

UM ESTUDO DO USO DA BASE ENGASTADA DOS POSTES DE CONCRETO COMO ATERRAMENTO PARA REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO

A Feasibility Study on the Use of Concrete Pole Bases as a Grounding Topology for Distribution Systems

Deyvi Saquetti¹  orcid.org/0000-0001-5375-0217

Hugo Almaguer Dominguez^{1,2}  orcid.org/0000-0002-3215-750X

Vilson Luiz Coelho³  orcid.org/0000-0001-8957-3902

¹ Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Regional de Blumenau, Santa Catarina, Brasil,

² Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica - Mestrado, Universidade Regional de Blumenau, Santa Catarina, Brasil,

³ Faculdade SACT, Criciúma, Santa Catarina, Brasil.

E-mail do autor principal: Deyvi Saquetti deyvi.s@hotmail.com

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo do comportamento das bases engastadas dos postes de concreto quando utilizadas como estruturas de aterramento em redes aéreas de distribuição de energia elétrica. O poste tipo duplo T, o qual é um dos mais empregados nas redes urbanas e rurais, foi avaliado, sendo os resultados comparados aos obtidos para aterramentos com hastes verticais, que é a topologia tradicionalmente utilizada pelas concessionárias de energia. Para esse fim, foram executadas medições experimentais e desenvolvidos modelos numéricos e analíticos, determinando a resistência e a impedância transitória de aterramento de ambas topologias na condição de descarga atmosférica. Além disso, foi feito um estudo térmico mediante modelagem computacional, para verificar se a consequente elevação de temperatura no concreto do poste, devida ao aquecimento provocado pela corrente de surto, seria capaz de danificar a estrutura. A análise dos resultados sinalizou, em determinadas condições específicas, que o uso dos postes comuns de concreto armado como estrutura autoaterrada representaria uma alternativa viável e econômica a ser aplicada nos sistemas de distribuição de energia.

Palavras-Chave: Aterramento elétrico; Redes aéreas de distribuição; Modelagem computacional; Postes de concreto armado.

Abstract

This paper presents a study of the behavior of concrete pole bases under lightning currents and their application as a grounding topology for overhead power distribution lines. For this purpose, the double T-type pole which is one of the most used in urban and rural networks was evaluated. An electromagnetic analysis was performed from measurements, analytical calculations and numerical simulations. Thus, grounding resistance and transient impedance in lightning condition were

determined. The results were compared with those obtained for vertical rods, which is the most common type of grounding topology practiced by power utilities in Brazil. Moreover, a thermal study was made using computational modeling, to check if the temperature rise in the concrete of the pole, due to the heating caused by the atmospheric surge current, would be able to damage the structure. The research results point to the fact that in some situations the use of the reinforced concrete pole bases is shown to be a viable and economical alternative to be applied in power distribution grounding systems.

Key-words: Grounding; Overhead power distribution lines; Computational modeling; Concrete pole.

1 Introdução

No setor elétrico um dos grandes problemas que as concessionárias distribuidoras de energia elétrica enfrentam está diretamente relacionado às consequências provocadas pelas descargas atmosféricas que impactam as redes aéreas, refletindo de forma negativa na qualidade do fornecimento.

Segundo Coelho, a partir de dados coletados de concessionárias que atuam nos estados do Sul do Brasil, estima-se que mais de 300.000 interrupções de fornecimento elétrico das Redes Aéreas de Distribuição (RAD) acontecem por ano tendo como causa exclusiva as descargas atmosféricas. Esse número representa mais do que o 30% do total das interrupções acidentais anuais destas redes [1]. Outro exemplo desta constatação é apresentado por Ávila, em pesquisa onde relata-se que no estado de Minas Gerais as descargas atmosféricas são responsáveis por aproximadamente 80% das interrupções acidentais causadas por fenômenos naturais nas redes de distribuição, o que equivale a 40% do número total de interrupções sofridas por todo o sistema elétrico sob a responsabilidade da CEMIG, principal concessionária do estado [2].

Assim, a busca de alternativas para melhorar o desempenho do sistema de proteção contra descargas atmosféricas nas redes é um quesito prioritário para as concessionárias. Neste contexto, o aterramento elétrico exerce um papel fundamental, pois proporciona um caminho de baixa impedância para a corrente de surto atmosférico em direção ao solo.

No caso específico das RAD, as malhas de aterramento empregadas são geralmente de pequenas dimensões, devido aos custos envolvidos e às restrições impostas pelas limitações de espaço físico para sua instalação. Tipicamente, essas topologias consistem em hastes cilíndricas condutoras enterradas verticalmente no solo, alinhadas e interligadas. A

configuração mais comum é constituída por três hastes de aço cobreado com 2,4 metros de comprimento e espaçadas a 3 metros, enterradas a uma profundidade mínima de 30 centímetros, como ilustrado esquematicamente na Figura 1.

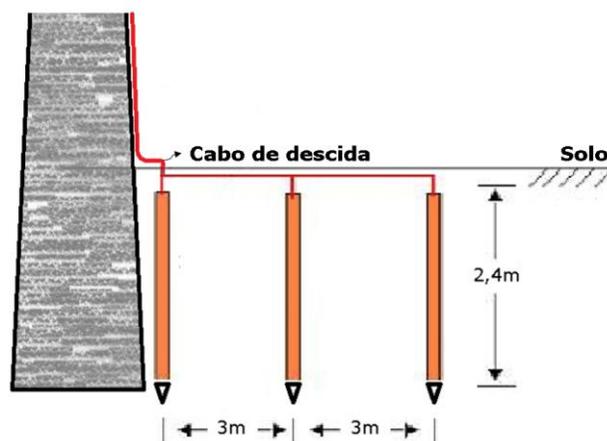


Figura 1: Topologia típica de aterramento elétrico para RAD – Hastes verticais em linha, interligadas.

Fonte: Dos autores.

Cada quilometro da RAD deve possuir, no mínimo, seis pontos de aterramento. Essa quantidade é devida ao fato de que os neutros do lado de baixa tensão da rede devem estar aterrados no máximo a cada 200 metros. Ainda, todos os equipamentos de média tensão instalados nos postes, assim como os finais de linha, devem obrigatoriamente estar aterrados. O aterramento é executado na proximidade da base dos postes, estando ligado pelo cabo de descida às estruturas da rede localizadas no topo (conexões dos neutros, carcaça dos transformadores, para-raios do lado primário, etc.).

Os valores máximos de resistência de aterramento estipulados pelas concessionárias ficam na faixa típica entre 10 e 20 (Ω). O valor específico do limite para cada RAD depende da sua localização (rural ou urbana), do nível da média tensão do lado primário (13,8 kV; 23,5 kV ou 34,5 kV) e da potência instalada do transformador de distribuição.

