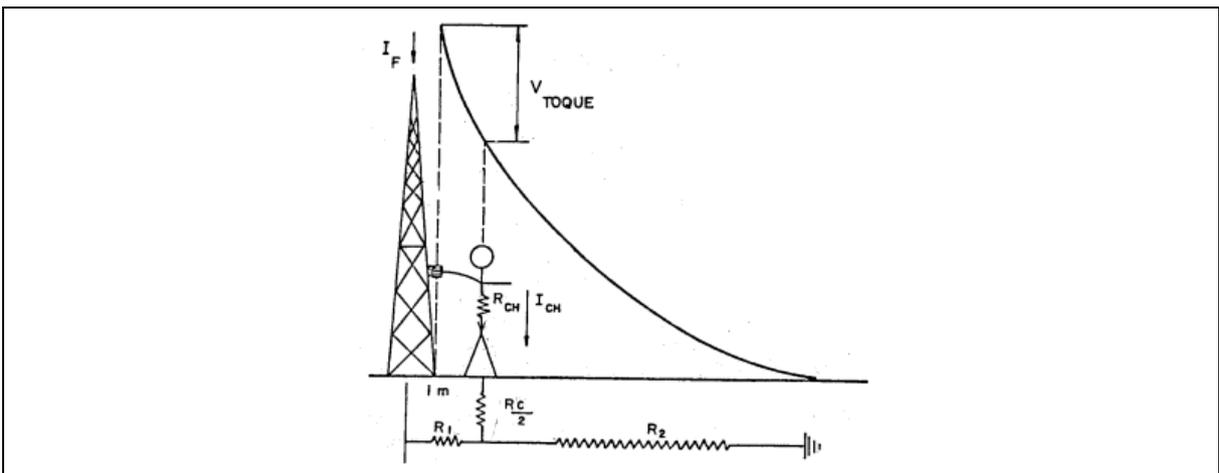


Fonte: Autor (2019).

Como a análise vai considerar a possibilidade de energização do condutor de descida de aterramento, e a única proteção que esse condutor possui é o uso de calha de madeira ou eletroduto até 3 metros de altura do solo, pode ocorrer um toque accidental por qualquer pessoa que venha a se aproximar da estrutura, logo é de extrema importância o entendimento do conceito de tensão de toque (NBR 16527, 2016).

No caso de uma pessoa se aproximar e tocar accidentalmente um condutor de descida de aterramento que esteja energizado, entre a mão e o pé do indivíduo, existirá uma diferença de potencial que é denominada tensão de toque. Pela definição, considera-se a distância do poste até o pé igual a 1m. A Figura 14 ilustra o potencial de toque (NBR 15749, 2009).

Figura 14. Demonstração de um indivíduo submetido a uma tensão de toque.

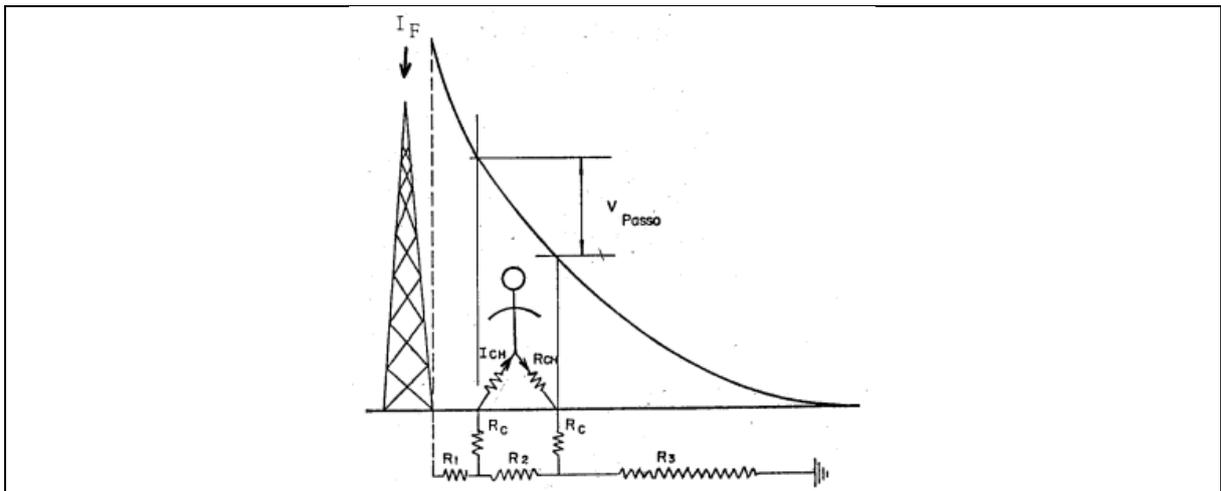


Fonte: KINDERMANN (2000)

Tensão de passo é a diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo separados pela distância de um passo de uma pessoa, considerada igual a 1m (NBR 15749, 2009). Esta diferença pode surgir quando ocorre uma falta a terra, onde a corrente de curto-circuito flui pelo aterramento e conseqüentemente gera tensões na superfície do solo. A Figura 15 ilustra este conceito.

Ainda, pode-se observar que a tensão de passo somente ocorre quando a pessoa está com os pés afastados, concluindo que se os dois pés estiverem na mesma superfície de potencial a tensão de passo será nula e não haverá o choque elétrico (KINDERMANN, 2000).

Figura 15. Demonstração de um indivíduo submetido a uma tensão de passo.



Fonte: KINDERMANN (2000)

A tensão de passo é menos perigosa que a tensão de toque. Isso se deve ao fato do coração não estar no percurso da corrente de choque. Os potenciais de passo e de toque devem estar dentro de limites seguros, e o aterramento deve manter esses potenciais dentro desses limites toleráveis em caso de defeito (KINDERMANN, 2000).

2.5 PROCEDIMENTOS DE SEGURANÇA CONTRA CHOQUE ELÉTRICO

No setor elétrico quando se trata de medidas preventivas dos riscos de origem elétrica deve-se consultar a norma regulamentadora de número 10 (NR10), "Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade", que possui como objetivo regulamentar a segurança dos serviços que de algum modo envolvam a eletricidade de forma direta ou indiretamente. A medida de proteção coletiva prioritária apresentada no item 10.2.8.2 da NR10 compreende a desenergização elétrica, que ocorre com a realização dos seguintes procedimentos apropriados conforme a sequência a seguir:

- a) Seccionamento;
- b) Impedimento de reenergização;
- c) Constatação da ausência de tensão;
- d) Instalação de "Aterramento Temporário" com equipotencialização dos condutores dos circuitos;

- e) Proteção dos elementos energizados existentes na "Zona Controlada";
- f) Instalação da sinalização de impedimento de reenergização.

Com a realização dos procedimentos da desenergização da rede elétrica é possível controlar o risco de choque elétrico ou até mesmo eliminá-lo, porém devido à importância da eletricidade aos cidadãos, cada vez mais se torna inviável desligar a rede de energia, sendo necessário se tomar outras medidas para controle dos riscos elétricos.

Quando a desenergização não é possível, devem-se utilizar outras medidas de proteção coletiva que visam conter os riscos elétricos. As alternativas indicadas pela NR10 são a utilização de isolamento das partes vivas, uso de obstáculos e barreiras, sinalização, sistema de seccionamento automático de alimentação e bloqueio do religamento automático (MTE, 2004).

Podendo ainda as medidas de proteção coletiva ser tecnicamente insuficientes, o uso de medidas individuais deve ser adotado através de equipamentos de proteção individual (EPI).

A seguir serão apresentados alguns procedimentos e medidas preliminares em rede energizada preventivas ao risco de choque elétrico no condutor de descidas de aterramento aplicado pela concessionária Rio Grande Energia (RGE) para realização de manutenção em redes de distribuição.

2.5.1 Regra geral do Manual do Eletricista Padrão RGE

O eletricista sempre deve constatar a ausência de tensão de partes metálicas, como descidas de aterramentos, transformadores, luminárias e messageiros de telefone, mantendo seu corpo afastado das mesmas evitando assim receber uma descarga elétrica durante a realização das tarefas. Caso se constate presença de tensão em alguma das partes metálicas da estrutura, o defeito que provocou a energização destes deve ser corrigido (CPFL, 2016a).

Essa medida é aplicada a qualquer trabalho na rede de distribuição, sendo realizada de forma preliminar, tendo o objetivo de se antecipar a situações que podem expor os colaboradores da empresa ao risco de choque elétrico.

2.5.2 Tarefa de testar ausência de tensão

Consiste em detectar a ausência de tensão em rede de baixa ou média tensão, cordoalhas, luminárias e descidas de aterramento. O teste deve ser realizado através de um detector de tensão, conforme nível de tensão da rede, acoplado a uma vara de manobra com no mínimo três estágios de extensão, devendo o eletricitista respeitar uma distância de três metros da estrutura. Na baixa tensão existe também a possibilidade de se utilizar o volt-amperímetro acoplado a varetas específicas para detectar ausência de tensão. A Figura 16 mostra o conjunto de varetas sendo utilizada em conjunto com o volt-amperímetro (CPFL, 2016b). No caso do uso das varetas, um fator que deve ser observado é a distância entre o provável ponto energizado e o eletricitista, ficando ele exposto a uma possível tensão de passo.

Figura 16. Varetas para medição de tensão.



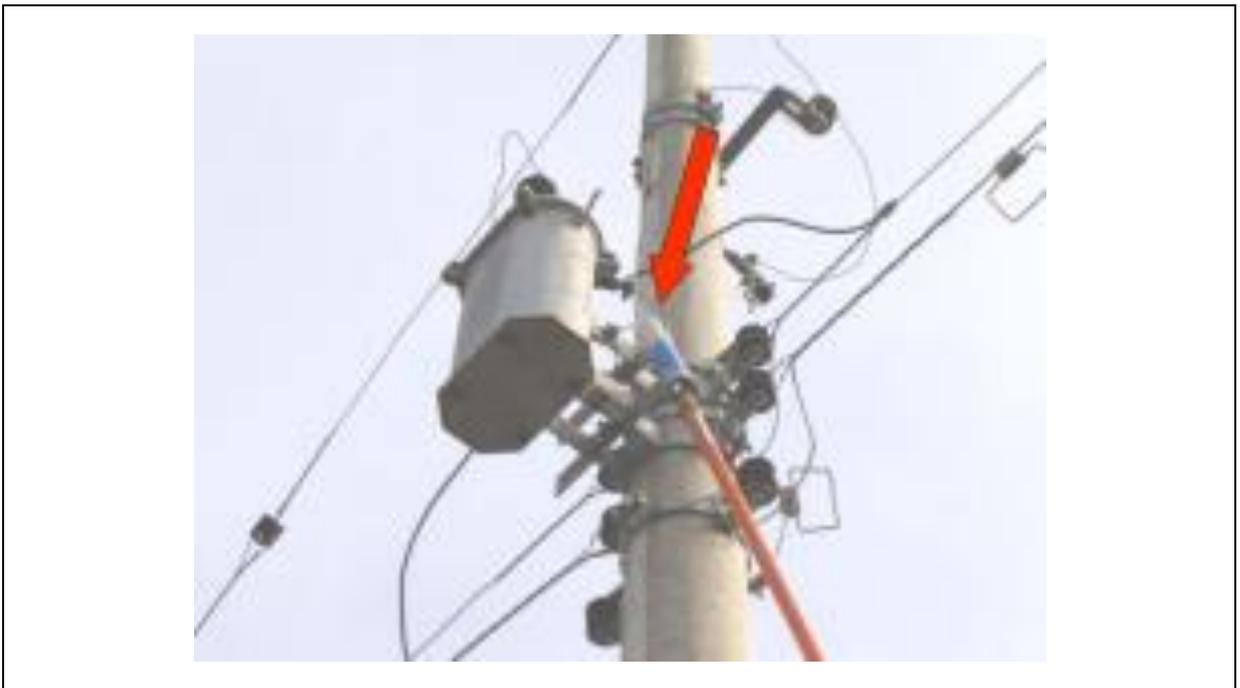
Fonte: CPFL (2016b)

2.5.3 Teste em transformador MRT

Este teste consiste em realizar inspeção visual da estrutura verificando principalmente as conexões de descida do aterramento, observando a perfeita continuidade física do mesmo, mantendo uma distância aproximada de três metros do poste com MRT. Testar a ausência de tensão nos condutores de descida do aterramento do transformador independente da chave fusível do transformador estar

aberta ou fechada. Caso o poste existente seja de concreto, com fio de descida interno, testar ausência de tensão no próprio poste, desde a linha de terra até o ponto mais próximo da rede de baixa tensão, conforme mostrado na Figura 17 (CPFL, 2016c).

