



**DESEMPENHO DE FUNDAÇÕES DE  
CONCRETO COMO ELETRODO DE  
ATERRAMENTO NATURAL EM TORRES DE  
LINHAS DE TRANSMISSÃO**

**AMANDA DOS SANTOS MARINHO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

Desempenho de Fundações de Concreto como Eletrodo de  
Aterramento Natural em Torres de Linhas de Transmissão

Amanda dos Santos Marinho

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO PROGRAMA DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE DE BRA-  
SÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO  
DO GRAU DE ENGENHEIRA ELETRICISTA.

APROVADO POR:

---

Prof. Amauri Gutierrez Martins Britto, D.Sc. (ENE-UnB)  
(Orientador)

---

Prof. Francisco Damasceno Freitas, D.Sc. (ENE-UnB)  
(Examinador Interno)

---

Prof. Kleber Melo e Silva, D.Sc. (ENE-UnB)  
(Examinador Interno)

Brasília/DF, dezembro de 2023.

## FICHA CATALOGRÁFICA

DOS SANTOS MARINHO, AMANDA

Desempenho de Fundações de Concreto como Eletrodo de Aterramento Natural em Torres de Linhas de Transmissão. [Brasília/DF] 2023.

xxx, nnp., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheira Eletricista, Trabalho de Conclusão de Curso, 2023).

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica.

Departamento de Engenharia Elétrica

- |                                   |                                       |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 1. Resistividade elétrica do solo | 2. Resistividade elétrica do concreto |
| 3. Fundações de concreto          | 4. Aterramento                        |
| 5. Solo homogêneo                 | 6. Solo não homogêneo                 |
| 7. Linhas de transmissão          |                                       |
| I. ENE/FT/UnB                     |                                       |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DOS SANTOS MARINHO, AMANDA (2023). Desempenho de Fundações de Concreto como Eletrodo de Aterramento Natural em Torres de Linhas de Transmissão. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Amanda dos Santos Marinho

TÍTULO: Desempenho de Fundações de Concreto como Eletrodo de Aterramento Natural em Torres de Linhas de Transmissão.

GRAU: Engenheira Eletricista ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Trabalho de Conclusão de Curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Amanda dos Santos Marinho

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

Faculdade de Tecnologia - FT

Departamento de Engenharia Elétrica(ENE)

Brasília - DF CEP 70919-970

*"Faça o necessário, depois o possível e, de repente,  
você estará fazendo o impossível."  
São Francisco de Assis*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre me enviar sinais de Sua presença ao meu lado, iluminando e fortalecendo-me em toda a minha jornada até aqui.

Ao professor Amauri, a quem tenho grande respeito e admiração, agradeço pela paciência, cuidado e todo conhecimento transmitido. Agradeço também pela oportunidade concedida e por acreditar em mim. Sua constante disponibilidade e disposição para ensinar são inestimáveis.

Aos meus amigos, listados em ordem alfabética para evitar conflitos: Alessandro, Carla, Geovanna, Jonas e Pedro Henrique. Agradeço pelos conselhos, pelas boas conversas compartilhadas e por me ouvirem nos momentos difíceis, mostrando-se disponíveis em todas as situações.

À minha segunda família, composta por Ana Luiza, Lucas, Ana Rosa e Luiz, agradeço por estarem sempre ao meu lado e por me permitirem fazer parte da família de vocês. Agradeço por todos os momentos vividos até agora, por proporcionarem uma vida mais próxima de Deus e por todas as "marmeladas" contadas.

À minha família, minha mãe Eliana, meu pai Jenaldo e meu irmão Fábio, sabemos que as coisas nunca foram fáceis, mas vocês nunca deixaram me faltar nada. Se estou aqui hoje, é porque nunca estive sozinha.

Ao meu querido namorado, Francisco, agradeço por fazer parte de tudo isso, por seu apoio, crença em mim e por sempre me ajudar a tomar as melhores decisões. Agradeço pela paciência e pelo carinho nestes quase nove anos de relacionamento.

Aos meus bichinhos, pois não sou nada sem eles: Dogha, Linguida, Fumaça, Rajadão e Branquíssimo.

Agradeço imensamente a todos os envolvidos, serei eternamente grata a cada um de vocês!

## RESUMO

O objetivo deste estudo é analisar o comportamento da fundação estrutural de torres de linhas de transmissão como um sistema de aterramento. Utilizando a implementação do método de *Segmentation-Integration* disponível em softwares padrão da indústria, uma estrutura típica de torre é analisada em diferentes cenários, com uma avaliação abrangente das distribuições de corrente, GPR (Ground Potential Rise), tensões de toque e passo para diferentes valores de resistividade elétrica do concreto, considerando dois tipos de solo: homogêneo e não homogêneo. Os resultados mostram que em solos com duas camadas, se a resistividade da camada superior for menor do que a da camada inferior, o desempenho da fundação da torre como sistema de aterramento não atende aos critérios de segurança, o sistema se torna dependente das características e do estado de umidade do concreto. No entanto, a associação de condutores de contrapeso com a fundação apresenta resultados satisfatórios, semelhantes ao comportamento do sistema composto somente por condutores de contrapeso. Se a camada superior do solo apresentar resistividade maior do que a camada inferior, a própria fundação pode ser suficiente para garantir a dispersão eficaz da corrente no sistema de aterramento. Dos resultados obtidos, o concreto presente na fundação tem impacto prático nos resultados e não pode ser ignorado na modelagem do sistema de aterramento.

**Palavras-chave:** Resistividade elétrica do solo, Resistividade elétrica do concreto, fundações de concreto, aterramento, solo homogêneo, solo não homogêneo, linhas de transmissão.

## ABSTRACT

The objective of this study is to analyze the behavior of the structural foundation of transmission line towers as a grounding system. Using the implementation of the Segmentation-Integration method available in industry-standard software, a typical tower structure is analyzed under different scenarios, with a comprehensive assessment of current distributions, GPR (Ground Potential Rise), touch and step voltages for different values of concrete electrical resistivity, considering two types of soil: homogeneous and non-homogeneous. The results show that in soils with two layers, if the resistivity of the upper layer is lower than that of the lower layer, the tower foundation's performance as a grounding system does not meet safety criteria, becoming dependent on the characteristics and moisture state of the concrete. However, the association of counterpoise conductors with the foundation yields satisfactory results, similar to the behavior of the system composed solely of counterpoise conductors. If the upper layer of the soil exhibits higher resistivity than the lower layer, the foundation itself may be sufficient to ensure effective current dispersion in the grounding system. From the obtained results, the concrete used in the foundation has practical impact on the outcomes and cannot be overlooked in the grounding system modeling.

**Keywords:** Soil electrical resistivity, Concrete electrical resistivity, Concrete foundations, Grounding, Homogeneous soil, Non-homogeneous soil, Transmission lines.

# SUMÁRIO

<b>Sumário</b>	i
<b>Lista de figuras</b>	iii
<b>Lista de tabelas</b>	vi
<b>Lista de símbolos</b>	vii
<b>Glossário</b>	viii
<b>Capítulo 1 – Introdução</b>	1
1.1 Apresentação, objetivos e metodologia . . . . .	1
1.2 Estrutura da monografia . . . . .	3
<b>Capítulo 2 – Aterramento de torres de linhas de transmissão</b>	4
2.1 Descargas atmosféricas . . . . .	4
2.2 Transmissão de energia elétrica . . . . .	5
2.3 Efeitos da incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão . . . . .	6
2.4 Cálculo do sistema de aterramento de linhas de transmissão . . . . .	8
2.5 Síntese do capítulo . . . . .	11
<b>Capítulo 3 – Resistividade elétrica do solo e do concreto</b>	12
3.1 Resistividade elétrica do solo . . . . .	12
3.1.1 Modelo uniforme . . . . .	15
3.1.2 Modelo de duas camadas . . . . .	17
3.1.3 Modelo multicamadas . . . . .	20
3.2 Resistividade elétrica do concreto . . . . .	21
3.3 Síntese do capítulo . . . . .	24
<b>Capítulo 4 – Estudo da fundação da torre como sistema de aterramento</b>	25
4.1 Análise do modelo uniforme . . . . .	26

---

4.2	Análise do modelo de duas camadas . . . . .	47
4.3	Síntese do capítulo . . . . .	68
<b>Capítulo 5 – Conclusões</b>		<b>69</b>
<b>Referências</b>		<b>71</b>

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Dispersão da corrente após a incidência de raios em LTs. . . . .	6
2.2	Tensão de toque. . . . .	7
2.3	Tensão de passo. . . . .	8
2.4	Curvas de corrente versus tempo e zonas conforme IEC 60479-1. . . . .	9
2.5	Sistema de aterramento com contrapesos. . . . .	10
2.6	Modelagem para o cálculo do sistema de aterramento com contrapesos. . . . .	11
3.1	Perfil do solo. . . . .	13
3.2	Método de Wenner. . . . .	14
3.3	Corrente em solo uniforme. . . . .	15
3.4	Potenciais escalares em meio uniforme. . . . .	17
3.5	Fundações da torre de LTs em solo uniforme. . . . .	18
3.6	Corrente em solo de duas camadas ( $\rho_1 > \rho_2$ ). . . . .	18
3.7	Corrente em solo de duas camadas ( $\rho_1 < \rho_2$ ). . . . .	19
3.8	Fundações da torre de LTs em solo com duas camadas . . . . .	19
3.9	Modelo de solo multicamadas. . . . .	21
4.1	Caso (a) - concreto sem cura ( $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ ). . . . .	28
4.2	Caso (a) - concreto com cura por 7 dias ( $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ ). . . . .	29
4.3	Caso (a) - concreto com cura por 14 dias ( $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ ). . . . .	30
4.4	Caso (b) - concreto sem cura ( $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ ). . . . .	31

4.5	Caso (b) - concreto com cura por 7 dias ( $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ ).	32
4.6	Caso (b) - concreto com cura por 14 dias ( $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ ).	33
4.7	Caso (c) - densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ ).	34
4.8	Caso (d) - densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ ).	35
4.9	Caso (e) - densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ ).	36
4.10	Caso (a) - concreto sem cura ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ).	37
4.11	Caso (a) - concreto com cura por 7 dias ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ).	38
4.12	Caso (a) - concreto com cura por 14 dias ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ).	39
4.13	Caso (b) - concreto sem cura ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ).	40
4.14	Caso (b) - concreto com cura por 7 dias ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ).	41
4.15	Caso (b) - concreto com cura por 14 dias ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ).	42
4.16	Caso (c) - densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ).	43
4.17	Caso (d) - densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ).	44
4.18	Caso (e) - densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ).	45
4.19	Caso (a) - concreto sem cura ( $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ).	49
4.20	Caso (a) - concreto com cura por 7 dias ( $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ).	50
4.21	Caso (a) - concreto com cura por 14 dias ( $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ).	51
4.22	Caso (b) - concreto sem cura ( $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ).	52
4.23	Caso (b) - concreto com cura por 7 dias ( $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ).	53
4.24	Caso (b) - concreto com cura por 14 dias ( $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ).	54
4.25	Caso (c) - Densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ).	55
4.26	Caso (d) - Densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ).	56
4.27	Caso (e) - Densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ).	57
4.28	Caso (a) - concreto sem cura ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ).	58
4.29	Caso (a) - concreto com cura por 7 dias ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ).	59

---

4.30	Caso (a) - concreto com cura por 14 dias ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ). . . . .	60
4.31	Caso (b) - concreto sem cura ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ). . . . .	61
4.32	Caso (b) - concreto com cura por 7 dias ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ). . . . .	62
4.33	Caso (b) - concreto com cura por 14 dias ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ). . . . .	63
4.34	Caso (c) - Densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ). . . . .	64
4.35	Caso (d) - Densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ). . . . .	65
4.36	Caso (e) - Densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ). . . . .	66

## LISTA DE TABELAS

2.1	Efeitos da corrente elétrica no corpo humano conforme IEC 60479-1 . . . . .	9
3.1	Resistividades típicas de diversos tipos de solo . . . . .	13
3.2	Propriedades do concreto . . . . .	23
3.3	Resistividade elétrica do concreto . . . . .	23
4.1	Solo uniforme ( $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ ). . . . .	46
4.2	Solo uniforme ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ). . . . .	46
4.3	Conclusões para solo homogêneo ( $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ ). . . . .	46
4.4	Conclusões para solo homogêneo ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ). . . . .	47
4.5	Solo de duas camadas ( $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ). . . . .	67
4.6	Solo de duas camadas ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ). . . . .	67
4.7	Conclusões para solo não homogêneo ( $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ). . . . .	67
4.8	Conclusões para solo não homogêneo ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ). . . . .	68

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\rho_s$	Resistividade elétrica do solo uniforme	[ $\Omega\text{m}$ ]
$\rho_C$	Resistividade elétrica do concreto	[ $\Omega\text{m}$ ]
$\rho_1$	Resistividade elétrica primeira camada do solo	[ $\Omega\text{m}$ ]
$\rho_2$	Resistividade elétrica segunda camada do solo	[ $\Omega\text{m}$ ]

## GLOSSÁRIO

LT	Linhas de transmissão
CDEGS	Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis
SC	Concreto sem cura submersa
CC7	Concreto com cura submersa por 7 dias
CC14	Concreto com cura submersa por 14 dias

### 1.1 APRESENTAÇÃO, OBJETIVOS E METODOLOGIA

As linhas de transmissão (LTs) podem atingir centenas de quilômetros, estando vulneráveis à ações externas, como as descargas atmosféricas ocasionada pelo clima, o que pode afetar a segurança do sistema de transmissão de energia elétrica. Para garantir a segurança e proteção dos usuários e equipamentos é necessário um sistema de aterramento eficiente. Mas, devido às grandes extensões, é comum encontrar diferentes tipos de solo e, conseqüentemente, diferentes valores de resistividade elétrica.

O sistema de aterramento de uma LT deve ser capaz de dissipar para a terra correntes ocasionadas por faltas ou descargas atmosféricas. A forma como a corrente se distribui no solo depende de dois fatores importantes, a resistividade do solo e o arranjo do aterramento utilizado. A depender do local e tipo de solo é necessário realizar o tratamento químico ou mudar o arranjo do aterramento. Apesar desses métodos serem os mais utilizados, estudos anteriores mostram que as fundações estruturais podem ser consideradas como um sistema de aterramento.

Em (UFER, 1964) as análises foram realizadas nas fundações estruturais de instalações militares, construídas durante a Segunda Guerra Mundial, no Arizona. Alguns dos resultados obtidos mostram que o concreto absorve a umidade do solo e mantém sua resistividade baixa, mesmo sob climas quentes e secos durante a maior parte do ano. Os resultados obtidos em (FAGAN; LEE, 1970) indicam que as fundações do tipo sapatas de concreto armado fornecem resistência de aterramento baixa e que as vantagens desse sistema são a sua disponibilidade acessível e de baixo custo. Estudos mais recentes mostram que análises em arranjos de aterramento com escala reduzida, o uso de concreto reduz significativamente o valor da impedância de aterramento, a resistência de contato com o solo e a corrente de fuga à terra (CABRAL *et*

*al.*, 2016).

Assim como a resistividade elétrica do solo é influenciada por fatores como o tipo de solo, umidade, temperatura, teor de sais dissolvidos e outros fatores (HE *et al.*, 2013), a resistividade elétrica do concreto também é influenciada por fatores em comum, em especial, e uma das mais importantes, a quantidade de água presente na mistura. A relação entre água e cimento é um dos principais parâmetros da resistência mecânica do concreto: quanto maior a relação água-cimento, maior é o volume de poros interconectados por seus diâmetros e, conseqüentemente, menor a resistividade elétrica (ARAUJO; MEIRA, 2022).

Nesse cenário, o objetivo principal desse trabalho é o estudo das fundações de concreto armado de torres de linhas de transmissão como eletrodos de aterramento naturais. Nesse tipo de aterramento, a estrutura metálica da fundação está conectada aos pés das torres e por meio das pesquisas bibliográficas e das análises das simulações realizadas no software CDEGS (Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis) (DAWALIBI; DONOSO, 1993a) foi estudado se as fundações de concreto armado podem ser utilizadas como eletrodo de aterramento natural dos pés das torres de linhas de transmissão.

Os estudos disponíveis na literatura têm como foco principal a impedância do sistema de aterramento. Nesse trabalho são abordados, adicionalmente, solos homogêneos e heterogêneos, fundações de concreto armado e a influência dos condutores de contrapeso, além da impedância do sistema, bem como os níveis de tensão de toque e de passo. Os valores de resistividade elétrica do concreto utilizados foram obtidos a partir de um estudo da literatura cujo o objetivo foi avaliar a influência do tempo de cura no desempenho e no comportamento da resistividade elétrica superficial do concreto, desde as primeiras idades até o mesmo ter atingido o estado endurecido (SILVA, 2016).

Com relação à publicação dos resultados relacionados à pesquisa e resultados desse trabalho, o seguinte artigo foi submetido e aceito para publicação nos anais da conferência:

A. S. MARINHO; C. M. MORAES; A. G. MARTINS-BRITTO, "On the Performance of Concrete Foundations as Natural Grounding Electrodes in Transmission Line Towers", submetido para *WCNPS 2023: 8th Workshop on Communication Networks and Power Systems*. Brasília, Brasil, 2023.

## 1.2 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

Para o desenvolvimento do trabalho é necessário entender alguns conceitos chaves que compõem o objetivo principal. Dessa forma o trabalho é dividido em seis capítulos.

O **Capítulo 1** expõe o contexto em que se insere o trabalho, os objetivos, a metodologia e a estrutura da monografia.

O **Capítulo 2** apresenta alguns dos principais objetos de estudo do aterramento de torres de linhas de transmissão como, descargas atmosféricas, transmissão de energia elétrica, efeitos da incidência de raios em linhas de transmissão e os tipos de aterramento existentes. Além disso, o capítulo descreve os riscos provenientes de tensões de toque e de passo.

O **Capítulo 3** trata do estudo da resistividade elétrica do solo em cenários homogêneos e heterogêneos, bem como dos elementos que compõem a resistividade elétrica do concreto. Além disso, o capítulo descreve os sistemas estudados.

O **Capítulo 4** apresenta as análises realizadas em modelos de solo uniforme e de duas camadas considerando a densidade de corrente de fuga, GPR, níveis de tensão de toque e de passo no sistema, para cada cenário apresentado.