Todavia, não é incomum que os valores de resistência de aterramento na prática sejam maiores do que os exigidos pelas normas das concessionárias. O Brasil é um país de dimensões continentais com grande diversidade nas características do solo, tendo predominância de regiões que apresentam níveis médios e elevados de resistividade elétrica [1, 3, 4]. Sabendo que a resistência do aterramento é diretamente proporcional à resistividade do solo, em muitos casos os valores medidos de resistência ultrapassam os limites, podendo inclusive atingir a ordem de centenas de Ohms [1, 3, 4, 5].

Desta forma, para obter níveis aceitáveis nas instalações, as empresas devem executar modificações nas topologias, estando entre as ações mais recorrentes: a) aumento do número de hastes alinhadas; b) uso de hastes profundas, para atingir camadas do solo com menor resistividade; c) aumento do espaçamento entre as hastes; d) uso de malhas horizontais reticuladas, com hastes nas intercepções; e) uso de malhas radiais e f) tratamento químico do solo. Em todos os casos, haverá o aumento da complexidade e do custo da obra, além das possíveis restrições de espaço físico para implantar as adequações, principalmente em ambientes urbanos.

Por outro lado, os postes de concreto armado (do tipo duplo T e circulares), são atualmente os mais utilizados nas RAD. Por exemplo, a concessionária CELESC no estado de Santa Catarina possui mais de 150 mil quilômetros de redes de média e baixa tensão [6]. O vão médio entre postes é de 70 metros, aproximadamente. Isto significa que existem mais de 2 milhões de postes instalados, sendo a maioria de concreto (com a exceção de redes rurais antigas, que ainda possuem alguns postes de madeira). Os postes circulares são mais caros e ficam restritos basicamente às redes urbanas e aos troncais primários importantes. Desta forma, os postes duplo T tem uma maior abrangência de instalação (redes urbanas e rurais), representando aproximadamente 60% do total em operação da concessionária.

Os postes de concreto apresentam em sua composição barras de aço longitudinais e suas bases são enterradas no solo a uma profundidade de até dois metros. Devido às bases engastadas permanecerem úmidas sob o solo e à própria composição físico-química do concreto, a resistividade elétrica é baixa. Valores relatados na literatura oscilam entre 30 e 120 (Ωm) [5, 7, 8], faixa semelhante à de um solo classificado de baixa resistividade.

Assim, estes fatos sinalizam para a possibilidade da utilização das bases engastadas dos postes de concreto como uma alternativa técnica e econômica para o aterramento efetivo das RAD, em substituição aos eletrodos convencionais, na tentativa de reduzir custos e os riscos de falhas nas redes.

No Brasil existem poucas pesquisas sobre o assunto, merecendo especial destaque o estudo feito pela Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), que envolveu o projeto, a construção e teste de um protótipo de poste autoaterrado diferenciado para RAD [5]. Segundo esta pesquisa, a estrutura dos postes convencionais foi modificada, substituindo a brita na parte da base engastada por uma massa de concreto condutivo, constituída por coque metalúrgico fino. Desta forma, os autores conseguiram diminuir a resistividade elétrica da base entre cinco e nove vezes, em comparação à dos postes convencionais. Foram executadas instalações piloto substituindo 156 postes convencionais pelo autoaterrados em várias RAD da concessionária no estado de São Paulo. Nesses pontos, os aterramentos foram desligados. Os resultados das medições, antes e depois da substituição, indicaram uma redução média no valor da resistência de aterramento das instalações de 81,8%, comprovando que este tipo de poste garante por si só o aterramento.

Neste contexto, o presente trabalho teve por objetivo desenvolver um estudo, do ponto de vista eletromagnético e térmico, da viabilidade do uso das bases engastadas dos postes de concreto convencionais como topologia de aterramento para as RAD. Para isso, foram desenvolvidos cálculos analíticos, medições e simulações numéricas, no intuito de comparar o comportamento das bases dos postes em relação às hastes verticais. Os principais parâmetros quantificados foram a impedância transitória, a resistência de aterramento e a transferência de calor devida ao surto à estrutura do poste.

2 Desenvolvimento

2.1 Medições de resistência de aterramento

No estudo foram efetuadas medições da resistência de aterramento de um segmento de poste de concreto do tipo duplo T 11m/300daN (ver figura 2), um dos mais comuns tanto em redes urbanas quanto rurais. A base foi engastada no solo a uma profundidade de 1,8 metros.

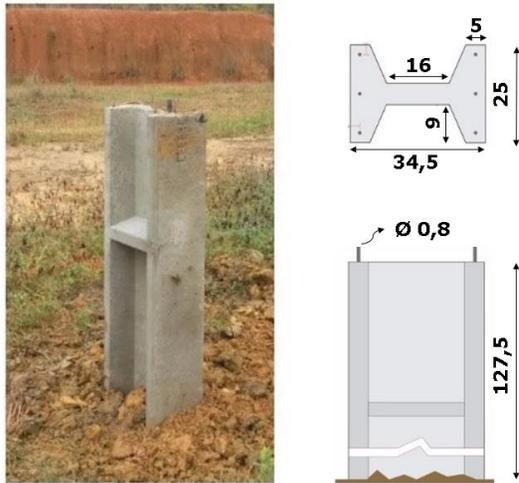


Figura 2: A esquerda o segmento de poste tipo duplo T utilizado no estudo para a medição da resistência de aterramento e em seu lado suas dimensões em centímetros. **Fonte:** Dos autores.

Para fins de comparação, no campo de testes também foram enterradas uma haste vertical de aço cobreado de 1,8 metros de comprimento e 12,7 milímetros de diâmetro, assim como um segmento de poste de concreto de seção circular engastado na mesma profundidade do poste duplo T.

Para executar as medições de resistência de aterramento, foi utilizado um equipamento terrômetro digital e aplicado o método de queda de potencial conforme a norma NBR 15749 [9]. No total, foram obtidas 15 medições para cada uma das três topologias em um período de aproximadamente 4 meses. O perfil da resistividade elétrica do solo do campo de testes em função da profundidade também foi obtido mediante medições, utilizando o terrômetro e aplicando o

método de Wenner, seguindo a norma NBR 7117 [10]. Os resultados das medições serão apresentados e discutidos na seção 3 deste artigo.

2.2 Modelagem analítica da base do poste de concreto

Foi desenvolvido um modelo simplificado da base engastada do poste de concreto do tipo duplo T, considerando uma seção circular transversal equivalente, como mostrado na figura 3.