Figura 17. Teste de ausência de tensão em descida de aterramento em poste com transformador MRT.



Fonte: CPFL (2016c)

3 METODOLOGIA

Com objetivo de avaliar o nível de potencial encontrado na descida de aterramento e ao longo do solo, serão efetuados ensaios de energização acidental do condutor de descida de aterramento em uma estrutura de rede de distribuição. Esta simulação apresentará resultados com os níveis de potencial de toque na estrutura e de passo nas proximidades. Diante dos resultados obtidos, será realizada a comparação com os valores considerados toleráveis, verificando a possibilidade de choque elétrico e qual a gravidade para as pessoas. Além disso, será avaliada a possibilidade de medidas de segurança capazes de controlar o risco que venha a existir, repetindo novamente as medições após aplicação dessas melhorias.

3.1 REGRAS PARA ALTERAÇÃO DE PROCEDIMENTOS DE TRABALHO

Atualmente todos os procedimentos de trabalho descrito nos manuais de manutenção do grupo CPFL tem o compromisso de zelar pela segurança em seus processos de trabalho. Essa é uma condição essencial para ter um ambiente de trabalho seguro e saudável para as pessoas e ao mesmo tempo, garantir a excelência na prestação dos serviços (CPFL, 2016a).

Para descrever uma tarefa ou técnica de trabalho é indispensável levar em consideração o mapeamento dos perigos, riscos e medidas de controle essenciais para realização das atividades nas redes de distribuição. Na execução das tarefas o uso e aplicação de ferramentas, equipamentos, EPI e EPC adequados também são determinantes para o sucesso da atividade.

As sugestões de criação ou alteração dos procedimentos de trabalho necessitam de análise criteriosa baseado em estudos de casos e experiências de campo. No grupo CPFL esse trabalho é realizado pela Gerência de Processos da Distribuição que tem a responsabilidade sobre os manuais e procedimentos de trabalho da empresa. As alterações costumam ser analisadas quando possuem o objetivo de aumentar o nível de segurança, captar ganhos em produtividade, sugerir uso de novas ferramentas, equipamentos ou melhorar o entendimento do procedimento.

3.2 LOCAL DE REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

O local escolhido para realização dos ensaios é o Centro de Treinamento da RGE em Caxias do Sul, imagens das instalações são mostrados na Figura 18. O espaço oferece uma diversidade de estruturas de rede de distribuição que segue os mesmos padrões técnicos hoje encontrados nas redes da concessionária. Por se tratar de um ambiente controlado, as instalações podem ser energizadas ou não de acordo com a necessidade dos testes, o que permite realizar diversas simulações de defeitos para um estudo detalhado da proposta desse trabalho.

Figura 18. Instalações do Centro de Treinamento RGE em Caxias do Sul.



Fonte: Autor (2018)

3.3 SEGURANÇA PARA REALIZAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS

Para garantir a segurança durante os procedimentos é necessário realizar algumas medidas visando diminuir o risco de acidente em virtude dos potenciais perigosos que possam surgir nas proximidades da haste de aterramento ou em alguma estrutura condutora próxima (NBR 15749, 2009). Para tanto será seguido os passos abaixo:

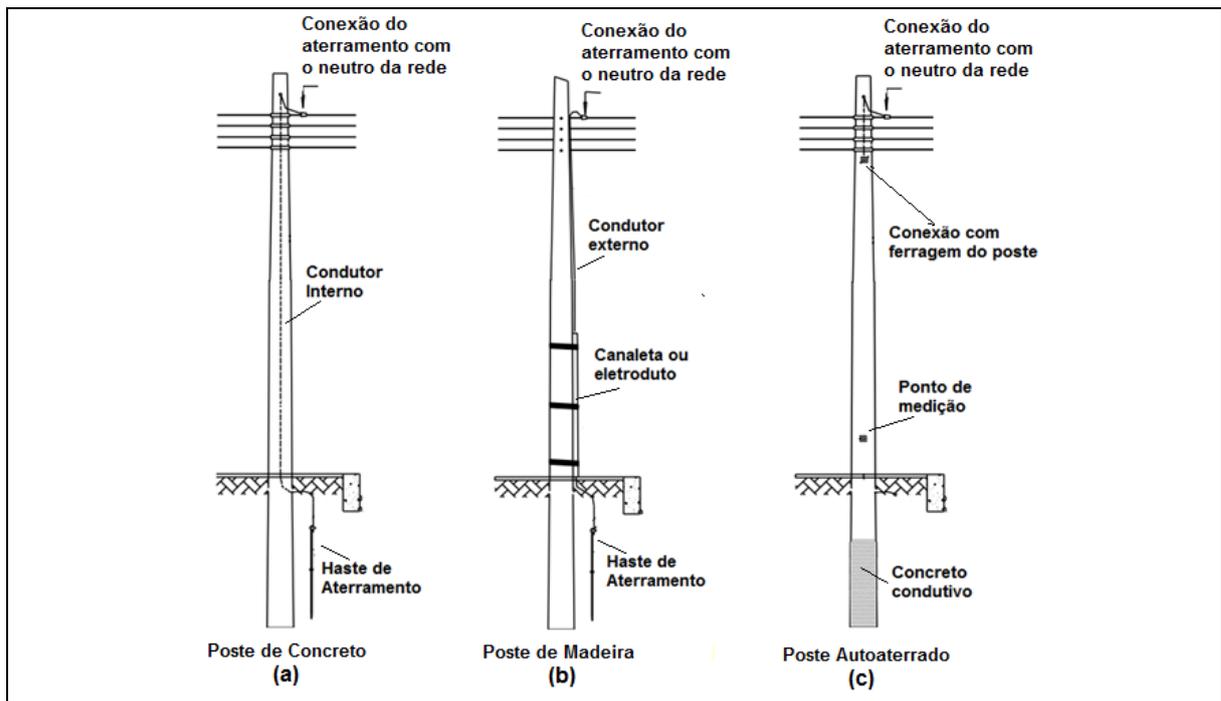
- a) Utilização de equipamentos de proteção individual tais como: Vestimenta retardante a chamas, capacete, óculos de segurança e calçado de proteção;
- b) Luvas isolantes de borracha adequadas ao nível de tensão máxima aplicada;
- c) Evitar realizar os ensaios em condições climáticas adversas, evitando assim a possibilidade de uma descarga atmosférica;
- d) Controlar o acesso de pessoas estranhas ao local através de sinalização e delimitação adequada da área de trabalho.

3.4 ESTRUTURA PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Para realização dos ensaios será utilizado três estruturas diferentes, todas final de rede. Na primeira delas o poste utilizado será de concreto com o condutor de descida do aterramento interno ao poste conforme mostrado na Figura 19 (a). A segunda, com poste de madeira e com o condutor de descida do aterramento descendo pela lateral do poste, protegido por eletroduto de PVC até a altura de 3 metros, conforme ilustrado na Figura 19 (b). Uma terceira estrutura com poste de concreto autoaterrado completa as montagens a serem avaliadas durante ensaios, conforme Figura 19 (c).

Nas duas primeiras estruturas o condutor de descida do aterramento é ligado no condutor neutro da rede do sistema de alimentação e a uma haste simples de aterramento, reproduzindo o pior caso encontrado em situações reais em campo. Já na estrutura com poste autoaterrado, o neutro da rede será interligado a ferragem do poste que executa a função de eletrodo de aterramento, sem uso da haste adicional.

Figura 19. Modelos de estruturas onde será realizado ensaio.



Fonte: Autor (2018)

3.5 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

As medições dos potenciais serão obtidas através dos seguintes equipamentos:

Multímetro Digital: Marca Minipa, modelo ET-2231a, escala de medição de tensão de 40 mV a 750 V, precisão de $\pm 1,2\%$ da leitura + 5 dígitos e resolução de leitura com visor de 3 $\frac{3}{4}$ dígitos.

Terrômetro digital de alta frequência: Marca Megabrás, modelo TM-25m, alcance de 0 a 300 Ω , exatidão na medição de $\pm 2,5\%$ do valor medido ± 1 dígito e frequência de operação de 25.000 Hz.

3.6 ENERGIZAÇÃO DO CONDUTOR DE ATERRAMENTO

A fonte de alimentação para energização do condutor de aterramento se dará através de um transformador externo ao circuito proveniente de uma rede próxima ao local. Isolada do sistema de aterramento sob ensaio, a fonte de alimentação deve ter

potência e tensão adequadas para fornecer corrente suficientemente elevada e garantindo reduzir erros de medição (NBR 15749, 2009).

Para uma avaliação precisa do sistema de aterramento local onde o teste é realizado, o condutor de descida do aterramento deve ser desconectado do condutor neutro do circuito secundário ao qual ele pertence, estando o mesmo isolado dos demais aterramentos do circuito, fazendo com que ele seja autossuficiente durante os ensaios previstos.

O potencial de teste aplicado ao condutor de descida de aterramento é de 220 volts, tensão nominal de fase encontrado na rede de distribuição local. Para essa etapa será seguido os seguintes passos:

- a. Certificar que o circuito onde se encontra o condutor de aterramento está desligado;
- b. Desconectar o condutor de descida do aterramento do neutro do circuito secundário;
- c. Desligar o disjuntor geral da fonte externa;
- d. Conectar o condutor de aterramento a fonte de alimentação externa;
- e. Ligar o disjuntor da fonte externa;
- f. Realizar as medições.

3.7 MEDIÇÕES

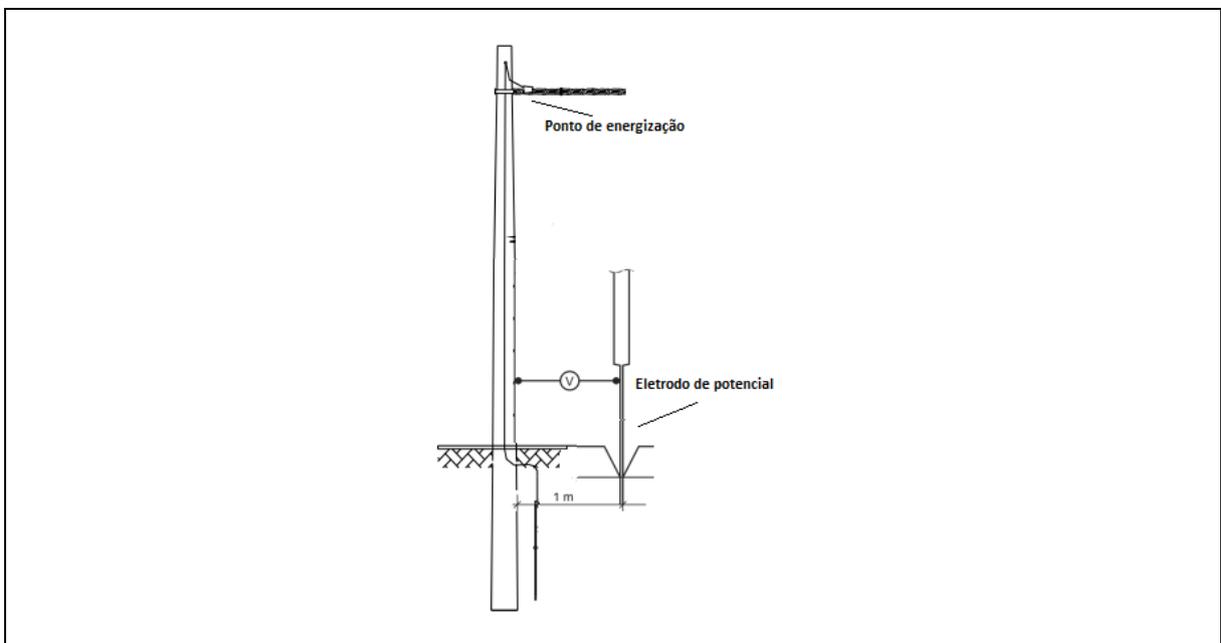
As medições devem ser realizadas em pontos estratégicos na proximidade da estrutura, produzindo o posicionamento de uma pessoa que venha a se aproximar ou tocar no poste que está sendo submetido ao ensaio. O levantamento dos potenciais de toque e passo utilizará dois métodos diferentes, descritos na seção 3.7.1 e 3.7.2, o uso de duas amostragens usando técnicas distintas possibilita uma maior assertividade para os resultados esperados, ambas seguirão os critérios previstos em normas.