O **Capítulo 5** expõe as conclusões e propostas para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

# ATERRAMENTO DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Para o estudo do aterramento de torres de linhas de transmissão é necessário entender as características das descargas atmosféricas, da transmissão de energia elétrica, os efeitos da incidência de raios em linhas de transmissão e os tipos de aterramento existentes.

### 2.1 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define em sua norma NBR 5419:2015 que descarga atmosférica é uma descarga elétrica de origem atmosférica entre uma nuvem e a terra ou entre nuvens, consistindo em um ou mais impulsos de vários quiloampères (ABNT, 2015). Devido à grande extensão territorial próxima ao Equador, as condições físicas e climatológicas do Brasil contribuem para o país ser um dos com maior incidência de descargas atmosféricas. É importante ressaltar que esse fenômeno é complexo, aleatório e probabilístico (RODRIGUES, 2020).

Na formação das nuvens o vento provoca a separação das cargas de polaridades opostas, na região inferior da nuvem há uma elevada densidade de cargas negativas que atraem uma grande quantidade de cargas positivas do solo. Essa atração gera um campo elétrico forte o suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar, momento em que é possível ver a forma do raio (RODRIGUES, 2020). A ruptura dielétrica é a transformação de um material não condutor, nesse caso o ar, em condutor.

As descargas entre nuvem e solo são classificadas como descendentes e estão associadas à estruturas não muito altas, como as LTs. Esse tipo de descarga é a maior causa de interrupção no fornecimento de energia, porque as ondas de correntes injetadas no sistema podem fazer com que o nível de tensão ultrapasse os níveis suportados pelos equipamentos do sistema elétrico de

potência, podendo colocar em risco os mesmos e a vida de pessoas e animais devido ao toque em regiões metálicas do sistema, ou o simples caminhar em regiões afetadas pela falta.

## 2.2 TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A linha de transmissão é um dos componentes mais importantes do sistema elétrico de potência, que é composto por geração, transmissão e distribuição. É a principal função das LTs é transportar a energia elétrica de um ponto A até um ponto B, é formada por torres (metálicas, concreto ou madeira), cabos para-raios, isoladores e condutores. Os circuitos podem ser simples, duplo ou até múltiplos (PINTO, 2013).

As LTs são classificadas em linhas de transmissão longas, com comprimento  $> 249$  km, médias, com comprimento  $> 80$  e  $< 249$  km, e curtas, comprimento  $< 80$  km (PINTO, 2013). Além disso, no Brasil os níveis são padronizados em transmissão (750, 500, 230, 138 e 69 kV) e subtransmissão (138, 69 e 34,5 kV). Com mais de 8,5 milhões de  $m^2$  de território, o país possui mais de 102 mil km de linhas de transmissão, um dos maiores sistemas do planeta (PINTO, 2013).

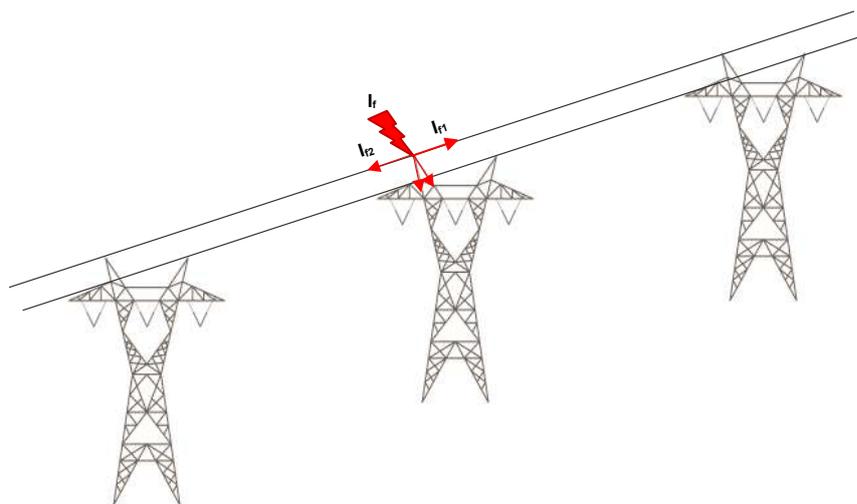
Grande parte das torres são de estruturas metálicas construídas com aço, o projeto deve considerar as diversas peculiaridades de uma região, como o tipo de solo. Na parte mais alta da torre encontra-se o cabo de para-raios ou de guarda, responsável pela proteção dos condutores de fase. A estrutura da torre deve ser aterrada para que em caso da falta ou descargas atmosféricas a corrente seja guiada pelo sistema de aterramento para uma região de baixa resistência, para que possa ser dissipada com segurança (ROBBA, 2020).

Com o propósito de se evitar riscos e a exposição humana a esses efeitos provocados por faltas, descargas atmosféricas, campos elétricos e magnéticos, dentre outros, é necessário que essas linhas sejam instaladas dentro de uma área, com uma largura definida, nomeada faixa de segurança, que também é conhecida por faixa de passagem (ROBBA, 2020). Dentro da faixa de segurança há o sistema de aterramento, conforme apresentado pela (ABNT, 1985) o aterramento deve se restringir a essa área e não interferir em outras instalações ou atividades no local.

## 2.3 EFEITOS DA INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

As descargas atmosféricas em linhas de transmissão resultam em sobretensões, transitórias e faltas. No momento em que a descarga acontece nos cabos de guarda, a corrente se divide conforme ilustrados na Fig. 2.1. Se a corrente proveniente da descarga não for direcionada para um caminho alternativo, serão provocados distúrbios na rede, como sobretensões, que podem ativar mecanismos de desligamentos, como *flashover* e *blackflashover*. Além disso, as descargas atmosféricas podem ocasionar riscos à segurança pessoal, como eletrocussão por tensões de toque e passo.

Figura 2.1: Dispersão da corrente após a incidência de raios em LTs.



**Fonte:** Autoria própria.

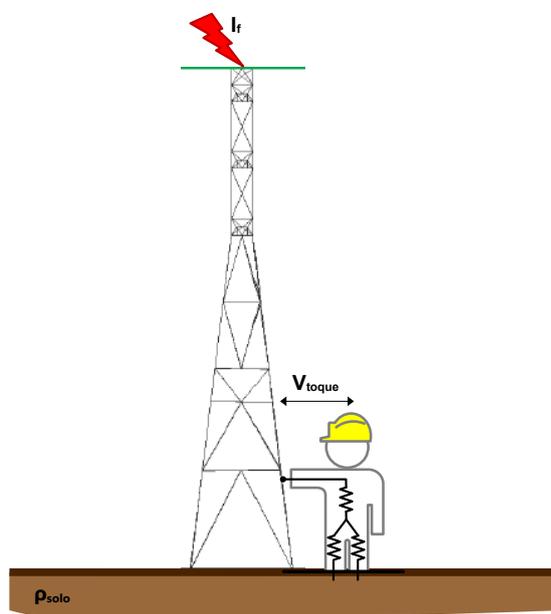
No *flashover* ocorre a incidência direta da descarga atmosférica nos condutores da linha de transmissão. Esse cenário acarreta em sobretensão nos condutores, que pode ser maior do que os isoladores podem suportar. Nesse caso ocorre um curto circuito entre fase e terra. No *blackflashover* a descarga atmosférica incide nos cabos de guarda da estrutura, projetados para prevenir o *flashover*.

O principal risco à segurança de pessoas é o contato com a parte metálica da torre. Nesse cenário o indivíduo está sujeito a tensão de toque, Fig. 2.2, definida como: “diferença de potencial entre um objeto metálico aterrado ou não e um ponto da superfície do solo separado

por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa; essa distância é convencionada igual a 1,0 m (ABNT, 2009). Nos eventos envolvendo a terra, a elevação de potencial do solo, sobretudo na zona de influência do eletrodo de aterramento, pode acarretar a exposição de pessoas a tensões de passo, Fig. 2.3, definida pela norma ABNT NBR 15751 como: “diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo separados pela distância de um passo de uma pessoa, considerada igual a 1,0 m” (ABNT, 2009).

O choque elétrico acontece quando a corrente elétrica flui através do corpo humano, afetando suas suas funções musculares, circulatórias e respiratórias, bem como a integridade dos tecidos. Suas consequências dependem, dentre outros fatores, da magnitude, da frequência, do tempo de exposição e da constituição física do indivíduo. Os principais impactos do choque elétrico no corpo humano, listados em ordem crescente de magnitude da corrente de eletrocussão, são: percepção cutânea, contração muscular, inconsciência, fibrilação cardíaca, bloqueio do sistema respiratório e queimaduras (IEEE, 2000).

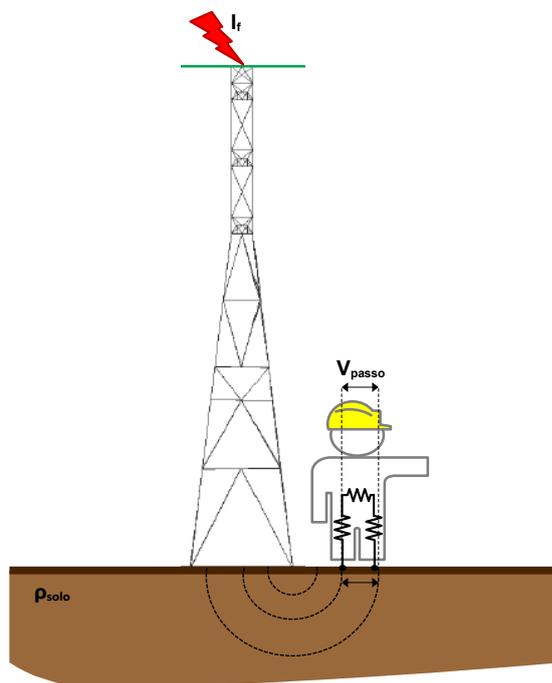
Figura 2.2: Tensão de toque.



Fonte: Autoria própria.

Uma corrente elétrica de até 0,5 mA é reconhecida como o limiar da percepção, ou seja, o indivíduo é capaz de perceber um leve formigamento nas mãos ou pontas dos dedos. Para

Figura 2.3: Tensão de passo.



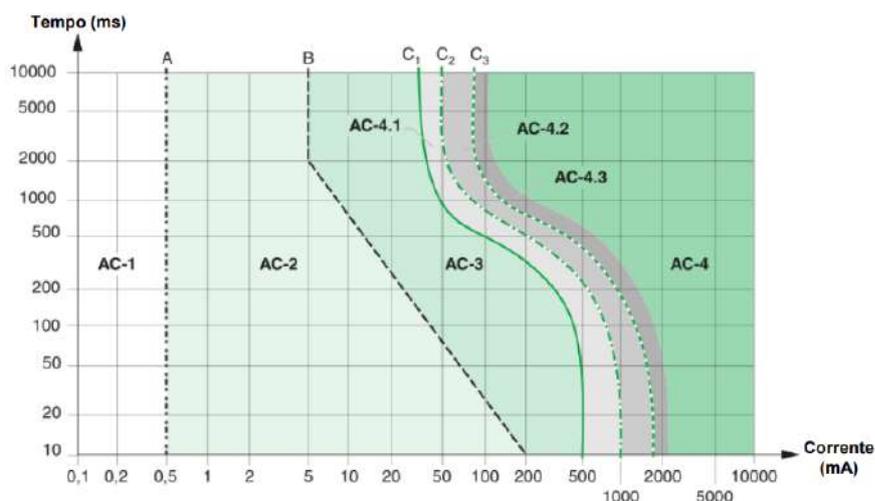
Fonte: Autoria própria.

correntes com magnitude na faixa de 1 mA a 6 mA, apesar de uma sensação incômoda, o indivíduo em contato com um material energizado não perde o controle muscular, portanto, ainda consegue largar o objeto. Correntes com valores entre 9 mA e 25 mA podem ser dolorosas, dificultar ou até mesmo impossibilitar a interrupção do contato com o elemento energizado. Valores maiores que a faixa anterior podem causar contrações musculares capazes de prejudicar a respiração. Tipicamente esses efeitos são temporários e desaparecem quando a corrente é interrompida, a menos que a respiração tenha sido afetada por um longo intervalo de tempo. A partir da faixa entre 60 mA a 100 mA pode ocorrer fibrilação ventricular e parada cardiorrespiratória, resultando em ferimentos graves e, eventualmente, óbito. Cada um desses efeitos podem ser observados na Fig. 2.4 e Tab. 2.1.

## 2.4 CÁLCULO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

O aterramento elétrico de uma LT tem o objetivo de evitar ou mitigar os efeitos da corrente de uma descarga atmosférica nos cabos de para-raios e torres, garantindo que o sistema de transmissão apresente desempenho adequado. Os sistemas de aterramento são compostos por três componentes: condutores, eletrodos e a terra (VISACRO, 2007b).

Figura 2.4: Curvas de corrente versus tempo e zonas conforme IEC 60479-1.



Fonte: (IEC, 1984).

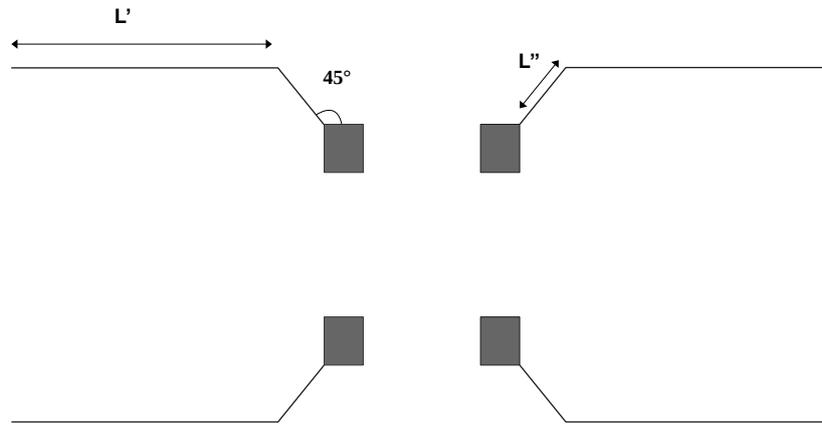
Tabela 2.1: Efeitos da corrente elétrica no corpo humano conforme IEC 60479-1

Zona	Efeitos
AC-1	Imperceptível
AC-2	Perceptível
AC-3	Efeitos reversíveis: contração muscular
AC-4	Possibilidade de efeitos irreversíveis
AC-4.1	Até 5% de probabilidade de fibrilação ventricular
AC-4.2	Até 50% de probabilidade de fibrilação ventricular
AC-4.3	Acima de 50% de probabilidade de fibrilação ventricular
Curva A	Limiar de percepção da corrente
Curva B	Limiar de reação muscular
Curva $C_1$	Limiar de 0% de probabilidade de fibrilação ventricular
Curva $C_2$	Limiar de 5% de probabilidade de fibrilação ventricular
Curva $C_3$	Limiar de 50% de probabilidade de fibrilação ventricular

Fonte: (IEC, 1984).

Os condutores são conectados aos pés das torres e ao sistema de aterramento imerso no solo. No Brasil a configuração típica de aterramento utilizada em LTs é composta por cabos contrapeso radiais de aço-cobre (4AWG), conforme apresentado na Fig. 2.5. O aterramento é normalmente representado por uma impedância, onde as ondas provenientes de descargas atmosféricas se propagam ao longo dos cabos contrapeso, que se comportam como uma linha de transmissão em um meio com perdas (VISACRO, 2007b).

Figura 2.5: Sistema de aterramento com contrapesos.



**Fonte:** Autoria própria.

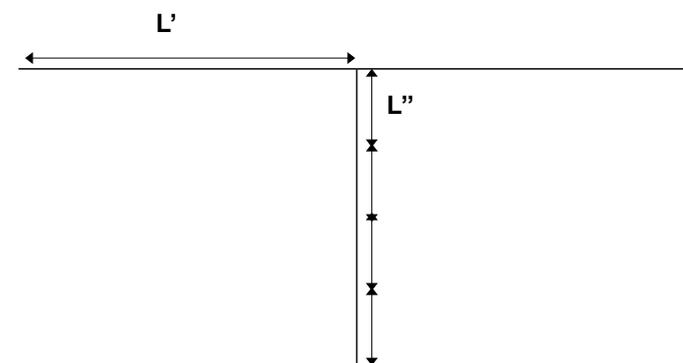
Por mais que se comporte como uma impedância, é comumente avaliada como resistência de aterramento, devido à maior viabilidade de medição desse parâmetro. Nas concessionárias de transmissão de energia, a resistência de aterramento adotada por grande parte delas é igual ou inferior a  $30 \Omega$ . É importante ressaltar que o valor da resistência reduzido não assegura valor reduzido da magnitude da impedância de aterramento (VISACRO, 2007a).

Quando o sistema de aterramento é extenso, é comum utilizar condutores horizontais enterados e interligados entre si, como uma malha, dessa forma substitui-se os eletrodos verticais, devido ao grande número de hastes que poderia ser necessário e, conseqüentemente, os potenciais que aparecem no solo para cada eletrodo utilizado (LEON, 1982). O sistema composto pelos contrapesos pode ser representado como uma malha, conforme ilustrado na Fig. 2.6. Dessa forma, a resistência de aterramento da malha é dada pela seguinte relação:

$$R_{malha} = \rho_{solo} \left[ \frac{1}{L_{total} + \frac{1}{\sqrt{20A_{malha}}}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A_{malha}}}} \right) \right], \quad (2.1)$$

em que,  $A_{malha}$  é área ocupada pela malha,  $h$  é a profundidade da malha, que pode variar entre 0,25 e 2,5 m, e  $L_{total} = 4L' + 4L''$  é o comprimento total dos condutores que formam as malhas (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995). Em solos com alta resistividade busca-se se diminuir a resistência de aterramento, e conforme apresentado pela Eq. 2.1 é necessário aumentar a profundidade, ou de forma mais significativa, aumentar o comprimento dos condutores e,

Figura 2.6: Modelagem para o cálculo do sistema de aterramento com contrapesos.



**Fonte:** Autoria própria.

consequentemente, a área de todo o sistema, inclusive a faixa de segurança.

## 2.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Foi realizada a exposição de conceitos fundamentais sobre o aterramento de torres de linhas de transmissão. As LTs estão sujeitas a diversas condições climáticas, sendo as descargas atmosféricas um dos principais agentes de interrupção no fornecimento de energia. Quando uma descarga atmosférica atinge uma LT, toda a sua estrutura metálica fica energizada. Além de provocar sobretensões, transitórios e faltas, a própria estrutura pode ser responsável por acidentes devido à exposição das pessoas à tensão de toque e de passo.