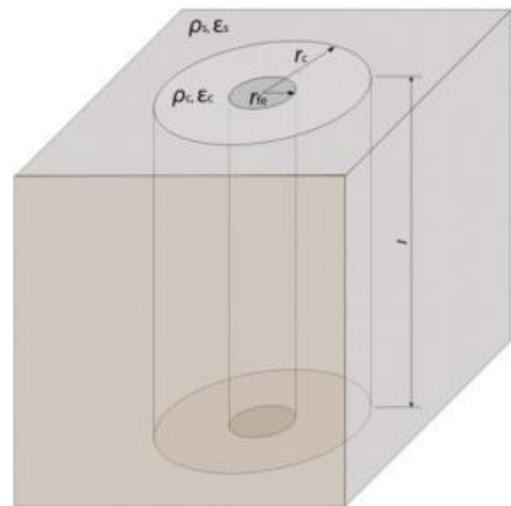


Figura 3: Modelo simplificado da base engastada do poste de concreto. **Fonte:** Dos autores.

A expressão analítica para o cálculo de resistência de terra foi derivada da proposta pela diretriz internacional IEEE Std 80, para estimar a resistência de uma haste vertical embutida em concreto [11].

$$R = \frac{\rho_c}{2\pi \cdot l} \ln\left(\frac{rc}{rfe}\right) + \frac{\rho_s}{2\pi \cdot l} \ln\left(2 \frac{l}{rc}\right) \quad (1)$$

Sendo: R (Ω) a resistência do modelo da base do poste; ρ_c (Ωm) a resistividade do concreto; l (m) o comprimento da parte engastada da estrutura; ρ_s (Ωm) a resistividade aparente do solo; rc (m) o raio equivalente do concreto e rfe (m) o raio equivalente do condutor. No presente trabalho o rfe tem valor de 4 milímetros, correspondente ao raio do vergalhão longitudinal de aço onde é efetuada a excitação

(injeção do surto de corrente advindo da descarga atmosférica).

Para o cálculo da resistência de aterramento no caso de uma haste vertical simples, foi empregada a conhecida expressão de Dwing [12]:

$$R_{1H} = \frac{\rho_s}{2\pi \cdot l} \left(\ln \left(\frac{4l}{r} \right) - 1 \right) \quad (2)$$

onde: R_{1H} (Ω) é a resistência de aterramento da haste vertical; ρ_s (Ωm) é a resistividade aparente do solo; r e l , em metros, são o raio da seção transversal e o comprimento da haste, respectivamente.

No caso das topologias de várias hastes verticais idênticas interligadas (conforme ilustrado na figura 1), para obter a resistência equivalente do conjunto é aplicado um fator de redução à expressão (2). Este coeficiente depende da quantidade de hastes e da separação entre elas. Por exemplo, para a configuração de três hastes com espaçamento regular de 3 metros, o fator de redução a ser aplicado é igual a 0,397 [1, 13].

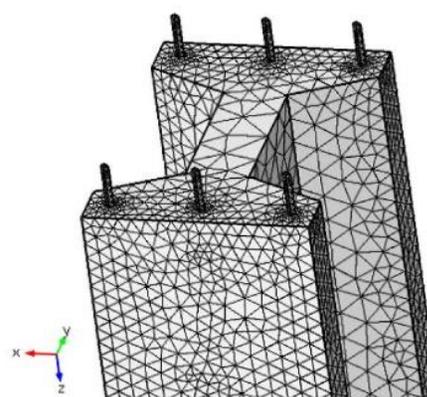
A comparação entre os resultados analíticos, os obtidos nas simulações numéricas e aqueles medidos no campo de testes será apresentada na seção 3 do artigo.

2.3 Modelagem numérica da base do poste de concreto

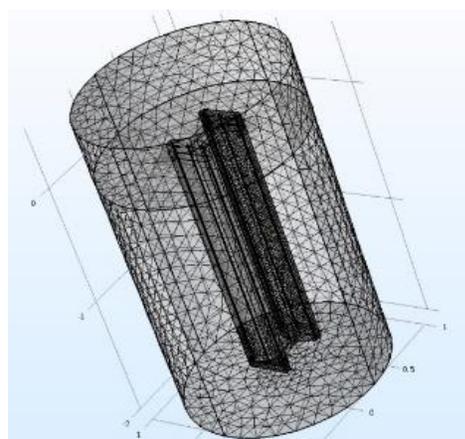
Para a modelagem e simulação numérica do comportamento eletromagnético e térmico da base do poste de concreto como topologia de aterramento elétrico na condição de descarga atmosférica, foi utilizado o programa COMSOL *Multiphysics*, o qual é baseado no método dos elementos finitos [14]. Mais especificamente, foram empregados os módulos *AC/DC - Electric Currents*, destinado a problemas de engenharia elétrica, e o *Heat Transfer*, para a consideração de efeitos térmicos em materiais.

Todas as simulações foram feitas no domínio do tempo, para o regime transitório, obtendo-se como principais resultados: a impedância dinâmica de aterramento, a distribuição dos potenciais elétricos e a elevação da temperatura em diversos pontos da estrutura.

O domínio espacial de estudo no COMSOL foi composto para um segmento do poste Duplo T na área central, por uma camada de solo na parte inferior e preenchida com ar no resto do domínio. O poste foi dimensionado com 1,8 metros abaixo do solo e 10 centímetros acima, conforme ilustra a figura 4. As condições de contorno aplicadas foram de potenciais elétricos nulos em todos os limites externos da malha. O domínio foi discretizado com uma malha 3D auto adaptativa de elementos tetraédricos na escala *fine* do COMSOL, também observada na figura 4.



(a)



(b)

Figura 4: Modelagem COMSOL da base do poste. a) Vista em perspectiva da parte superior; b) Malha de elementos finitos.

Fonte: Dos autores.

Como excitação foi injetada uma corrente de surto atmosférico do tipo dupla exponencial (ver figura 5), em uma das ferragens longitudinais do poste, na região de ar próxima da superfície do solo.

Esta situação representa a descarga atmosférica atingindo o lado primário da rede com o surto se propagando através do cabo de descida, que na parte superior do poste está ligado ao terminal inferior do para-raios. O cabo de descida percorre, dentro de um tubo de PVC, todo o comprimento longitudinal do poste até as proximidades da base engastada, onde então é conectado eletricamente a um dos vergalhões de aço do poste. É a partir deste ponto que a condição de excitação é considerada na modelagem computacional.

Em uma configuração convencional das RAD, a ligação do cabo de descida é feita diretamente nos eletrodos de aterramento (ex. haste vertical ou conjunto de hastes interligadas), sem contato elétrico com as ferragens do poste.