3.7.1 Método de medição 1

Este primeiro método será baseado na Norma ABNT NBR 15749 - Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. A medição de tensão de toque será realizada através de um voltímetro digital entre a parte metálicas da estrutura e o eletrodo de potencial cravado no solo. Para poste de madeira (estrutura B) será usado como contato o condutor de descida de aterramento, no poste de concreto (estrutura A) e no poste autoaterrado (estrutura C) o ponto de referência será através de uma sela metálica instalada em torno do poste, na altura de 1m em relação ao solo.

O eletrodo de potencial deve estar posicionado conforme modelo da Figura 20. Serão realizadas quatro medições no perímetro em torno da estrutura em teste, simulando os possíveis caminhos de aproximação do poste.

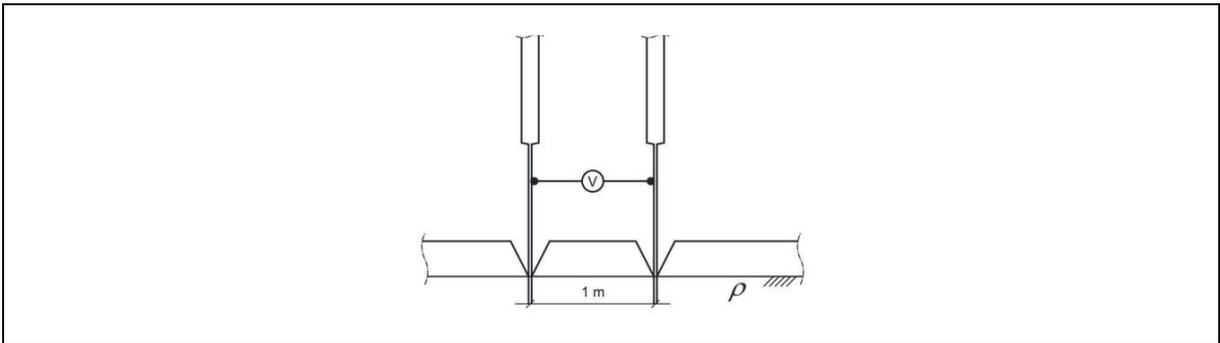
Figura 20. Medição de potencial de toque pelo método 1.



Fonte: NBR 15749 (2009)

Para medição do potencial de passo serão utilizados dois eletrodos de potencial enterrados no solo a uma distância de 1 metro entre eles. Os eletrodos devem estar a uma distância aproximada do poste onde foi energizado o aterramento, verificando a medição pelo voltímetro digital conectando seus terminais conforme demonstra a Figura 21. Serão realizadas quatro medições no perímetro em torno da estrutura em teste, simulando os possíveis caminhos de aproximação do poste.

Figura 21. Medição de potencial de passo pelo método 1.

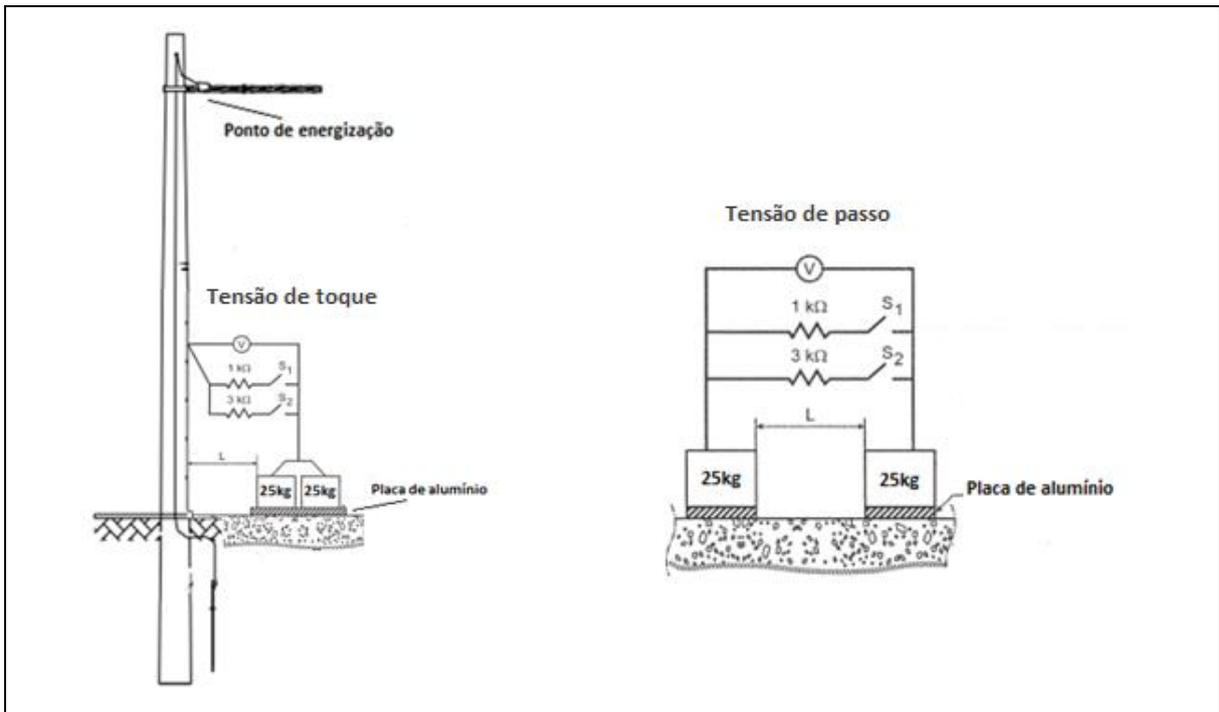


Fonte: NBR 15749 (2009)

Para uma avaliação precisa dos resultados é importante levar em consideração os valores de resistência de contato do pé com o solo, encontrados próximos da estrutura. Com essa investigação é possível determinar a tensão aplicada diretamente à pessoa (NBR 15479, 2009).

Para essa etapa do experimento serão utilizadas duas placas de alumínio com base de 200 cm², representando a área de contato do pé com o solo, sobre feltro embebido em uma solução salina saturada. Sobre cada placa aplicar um peso de 25 Kg que representa o peso de um indivíduo de 50 Kg. Para simular a resistência do corpo humano será conectada uma resistência de 1000 Ω entre as placas, esse valor como resistência do corpo humano é normalmente adotado por diversos padrões internacionais como IEC, IEEE, etc. A representação da medição de tensão de toque e passo para encontrar a resistência de contato está ilustrada na Figura 22. Para enriquecer o estudo, será feita a medição inicialmente com o solo seco e posteriormente com o solo molhado (úmido) (NBR 15479, 2009).

Figura 22. Medição de tensão para encontrar a resistência de contato.



Fonte: NBR 15749 (2009)

Durante a realização dos experimentos a tensão encontrada nos terminais da resistência de 1000Ω é a tensão que uma pessoa estaria submetida durante um contato acidental. Para determinar a resistência de contato entre o pé e o solo, será realizada uma medição com a resistência de 1000Ω e outra com a resistência de 3000Ω relacionando os valores com o circuito equivalente, e utilizando as equações de (1) a (6).

Para a tensão de toque, utiliza-se as equações (1) e (2):

$$V_f = V_{1K} + \frac{V_{1K}}{1000} \times \frac{2R_{ct}}{2} \quad (1)$$

$$V_f = V_{3K} + \frac{V_{3K}}{3000} \times \frac{2R_{ct}}{2} \quad (2)$$

Ao resolver o sistema, obtêm-se a equação (3):

$$R_{CT} = \frac{2(V_{3K} - V_{1K})}{\left(\frac{V_{1K}}{1000} - \frac{V_{3K}}{3000}\right)} \quad (3)$$

Para a tensão de passo, obtêm-se as equações (4) e (5):

$$V_f = V_{1K} + \frac{V_{1K}}{1000} \times 2R_{CP} \quad (4)$$

$$V_f = V_{3K} + \frac{V_{3K}}{3000} \times 2R_{CP} \quad (5)$$

Ao resolver o sistema, obtêm-se a equação (6):

$$R_{CP} = \frac{V_{3K} - V_{1K}}{2 \times \left(\frac{V_{1K}}{1000} - \frac{V_{3K}}{3000} \right)} \quad (6)$$

Em que:

V_{1K} - tensão medida nos terminais do resistor de 1000 Ω , expressa em volts (V);

V_{3K} - tensão medida nos terminais do resistor de 3000 Ω , expressa em volts (V);

R_{CT} - resistência de contato pé-solo, simulando a tensão de toque, expressa em ohms (Ω);

R_{CP} - resistência de contato pé-solo, simulando a tensão de passo, expressa em ohms (Ω);

3.7.2 Método de medição 2

Este método utiliza um terrômetro digital de alta frequência para levantamento dos dados, a medição será baseada no procedimento da CPFL GED 17372. A medição de toque será realizada através de uma haste instalada a 1 metro do ponto a ser medido. Esta haste recebe o cabo de medição de potencial do aparelho. O ponto de referência da malha de aterramento é a parte metálica no poste onde se deseja medir a tensão de toque, como exemplificado na Figura 23 (CPFL, 2018).

O valor da tensão de toque será encontrado conforme a equação 7:

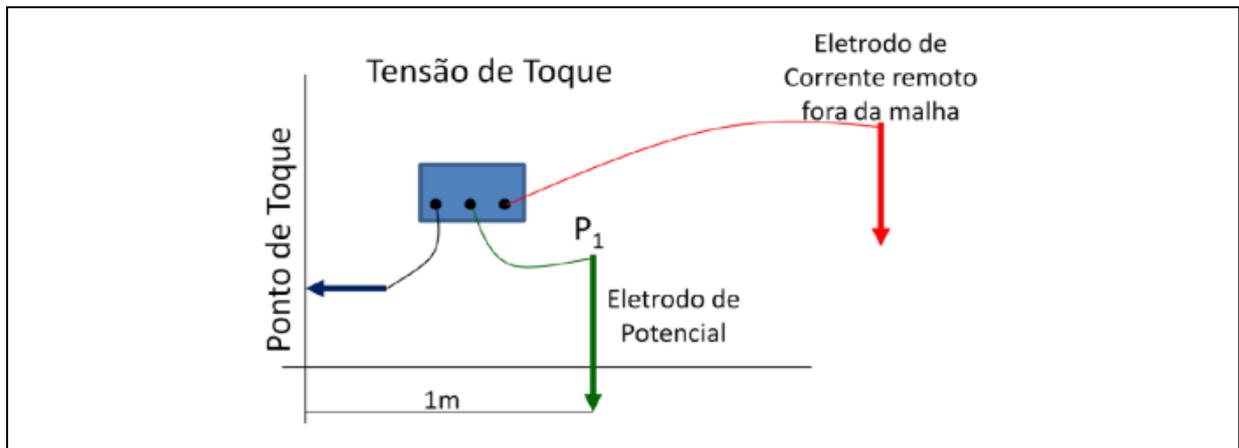
$$V_{toque} = I_{terra} \times R_{medido} \quad (7)$$

Em que:

I_{terra} – corrente medida durante energização do aterramento, expressa em ampères (A);

R_{medido} – resistência medida entre eletrodo P1 e ponto de toque, expressa em ohms (Ω);

Figura 23. Medição de potencial de toque pelo método 2.



Fonte: CPFL (2018)

A medição de passo será realizada através de uma haste, instalada a 1 metro do ponto da haste onde foi realizada a medição da tensão de toque do passo anterior, realizando nova medição. A diferença entre as medições representa o valor de tensão de passo, exemplificado na Figura 24.