Para mitigar os efeitos da corrente de uma descarga atmosférica, são utilizados sistemas de proteção, como o sistema de aterramento. A resistência da malha de aterramento foi determinada pela Eq. 2.1, na qual os comprimentos dos condutores de contrapeso são os principais responsáveis por garantir baixa resistência de aterramento em solos com alta resistividade. Aumentar o comprimento dos contrapesos ou a profundidade em que estão enterrados pode afetar o custo final do sistema e sua complexidade.

Nesse contexto de influência da resistividade elétrica do solo, no capítulos subsequente serão apresentados os conceitos de resistividade de solos homogêneos e não homogêneos, além das propriedades da resistividade elétrica do concreto.

## CAPÍTULO 3

# RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO E DO CONCRETO

Um dos principais fatores que determinam o desempenho de um sistema de aterramento é o tipo de solo: a partir dos valores de resistividade elétrica do mesmo, é projetado todo o sistema. Nesse capítulo são estudadas as características de solos homogêneos e heterogêneos, além disso também foi analisado o comportamento do concreto em ambientes variados.

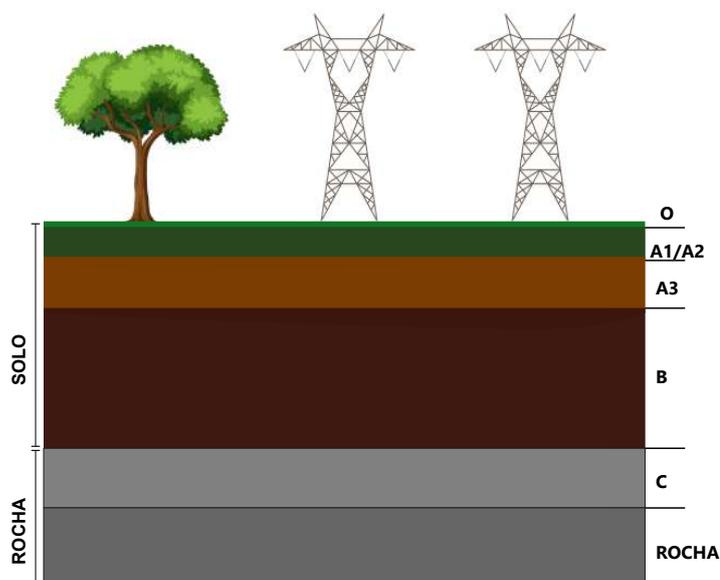
### 3.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO

O conceito de solo foi se moldando ao longo da formação do planeta. Em um determinado momento, rochas colidiram com o planeta e se fragmentaram diversas vezes, tornando-se pequenos grãos e, conseqüentemente, minerais. Com isso, as plantas começaram a se desenvolver, os animais surgiram e o solo começou a enriquecer-se com a decomposição de materiais orgânicos. O solo é a camada mais superficial da crosta terrestre, situada entre a litosfera e a atmosfera. É composto por sais minerais dissolvidos na água, resíduos orgânicos de seres vivos e rochas em decomposição (SANTOS, 2013).

Conforme apresentado na Fig. 3.1, o solo é composto por camadas com diferentes características. A camada **O** é o horizonte orgânico com matéria orgânica recente e/ou em decomposição, as camadas **A1**, **A2** e **A3** são compostas por galhos, frutos, folhas, sementes, além de urina, fezes, ossos e restos de animais. Todos esses materiais liberam minerais que são absorvidos pelas raízes e/ou levados pela água para a camada inferior. Na camada **B** o solo é rico em argila, carbonatos e materiais provenientes das camadas superiores. Na camada **C** há pedras e cascalho que fazem parte das rochas abaixo do solo, ou que foram trazidas por algum rio (SANTOS, 2013).

O solo é uma estrutura complexa, composta por elementos gasosos, sólidos e líquidos. A

Figura 3.1: Perfil do solo.



**Fonte:** Autoria própria.

resistividade elétrica do solo é dependente da presença de água, porosidade das partículas, tipo de eletrólito e temperatura. Em situações práticas, apresenta propriedade anisotrópica, ou seja, os valores variam com a direção (camadas verticais) e com a profundidade (camadas horizontais) (HE *et al.*, 2013). É possível distinguir os solos em três tipos: orgânico com resistividade de 5 a 500  $\Omega\text{m}$ , arenoso ou argiloso, com resistividade de 500 a 5000  $\Omega\text{m}$ , e rochoso, com resistividade acima de 5000  $\Omega\text{m}$  (RANDO, 2021). Alguns valores típicos estão apresentados na Tab. 3.1.

Tabela 3.1: Resistividades típicas de diversos tipos de solo

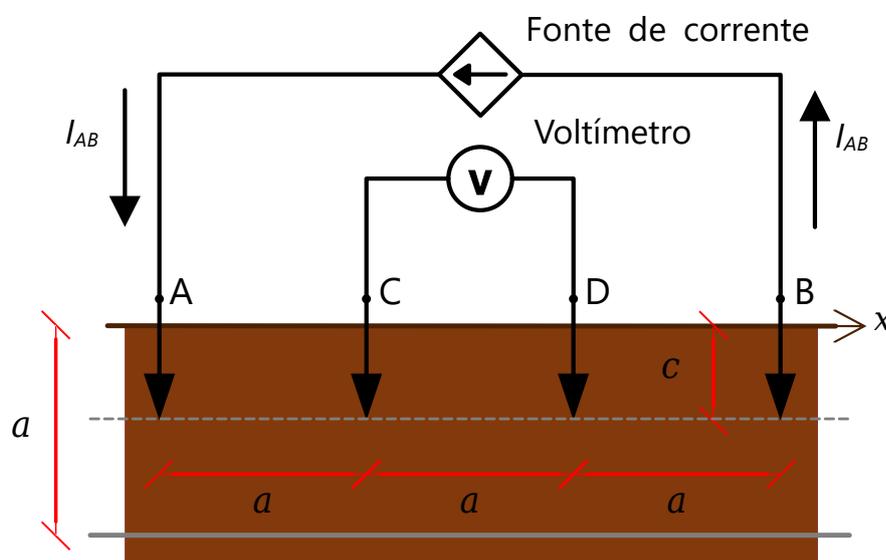
Tipo de solo	Resistividade elétrica ( $\Omega\text{m}$ )
Água do mar	< 10
Alagadiço, limo, húmus, lama	< 150
Água destilada	300
Argila	300-5000
Calcário	500-5000
Areia	1000-8000
Granito	1500-10000
Basalto	> 10000

**Fonte:** (ABNT, 2012).

Cada uma dessas camadas que compõem o solo implica em características que afetam a

resistividade elétrica do mesmo. Para sistemas de aterramento a resistividade elétrica do solo é o principal fator em projetos e proteção contra descargas atmosféricas e faltas em LTs. Existem sistemas de aterramento que estão presentes na primeira ou segunda camada, ou até mesmo entre a primeira e a segunda camada, porque o solo possui características irregulares. Existem sistemas que são mais profundos, como as hastes de aterramento, nesse caso pode percorrer as camadas **O**, **A1**, **A2** e até mesmo **A3**, porque depende do comprimento da haste e das espessuras de cada camada. Então, devido a essas irregularidades são necessárias técnicas de medições apropriadas, como o método de Wenner.

Figura 3.2: Método de Wenner.



Fonte: Autoria própria.

No método de Wenner são realizadas leituras sucessivas na superfície do solo, em locais distintos e o arranjo permite diversas profundidades. Cada um dos valores aferidos são chamados de resistência elétrica aparente. A medição utiliza quatro hastes alinhadas, igualmente espaçadas e cravadas no solo a mesma profundidade, conforme a Fig. 3.2. A corrente é injetada na haste A e coletada na haste B, a corrente que passa entre as hastes A e B produz potencial nas hastes C e D. Após, no mínimo, dois ensaios ao longo dos eixos de medições, conforme recomendado pela norma (ABNT, 2012) a resistividade aparente do solo pode ser escrita como a seguinte expressão:

$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4c^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + c^2}}}, \quad (3.1)$$

em que  $\rho_a$  é a resistividade aparente do solo medida conforme a profundidade  $a$  e  $R$  é a

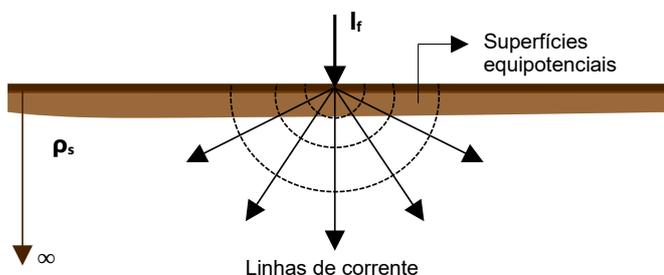
resistência aparente medida pelo método de Wenner (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

O resultado obtido pelo método de Wenner é dito aparente, mas foram apresentados no início do capítulo as propriedades que indicam que o solo é composto por camadas distintas e de diferentes espessuras. O ato de modelar o solo em camadas é chamado de estratificação, sendo que os modelos tipicamente avaliados são o modelo de solo uniforme, de duas camadas e multicamadas.

### 3.1.1 Modelo uniforme

Os solos uniformes não são comuns em meios naturais, isto é, os solos em sua maioria não possuem características uniformes. Mas o modelo é comumente utilizado para analisar o comportamento da corrente em meios de alta e baixa resistividade. Em um solo uniforme e semi-infinito, as linhas de corrente produzidas pela fonte pontual irradiam por todo o espaço, como a fonte pontual é considerada o centro, as respectivas superfícies equipotenciais são superfícies hemisféricas centradas no ponto fonte, conforme mostrado na Fig. 3.3.

Figura 3.3: Corrente em solo uniforme.



Fonte: Autoria própria.

O sistema de aterramento das torres de linhas de transmissão é o responsável por dissipar para a terra as correntes oriundas de faltas ou descargas atmosféricas. Quando a corrente entra em contato com o solo, a resistência de aterramento do sistema resulta no aumento do potencial, dessa forma a corrente máxima vezes a resistência de aterramento do sistema resulta no potencial máximo do sistema de aterramento, denominado GPR, do inglês, "ground potential rise" (IEEE, 2000).

Os diferentes níveis de potencial no solo podem deixar pessoas sujeitas a tensão de toque e de passo. A tensão de toque é a diferença entre o GPR e a superfície de contato, e a tensão de

passo ocorre quando ambos os pés do indivíduo, distanciados por um metro, encontram-se em potenciais diferentes (IEEE, 2000).

A resistência de aterramento e o GPR são os principais parâmetros do sistema de aterramento, mas o ponto chave é a elevação do potencial na superfície do solo, a partir do GPR é possível calcular parâmetros como tensão de toque e de passo. Os métodos numéricos comumente empregados na análise rigorosa de sistemas de aterramento baseiam-se no conceito de que o eletrodo aterramento pode ser analisado como pequenos segmentos, tais segmentos são tratados como fontes de corrente pontuais, dessa forma os potenciais são diretamente proporcionais à corrente, então só é preciso obter o campo elétrico produzido por uma fonte de corrente pontual unitária para calcular o potencial de um ponto arbitrário  $P(r, z)$ :

$$GPR(r, z) = \sum_{i=1}^N I_i G_i(r, z) \quad (3.2)$$

em que  $N$  é o número total de segmentos,  $I_i$  é a corrente através do  $i$ -ésimo segmento e  $G_i(r, z)$  é o potencial do ponto  $P$  produzido pela fonte de corrente pontual unitária do  $i$ -ésimo segmento (HE *et al.*, 2013).

A modelagem matemática nesse cenário considera que cada fundação da torre se comporta como um eletrodo submetido a uma fonte de corrente  $I_f$ , devido a simetria da torre, a corrente é dividida em parcelas iguais, ou seja, cada pé da torre está submetido a  $I_f/4$ . Cada fundação possui uma localização espacial  $P_0(x_0, y_0, z_0)$ ,  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $P_2(x_2, y_2, z_2)$  e  $P_3(x_3, y_3, z_3)$ , dessa forma são produzidos potenciais na superfície do solo em um ponto  $O(x, y, z)$ , conforme ilustrado na Fig.3.4 e dados por:

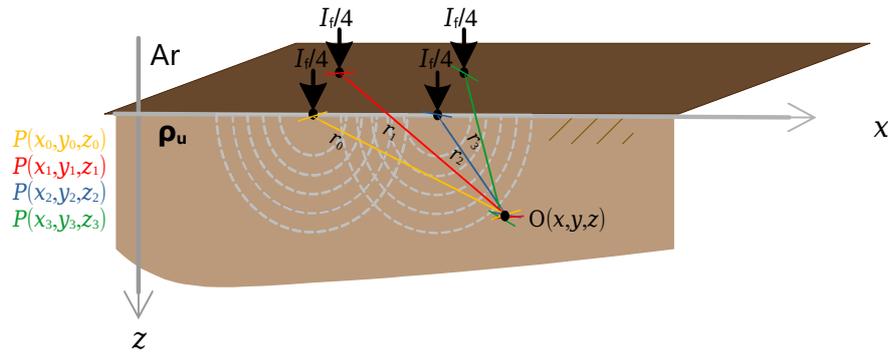
$$U_s(r) = U_s(r_0) + U_s(r_1) + U_s(r_2) + U_s(r_3), \quad (3.3)$$

$$U_s(r) = \frac{\rho_u I_0}{2\pi r_0} + \frac{\rho_u I_1}{2\pi r_1} + \frac{\rho_u I_2}{2\pi r_2} + \frac{\rho_u I_3}{2\pi r_3} [V], \quad (3.4)$$

$$r_0 = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} [m], \quad (3.5)$$

$$r_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} [m], \quad (3.6)$$

Figura 3.4: Potenciais escalares em meio uniforme.



Fonte: Autoria própria.

$$r_2 = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} [m], \quad (3.7)$$

$$r_3 = \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} [m], \quad (3.8)$$

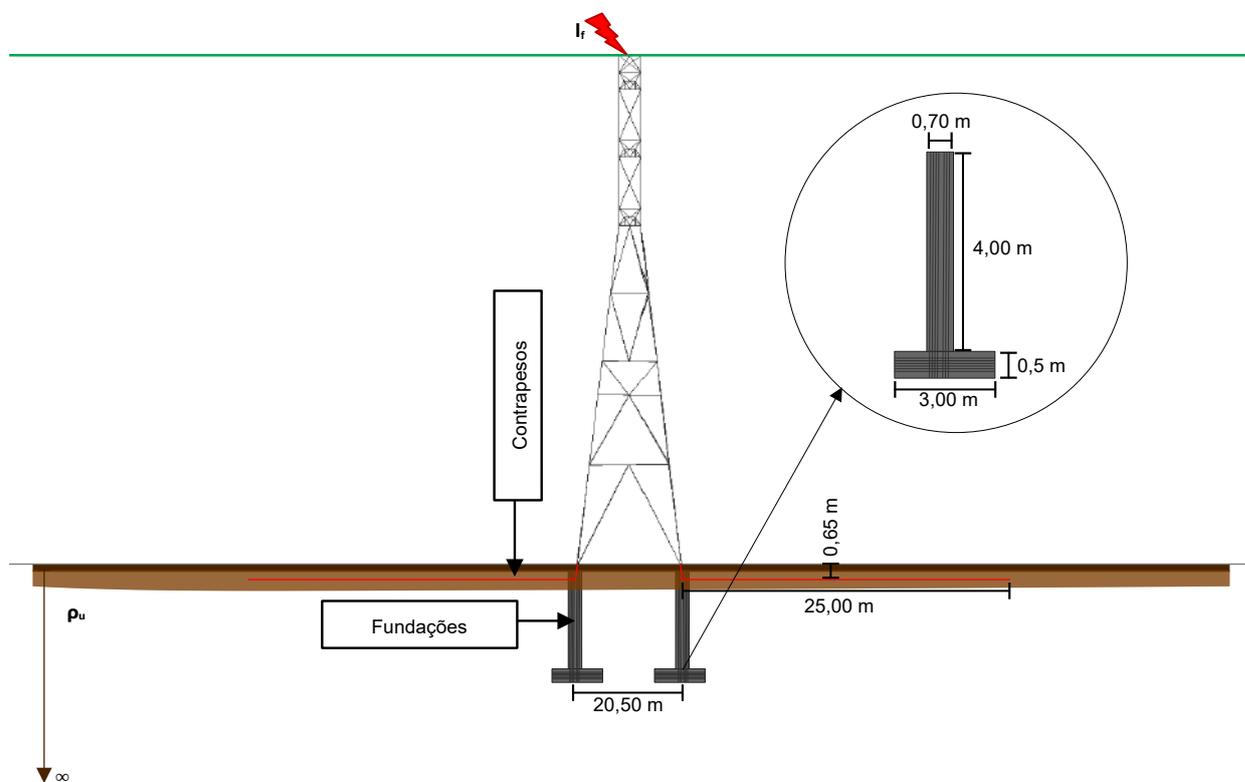
Nesse cenário é possível analisar o comportamento da corrente na fundação de torres de LTs quando a resistividade do solo é menor que a resistividade do concreto e quando a resistividade do solo é maior que a resistividade do concreto. A Fig. 3.5 ilustra o sistema de aterramento proposto em meio uniforme.

### 3.1.2 Modelo de duas camadas

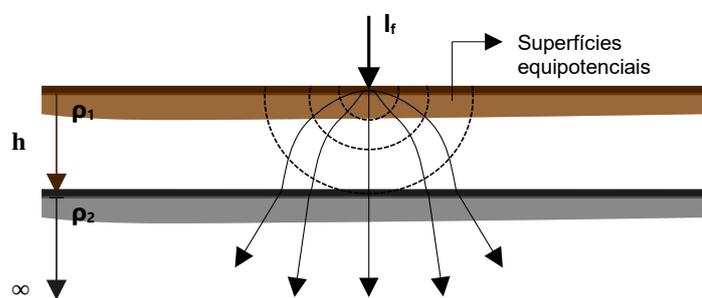
Os solos não uniformes são os mais comumente encontrados em projetos de sistemas de aterramento, podem ter topologia horizontal ou vertical, mas para esse trabalho foi considerado modelo de duas camadas horizontais. Assim como no solo uniforme, as linhas de corrente produzidas pela fonte pontual irradiam por todo o espaço, como a fonte pontual é considerada o centro, as respectivas superfícies equipotenciais são superfícies hemisféricas centradas no ponto fonte. O que muda é o percurso da corrente ao se deparar com a segunda camada, conforme ilustrado pelas Figs. 3.6 e 3.7.