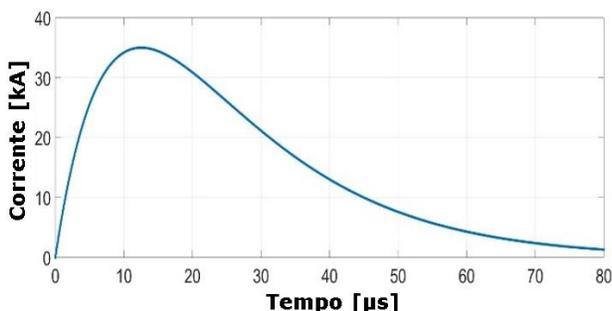


Figura 5: Corrente de surto atmosférico de tipo dupla exponencial utilizado como sinal de excitação nas simulações.

Fonte: Dos autores.

Quanto ao valor do pico da corrente de descarga atmosférica, conforme a NBR 5419, 99% apresentam valores acima de 3 kA e apenas 5% atingem mais de 100 kA [15]. Dessa forma, optou-se por aplicar nas simulações o valor de pico de 35 kA, que corresponde à mediana (valor acima do qual 50% das descargas são superiores e 50% são inferiores) [16]. É importante salientar que está sendo considerada a pior condição, isto é, toda a corrente da descarga direta se propagando pelo cabo de descida e atingindo diretamente as ferragens do poste, perto da base.

Os parâmetros do modelo do poste foram os seguintes [17, 18, 19, 20]:

- Ferragens de aço: condutividade elétrica de $4,032 \cdot 10^6$ (S/m); permissividade elétrica relativa unitária; condutividade térmica de 44,5 (W/(mK)); massa volumétrica de 7.850 (kg/m³) e capacidade calorífica de 475 (J/(kgK));

- Concreto armado: resistividade elétrica de 75 (Ω m); permissividade elétrica relativa de 5 vezes; condutividade térmica de 0,878 (W/(mK)); massa volumétrica de 1.438,4 (kg/m³); e capacidade calorífica de 880 (J/(kgK)).

A impedância dinâmica (ou transitória) de aterramento da estrutura é calculada em cada iteração temporal, como a razão entre a tensão e a corrente no ponto de injeção do surto atmosférico, de acordo com:

$$Z(t) = \frac{V_n(t)}{I_n(t)} \quad (3)$$

O número de iterações no domínio do tempo deve ser suficiente para a impedância transitória convergir ao valor da resistência de terra em regime permanente.

2.4 Modelagem térmica

Devido aos altos níveis de corrente da descarga atmosférica que atinge o poste em um período muito curto (da ordem de dezenas de microssegundos), as temperaturas dos materiais constituintes do concreto tendem a se elevar. Assim, foi analisado a partir da modelagem numérica se essa variação da temperatura pode danificar a estrutura do poste levando à diminuição da sua vida útil.

O método de acoplamento entre os processos elétricos e térmicos utilizado na pesquisa através do COMSOL foi do tipo "indireto" ou "fraco". Isto significa que as bases de dados e arquivos para cada tipo de análise (elétrica e térmica), são construídas separadamente. Desta forma, os resultados obtidos da simulação elétrica são usados como condições iniciais para a modelagem térmica, em um processo iterativo temporal.

A passagem do fluxo da corrente elétrica nas ferragens do poste provoca a geração de energia calorífica no interior do concreto, tanto por condução devido ao efeito Joule (perdas resistivas), quanto por indução eletromagnética (perdas magnéticas).

Assim, as perdas de origem elétrica constituem no modelo térmico as fontes de calor [14, 21]:

$$Q = Q_{rt} + Q_{ml} \quad (4)$$

Uma componente representa as perdas resistivas (5) e a outra as perdas magnéticas (6):

$$Q_{rt} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}^*) \quad (5)$$

$$Q_{ml} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(i\omega \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}^*) \quad (6)$$

Onde: \mathbf{J} (A/m²) é o vetor densidade superficial de corrente; \mathbf{E}^* (V/m) é o complexo conjugado do vetor intensidade de campo elétrico; \mathbf{B} (T) é o vetor de indução magnética e \mathbf{H}^* (A/m) é o complexo conjugado do vetor de intensidade do campo magnético.

O calor produzido pelas duas fontes é então utilizado como dado de entrada para calcular a temperatura a partir da equação geral da transferência de calor em sólidos [14, 21], que no caso das condições específicas do problema sob análise, tem a forma:

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q \quad (7)$$

sendo:

$$\mathbf{q} = -k\nabla T \quad (8)$$

Onde: T (K) é a temperatura; ρ (kg/m³) é a massa volumétrica; C_p (J/kgK) é a capacidade calorífica a pressão constante; k (W/mK) é a condutividade térmica; Q (W/m³) é a fonte de calor e \mathbf{q} (W/m²) é a taxa de fluxo de calor.

As equações (4) a (8) foram resolvidas durante a simulação do processo transitório da descarga atmosférica até as curvas de temperatura atingirem seus níveis máximos.

3 Resultados e discussão

3.1 Resultados para as topologias instaladas no campo de testes

A figura 6 apresenta os resultados das medições de resistência de aterramento para as estruturas instaladas no campo de testes. Além da base do poste duplo T e haste vertical, conforme descrito no item 2.1, podem ser observadas as medições para uma base engasta de poste de concreto de seção circular.

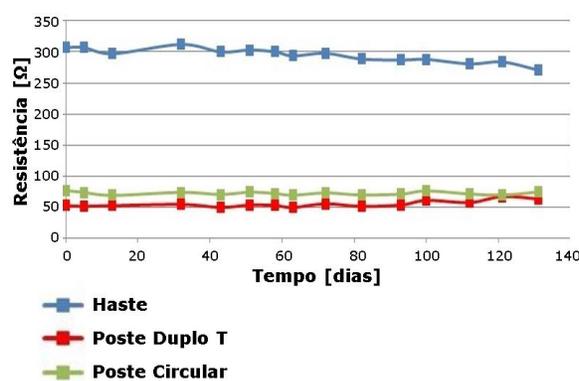


Figura 6: Resultados das medições de resistência de aterramento nas estruturas do campo de teste.

Fonte: Dos autores.

Fica evidente que os valores de resistência de aterramento das bases engastadas foram sensivelmente menores do que para a haste vertical instalada, o que implica em um melhor desempenho dos postes como estrutura de aterramento, do ponto de vista elétrico.

No intuito de validar os procedimentos de modelagem desenvolvidos (analítico e numérico), descritos nos itens 2.2 e 2.3, os resultados para um dia específico das medições foram confrontados com os obtidos das simulações, considerando os mesmos dados geométricos e materiais das estruturas do campo de testes. O comparativo é apresentado na Tabela 1. Conforme pode ser observado, houve uma boa concordância para todos os casos.

Tabela 1: Comparação entre os resultados de resistência de aterramento obtidos.

Topologia	Haste	Base Poste Duplo T
Medido (Ω)	281,00	52,00
Análítico (Ω)	269,60	47,20
Numérico (Ω)	273,50	50,70
Desvio Relativo entre Medido e Analítico (%)	4,01	9,23
Desvio Relativo entre Medido e Numérico (%)	2,67	2,50

Fonte: Dos autores.