O valor da tensão de passo será encontrado segundo a equação 8:

$$V_{passo} = I_{terra} \times (R_{medido1} - R_{medido2}) \quad (8)$$

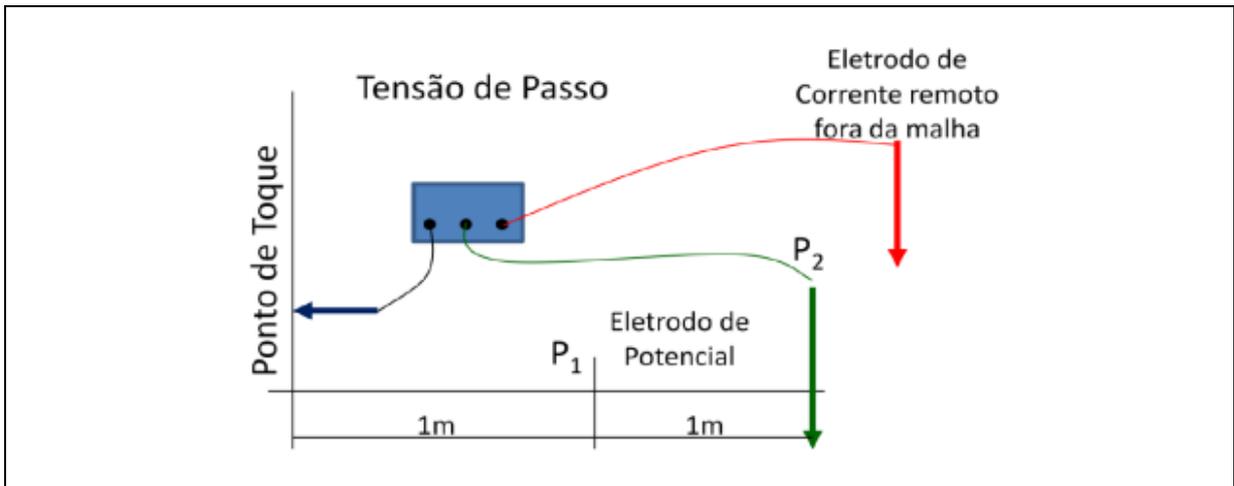
Em que:

I_{terra} – corrente medida durante energização do aterramento, expressa em ampères (A);

$R_{medido1}$ – resistência medida entre eletrodo P1 e ponto de toque, expressa em ohms (Ω);

$R_{medido2}$ – resistência medida entre eletrodo P2 e ponto de toque, expressa em ohms (Ω);

Figura 24. Medição de potencial de passo pelo método 2.



Fonte: CPFL (2018)

3.8 POTENCIAIS DE TOQUE E PASSO TOLERÁVEIS E AVALIAÇÃO

Os potenciais de toque e passo medidos serão comparados aos potenciais toleráveis. Os valores não podem ultrapassar os limites suportados pelo corpo humano.

Para esse estudo serão considerados defeitos de longa duração, aqueles que não sensibilizam os dispositivos de proteção. A corrente permissível pelo corpo humano de longa duração, é definida como a corrente provocada por uma tensão de toque ou passo, cujo corpo humano pode suportar por um longo período.

3.8.1 Corrente de choque de longa duração

O limite de corrente de choque elétrico de longa duração máximo permissível é aquele que pode circular pelo corpo sem provocar a fibrilação. Esses valores podem ser definidos conforme a Tabela 2 (NBR 15751, 2013).

Tabela 2. Corrente limite de largar de longa duração (I_{chld}).

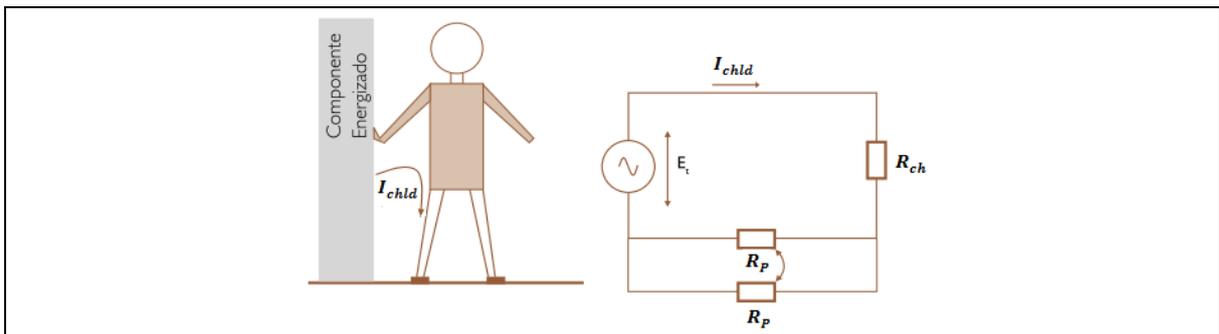
Porcentagem da população que suporta	Homens	Mulheres
99,5 %	9 mA	6 mA
50 %	16 mA	10,6 mA

Fonte: NBR 15751 (2013)

3.8.2 Máxima tensão de toque permissível pelo corpo

Para que ocorra a tensão de toque, basta à pessoa tocar o ponto energizado. A Figura 25 simula essa representação e mostra o circuito equivalente com os parâmetros resistivos envolvidos.

Figura 25. Conceito de tensão de toque.



Fonte: NBR 15751 (2013)

A máxima tensão de toque permissível pelo corpo humano de longa duração é dada pela equação (9):

$$E_{tld} = \left(R_{ch} + \frac{R_{ct}}{2} \right) \times I_{chld} \quad (9)$$

Em que:

R_{ch} - resistência do corpo humano, adotada como sendo 1000 ohms (Ω);

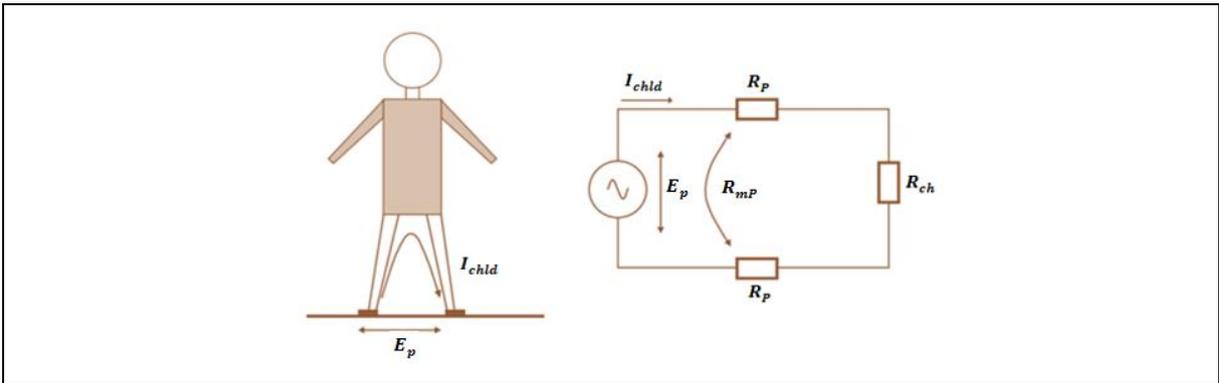
R_{ct} - resistência de contato do pé em relação ao solo, expressa em ohms (Ω);

I_{chld} - máxima corrente de choque tolerável pelo corpo humano, expressa em ampères (A).

3.8.3 Máxima tensão de passo permitível pelo corpo

Quando ocorre uma falta para terra, uma corrente flui pelo aterramento e gera tensões no solo. Nas redondezas do aterramento, essas tensões não devem atingir valores superiores aos permitíveis. O circuito elétrico equivalente pode ser determinado conforme a Figura 26 (NBR 15751,2009).

Figura 26. Conceito de tensão de passo.



Fonte: NBR 15751 (2013)

A máxima tensão de passo permitível pelo corpo humano é dada pela equação (10):

$$E_p = [R_{ch} + 2(R_{cp})] \times I_{chld} \quad (10)$$

Em que:

R_{ch} - resistência do corpo humano, adotada como sendo 1000 ohms (Ω);

R_{cp} - resistência própria de cada pé com relação ao solo expressa em ohms (Ω);

I_{chld} - máxima corrente de choque admissível pelo corpo humano, expressa em ampères (A).

Concluindo a etapa de medições dos potenciais de toque e passo, será feita uma avaliação e comparação dos resultados encontrados com os valores máximos permitíveis, que devem estar dentro dos limites toleráveis para serem considerados seguros.

4 RESULTADOS

No local definido na seção 3.2, foi realizada a energização da descida de aterramento das três estruturas apresentadas na Figura 19 da seção 3.4, e então realizadas as medições de potencial de toque e de passo. A tensão aplicada para energização do condutor de descida do aterramento no momento dos ensaios foi de 227 V, tensão de fase do transformador usado como fonte de alimentação para o ensaio. Como dado relevante ao estudo também se realizou a medição da corrente elétrica circulante em cada um dos aterramentos no momento da energização. Os valores são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Corrente de curto fase/terra medida na descida do aterramento.

Tipo estrutura	Corrente para terra
Poste de Madeira	2,75 A
Poste de Concreto	3,01 A
Poste Autoaterrado	2,93 A

Fonte: Autor (2019)

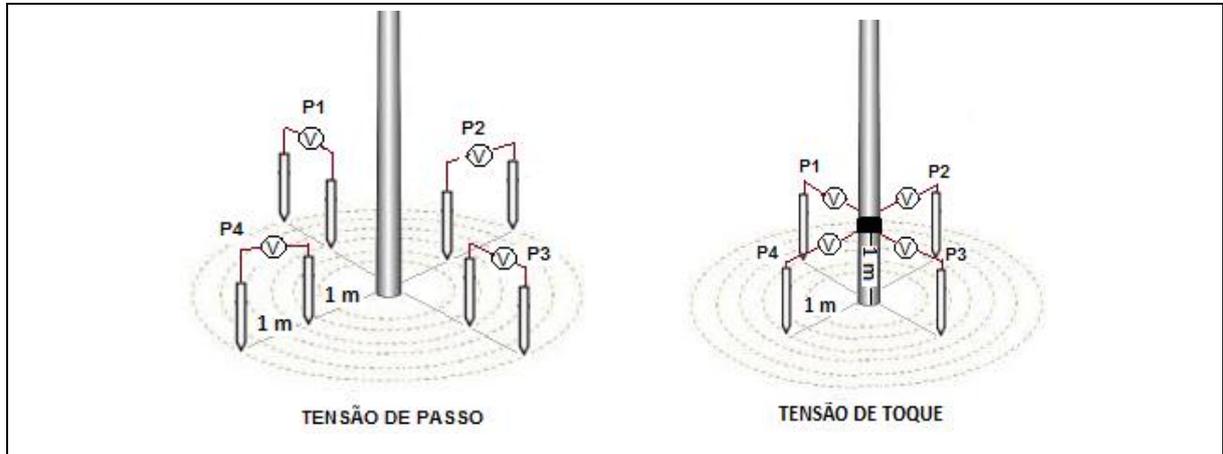
A corrente elétrica medida na descida do aterramento, de cada uma das estruturas, está diretamente relacionada ao valor da resistência elétrica do aterramento. Esses valores de corrente de falta para a terra, não são suficientes para sensibilizar a proteção do circuito em uma rede de distribuição, se comportando como uma carga. Logo, se confirma um defeito com possibilidade de choque de longa duração, conforme as condições avaliadas aqui. Essas medidas também são utilizadas no método 2 para encontrar os potenciais de tensão de toque e passo.

4.1 MEDIÇÕES REALIZADAS PELO MÉTODO 1

Para realizar as medições pelo método 1, foi definido quatro pontos no entorno do perímetro do poste, tanto para tensão de passo, como para tensão de toque. Na tensão de passo, os eletrodos foram cravados no solo, distantes entre si em 1 metro e distante do poste em 1 metro também. Já a tensão de toque, foi medida entre o

eletrodo, distante um metro da estrutura e a sela, sendo essa fixada no poste na altura de 1 metro. Os detalhes podem ser visualizados na Figura 27.

Figura 27. Marcação dos pontos de medição no entorno da estrutura.



Fonte: Autor (2019)

4.1.1 Poste de concreto

As tensões de toque e passo encontradas nas proximidades da estrutura do poste de concreto, durante o ensaio, estão apresentadas na Tabela 4. Na coluna “posição” está indicada a posição dos diferentes pontos em torno do perímetro do poste, onde a medição ocorreu.