Nesse cenário há duas configurações possíveis:  $\rho_1 > \rho_2$  e  $\rho_1 < \rho_2$ , em que a primeira camada possui espessura finita igual a  $h$  e a segunda camada espessura infinita, isto é,  $h = \infty$ . Aqui

Figura 3.5: Fundações da torre de LTs em solo uniforme.

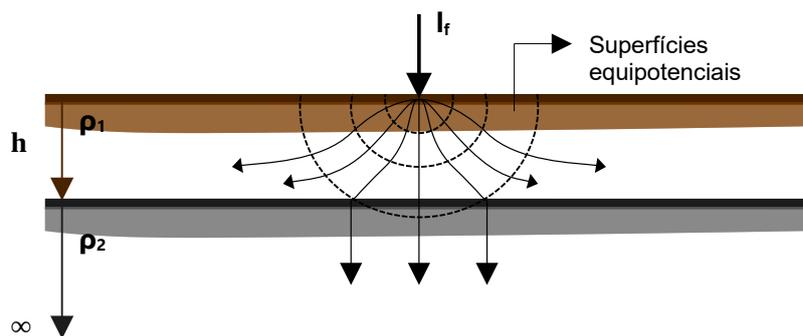


Fonte: Autoria própria.

Figura 3.6: Corrente em solo de duas camadas ( $\rho_1 > \rho_2$ ).

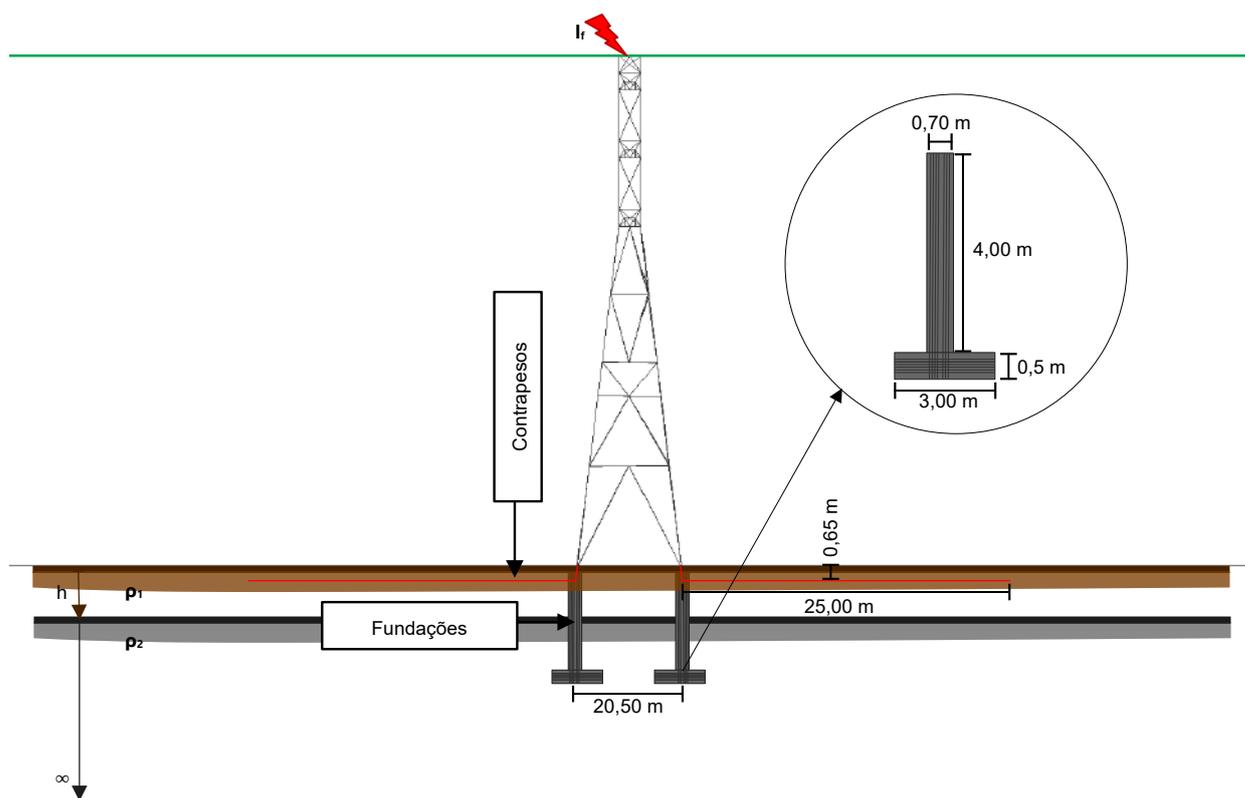
Fonte: Autoria própria.

é possível analisar o comportamento da corrente na fundação de torres de LTs quando imersa em solos de diferentes resistividades. A Fig. 3.8 ilustra o sistema de aterramento proposto em meio não uniforme.

Figura 3.7: Corrente em solo de duas camadas ( $\rho_1 < \rho_2$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 3.8: Fundações da torre de LTs em solo com duas camadas



Fonte: Autoria própria.

A modelagem matemática parte do mesmo princípio apresentado para solo uniforme, a diferença é que agora há duas camadas com resistividades distintas. Então se o ponto fonte e

o ponto de observação estão na primeira camada, é considerada a seguinte relação:

$$\hat{U}_{11} = \frac{\hat{I}_j \rho_1}{4\psi} \left\{ \psi(0) + \psi(e) + \sum_{n=1}^{\infty} k^n [\psi(nh) + \psi(nh + e) + \psi(-nh) + \psi(-nh) + e] \right\}. \quad (3.9)$$

Se o ponto fonte está na primeira camada e o de observação na segunda, a relação se torna:

$$\hat{U}_{12} = \frac{\hat{I}_j \rho_1 (1 + k)}{4\psi} \left\{ \psi(0) + \psi(e) + \sum_{n=1}^{\infty} k^n [\psi(nh) + \psi(nh + e)] \right\}. \quad (3.10)$$

Se o ponto fonte está na segunda camada e o de observação na primeira, o potencial é dado por:

$$\hat{U}_{21} = \frac{\hat{I}_j \rho_2}{4\psi} \left\{ \psi(0) + \psi(e) + \sum_{n=1}^{\infty} k^n [\psi(-nh) + \psi(nh + e) - \psi((-n-1)h) - \psi((n-1)h) + e] \right\}. \quad (3.11)$$

Por fim, se o ponto fonte está na segunda camada e o de observação na segunda:

$$\hat{U}_{22} = \frac{\hat{I}_j \rho_2}{4\psi} \left\{ \psi(0) + \psi(e) + \sum_{n=1}^{\infty} k^n [\psi(nh + e) - \psi((n-2)h + e)] \right\}. \quad (3.12)$$

Nas relações apresentadas, a função  $\psi$  é definida como:

$$\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{r_j^2 + (2x + b)^2}} \quad (3.13)$$

em que  $\rho_1$  e  $\rho_2$  são respectivamente a resistividade elétrica do solo na primeira e segunda camada,  $h$  é a espessura da primeira camada,  $e$  é a distancia vertical até o ponto fonte e  $b$  é a distancia vertical do ponto fonte até o ponto de observação (MARTINS-BRITTO, 2017).

### 3.1.3 Modelo multicamadas

O solo multicamadas é o modelo real, como apresentado na Fig. 3.9. O modelo é constituído por  $N$  camadas horizontais ou verticais, cada uma dessas camadas é composta por resistividades elétricas distintas. Assim como o modelo de duas camadas, a última camada possui espessura infinita. Dessa forma, o solo de multicamadas pode ser reduzido a um modelo equivalente de duas camadas (MARTINS-BRITTO, 2017).

Figura 3.9: Modelo de solo multicamadas.



Fonte: Autoria própria.

### 3.2 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO

A fabricação de concreto, no início, era composta por três materiais: cimento, água e agregados como areia e brita. Mas com o passar do tempo, aditivos químicos foram adicionados à mistura com o objetivo de melhorar as propriedades no estado fresco e endurecido. A relação água/cimento faz parte das principais características que compõem a resistência mecânica do concreto (NEVILLE, 2015).

A mistura de água e cimento é chamada de pasta de cimento, além disso a mistura é higroscópica, devido à característica hidrofílica do cimento. Dessa forma a quantidade final de água na pasta depende da umidade do ambiente. Mesmo em umidades baixas a água no cimento hidratado é retida em diferentes graus de energia. "Em um extremo, está a água livre; no outro, está a água quimicamente combinada que constitui parte definitiva dos compostos hidratados. Entre essas duas categorias está a água de gel, retida em diversas outras formas" (NEVILLE, 2015).

Assim como qualquer material, o concreto também possui propriedades elétricas. A mistura pode ser considerada como um semicondutor quando úmida, com resistividade de até  $100 \Omega\text{m}$ . Mas também pode ser vista como um isolante quando seca ao ar, com resistividade de até  $10^4 \Omega\text{m}$ . Quando secos em estufas a resistividade pode atingir  $10^9 \Omega\text{m}$  (NEVILLE, 2015).

De acordo com (HE *et al.*, 2013), cerca de 20 a 25% do peso da mistura do concreto é composto por água. Os autores também mostram que um bloco de concreto enterrado no solo

se comporta como semicondutor, com resistividade de 30 a 90  $\Omega\text{m}$ , e que em solos úmidos, ou seja, com alto teor de água a resistividade está entre 25 e 40  $\Omega\text{m}$ . Além disso, muitos experimentos indicam que quando o teor de água do solo ultrapassa 1%, o teor de água absorvido pelo concreto pode atingir cerca de 5 a 10% do peso do concreto após o mesmo ficar enterrado no solo por períodos de 1 e 6 meses.

Assim como os diferentes tipo de solo, a resistividade elétrica do concreto pode ser influenciada pela quantidade água, o que implica em técnicas cura, no grau de hidratação do cimento e umidade, agregados como calcário, areia e granito, temperatura, carbonação, minerais e aditivos. Dessa forma a resistividade elétrica do concreto pode carregar várias informações a respeito da resistência mecânica do material.

Segundo (LAYSSI H.; SALEHI, 2015), as técnicas de medição de resistividade estão se tornando muito populares entre pesquisadores e acadêmicos no controle de qualidade e avaliação da durabilidade do concreto. Por mais que a execução do ensaio seja trivial, os autores apresentam dificuldades em obter valores confiáveis por meio das técnicas existentes. Primeiro porque o material seco se comporta como isolante e, úmido, como condutor, além disso o concreto apresenta propriedades capacitivas. As medições realizadas com corrente contínua provocam altos efeitos de polarização, dessa forma os autores incentivam o uso de corrente alternada na medição da resistência, mas também informam que o uso de correntes alternadas introduz reatância nas medições. Em (NEVILLE, 2015), não se reporta diferença significativa de resistividade entre corrente contínua e alternada a 50 Hz.

É possível obter concreto com características condutoras se os agregados forem substituídos por material granular condutor, como carbono cristalino, a resistividade elétrica do concreto pode apresentar valores entre 0,005 e 0,2  $\Omega\text{m}$ , além disso as propriedades mecânicas não são afetadas significativamente (NEVILLE, 2015).

Nos cenários apresentados neste capítulo, a resistividade do concreto considerada nas simulações foram obtidas do estudo sobre a resistividade elétrica superficial do concreto e a influência da cura apresentado em (SILVA, 2016). O objetivo do autor foi avaliar o comportamento e desempenho da resistividade elétrica do concreto, baseado na influência do tempo de cura. No estudo, foram realizadas medições diariamente por 542 dias em três tipos de amostra. As características da amostra escolhida estão apresentadas na Tabela 3.2. Os valores

de resistividade elétrica no 1<sup>o</sup>, 7<sup>o</sup>, 14<sup>o</sup>, 91<sup>o</sup>, 255<sup>o</sup> e 542<sup>o</sup> dias para a amostra sem cura, com cura submersa por 7 dias e com cura submersa por 14 dias estão apresentados na Tabela 3.3. A amostra C60 foi escolhida porque apresenta a menor relação água/cimento, compondo um cenário mais conservador.

Tabela 3.2: Propriedades do concreto

Nomenclatura	Resistência à compressão	Traço (cim:areia:brita:água)
C60	60MPa	Traço (1:1,32:2,10:0,37)
<b>Consumo de materiais</b>		
Cimento (kg/m <sup>3</sup> )		480
Areia fina (kg/m <sup>3</sup> )		190
Areia grossa (kg/m <sup>3</sup> )		445
Brita 0 (kg/m <sup>3</sup> )		255
Brita 1 (kg/m <sup>3</sup> )		755
Água (kg/m <sup>3</sup> )		178
Sílica ativa (kg/m <sup>3</sup> )		30
Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )		3,48
Superplastificante (L/m <sup>3</sup> )		0,125
<b>Consumo das misturas</b>		
Relação água/aglomerante		0,35
Relação água/cimento		0,37
Argamassa seca (%)		38,64
Água/materiais secos (%)		8,26

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.3: Resistividade elétrica do concreto

Número de dias	Resistividade elétrica ( $\Omega\text{m}$ )		
	<i>SC</i>	<i>CC7</i>	<i>CC14</i>
1	26	23	24
7	220	110	110
14	700	340	210
91	4500	1250	3000
255	20000	5000	6000
542	15000	10000	6000

Fonte: Autoria própria.

### 3.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Foi realizado um estudo sobre a resistividade elétrica do solo, utilizando métodos de medição tradicionais, como o método de Wenner. Em seguida, foram apresentados modelos de solo homogêneo e não homogêneo, introduzindo a modelagem matemática dos efeitos da corrente e dos potenciais de superfície provocados pelas fundações de torres de LTs.

Além disso, também foi examinado o comportamento da resistividade elétrica do concreto presente na fundação. Foi observado que, da mesma forma que no solo, a presença de umidade no concreto contribui para níveis menores de resistividade elétrica.

Assim, a partir do desenvolvimento apresentado no Capítulo 2 e neste capítulo, o próximo capítulo apresentará o estudo das fundações de LTs como sistema de aterramento. A análise será realizada por meio de comparações entre os estudos presentes na literatura e simulações realizadas pelo software CDEGS, que permite a implementação de diferentes modelos de solo e malhas de aterramento..

# ESTUDO DA FUNDAÇÃO DA TORRE COMO SISTEMA DE ATERRAMENTO

Em solos homogêneos a resistividade elétrica não varia, dessa forma o modelo uniforme está longe da representação real. Mas em uma primeira análise é fundamental para observar o comportamento da fundação da torre como sistema de aterramento em dois cenários limite:  $\rho_C > \rho_s$  e  $\rho_C < \rho_s$ .

O modelo de solo heterogêneo representa os cenários reais encontrados durante a implementação dos sistemas de aterramento em torres de linhas de transmissão. Nesse cenário em que o solo não possui resistividade elétrica uniforme, foi considerado o modelo de duas camadas, a primeira camada com resistividade  $\rho_1$  e espessura finita  $h = 2$  m e a segunda camada com resistividade  $\rho_2$  e espessura infinita. Os potenciais de superfície variam conforme a localização do ponto de observação e a fonte responsável por dissipar a corrente no solo, conforme apresentado no Cap. 3.

No modelo de solos de duas camadas foram considerados dois cenários: no primeiro cenário a fundação está imersa em solo de duas camadas, a primeira camada possui resistividade elétrica ( $\rho_1$ ) de  $100 \Omega\text{m}$  e segunda camada possui resistividade elétrica ( $\rho_2$ ) de  $1000 \Omega\text{m}$ . No segundo cenário encontra-se também imersa em solo de duas camadas, a primeira camada possui resistividade  $\rho_1$  de  $1000 \Omega\text{m}$  e a segunda camada possui resistividade  $\rho_2$  de  $100 \Omega\text{m}$ . O cenário em que a primeira camada possui espessura maior que a profundidade da fundação se comporta de forma semelhante ao estudo em solo uniforme (CABRAL *et al.*, 2016).

Os resultados obtidos são apresentados de forma gráfica no software MALZ, integrante do pacote CDEGS, o qual é baseado em teoria circuital nodal, no domínio da frequência, para simulação de malhas arbitrárias de condutores enterrados, na presença de solo com múltiplas camadas, levando em consideração as quedas ôhmicas nos condutores de aterramento (DAWALIBI, 2014)(DAWALIBI; DONOSO, 1993a). O software utilizado é mundialmente conhecido

como o padrão da indústria para o cálculo de interferências eletromagnéticas (EMIs) e análises de aterramento (SES, 2014)(DAWALIBI; DONOSO, 1993b).

Em todos os casos estudados, a corrente alternada (CA) injetada no sistema é de 1000 A. As dimensões da fundação da torre são obtidas de um projeto real de uma linha de transmissão de 500 kV, e são utilizados vergalhões de aço de 4 mm para a disposição da estrutura metálica. Cinco casos diferentes são estudados para os cenários apresentados:

- (a) Estrutura metálica da fundação com concreto e sem contrapeso,
- (b) Estrutura metálica da fundação com concreto e com contrapeso,
- (c) Sem a estrutura metálica da fundação e com contrapeso,
- (d) Estrutura metálica da fundação sem concreto e sem contrapeso,
- (e) Estrutura metálica da fundação sem concreto e com contrapeso.

#### 4.1 ANÁLISE DO MODELO UNIFORME

Em uma primeira análise não foi considerado os efeitos do concreto no sistema de aterramento, dessa forma as análises foram entre os casos (c), (d) e (e). Para  $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ , a impedância de aterramento do caso (d) é maior que a impedância do caso (c) e (e). Para  $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ , a impedância de aterramento do caso (d) também é maior que a impedância do caso (c) e (e). Mesmo com os condutores conectados à estrutura metálica da fundação, a corrente distribuída no caso (e) é predominante nos contrapesos devido a impedância da estrutura metálica da fundação apresentar componente resistiva maior que o sistema composto somente pelos contrapesos. Além disso, a densidade de corrente do caso (e), Fig. 4.9, é menor se comparada ao caso (c), Fig. 4.7, o que significa que os potenciais na superfície do solo serão menores conforme apresentado na Fig.4.9b. O mesmo é observado para  $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ , Figs. 4.16 a 4.18.