3.2 Análise da variação da resistividade elétrica do solo

Foram desenvolvidas simulações numéricas considerando diferentes condições do solo, representando as situações de baixa, média e alta resistividade elétrica. Duas topologias de aterramento foram avaliadas: uma haste vertical de aço cobreado de 2,4 metros de comprimento e 15,7 milímetros de diâmetro (padrão mais utilizado pelas concessionárias nas RAD) e a base engastada de poste de concreto tipo duplo T descrita nas seções anteriores (enterrada a uma profundidade de 1,8 metros).

No caso da base do poste, foi observado durante as simulações que uma vez que a ferragem de excitação recebe a descarga, o surto de corrente se propaga e tenta se distribuir pela estrutura, tanto pelo concreto quanto pelas partes de aço. Entretanto, esta propagação é fortemente atenuada em amplitude, devido ao concreto e ao solo do entorno serem meios com perdas. Assim, a região efetivamente atingida é apenas aquela nas proximidades do ponto de injeção de corrente.

Na Tabela 2 são comparados os valores de resistência de aterramento obtidos a partir das simulações numéricas para as duas estruturas sob análise.

Tabela 2: Comparação entre os resultados simulados de resistência de aterramento (em Ω) para a haste vertical e base engastada de poste de concreto duplo T.

Resistividade (Ωm)	Haste Vertical (Ω)	Base do Poste (Ω)
100	43,00	51,22
500	207,50	167,40
1.000	423,10	352,00

Fonte: Dos autores.

A figura 7 apresenta os resultados das simulações para o comportamento transitório de impedância de aterramento das estruturas devido à descarga atmosférica, aplicando o surto da figura 5, nas condições de solo de baixa e alta resistividade elétrica.

Ambas as estruturas de aterramento - base de poste e haste vertical - apresentam comportamentos semelhantes. Isto é, depois de um rápido transitório inicial, as curvas de impedância estabilizaram em valores de regime permanente próximos à resistência de terra em baixa frequência. Também, conforme esperado, para ambas as topologias quanto maior a resistividade do solo maior foi o valor de resistência de aterramento, assim como o tempo necessário para atingir o regime permanente.

Ao comparar os resultados de resistência de aterramento, observou-se que no caso de solos de baixa resistividade os valores para a base do poste são ligeiramente maiores em relação àqueles para o caso da haste vertical. Por outro lado, a situação oposta é observada no caso de solos de alta resistividade. Este comportamento ocorre devido ao baixo valor da resistividade do concreto que compõem os postes (neste exemplo, segundo descrito no item 2.3, foi utilizado o valor de 75 Ωm). Nessa situação, a energia eletromagnética advinda da descarga atmosférica é adsorvida preferencialmente no concreto da região da base, sendo que no solo do entorno da estrutura os níveis dos campos e potenciais elétricos são fortemente atenuados.

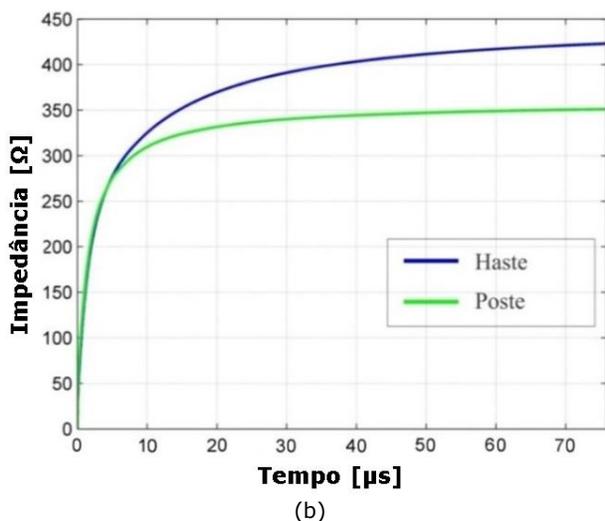
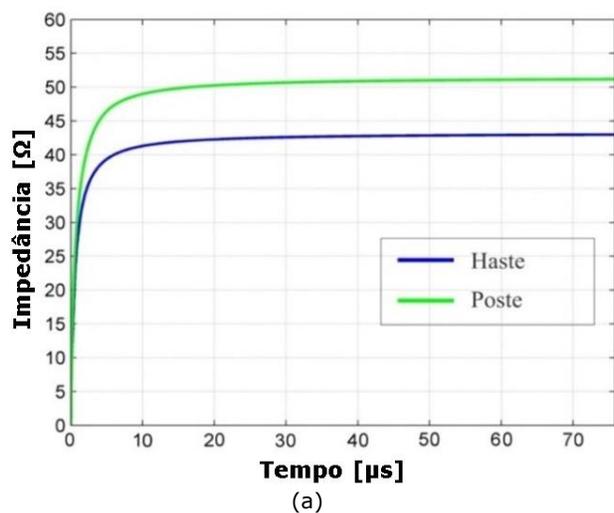


Figura 7: Impedância de aterramento transitória obtida a partir das simulações para as topologias base do poste e haste vertical, considerando diferentes valores de resistividade do solo: (a) 100 (Ωm); (b) 1.000 (Ωm).

Fonte: Dos autores.

Assim, para avaliar a eficácia do uso das bases dos postes na redução da resistência de aterramento, cálculos analíticos foram efetuados a partir do uso das expressões (1) e (2), variando a resistividade do solo entre 30 e 1.000 (Ωm). Também foi acrescentada na análise o caso de três hastes verticais interligadas. Conforme foi mencionado anteriormente, essa última topologia juntamente com o caso da haste simples são as mais empregadas pelas concessionárias nas RAD. A figura 8 apresenta os resultados dos cálculos.

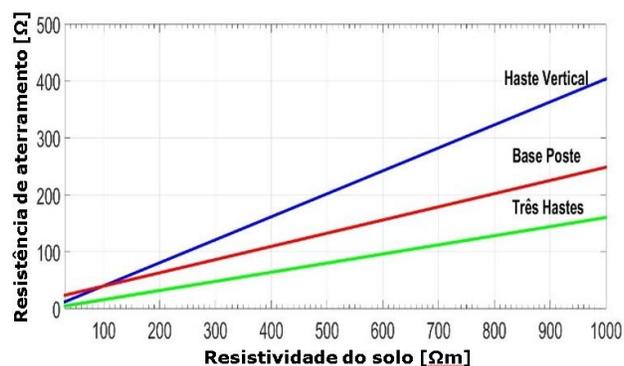


Figura 8: Comportamento da Resistência de Terra versus Resistividade do Solo. Curvas obtidas a partir das expressões (1) – base do poste; (2) – haste vertical e (2) com fator de redução de 0,397 – três hastes interligadas.