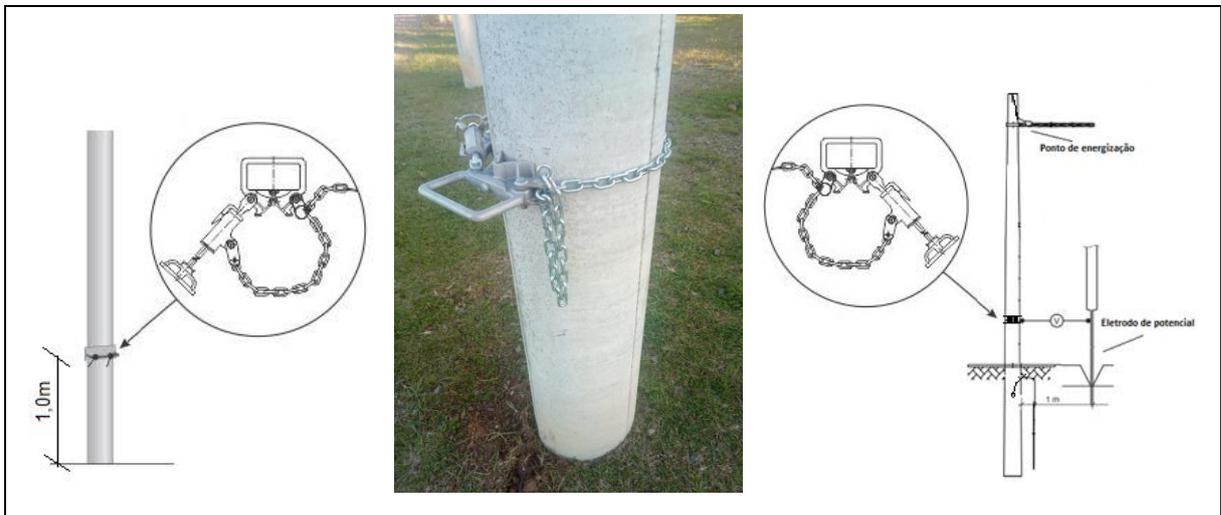
Tabela 4. Tensão de toque e tensão de passo em poste de concreto.

Posição	Tensão de toque (Volts)		Tensão de passo (Volts)
	Condutor interno	Condutor externo	
P1	33,80	68,93	10,28
P2	31,02	66,91	8,27
P3	34,74	70,02	9,73
P4	36,07	71,37	10,30

Fonte: Autor (2019)

Caracteristicamente, no modelo de poste de concreto tronco cônico, a descida do condutor de aterramento pode ser interna ao poste ou externamente, o que permitiu duas condições de medição de tensão de toque nessa estrutura. A primeira opção foi medir diretamente no fio de descida externo ao poste, e a segunda, quando o condutor está interno, foi utilizando uma sela de referência em torno do poste, detalhada na Figura 28.

Figura 28. Detalhe do ponto de medição através da sela instalada no poste.



Fonte: Autor (2019)

4.1.2 Poste de madeira

As tensões de toque e passo encontradas nas proximidades da estrutura com poste de madeira durante o ensaio estão apresentadas na Tabela 5. A coluna “posição” indica cada ponto do perímetro em torno do poste onde a medição ocorreu. Nessa estrutura, o ponto de referência de contato no poste, foi o condutor de descida do aterramento, que sempre será externo.

Tabela 5. Tensão de toque e tensão de passo em poste de madeira.

Posição	Tensão de toque (Volts)	Tensão de passo (Volts)
P1	92,91	5,74
P2	84,83	9,51
P3	90,25	5,04
P4	95,02	7,54

Fonte: Autor (2019)

4.1.3 Poste autoaterrado

As tensões de toque e passo encontradas nas proximidades da estrutura com poste autoaterrado durante o ensaio estão apresentadas na Tabela 6, a coluna “posição” indica cada ponto do perímetro em torno do poste onde a medição ocorreu. Como ponto de referência no poste foi usado uma sela metálica, conforme utilizado no poste de concreto convencional.

Tabela 6. Tensão de toque e tensão de passo em poste autoaterrado.

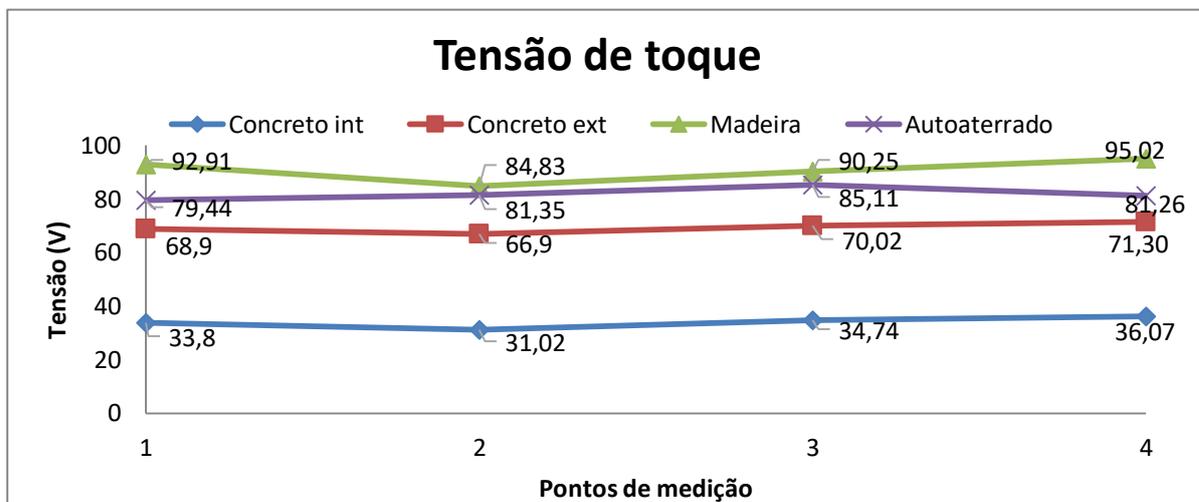
Posição	Tensão de toque (Volts)	Tensão de passo (Volts)
P1	79,44	20,46
P2	81,35	12,44
P3	85,11	14,66
P4	81,26	13,06

Fonte: Autor (2019)

4.1.4 Comparação dos valores do método 1

As medições de potenciais de toque e passo, encontradas nos três tipos de estruturas, podem ser comparadas na Figura 29 (Tensão de Toque) e na Figura 30 (Tensão de Passo).

Figura 29. Medidas de tensão de toque.

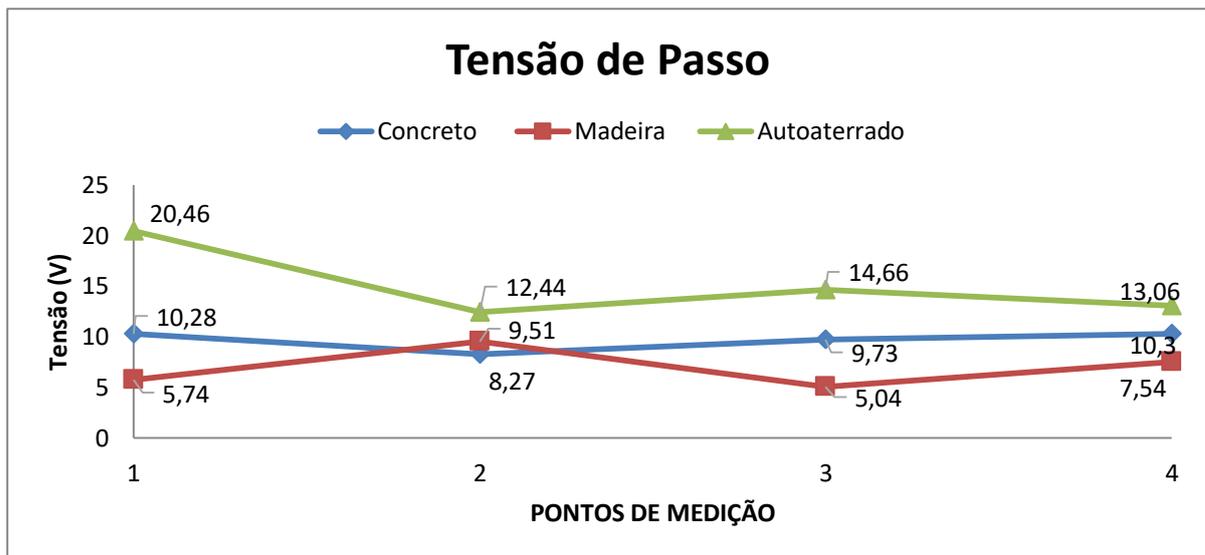


Fonte: autor (2019)

Verifica-se que os valores de tensão de toque, medidos nas estruturas, possuem uma variação em função dos pontos determinados no entorno do poste. No poste de madeira, entre o ponto 2 e o ponto 4 foi identificado a maior variação, alcançando um valor de 10,19 V entre eles. O que chama a atenção, são os valores encontrados na estrutura de concreto. Com o condutor de aterramento interno ao poste, as medições ficaram em torno de 50% menores em relação a medição, na

mesma estrutura, com condutor externo. Essa diferença pode ser justificada, pois no caso do condutor interno ao poste, o mesmo não permite contato direto para medição com partes metálicas, reproduzindo apenas os efeitos no concreto e ferragem do poste.

Figura 30. Medidas de tensão de passo



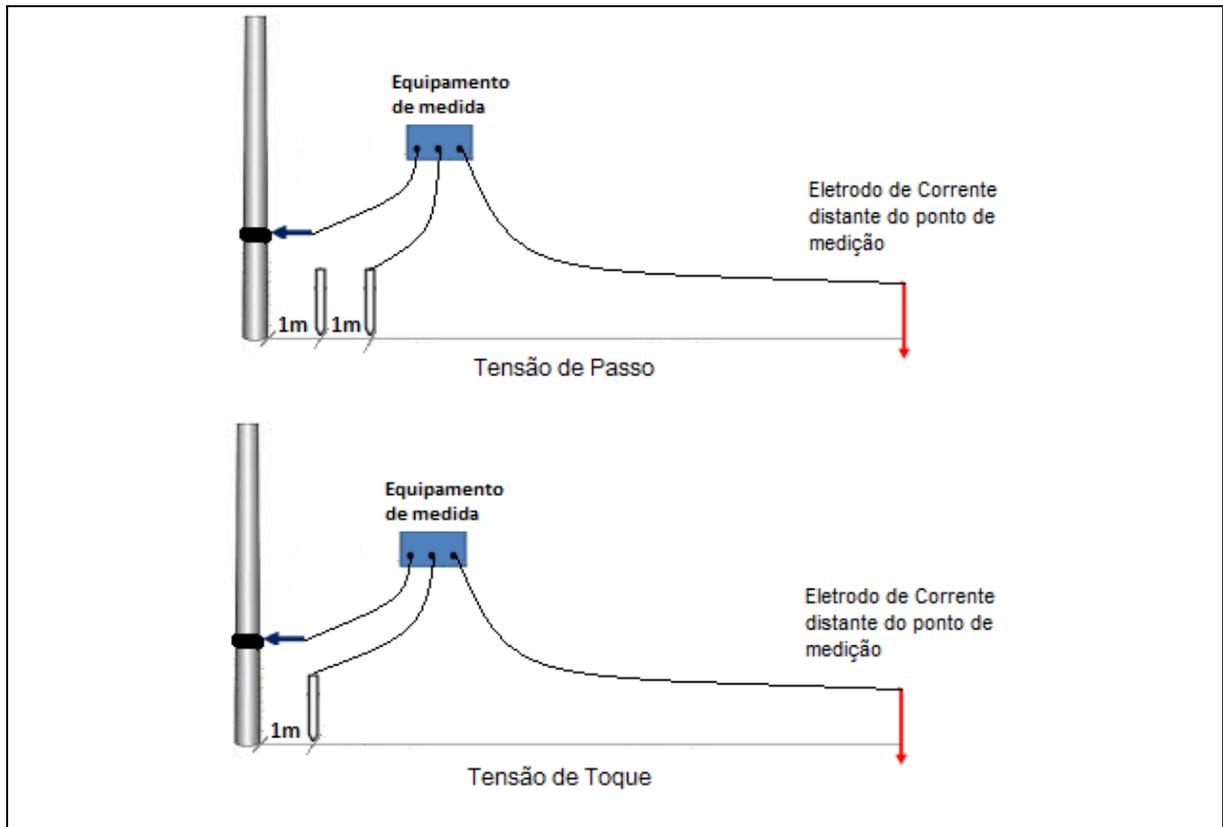
Fonte: autor (2019)

Na tensão de passo, foram encontrados valores consideravelmente menores em relação à tensão toque. Entre as estruturas, o maior valor medido para tensão de passo, que foi encontrado no ponto 1 do poste autoaterrado, ficou 15,42 V acima do ponto de menor valor, que foi verificado no poste de madeira. Importante destacar o fato de existir pontos, na mesma estrutura, com grande oscilação nas medidas, sendo essa uma questão de atenção para análise.