A segunda análise consiste em considerar os efeitos do concreto no sistema de aterramento, dessa forma a análise foi entre os casos (a) e (b). Para os casos em que o concreto não é submetido aos processos de cura submersa, os resultados apresentados nas Tabs. 4.1 e 4.2 e

nas Figs. 4.1 a 4.6 e Figs. 4.10 a 4.15, mostram que, quanto maior a umidade do concreto, menor a sua resistividade elétrica. O concreto sem cura representa o cenário em que a fundação encontra-se imersa em solos secos, ou seja, com baixa umidade. Outro ponto importante é que o valor da resistividade do concreto no 542º dia só ocorre quando a mistura está submetida a umidade do ar, então mesmo para solos secos a resistividade é muito menor, como já comentado. Dessa forma os valores de resistividade do concreto sem cura medidos no 14º dia estão próximos do cenário real. Além disso, é possível observar que quanto menor é a resistividade elétrica do concreto, maior será a densidade de corrente na fundação.

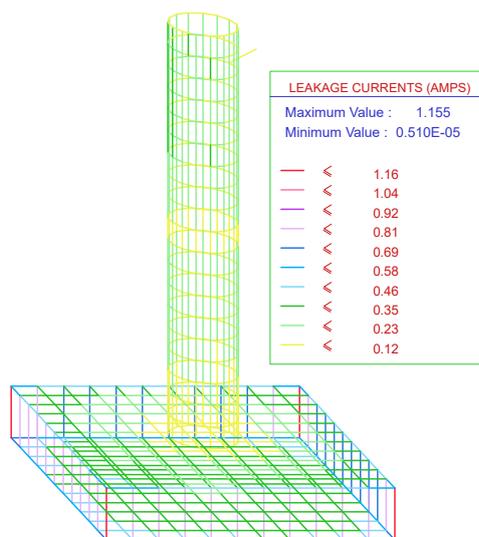
Para  $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ , a impedância de aterramento do caso (a) no 14º dia é maior que a impedância do caso (b). Para  $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ , a impedância de aterramento do caso (a) no 14º dia também é maior que a impedância do caso (b). Mesmo com os condutores conectados à estrutura metálica da fundação, a corrente distribuída no caso (b) é predominante nos contrapesos devido o caso (a) apresentar resistividade maior. O valor máximo da densidade de corrente no caso (b) está a 25 m da torre, o que contribui para potenciais menores na superfície do solo. Já o valor máximo da densidade de corrente do caso (a) está a 4,60 m da superfície da torre, apesar do valor máximo da corrente ser menor se comparado ao caso (b), a profundidade da fundação não é suficiente para níveis de potenciais menores na superfície. Por mais que o caso (b) tenha potenciais de superfície menores do que em (a) as regiões equipotenciais em (a) são maiores do que em (b). Regiões equipotenciais maiores, ou seja, mais distante umas das outras reduzem os riscos dos usuários sofrerem choques ocasionados pela tensão de passo. Por outro lado, a tensão de toque apresenta riscos maiores.

Para  $\rho_s < \rho_C$ , Figs. 4.10 a 4.15 o comportamento dos casos estudados se aproximam do método de aterramento tradicional (c). Em especial o caso (b) que apresenta valores de impedância, tensão de toque e tensão de passo inferiores ao caso (c). Para  $\rho_s > \rho_C$  o comportamento dos casos estudados divergem do método de aterramento tradicional (c). A impedância dos casos quando comparada ao caso (c) não há alteração significativa, a tensão de toque do caso (a) se aproxima do caso (c), mas o cenário muda de forma significativa entre os casos (b) e (c), devido ao contrapeso estar posicionado na região de maior resistividade. O caso (a) apresenta tensões de passo significativamente maiores do que os casos (b) e (c).

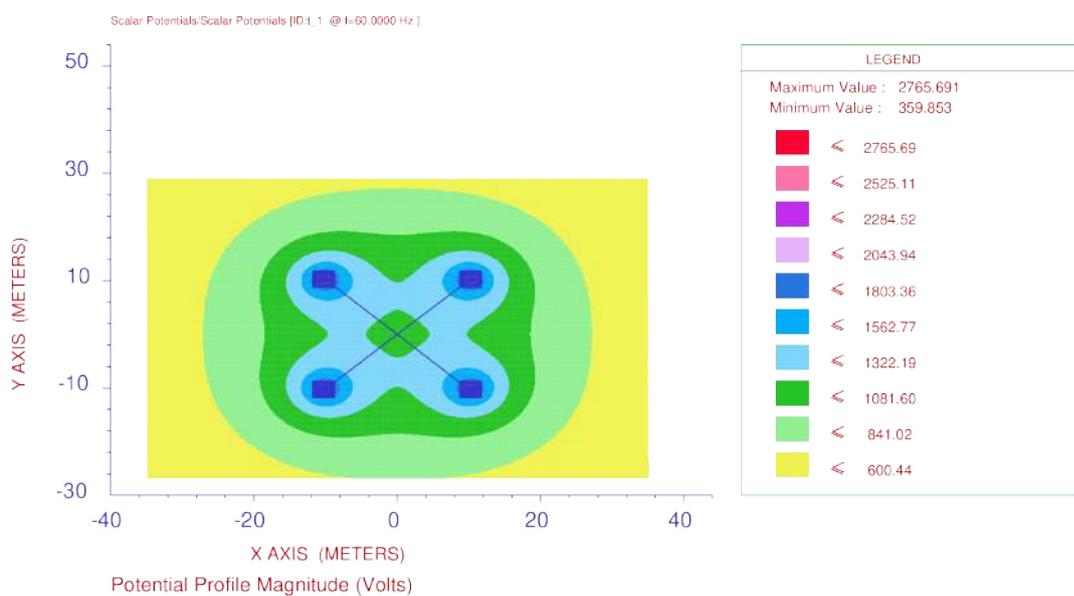
Apesar das dimensões da fundação serem pequenas quando comparadas às dimensões do

solo uniforme, o coeficiente de reflexão ( $k$ ) está presente nas fronteiras que o concreto entra em contato com o solo. Quando  $\rho_C > \rho_s$ , a corrente procura o cenário de menor resistividade e apresenta tensão de toque e de passo inferiores conforme analisado em solos heterogêneos com duas camadas ( $\rho_1 < \rho_2$ ). O oposto é observado quando  $\rho_C < \rho_s$ , a corrente tentar permanecer na fundação então apresenta níveis de tensão de toque e de passo maiores.

Figura 4.1: Caso (a) - concreto sem cura ( $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ ).



(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 700 \Omega\text{m}$ ).

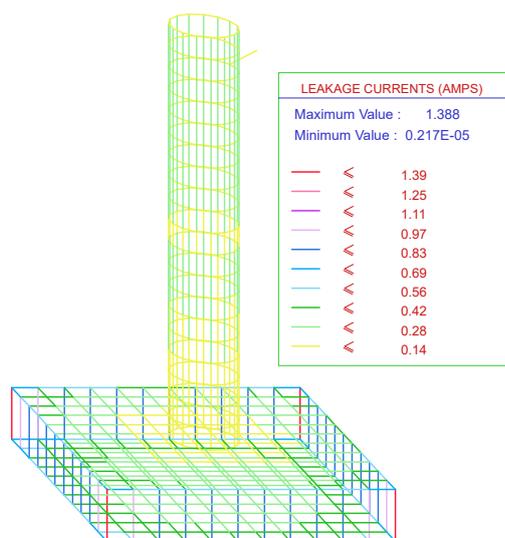


(b) GPR ( $\rho_C = 700 \Omega\text{m}$ ).

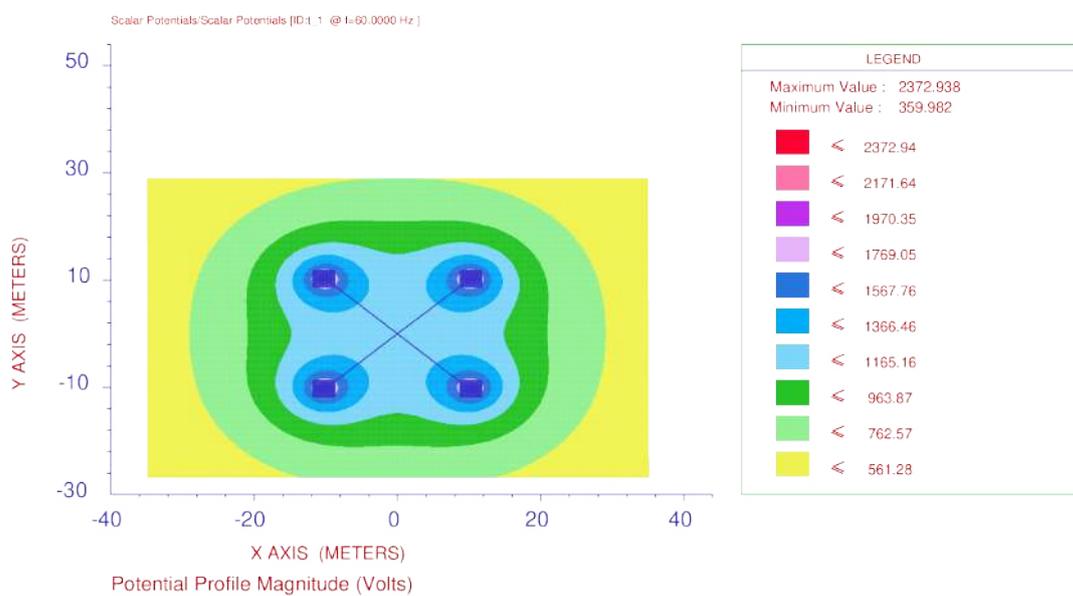
Fonte:

Autoria própria.

Figura 4.2: Caso (a) - concreto com cura por 7 dias ( $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ ).

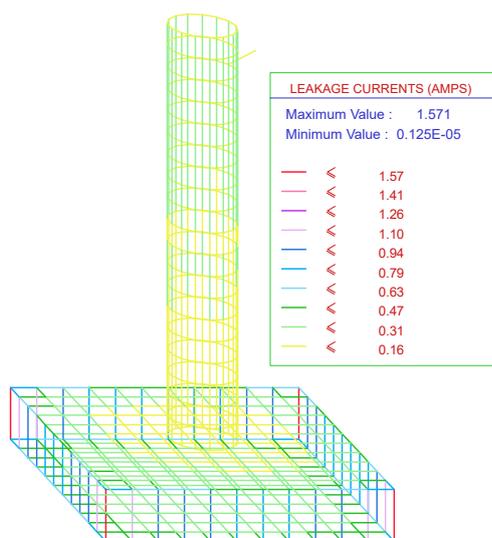
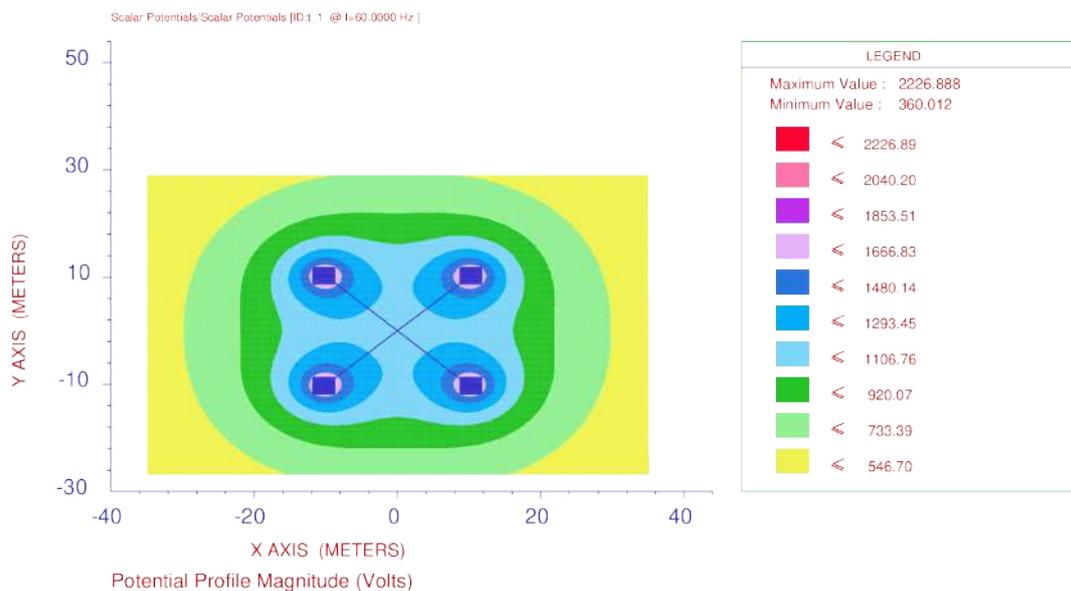


(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 340 \Omega\text{m}$ ).



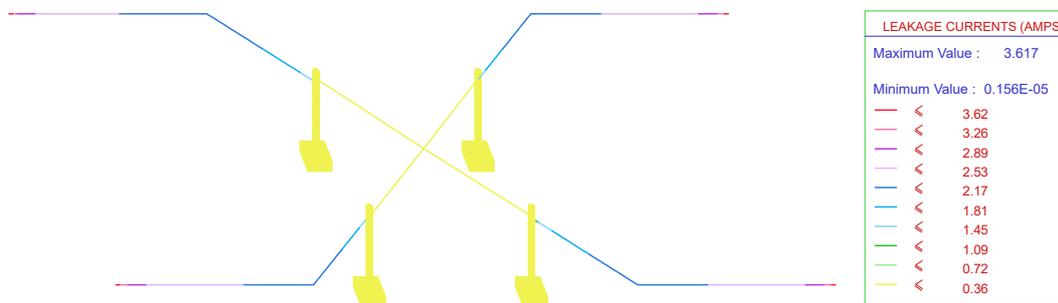
(b) GPR ( $\rho_C = 340 \Omega\text{m}$ ).

Fonte: Autoria própria.

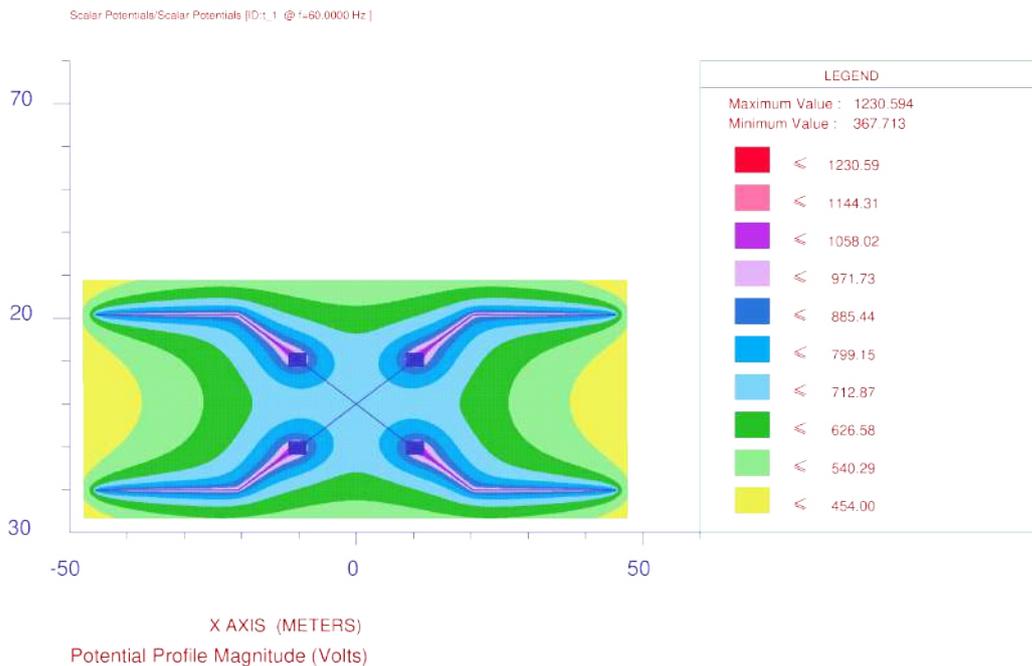
Figura 4.3: Caso (a) - concreto com cura por 14 dias ( $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ ).(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 210 \Omega\text{m}$ ).(b) GPR ( $\rho_C = 210 \Omega\text{m}$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.4: Caso (b) - concreto sem cura ( $\rho_s = 100 \Omega m$ ).



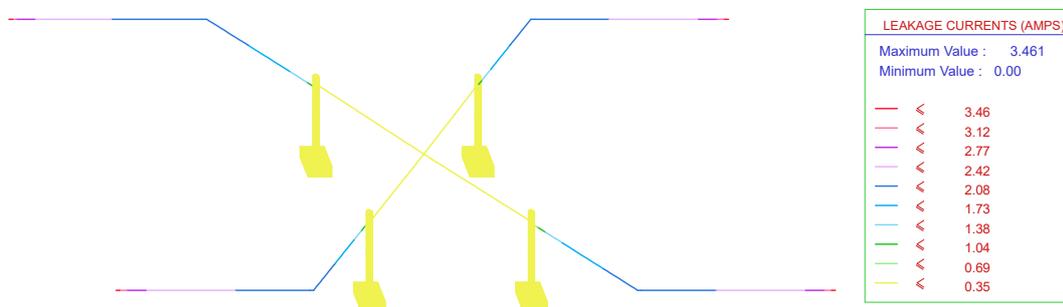
(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 700 \Omega m$ ).



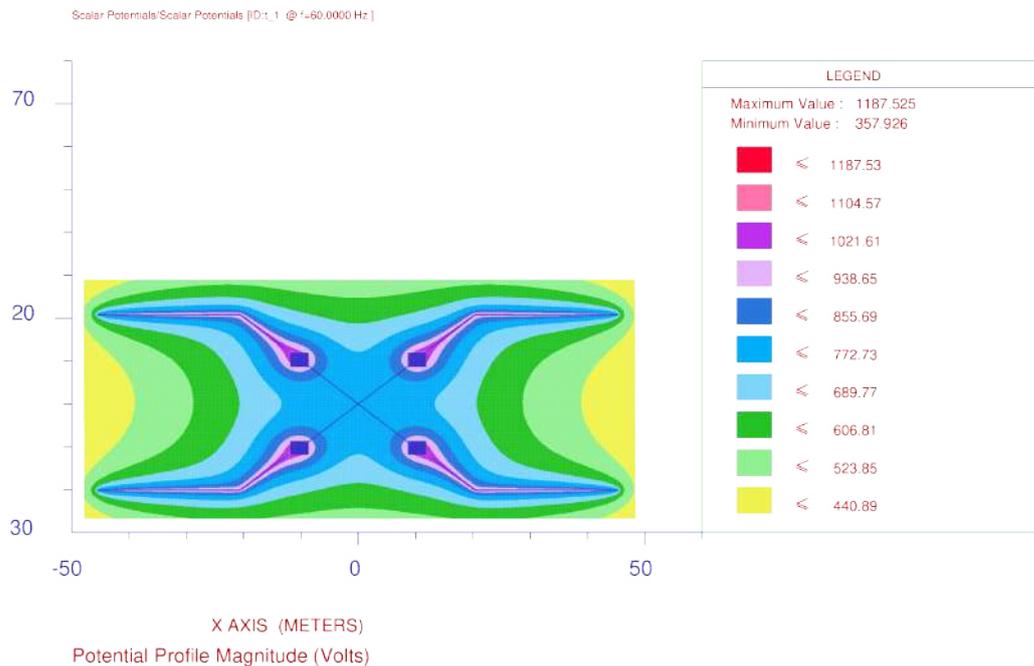
(b) GPR ( $\rho_C = 700 \Omega m$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.5: Caso (b) - concreto com cura por 7 dias ( $\rho_s = 100 \Omega m$ ).