Fonte: Dos autores.

Fica evidente que o emprego do poste como topologia única de aterramento seria uma opção interessante nos casos onde os solos apresentam valores médios e altos de resistividade e, ainda, quando por restrições financeiras e/ou de espaço físico no local, apenas uma haste vertical possa ser instalada. Quando comparado seu desempenho em relação ao conjunto de três hastes, essas últimas garantem menores valores de resistência de aterramento para qualquer valor de resistividade do solo.

3.3 Análise térmica da base engastada do poste

Foi também avaliada, conforme descrito no item 2.4, a elevação da temperatura no concreto da base engastada do poste, na região próxima à ferragem que sofre o impacto da descarga atmosférica. As simulações numéricas foram desenvolvidas utilizando o módulo *Heat Transfer* do COMSOL [14]. Foram considerados dois valores de resistividades do solo no entorno do poste: 100 (Ωm), representando solos de baixa resistividade e 1.000 (Ωm), para o caso de solos de alta resistividade. No concreto a resistividade foi de 75 (Ωm), mesmo valor estipulado nas modelagens dos itens anteriores. A temperatura inicial no concreto foi considerada igual a 20 °C. O intervalo de tempo das simulações foi definido de maneira a ser suficiente para observar o aquecimento na estrutura até atingir os níveis máximos de temperatura. Nas situações simuladas, esse tempo foi de 60 microssegundos.

A figura 9 apresenta a curva de elevação da temperatura para um ponto no concreto 5 milímetros distante da ferragem que recebe a excitação da corrente de surto da descarga (valor de pico de 35 kA), em um plano localizado sob a superfície do solo.

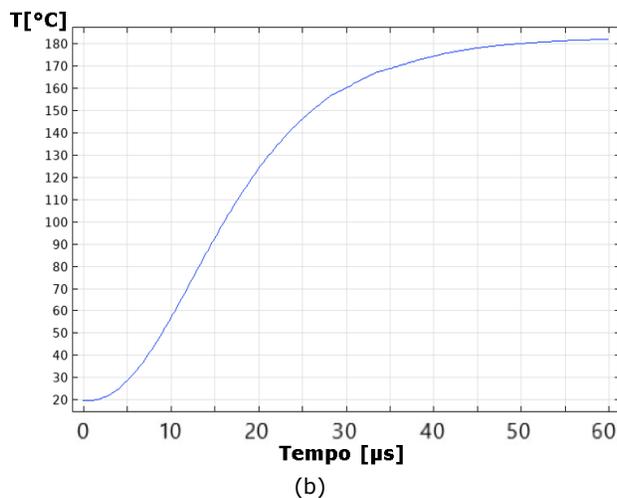
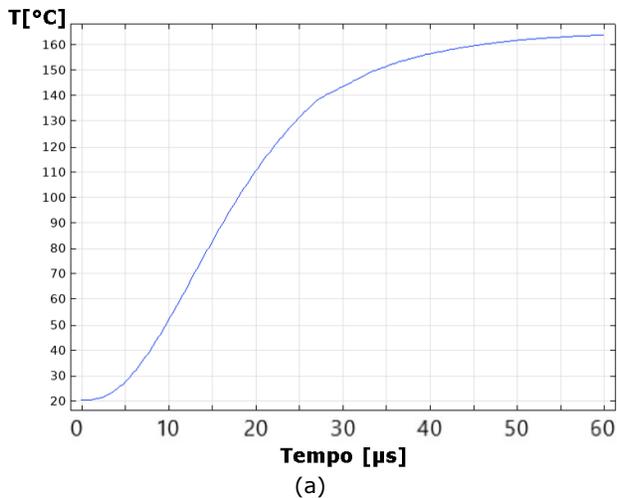


Figura 9: Variação de temperatura em um ponto no concreto da base do poste, próximo da descarga atmosférica, considerando diferentes valores de resistividade do solo: (a) 100 (Ωm); (b) 1.000 (Ωm).

Fonte: Dos autores.

Conforme notado na figura 9, houve um maior aumento de temperatura na região do concreto para o caso do solo de maior resistividade elétrica do que no caso de baixa resistividade. Assim, no solo de 100 (Ωm), o nível máximo foi de 164 °C (um aumento de 820% em relação à temperatura de referência de 20 °C). Já para o solo de 1.000 (Ωm), o valor máximo

atingido foi de 183 °C, representando um aumento de 915%.

Apesar da elevação percentual da temperatura ter sido notadamente elevada, os valores de pico atingidos ficaram aquém daqueles que podem danificar a estrutura. Segundo Morales *et al* e Neville, o efeito da elevação da temperatura sobre o concreto é pequeno e irregular até os 250 °C. Quando a temperatura ultrapassa os 300 °C, o material perde consideravelmente sua resistência mecânica comprometendo a integridade da estrutura [22, 23].

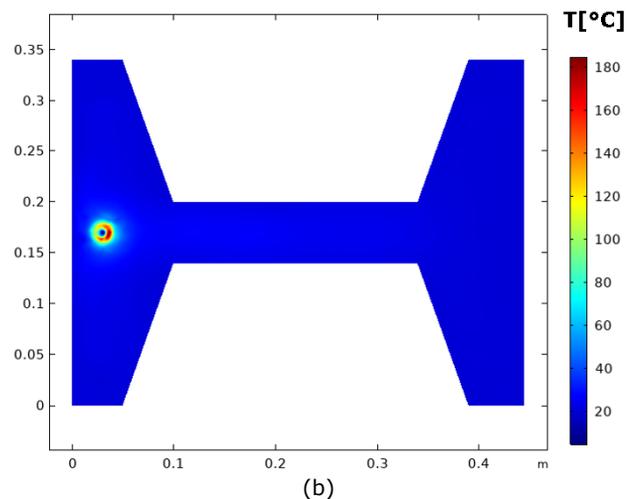
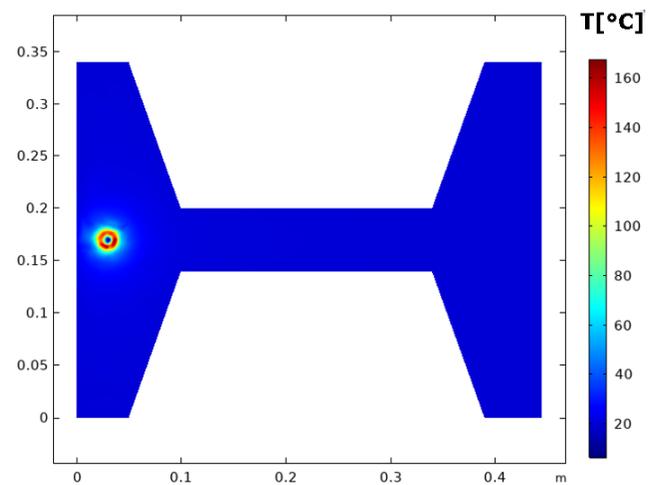


Figura 10: Distribuição espacial de temperatura em uma seção transversal da base, próxima do ponto da descarga atmosférica de 35 kA de pico, no instante de 60 μs . (a) Solo de 100 (Ωm); (b) Solo de 1.000 (Ωm).