4.2 MEDIÇÕES REALIZADAS PELO MÉTODO 2

A técnica de medição usada no método 2, que necessita de uma distância de 30 metros em linha reta, para fixação dos eletrodos de referência, possibilitou fazer apenas uma medição de tensão de toque e uma medição de tensão de passo para cada uma da estrutura. O arranjo dos pontos de medição para esse método está mostrado na Figura 31.

Figura 31. Modelo de montagem para medição pelo método 2.



Fonte: Autor (2019)

A medição dos valores de resistência nos pontos de toque e passo conforme descrito na seção 3.7.2, foram levantados conforme mostra a Tabela 7. Esses valores foram submetidos aos cálculos das equações 7 e 8, e resultando nas respectivas tensões de toque e passo.

Tabela 7. Tensão de toque e passo pelo método 2.

Tipo de estrutura	Resistência (Ω)		Tensão de toque (V)	Tensão de passo (V)
	Medição			
	P1	P2	Calculada	
Poste Madeira	30,6	32,8	84,15	6,05
Poste Concreto	25,6	28,8	77,05	9,63
Poste Autoaterrado	28,3	31,3	83,79	8,79

Fonte: autor (2019)

4.3 COMPARAÇÕES ENTRE OS MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Ambos os métodos utilizados são sensíveis às condições do ensaio, particularmente, o método 2 apresentou resultados mais aproximados para tensão de toque, com diferença entre o maior e menor valor medido de 7,1 V, já para tensão de passo a diferença entre o maior e menor valor medido ficou em 3,58 V. Este método utiliza equipamento de alta frequência (25 kHz), isentando possíveis interferências que podem ser causadas pela baixa frequência da rede de energia. No método 1, que utiliza a técnica de medição direta do potencial, usando um voltímetro entre dois pontos de contato, mostrou uma diferença entre os extremos de 28,12 V para tensão de toque e 15,4 V para a tensão de passo, sendo evidente a distinção de desempenho em cada estrutura e ponto de medição.

Esse comportamento de variação está relacionado à resistividade do solo nos pontos de medição, pois se percebeu aumento ou diminuição do valor medido em pontos que havia maior camada de brita no solo, em comparação a outros pontos do solo onde existia apenas grama ou terra. A Tabela 8 apresenta, em percentual, a variação entre os valores médios do método 1 em comparação com valor do método 2.

Tabela 8. Comparação percentual entre os dois métodos.

Tipo de estrutura	Tensão de Toque			Tensão de Passo		
	Método 1 (V)	Método 2 (V)	Variação (%)	Método 1 (V)	Método 2 (V)	Variação (%)
Poste Madeira	90,58	84,15	7,64	6,55	6,05	8,26
Poste Concreto	69,26	77,05	11,24	9,56	9,63	0,73
Poste autoaterrado	81,73	83,79	2,51	14,59	8,79	65,98

Fonte: autor (2019)

Mesmo com a diferença encontrada nas medições realizadas pelo método 1 e 2, pode-se afirmar que os dois procedimentos tendem a uma aproximação de valores para as respectivas estruturas e pontos de medição, caracterizando assertividade dos resultados. Exceção encontrada na tensão de passo no poste

autoaterrado, que apresentou uma variação percentual entre os dois métodos de 65,98%, justificado pela variação do tipo de solo no entorno dessa estrutura.

4.4 RESISTÊNCIA DE CONTATO DO PÉ COM O SOLO

Os valores de tensão de toque e tensão de passo medidos para encontrar a resistência de contato do pé com o solo, conforme descrito na seção 3.7.1.3 estão descritas na Tabela 9. Os valores foram encontrados em dois momentos, um com o solo úmido e outro com o solo seco, descritos nas respectivas colunas.

Tabela 9. Tensão de toque e passo para resistência de contato pé/solo.

Resistência (Ω)	Tensão de Toque – Valor medido (Volts)		Tensão de Passo – valor medido (Volts)	
	Solo seco	Solo úmido	Solo seco	Solo úmido
0	77,9	79,6	13,16	23,12
1000	16,38	47,23	0,71	6,79
3000	34,97	64,66	1,94	12,82

Fonte: autor (2019)

Para chegar ao valor de resistência de contato do pé com o solo, foi inserido os valores de tensão na equação 3 para tensão de toque, e na equação 6 para tensão de passo, conforme descrito na seção 3.7.1.3. Os resultados dos cálculos estão apresentados a seguir:

Resistência de contato para tensão de toque:

$$R_{CT} = 7871,5\Omega \cong 7,8k\Omega \text{ (solo seco)}$$

$$R_{CT} = 1357,6\Omega \cong 1,4k\Omega \text{ (solo úmido)}$$

Resistência de contato para tensão de passo:

$$R_{CP} = 9710,5\Omega \cong 9,7k\Omega \text{ (solo seco)}$$

$$R_{CP} = 1198,0\Omega \cong 1,2k\Omega \text{ (solo úmido)}$$

4.5 AVALIAÇÃO DO RISCO DE CHOQUE ELÉTRICO

Para avaliar o risco de choque elétrico é preciso encontrar o real potencial que uma pessoa é submetida nas condições ensaiadas. Esses valores foram encontrados aplicando as tensões medidas no ensaio nas equações descritas na seção 3.8 e comparadas com os limites toleráveis.

Utilizando a resistência de contato do pé com o solo, descrita na seção 4.4, é calculado os limites de tensão aceitáveis tanto de toque como de passo, para solo seco e solo úmido. O resultado dos cálculos está demonstrado na Tabela 10, onde a coluna “Corrente de choque” apresenta valores de referência suportável para a população, homens e mulheres, conforme a corrente elétrica suportável pelo corpo humano, mostrado na seção 3.8, em conformidade com a norma NBR 15751.

Tabela 10. Limites de potencial de toque e passo aceitáveis.

Corrente de choque (mA)	Limite de tensão de toque (V)		Limites de tensão de passo (V)	
	Solo seco	Solo úmido	Solo seco	Solo úmido
6	29,61	10,07	122,52	20,37
9	44,42	15,11	183,78	30,56
10,6	52,32	17,80	216,46	35,99
16	78,97	26,86	326,73	54,33

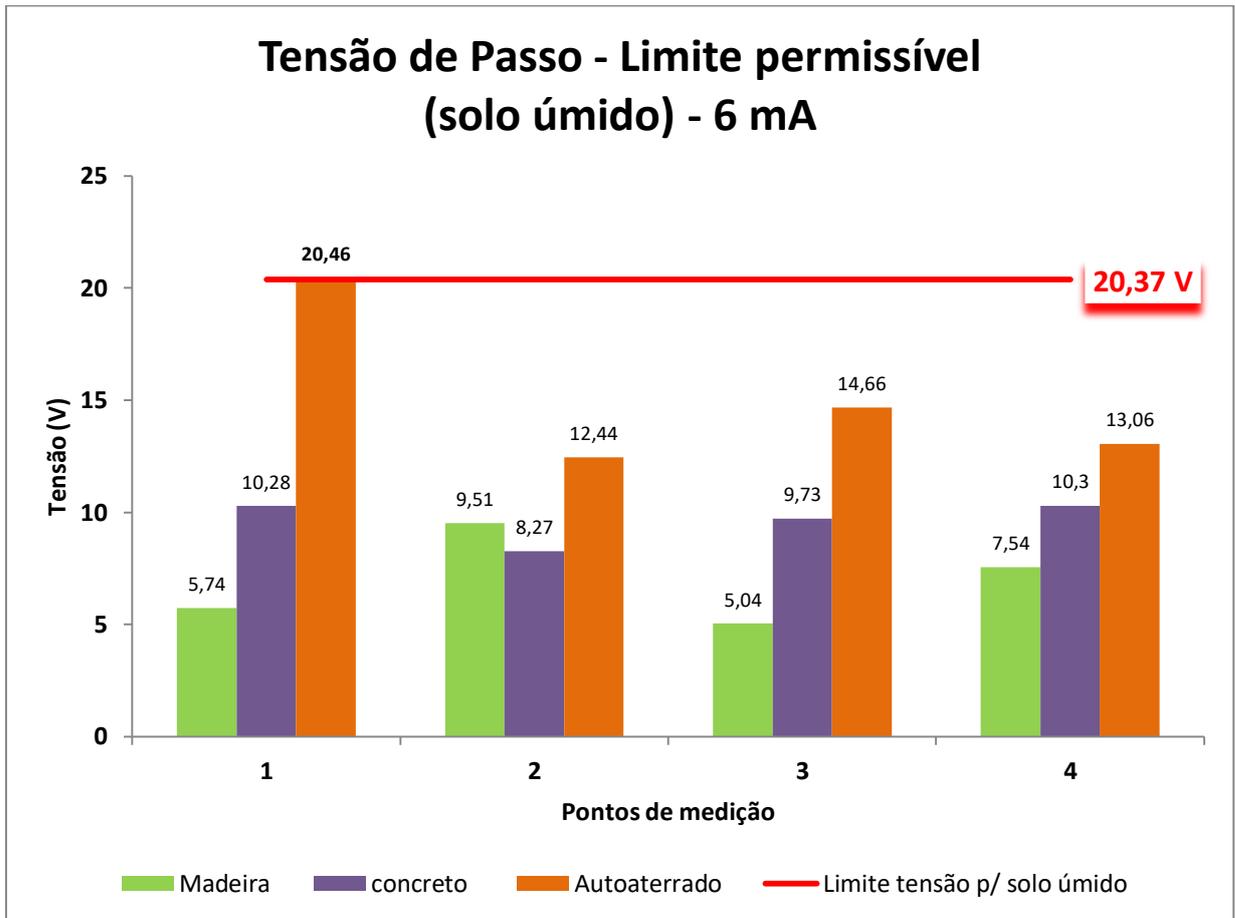
Fonte: autor (2019)

4.5.1 Risco de choque elétrico para tensão de passo

Para analisar se as condições de tensão de passo, encontradas no ensaio, oferecem ou não risco de choque elétrico, comparam-se os valores medidos com os limites aceitáveis, em solo seco e úmido. A Figura 32 mostra a tensão de passo, medida nas três estruturas em estudo, sendo comparado com o limite de tensão de passo permissível em solo úmido no pior caso previsto, sendo esse para uma corrente de choque de 6 mA e tensão limite de 20,37 V.

É possível verificar que apenas em um dos pontos de medições, especificamente na estrutura do poste autoaterrado, se excedeu o limite permitido.