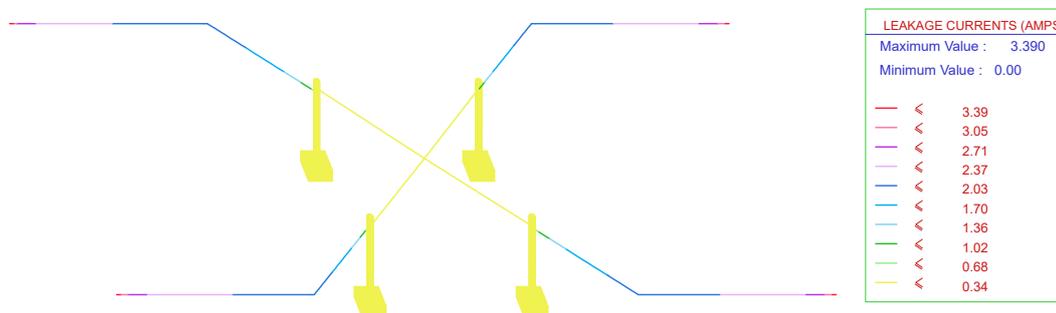
(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 340 \Omega m$ ).



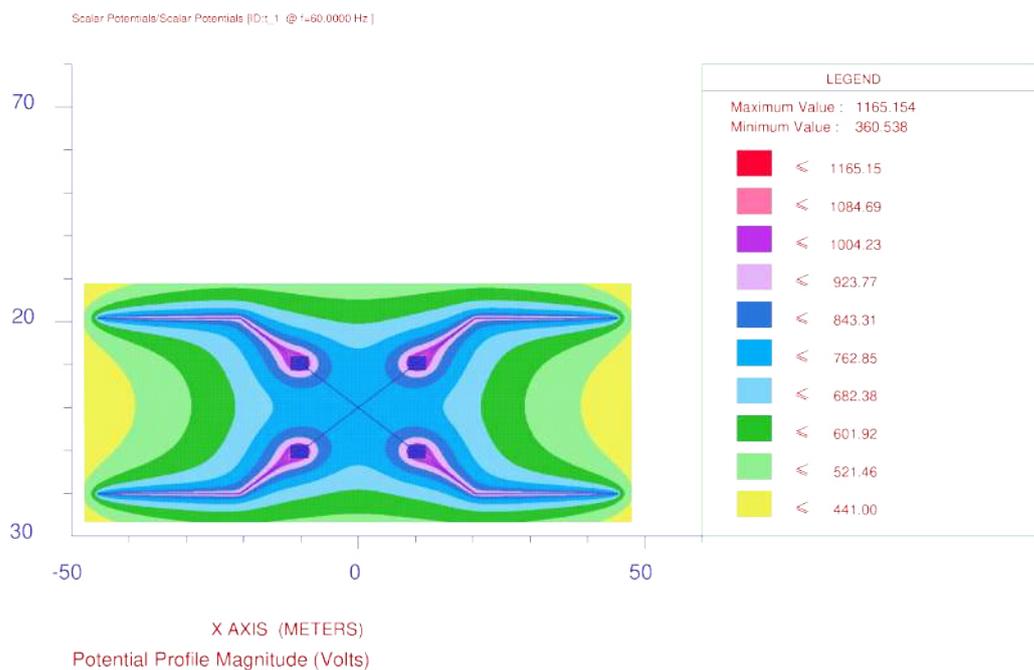
(b) GPR ( $\rho_C = 340 \Omega m$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.6: Caso (b) - concreto com cura por 14 dias ( $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ ).



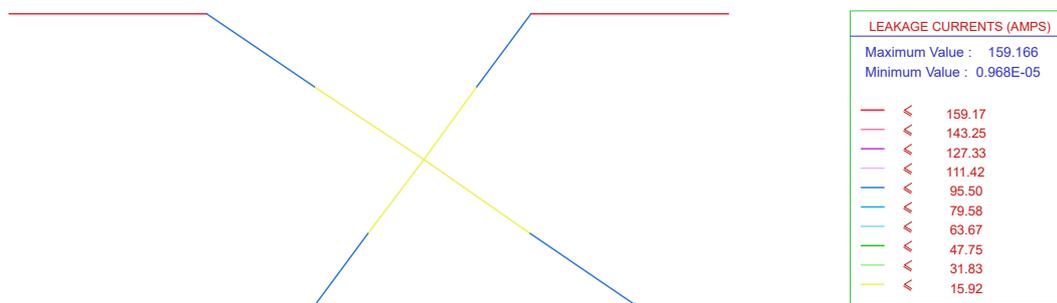
(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 210 \Omega\text{m}$ )



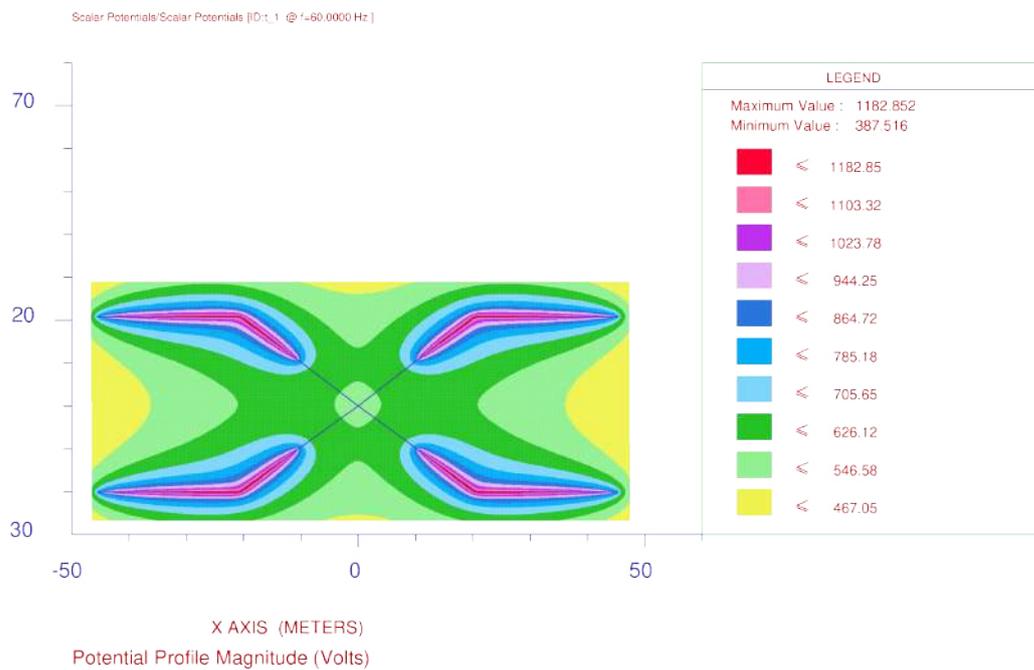
(b) GPR ( $\rho_C = 210 \Omega\text{m}$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.7: Caso (c) - densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ ).

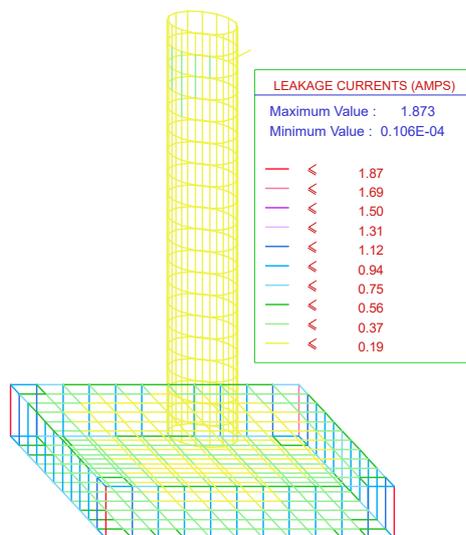


(a) Densidade de corrente de fuga.

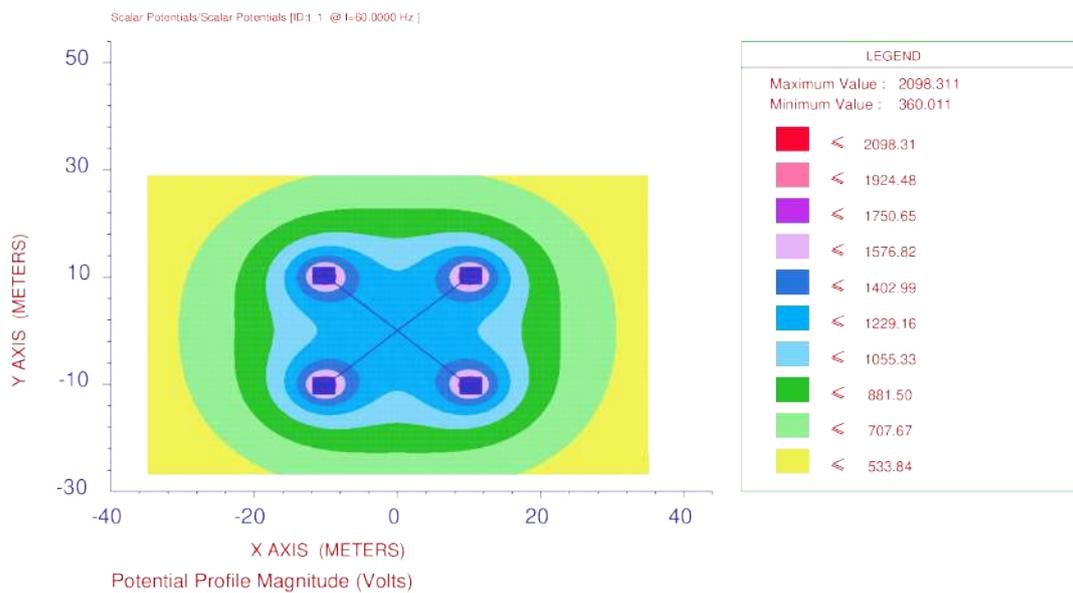


(b) GPR.

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.8: Caso (d) - densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ ).

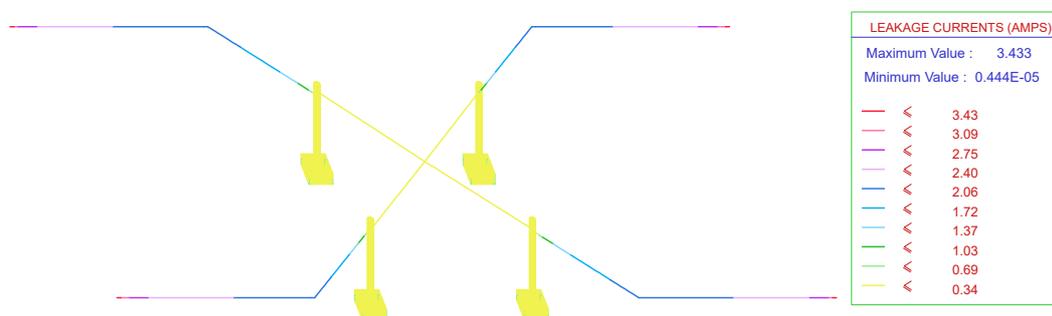
(a) Densidade de corrente de fuga.



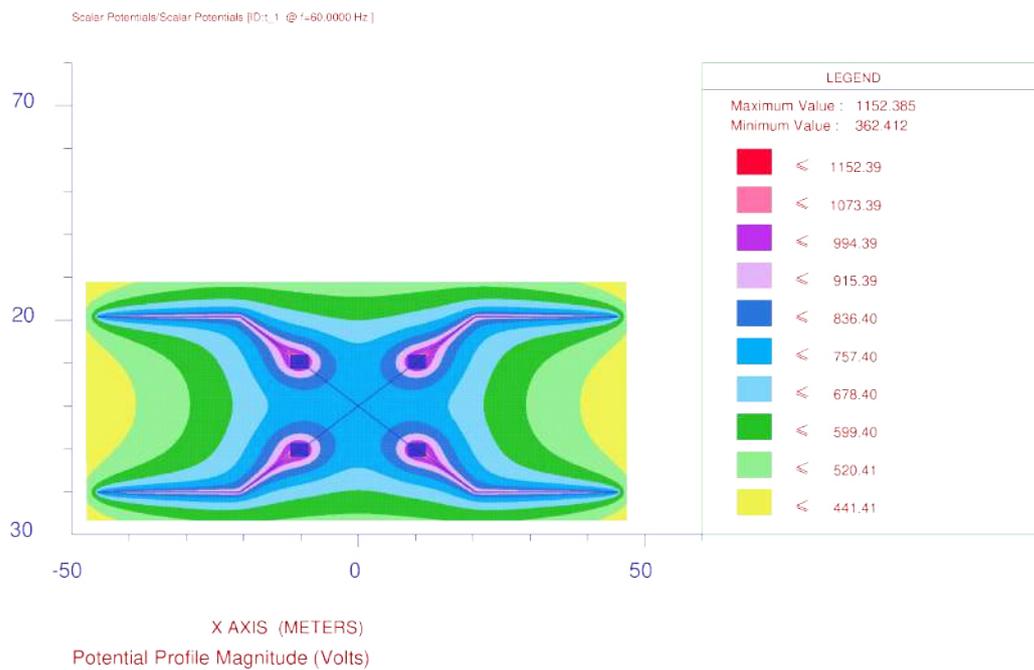
(b) GPR.

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.9: Caso (e) - densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ ).



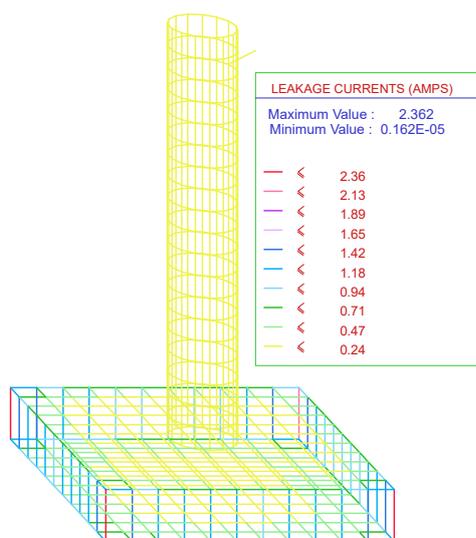
(a) Densidade de corrente de fuga.



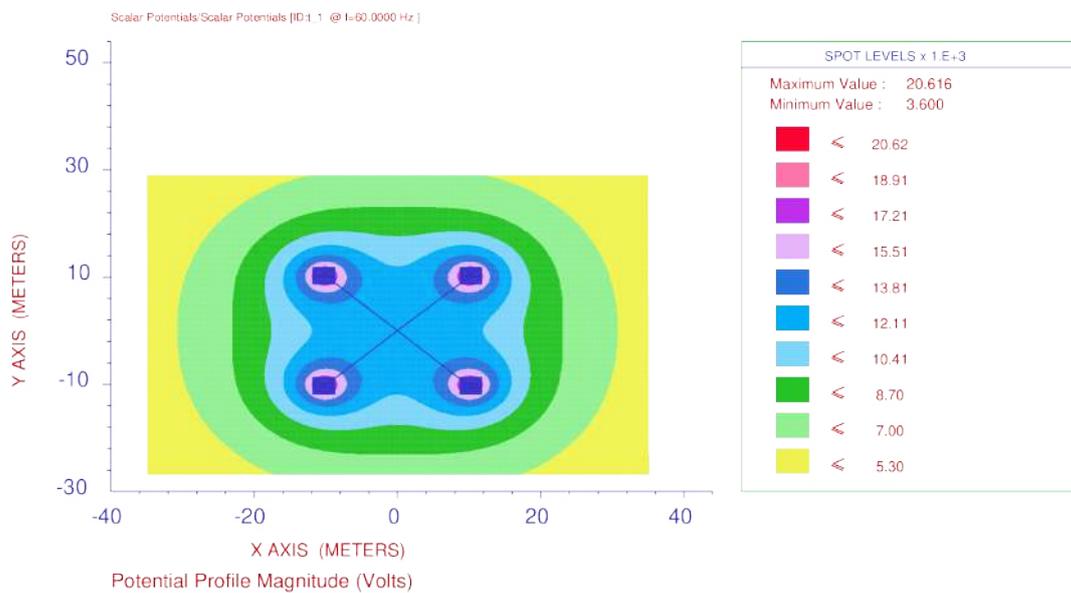
(b) GPR.

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.10: Caso (a) - concreto sem cura ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ).



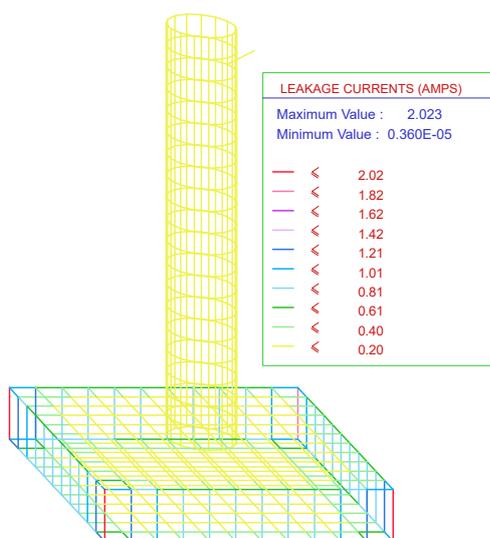
(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 700 \Omega\text{m}$ ).