Fonte: Dos autores.

A distribuição espacial da temperatura nas seções transversais da base do poste também foi observada. A figura 10 visualiza o plano que comporta o ponto mostrado na figura 9, para ambos os solos, no instante de tempo em que a temperatura atinge os valores máximos. Pode ser observado na figura 10 como os maiores níveis de aquecimento se concentram apenas nas proximidades da ferragem, na qual foi injetada a corrente da descarga atmosférica. Também os padrões de espalhamento espacial da temperatura foram similares para os dois tipos de solo.

Um novo conjunto de simulações foi executado com o objetivo de verificar o comportamento da temperatura no poste na condição de níveis de descarga muito elevados, mesmo que a probabilidade de acontecer seja pequena. No caso, foi imposto o valor de corrente de pico de 100 kA. Para esta nova situação os valores atingidos pela temperatura foram extremamente elevados. No solo de 100 (Ωm), a temperatura no concreto alcançou o pico de 1.280 °C, sendo que para 1.000 (Ωm) o valor máximo foi ainda maior, de 1.420 °C. Os efeitos na estrutura do poste podem ser desastrosos: esfarelamento, fissuração, perda total e irreversível das propriedades mecânicas e até a própria desintegração dos materiais componentes do concreto [22, 23]. A Tabela 3 apresenta os valores máximos de temperatura, para todas as situações simuladas.

Tabela 3: Níveis máximos de temperatura atingidos no concreto da base do poste, para os casos simulados.

Resistividade do solo / Pico de Corrente	100 (Ωm)	1000 (Ωm)
35 kA	164 °C	183 °C
100 kA	1.280 °C	1.420 °C

Fonte: Dos autores.

No intuito de comparar o comportamento transitório entre os fenômenos eletromagnéticos e térmicos, a figura 11 apresenta a variação temporal das grandezas de temperatura e tensão obtidas no mesmo ponto do concreto da simulação mostrada na figura 9. A curva da corrente de excitação também é mostrada. Nota-se na figura 11 que a resposta eletromagnética do sistema (curvas de tensão e corrente), é muito mais rápida que os fenômenos térmicos (temperatura). Isto significa que mesmo quando cessarem os efeitos elétricos da descarga atmosférica, o aquecimento na estrutura

ainda pode estar em fase de elevação e propagação, além de se manter por um longo intervalo de tempo.

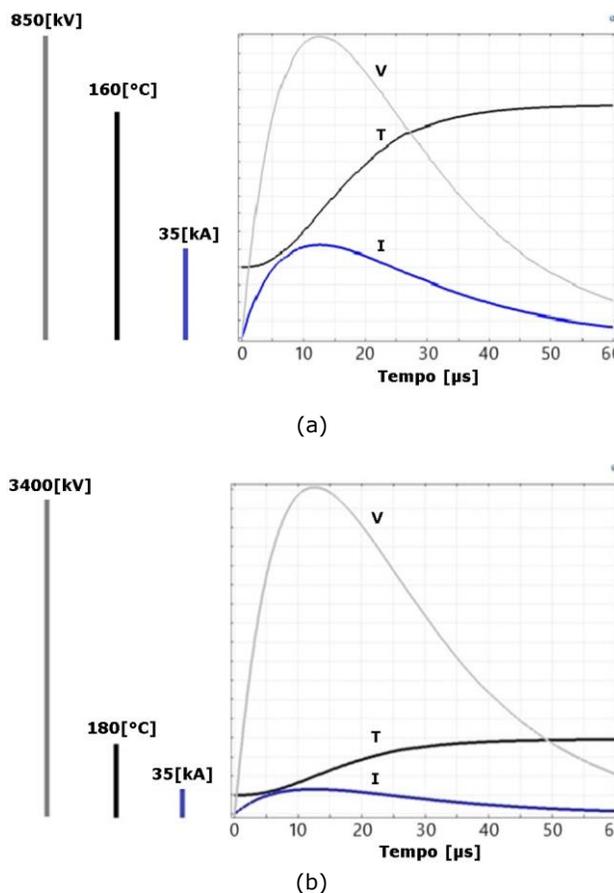


Figura 11: Variação de temperatura, corrente e tensão na base do poste, em um ponto no concreto próximo da excitação, considerando diferentes valores de resistividade do solo: (a) 100 (Ωm); (b) 1.000 (Ωm).

Fonte: Dos autores.

4. Conclusões

O principal objetivo da pesquisa foi avaliar a viabilidade do uso dos postes de concreto das RAD, na função de aterramento elétrico. O trabalho foi desenvolvido visando contribuir na busca de alternativas práticas para melhorar a segurança e confiabilidade de operação das RAD, assim como na diminuição dos custos das concessionárias.

As premissas que do ponto de vista dos autores tornam os postes de concreto uma opção interessante a ser avaliada para atuar como estruturas autoaterradas são: a) a dificuldade para a obtenção de níveis de resistência aceitáveis durante a instalação das

topologias típicas de aterramento, devido aos altos valores da resistividade elétrica dos solos; b) o consequente aumento da complexidade e do custo das obras dos aterramentos, na procura de atender os limites especificados em norma; c) as limitações de espaço nos ambientes urbanos para executar as instalações, que podem levar à necessidade de quebra de calçadas e ruas; d) a inexistência de procedimentos nas concessionárias para manutenção preventiva e fiscalização periódica de aterramentos. De forma geral, um aterramento já instalado e em operação é apenas revisado quando ocorrem problemas graves na rede; e) o fato de na atualidade quase todos os postes utilizados nas RAD serem de concreto; f) a baixa resistividade elétrica do concreto armado na base engastada dos postes, comumente menor do que o valor da resistividade do solo no entorno da instalação e g) o fato de os postes de concreto terem vida útil de 35 anos a partir da data de fabricação, enquanto que um sistema de aterramento tradicional para RAD tem vida média esperada de apenas oito anos, aproximadamente.