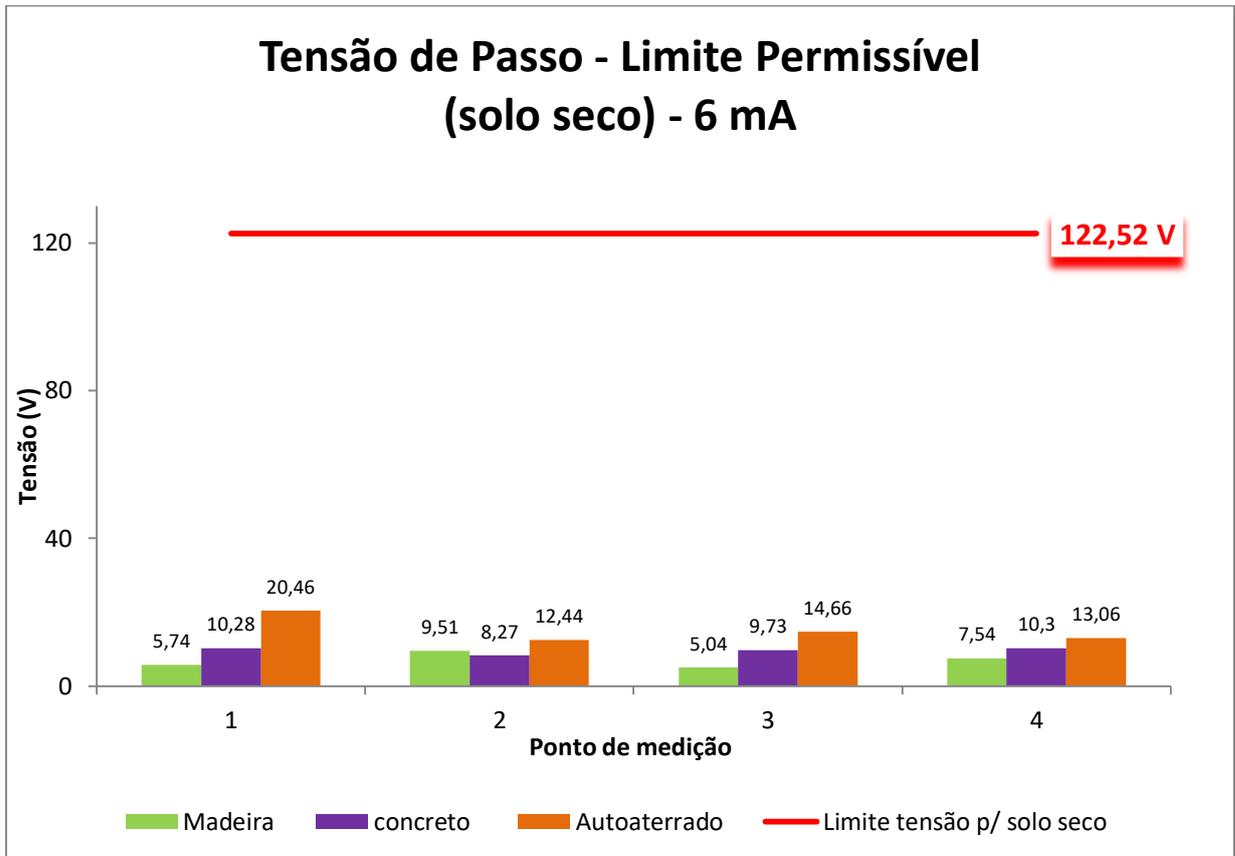
Figura 32. Limite tolerável para tensão de passo com solo úmido – 6 mA.



Fonte: autor (2019)

Na figura 33, a mesma verificação é feita, porém com solo seco, onde a menor tensão limite para essa condição é de 122,52 V. Nesse cenário, todos os pontos medidos em cada uma das estruturas avaliadas, ficaram abaixo do limite tolerável.

Figura 33. Limite tolerável para tensão de passo com solo seco – 6 mA.

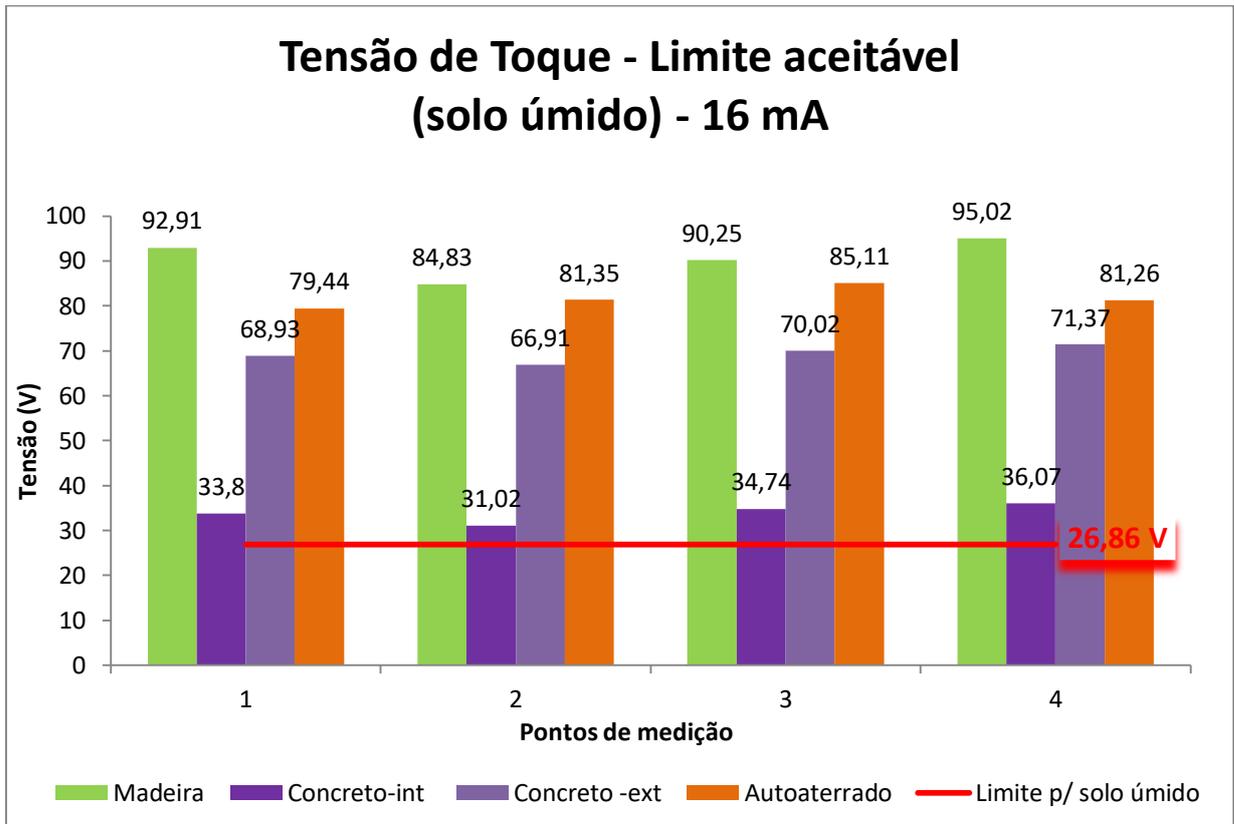


Fonte: autor (2019)

4.5.2 Risco de choque elétrico para tensão de toque

O risco de choque elétrico para tensão de toque é verificado ao comparar os pontos medidos em cada uma das estruturas, com o valor limite calculado para solo seco e solo úmido. A Figura 34 mostra o comparativo das tensões medidas e o maior valor de tensão suportável pelo corpo humano, condição mais favorável prevista pelo estudo em solo úmido, que é de 16 mA e tensão de 26,86 V. Observa-se que todas as medidas ficaram superiores ao limite aceitável, sendo desnecessário comparar os demais casos em solo úmido que possuem valores ainda inferior.

Figura 34. Limite tolerável para tensão de toque com solo úmido – 16 mA.

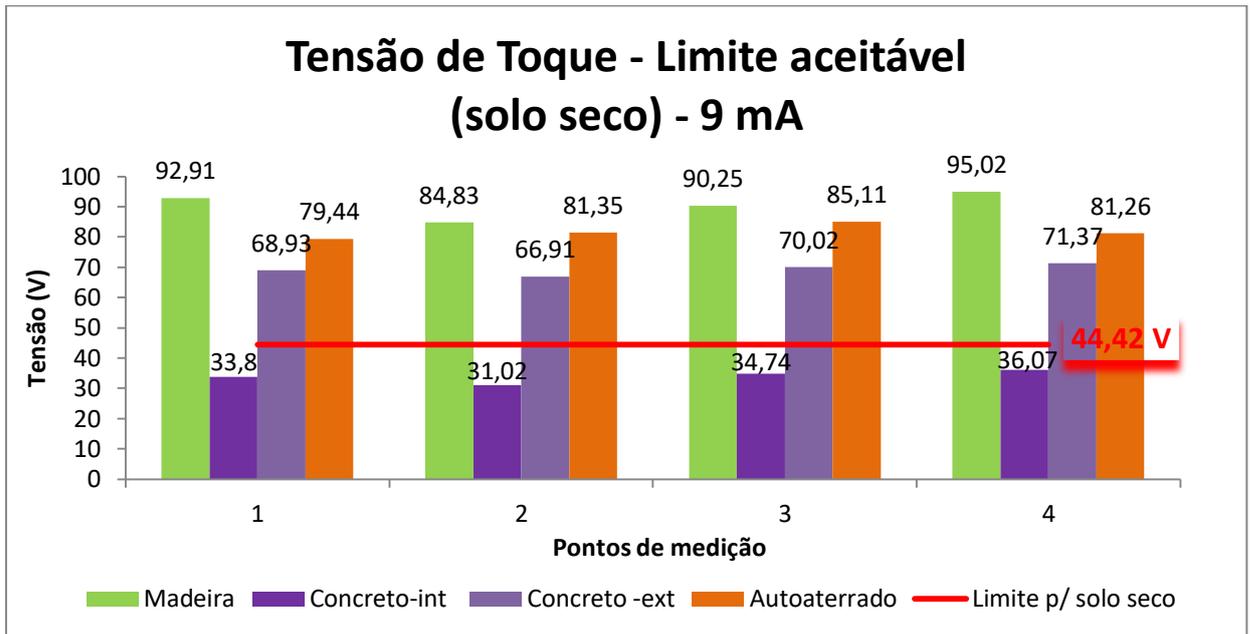


Fonte: autor (2019)

Na situação de solo seco, avaliando o pior caso aceitável, que admite uma corrente de choque de 6 mA, a tensão permissível é de 29,61 V, ficando todos os pontos de medição acima do aceitável.

Nos demais casos, mais favoráveis, a tensão medida ultrapassou o limite tolerável em alguns pontos. Na primeira situação, onde foi calculada a tensão máxima permitida de 44,42V para uma corrente de choque de 9 mA, apenas a estrutura com condutor de aterramento interno ao poste de concreto ficou abaixo do valor limite, conforme destaca a Figura 35.

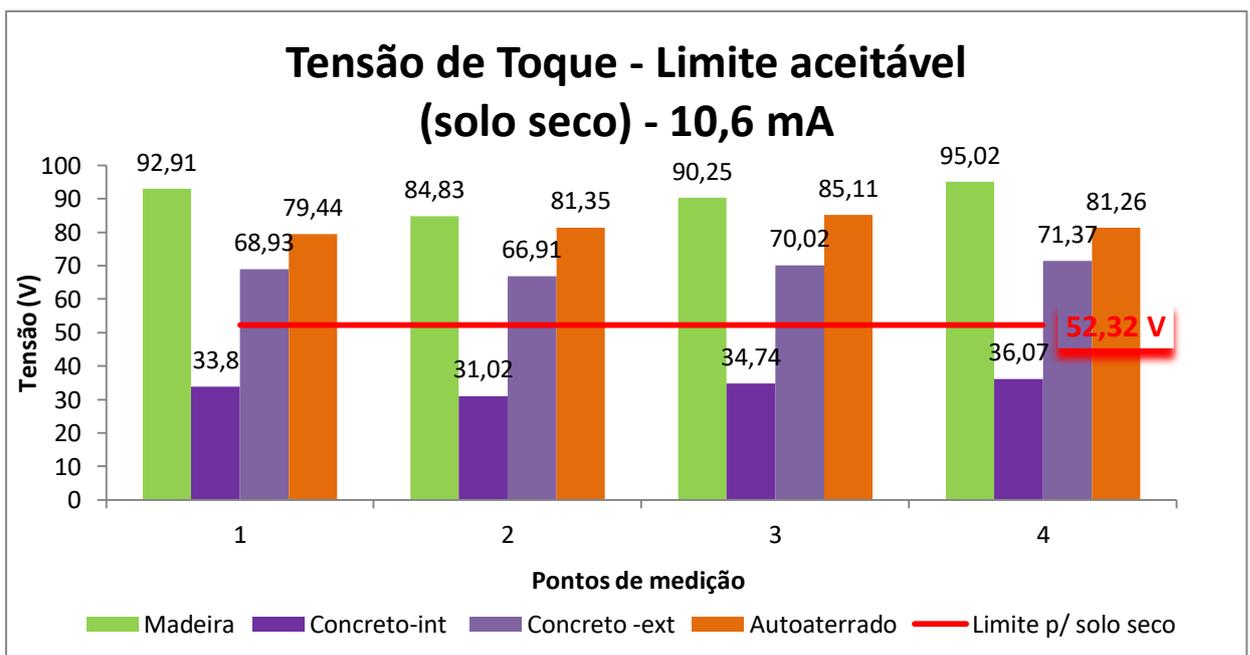
Figura 35. Limite tolerável para tensão de toque com solo seco – 9 mA.