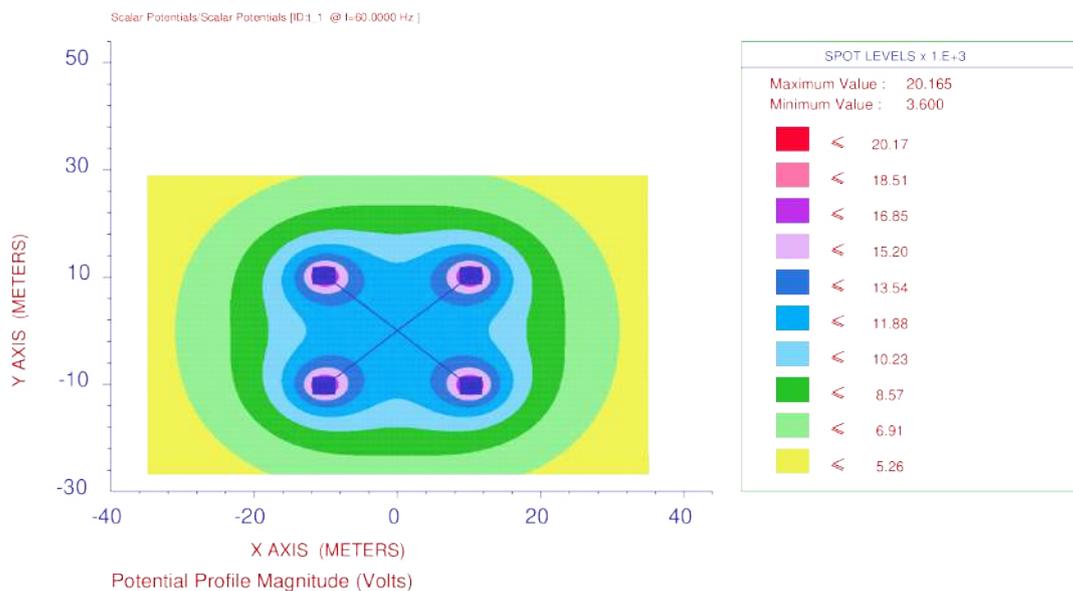
(b) GPR ( $\rho_C = 700 \Omega\text{m}$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.11: Caso (a) - concreto com cura por 7 dias ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ).



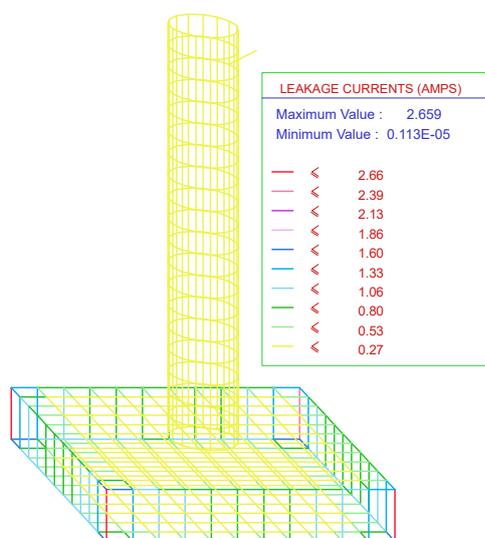
(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 700 \Omega\text{m}$ ).



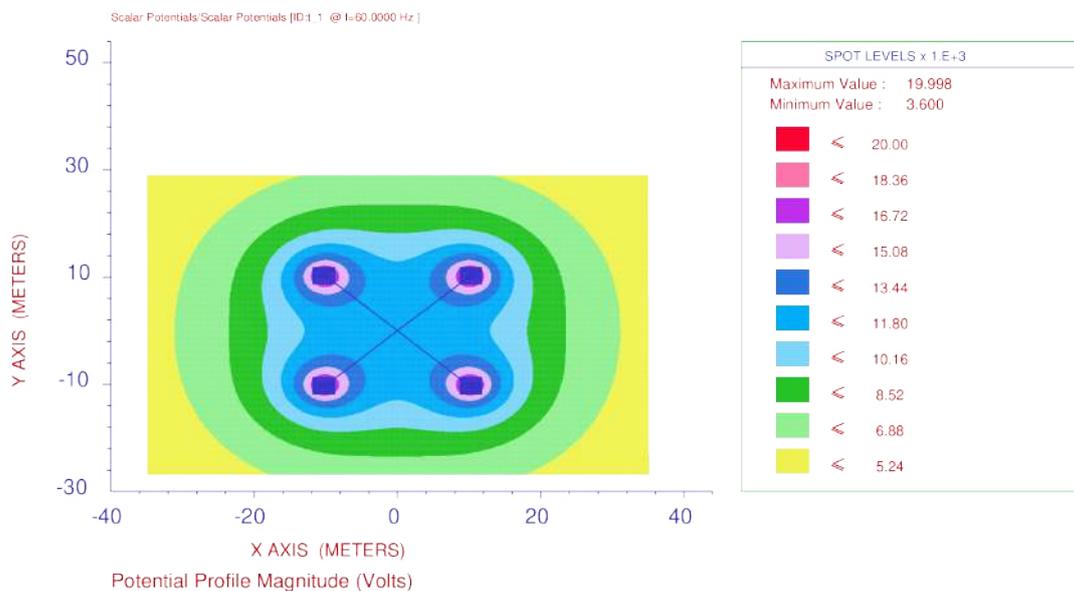
(b) GPR ( $\rho_C = 340 \Omega\text{m}$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.12: Caso (a) - concreto com cura por 14 dias ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ).



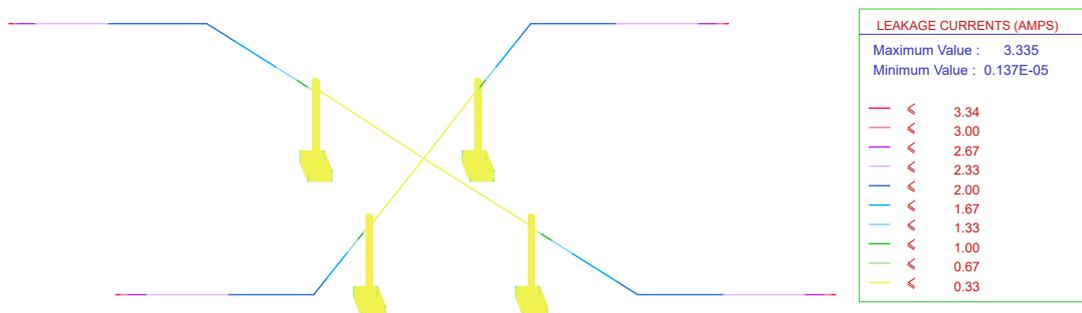
(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 700 \Omega\text{m}$ ).



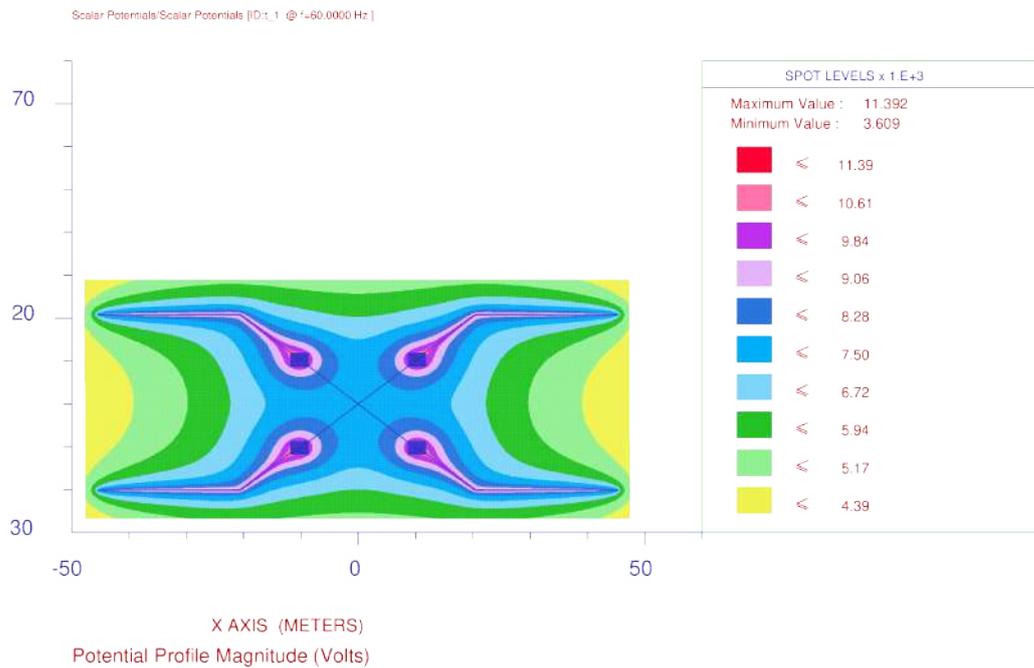
(b) GPR ( $\rho_C = 210 \Omega\text{m}$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.13: Caso (b) - concreto sem cura ( $\rho_s = 1000 \Omega m$ ).



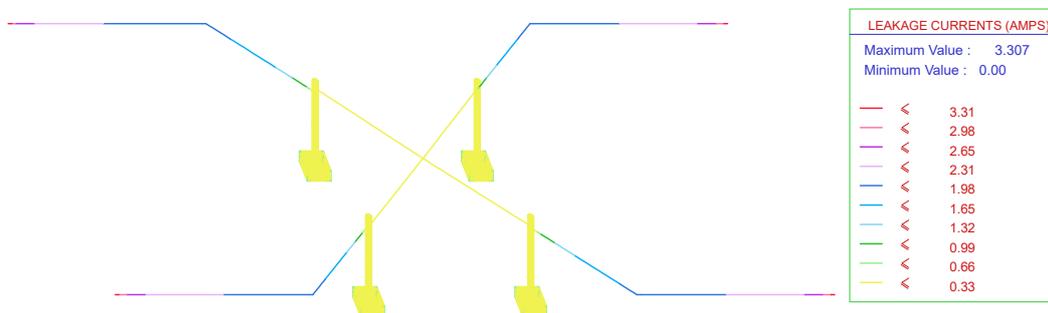
(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 700 \Omega m$ ).



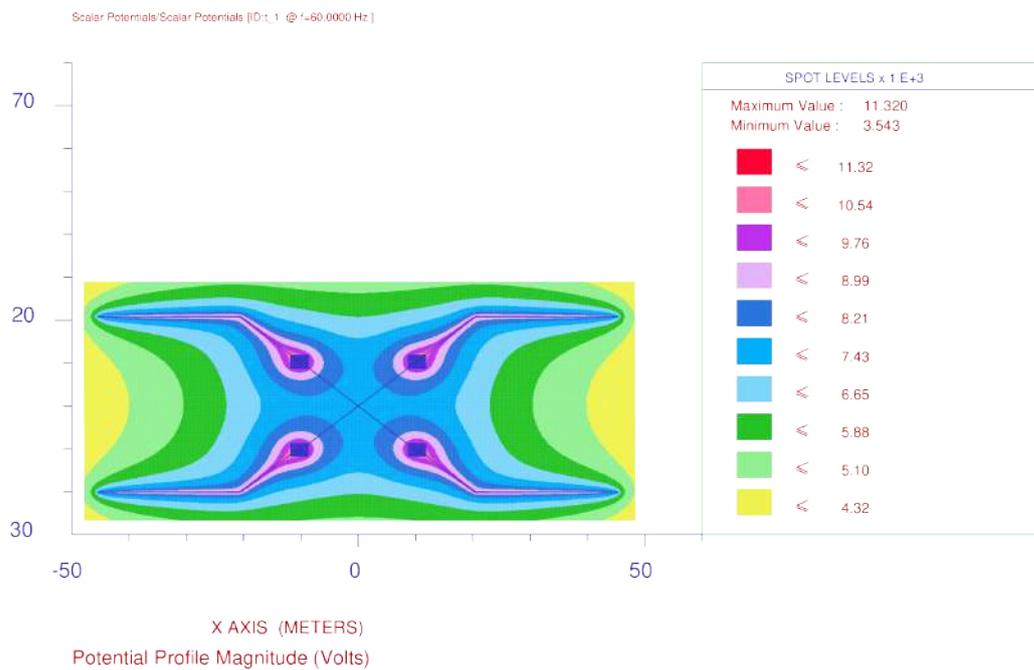
(b) GPR ( $\rho_C = 700 \Omega m$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.14: Caso (b) - concreto com cura por 7 dias ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ).



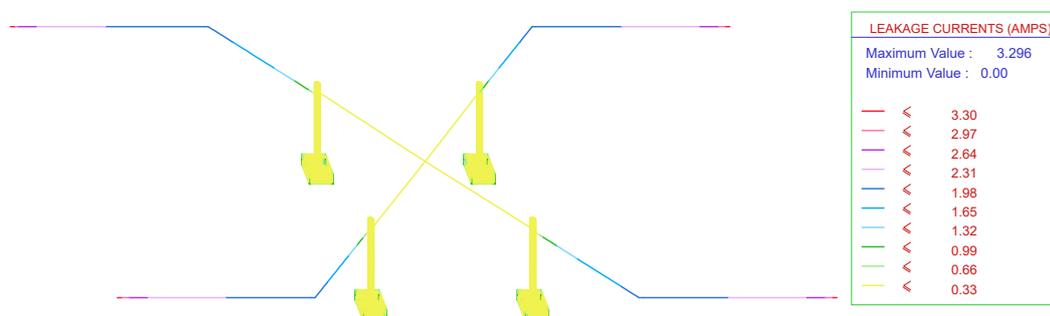
(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 340 \Omega\text{m}$ ).



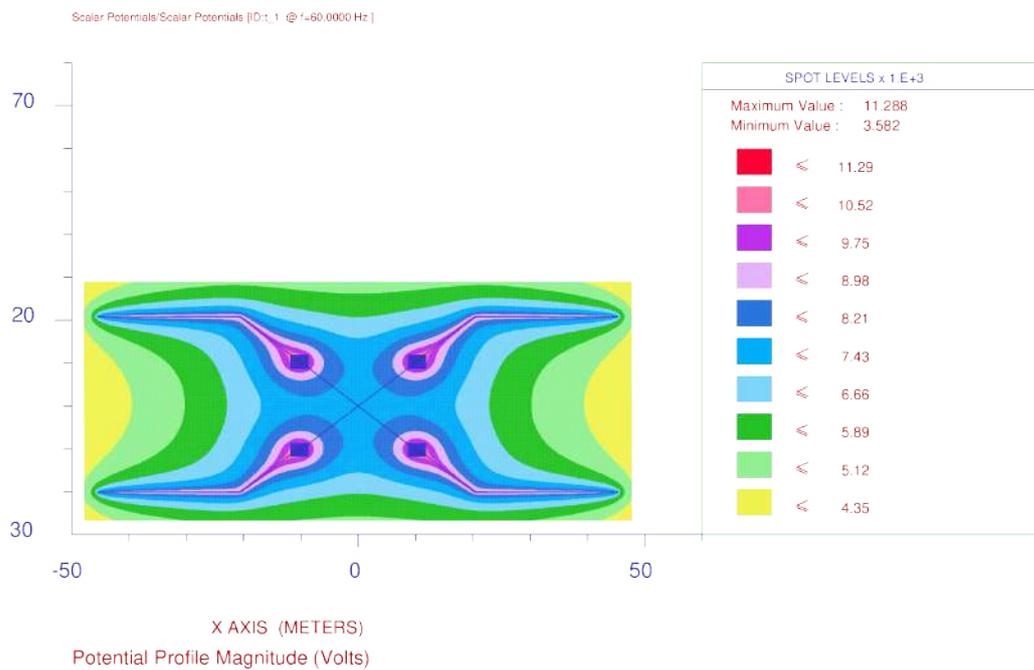
(b) GPR ( $\rho_C = 340 \Omega\text{m}$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.15: Caso (b) - concreto com cura por 14 dias ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ).



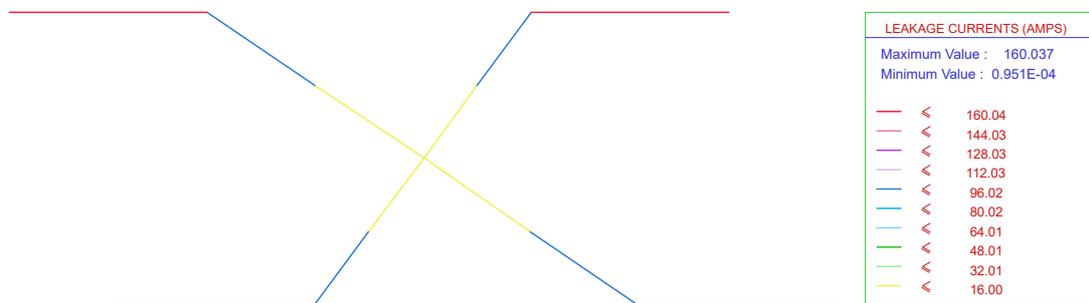
(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 210 \Omega\text{m}$ ).



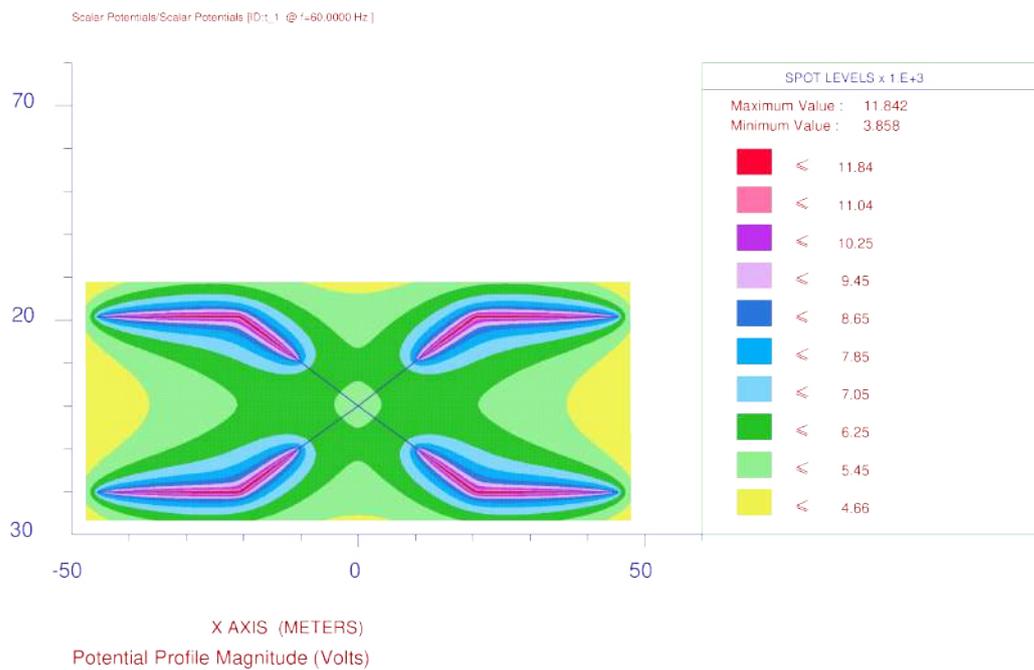
(b) GPR ( $\rho_C = 210 \Omega\text{m}$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.16: Caso (c) - densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ).