Especificamente, foi analisado o caso do poste duplo T, pela sua ampla utilização por parte das concessionárias. No estudo, dois modelos matemáticos, um simplificado (expressão analítica) e um realístico (modelo numérico computacional), foram utilizados para o cálculo da impedância transitória e da resistência de aterramento da base engastada do poste, agindo como estrutura autoaterrada. Também, medições foram efetuadas em um campo de testes. O comparativo dos resultados das bases de concreto com os levantados para uma haste vertical simples, indicou que nas instalações em solos de média e alta resistividade elétrica, os valores da resistência de aterramento e da impedância dinâmica obtidos para as bases do poste foram menores, o que implicaria em um melhor desempenho do poste do ponto de vista elétrico como estrutura de aterramento. No entanto, quando feita a comparação com a topologia de três hastes interligadas, nestas últimas os valores de resistência de aterramento sempre foram mais baixos para toda a faixa avaliada de resistividade elétrica do solo.

Também, foi desenvolvido um estudo térmico baseado em moldagem numérica para verificar se o aumento da temperatura no concreto devido à ação da descarga atmosférica poderia prejudicar a estrutura. Na pesquisa bibliográfica efetuada não foi encontrada nenhuma outra publicação abordando este assunto, para o caso de postes de RAD. Foi constatado que as

condições do solo no entorno da estrutura (representadas pela resistividade elétrica), influenciam fortemente no comportamento térmico da base engastada do poste. Assim, para o caso do solo com baixa resistividade houve um menor aquecimento no concreto do que na situação com o solo de alta resistividade. Ainda, os resultados das simulações térmicas revelaram que, no caso das amplitudes máximas da corrente de surto ficarem próximas da mediana de 35 kA (atendendo às probabilidades de ocorrência das descargas), mesmo com um aumento rápido e considerável do aquecimento na região do concreto que envolve a barra de aço impactada, os valores máximos de temperatura atingidos não ultrapassaram os limites relatados na literatura a partir dos quais os danos estruturais comprometem a integridade e a vida útil do poste. Por outro lado, na condição de correntes muito elevadas (de menor probabilidade de ocorrência), os valores de temperatura foram extremamente elevados, muito superiores àqueles que provocariam o colapso mecânico e a destruição da região do poste afetada.

Desta forma, sugere-se que a utilização do poste convencional de concreto como estrutura autoaterrada nas RAD, em substituição às topologias de aterramento tradicionais, deve ser feita com cautela. Para determinadas condições específicas o seu emprego representaria uma solução possível a ser implantada. Estas condições seriam: a) a instalação acontecer em solos de média e alta resistividade, sem possibilidade de efetuar um tratamento químico; b) restrições de espaço físico ou financeiras, que impeçam a instalação de conjuntos de hastes e c) exista o conhecimento da probabilidade de ocorrência dos valores de pico de descargas atmosféricas na região onde a rede está localizada, assim como da porcentagem da corrente de surto que atinge o aterramento.

Finalmente é importante salientar que no caso do uso de concreto condutivo na parte engastada do poste, conforme a proposta de [5], a resistividade elétrica da base será reduzida consideravelmente. Desta forma, essa estrutura se apresenta como uma melhor opção para a redução da resistência de aterramento elétrico nas RAD, garantindo por si só o aterramento para qualquer condição do solo. Restaria, no entanto, verificar o comportamento térmico assim como a viabilidade financeira da fabricação em grande escala desses novos tipos de postes.

Referências

[1] COELHO, V. L. Análise do desempenho de redes aéreas de distribuição de média tensão frente à ação das descargas atmosféricas. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

[2] AVILA, A. F. L. Estudo do desempenho de redes de distribuição rural utilizando dados do sistema de localização de tempestades e da operação do sistema. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

[3] TELLO, M. et al. Aterramento Elétrico Impulsivo, em Baixa e Alta Frequência. Porto Alegre: Ed. EdIPUCRS, 2007.

[4] FILHO, S. V. Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento. São Paulo: Ed. ARTLIBER, 2002.

[5] CANNABRAVA, A. C. de A.; FERREIRA, B. E. M.; PASQUA, L. P. Aterramento de Redes de Distribuição com a Utilização de Postes Autoaterrados. Revista O Setor Elétrico. Ano 12, Ed. 137, p.44 -52. 2017.

[6] CELESC Distribuição, página oficial disponível em: <<https://www.celesc.com.br/a-celesc-distribuicao>>. Acesso em: 15 de junho. 2020.

[7] MARSHALL, W. Earth Bonding of Reinforcing Cages on Older Concrete Poles: Part 2. Line Tech Consulting Ltd, EEA Conference and Exhibition. Christchurch: Nova Zelândia, 2009.

[8] R. HEE-SUK, J.; DONG-HAK, N.; KEE-YOUNG. An Experimental Study on the Response of Concrete Pole to Currents Impulses. Singapore: In International Conference on Power System Technology (POWERCOM 2004). 2004. pp. 1490 – 1495.

[9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15749: Medição de Resistência de Aterramento e de Potenciais na Superfície do Solo em Sistemas de Aterramento. Rio de Janeiro, 2009.

[10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7117: edição de resistividade e estratificação do solo. Rio de Janeiro, 2012.

[11] IEEE Std. 80. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York, 2000.

[12] TAGG, G. F. Earth Resistances. New York, 1964.

[13] KINDERMANN G.; CAMPAGNOLO J. M. Aterramento Elétrico, Porto Alegre: Ed. SagraLuzzatto, 1995.

[14] COMSOL Multiphysics, página oficial disponível em: <www.comsol.com>. Acesso em: 17 de abril. 2018.

[15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5419-1: Proteção contra descargas atmosféricas - Parte 1: Princípios Gerais. Rio de Janeiro, 2015

[16] SALDANA, P. et al. Proteção de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos Contra Surtos elétricos em Instalações. Lagoa Santa – MG: 1ª Ed. Clamper, 2016.

[17] MANGONON, P. L. The Principles of Materials Selection for Engineering Design. London: Prentice-Hall, 1999.

[18] Propriedade dos materiais. Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br/ciemat/cmat210.shtml>>. Acesso em: 14 de maio. 2018.

[19] Análise do desempenho térmico de sistema construtivo de concreto com EPS como agregado graúdo. Disponível em: <<ftp://ftp.ufrn.br/pub/biblioteca/ext/bdtd/LucianoACB.pdf>>. Acesso em: 21 de maio. 2018.

[20] Ficha técnica de materiais. Disponível em: <<http://www.imperiosmetais.com.br/fichatecnica.html>>. Acesso em: 13 de Maio. 2018.

[21] SHERBININ, S. A. et al. 3D thermo-electric field modeling tool and its applications for energy regime simulations in aluminum reduction cells. p.323-32. Light Metals, 2000.

[22] MORALES, G.; CAMPOS, A.; FAGARELLO, A. M. P. A ação do fogo sobre os componentes do concreto. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina. v.32, n.1, p.47 – 55, jan/mar, 2011

[23] NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. São Paulo: Pini, 1923.