Fonte: autor (2019)

O caso seguinte, que considera uma corrente aceitável de 10,6 mA e tensão limite calculada de 52,32 V, seguiu-se o mesmo comportamento do caso anterior, onde apenas a estrutura de concreto com o condutor interno ao poste ficou abaixo do permitido. Os dados são mostrados na Figura 36.

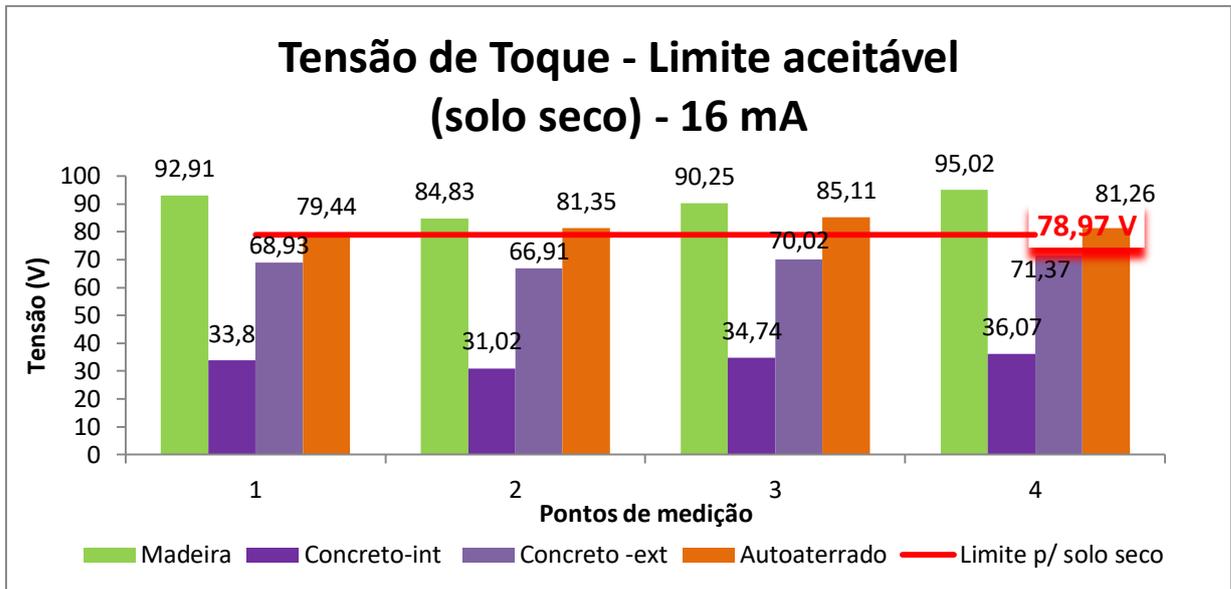
Figura 36. Limite tolerável para tensão de toque com solo seco – 10,6 mA.



Fonte: autor (2019)

No último caso aceitável, com corrente de choque de 16 mA, a tensão limite calculada ficou em 78,97V, observa-se que as medidas de tensão no poste de madeira e concreto autoaterrado, em todos os pontos ficaram acima do limite máximo tolerável para choque elétrico. As medidas realizadas no poste de concreto, tanto para condutor de aterramento interno e externo, estão abaixo do valor máximo aceitável. Os dados podem ser observados na Figura 37.

Figura 37. Limite tolerável para tensão de toque com solo seco – 16 mA.



Fonte: autor (2019)

4.6 RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Como forma de comprovação da qualidade do aterramento das estruturas em teste, foi realizada a medição da resistência de aterramento nos três postes utilizados no ensaio. Nessa medição foi possível verificar se os aterramentos estão atendendo os valores previstos na seção 2.3.4.

Ao analisar as medições de resistências de aterramento, se identificou que todas as três estruturas estão adequadas ao valor máximo previsto na norma. O poste de concreto, entre as três estruturas avaliadas, obteve o menor valor de resistência de aterramento com 32,8 Ω , uma diferença de 36,8% menor em relação ao poste de madeira, que possui 51,9 Ω . Os valores de cada estrutura estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resistência de aterramento das estruturas em teste.

Tipo estrutura	Resistência de Aterramento
Poste de Madeira	51,9 Ω
Poste de Concreto	32,8 Ω
Poste Autoaterrado	42,3 Ω

Fonte: Autor (2019)

A diferença da resistência do aterramento está ligada com a variação nos potenciais encontrados no entorno das estruturas. A estrutura com menor valor de resistência de aterramento, caso do poste de concreto, também apresentou o melhor desempenho ao risco de choque por tensão de toque e passo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou como proposta, avaliar o risco de choque elétrico em descidas de aterramento, quando uma energização acidental venha a ocorrer. A ideia de contribuir com medidas de segurança que visam evitar acidentes, pode ser verificada em virtude dos resultados, que também justificam o uso de investimento em novas tecnologias com melhor controle de risco.

Os resultados encontrados nas medições, ao serem comparados com os valores de referência determinados pela norma NBR 15751, apresentam casos que revelaram a existência do risco de choque elétrico, principalmente para a tensão de toque, onde foi observado em mais de um momento a ocorrência de valores superiores aos limites toleráveis pelo corpo humano.

Em razão da dificuldade em constatar as possíveis faltas, que provoque a energização da descida do aterramento, antes de se iniciar a manutenção na rede, o mais pertinente é se padronizar o uso de técnicas preventivas através de procedimento de trabalho. Entre as medidas de segurança, hoje adotadas pelas concessionárias de energia, destaca-se o teste de ausência de tensão na descida do aterramento por meio do detector de tensão.

Porém, durante os ensaios, realizando este teste nas estruturas, observou-se que o equipamento não acusou presença de tensão, dando a entender que a estrutura se encontrava segura, diferente do que foi mostrado em alguns dos resultados encontrados. Vale ressaltar que o equipamento utilizado no teste possui faixa de atuação entre 70 a 1000 V.

Como ponto de destaque pode-se citar:

- Os diferentes tipos de estruturas mostraram fragilidades, expondo a possibilidade de risco de choque elétrico na descida do aterramento, que teoricamente deveria ser seguro.
- A nova tecnologia do poste autoaterrado, em relação às estruturas convencionais, mostrou desempenho inferior nos resultados, não sendo um diferencial na prevenção do risco de choque elétrico.

- Nas simulações em solo úmido, os resultados mostraram que o risco se torna presente em relação ao solo seco. E nenhuma das medidas de segurança tem isso como ponto relevante.
- O teste de verificação de ausência de tensão, realizado hoje por algumas das concessionárias de energia não se mostrou eficiente, justificando implantar novas medidas de segurança para o risco apresentado.

As normas de segurança orientam sobre verificações de potenciais em partes metálicas da estrutura, porém se verificou durante o ensaio, potencial de risco também na superfície de concreto da estrutura. Como sugestão de medida preventiva, pode-se utilizar proteção isolante no entorno do poste onde existe risco de contato, através de barreiras ou invólucros. Essa medida evita o contato acidental com a estrutura, sendo capaz de controlar o risco de choque elétrico por tensão de toque.

Uma das verificações deparadas durante a implementação dos testes, foi a variação dos resultados encontrados. Em pontos onde o solo era gramado, foi possível encontrar valores mais constantes, já onde o solo estava coberto por pedra brita, o resultado apresentou grande variação, inclusive se mostrando favorável a prevenção do risco de choque elétrico.

Conhecidamente, as concessionárias utilizam a pedra brita, em volta da estrutura de transformadores e subestações. Essa é uma forma de aumentar a resistência de contato entre o pé e solo, aumentando também a suportabilidade aos limites toleráveis de choque, garantindo assim um ambiente mais seguro. Essa medida, usada no entorno de postes com descida de aterramento, pode ser uma ação preventiva a ser adotada, diminuindo o risco de choque por tensão de passo e tensão de toque.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se a avaliação de outros componentes que venham a interferir nos potenciais de toque e passo durante uma energização acidental, tais como:

- Realizar o estudo da resistividade do solo, buscando identificar limites aceitáveis em termos de proteção e segurança, e o quanto pode influenciar no comportamento do aterramento elétrico e nos potenciais de risco;

- Analisar a qualidade do sistema de aterramento, em novas instalações e velhas instalações, identificando o melhor desempenho e condições mínimas necessárias para garantir um potencial seguro;
- Buscar identificar outros tipos de estruturas, capazes de prevenirem o risco de choque elétrico na descida de aterramento, como exemplo o poste de fibra que possui característica isolante.
- Desenvolver um sistema de proteção eficiente e capaz de atuar frente a uma corrente desviada para a terra, sem que comprometa a confiabilidade do sistema, garantindo assim maior segurança para a instalação.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 15688. **Redes de distribuição aérea de energia elétrica com condutores nus**. Válida a partir de 20/05/2012.

ABNT NBR 15749. **Medição da resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento**. Válida a partir de 13/09/2009.

ABNT NBR 15751. **Sistemas de aterramento de subestações – Requisitos**. Válida a partir de 01/08/2013.

ABNT NBR 16527. **Aterramento para sistemas de distribuição**. Válida a partir de 06/10/2016.

AMORIM, Gustavo. **Elétrica Segura: O choque Elétrico**, 2015. Disponível em: <<http://eletricaseg.wixsite.com/eletricasegura/single-post/2015/01/30/O-choque-el%C3%A9trico>> Acesso em: 17 out. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSCIENTIZAÇÃO PARA OS PERIGOS DA ELETRICIDADE – ABRACOPEL. **Anuário Estatístico Abracopel de Acidentes de Origem Elétrica**, 2018. Disponível em: <<http://a7d4083.contato.site/inscricaoanuario-2018>>. Acesso em: 11 de nov. de 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA-ABRADEE. **Redes de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 05 out. de 2018.

CPFL Energia. GED 14376 - **RGE - Manual do Eletricista Padrão (MEP) Introdução**, Instrução, São Paulo, 2016a.

CPFL Energia. GED 14377 - **RGE - Manual do Eletricista Padrão (MEP) Tarefas Básicas**, Instrução, São Paulo, 2016b.

CPFL Energia. GED 14380 - **RGE - Manual do Eletricista Padrão (MEP) Tarefas Técnicas 12 a 30**, Instrução, São Paulo, 2016c.

CPFL Energia. GED 16409 - **Poste Auto Aterrado - Especificação Técnica**, Manual, São Paulo, 2017a.

CPFL Energia. GED 17472 - **Procedimentos e Critérios de Medição de Malha de Aterramento de SEs e LTs Energizadas e Sem Desconexão**, Manual, São Paulo, 2018.

CPFL Energia. GED 185 - **Aterramentos na Distribuição**, Instrução, São Paulo, 2016d.

CPFL Energia. GED 3613 - **Aterramento - Montagem**, Manual, São Paulo, 2017b.

ENERSUL - Orientação Técnica OT-01. **Fornecimento de energia elétrica no sistema monofásico com retorno por terra (MRT)**, 2001.

JÚNIOR, Joab Silas da Silva. "**Choques Elétricos**"; Brasil Escola. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/choques-eletricos.htm>>. Acesso em 30 de out. de 2018.

KINDERMANN, G; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento elétrico**. 3. ed. Porto Alegre: Editora Sagra DC Luzzatto, 1995.

KINDERMANN, Geraldo. **Choque Elétrico**. 2. Ed. Porto Alegre: Editora Sagra Luzzatto, 2000.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO – MTE. **Norma Regulamentadora nº 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**, Portaria nº 598, de 7 de dezembro de 2004.

PIZZALI, Luis Fernando Ochoa - **Cálculo de fluxo de potência em redes de distribuição com modelagem a quatro fios**. Universidade Estadual Paulista - Ilha Solteira – São Paulo: Maio de 2003.

PROCOBRE. **Aterramento Elétrico**. São Paulo, 2001. Disponível em: <<https://www.procobre.org/pt/publicacion/manual-de-aterramento-eletrico/>>. Acesso em 31 out. de 2018.

RIBEIRO, Fernando Selles, PAZZINI, Luiz Henrique Alves, KURAHASSI, Luiz Fernando. **O método dos elementos finitos na análise do aterramento do sistema monofilar com retorno por terra**. ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000200027&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 31 out. 2018.

SANTOS, M. A. da S. **Choque elétrico, um verdadeiro perigo**. Mundo Educação. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/choque-eletrico-um-verdadeiro-perigo.htm>> Acesso em 31 de out. de 2018.