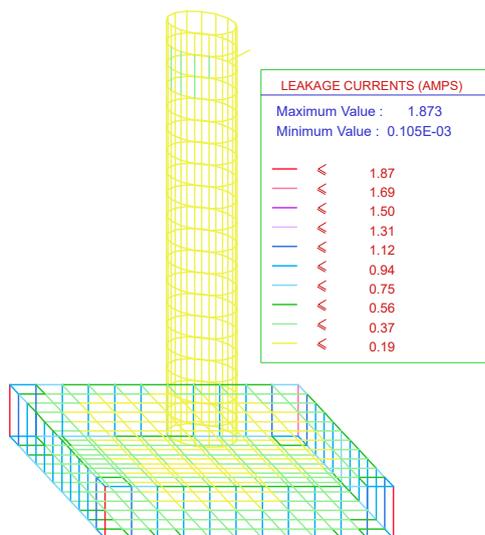


(a) Densidade de corrente de fuga.

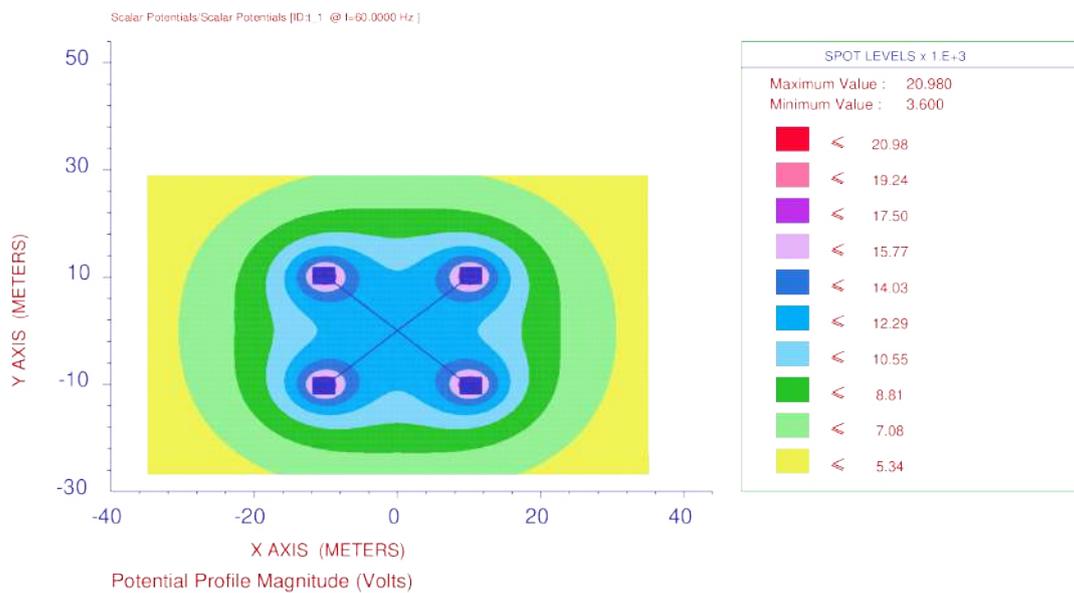


(b) GPR.

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.17: Caso (d) - densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ).

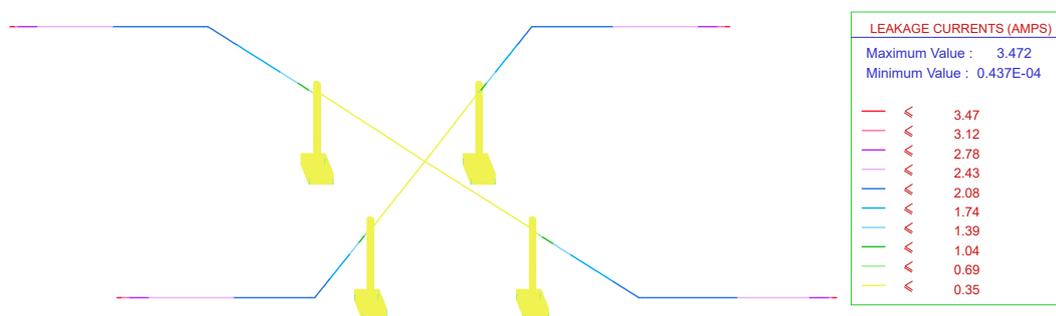
(a) Densidade de corrente de fuga.



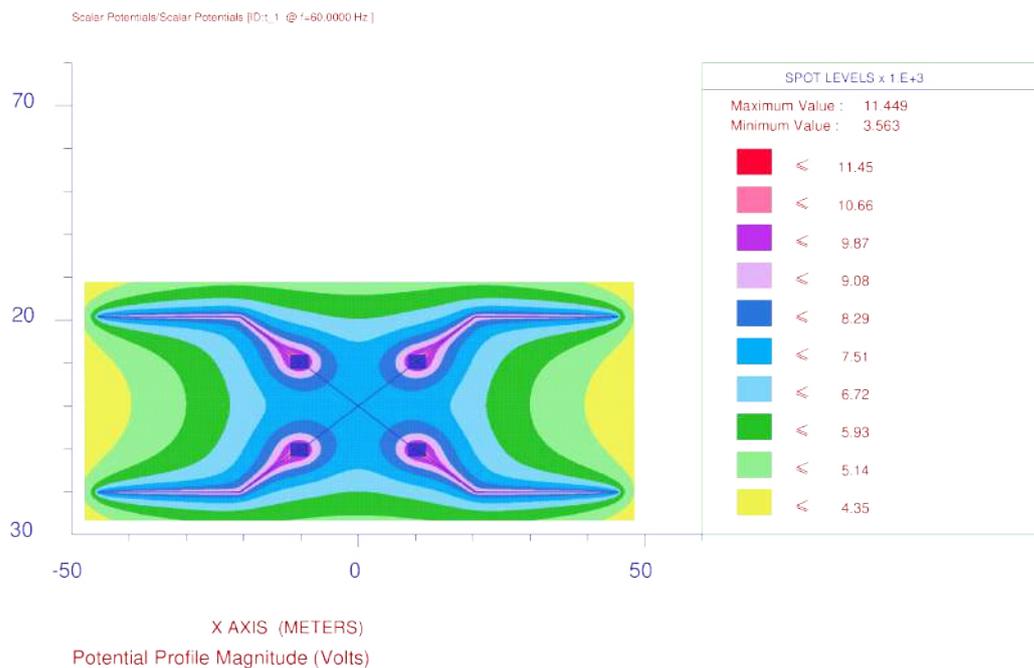
(b) GPR.

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.18: Caso (e) - densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ).



(a) Densidade de corrente de fuga.



(b) GPR.

**Fonte:** Autoria própria.

Com base nos níveis de tensões de toque e de passo obtidos no caso (c), modelo convencional de aterramento de linhas de transmissão, as Tabs. 4.3 e 4.4 apresenta as conclusões para os mesmos níveis apresentados nos casos (a) e (b) em solo homogêneo.

Tabela 4.1: Solo uniforme ( $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ ).

Casos	Dia	Impedância ( $\Omega$ )			Tensão de Toque (V)			Tensão de Passo (V)		
		<i>SC</i>	<i>CC7</i>	<i>CC14</i>	<i>SC</i>	<i>CC7</i>	<i>CC14</i>	<i>SC</i>	<i>CC7</i>	<i>CC14</i>
(a)	14 <sup>o</sup>	2,779	2,381	2,232	1215,96	812,00	751,23	635,29	279,96	284,09
	542 <sup>o</sup>	22,619	14,781	9,165	22510	13870	7630	3080	1900	1040
(b)	14 <sup>o</sup>	1,228	1,189	1,171	422,02	326,22	319,04	88,87	73,09	71,55
	542 <sup>o</sup>	1,448	1,431	1,402	786,60	706,32	711,63	250,81	221,00	199,09
(c)	Não se Aplica	1,504			772,04			111,70		
(d)	Não se Aplica	2,102			697,80			182,39		
(e)	Não se Aplica	1,153			310,42			93,36		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.2: Solo uniforme ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ).

Casos	Dia	Impedância ( $\Omega$ )			Tensão de Toque (V)			Tensão de Passo (V)		
		<i>SC</i>	<i>CC7</i>	<i>CC14</i>	<i>SC</i>	<i>CC7</i>	<i>CC14</i>	<i>SC</i>	<i>CC7</i>	<i>CC14</i>
(a)	14 <sup>o</sup>	20,635	20,176	20,006	6820	6640	6570	2130,38	1959,85	1914,95
	542 <sup>o</sup>	36,631	31,085	24,685	23210	16570	11600	4390	2840	2819,14
(b)	14 <sup>o</sup>	11,390	11,321	11,294	2332,17	2329,75	2311,78	936,61	930,13	926,02
	542 <sup>o</sup>	12,752	12,430	12,086	4533,31	4368,62	3357,79	992,85	891	873,50
(c)	Não se Aplica	14,851			7780			558,61		
(d)	Não se Aplica	21,005			6980			2276,42		
(e)	Não se Aplica	11,445			2364,09			944,02		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.3: Conclusões para solo homogêneo ( $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ ).

Casos	Dias	Atende critério de tensão de toque?	Atende critério de tensão de passo?
(a)	14 <sup>o</sup>	Sim	Sim
	542 <sup>o</sup>	Não	Não
(b)	14 <sup>o</sup>	Sim	Sim
	542 <sup>o</sup>	Sim	Sim

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.4: Conclusões para solo homogêneo ( $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ ).

Casos	Dias	Atende critério de tensão de toque?	Atende critério de tensão de passo?
(a)	14 <sup>o</sup>	Sim	Não
	542 <sup>o</sup>	Não	Não
(b)	14 <sup>o</sup>	Sim	Não
	542 <sup>o</sup>	Sim	Não

Fonte: Autoria própria.

## 4.2 ANÁLISE DO MODELO DE DUAS CAMADAS

Para o primeiro cenário ( $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ), as Figs. 4.19 a 4.27 apresentam o GPR e a densidade de corrente de fuga nos casos de (a) a (e), respectivamente. Para o segundo cenário ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ), as Figs. 4.28 a 4.36 apresentam o GPR e a densidade de corrente de fuga nos casos de (a) a (e), respectivamente.

Devido à distribuição simétrica da corrente nos pés da torre, as figuras que apresentam os casos sem contrapeso ilustram apenas a distribuição da corrente em um dos pés. As Tabs. 4.5 e 4.6 apresentam os resultados de impedância, tensão de toque e tensão de passo para o primeiro e segundo cenário.

Em uma primeira análise não foi considerado os efeitos do concreto no sistema de aterramento, dessa forma as análises foram entre os casos (c), (d) e (e). Para o primeiro cenário, solo de duas camadas com  $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$  and  $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ , a dispersão da corrente ocorre na primeira camada do solo como esperado e apresentado nas Figs. 4.25 a 4.27. Para o segundo cenário,  $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ , o caso (d) se destaca por ter uma impedância menor do que o caso (c). Apesar dos contrapesos terem menor impedância nos demais cenários, o fato de estarem na camada de maior resistividade contribui para o aumento na impedância do sistema. A estrutura metálica da fundação fornece um caminho consideravelmente mais curto para que a corrente alcance a camada de resistividade inferior. Na Fig. 4.35a é possível observar que a região com o a maior densidade de corrente é a base da fundação, que está imersa na segunda camada do sistema apresentado na Fig. 3.8.

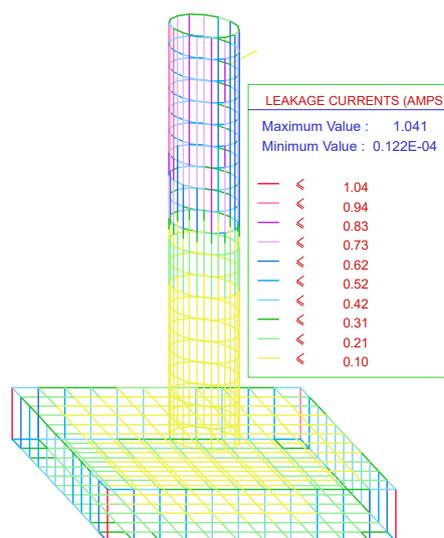
A segunda análise envolve considerar os efeitos do concreto no sistema de aterramento, com foco nos casos (a) e (b). Para os casos em que o concreto não é submetido aos processos de cura

por submersão, os resultados apresentados nas Tabs. 4.5 e 4.6 e nas Figs. 4.19 a 4.24 e 4.28 a 4.33 demonstram que quanto maior o teor de umidade do concreto menor resistividade elétrica. O concreto sem cura representa o cenário em que a fundação fica imersa em solos secos, ou seja, com baixa umidade. Outro ponto crucial é que o valor da resistividade do concreto no 542<sup>o</sup> dia só ocorre quando a mistura é submetida à umidade do ar. Assim, mesmo para solos secos, a resistividade é muito menor, como mencionado no Cap. 3. Portanto, os valores de resistividade do concreto sem cura medidos no 14<sup>o</sup> dia estão próximos do cenário real.

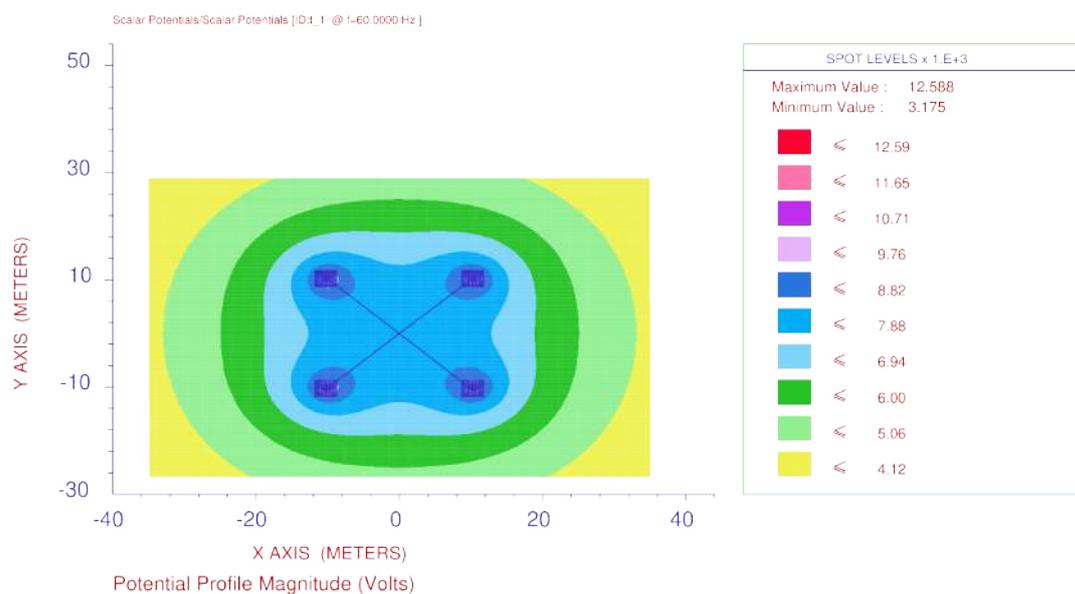
Os níveis de tensão de toque e de passo, conforme apresentados na Tab. 4.5 para o caso (a), revela valores elevados. Quando a primeira camada possui resistividade menor que a segunda, os potenciais na superfície do solo tendem a ser maiores devido à alta densidade de corrente na região. Nas Figs. 4.19 a 4.21 é possível observar que a densidade de corrente na fundação é elevada na região onde está localizada a primeira camada de solo. No caso (b), 4.22 a 4.24, os contrapesos proporcionam um caminho mais longo para dispersão de corrente na camada de resistividade inferior. Como resultado, uma porção significativa da corrente é dispersa na primeira camada com a ajuda dos contrapesos, levando a uma redução substancial nos níveis de tensão de toque e de passo.

Os níveis de tensão de toque e de passo, apresentados na Tab. 4.6 para o caso (a), indicam valores significativamente inferiores em relação ao primeiro cenário. Quando a primeira camada possui resistividade maior que a segunda, os potenciais na superfície do solo tendem a ser menores porque a corrente será dispersa na camada de resistividade mais baixa, conforme mostrado na Fig. 3.6. Nas Figs. 4.28 a 4.30 é possível observar que a densidade de corrente na fundação é elevada na região onde está localizada a segunda camada de solo. No caso de (b), Figs. 4.31 a 4.33, os contrapesos proporcionam um caminho mais longo para dispersão de corrente na camada de maior resistividade. Por outro lado, a fundação oferece um caminho mais curto para a camada de resistividade inferior. Portanto, parte da corrente é dispersa na primeira camada com o auxílio dos contrapesos, enquanto a outra parte é dispersa na segunda camada com o auxílio das fundações, conforme ilustrado nas Figs. 4.31 a 4.33.

Figura 4.19: Caso (a) - concreto sem cura ( $\rho_1 = 100 \Omega m$  e  $\rho_2 = 1000 \Omega m$ ).



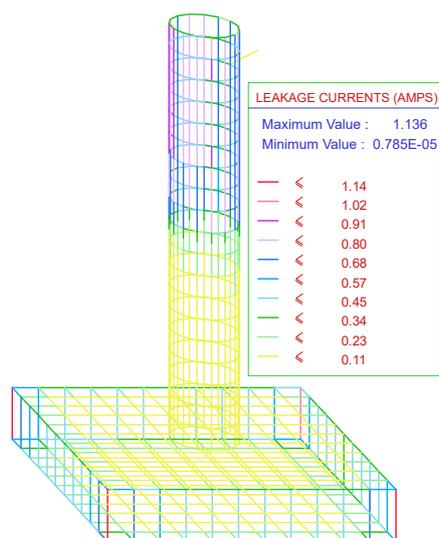
(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 700 \Omega m$ ).



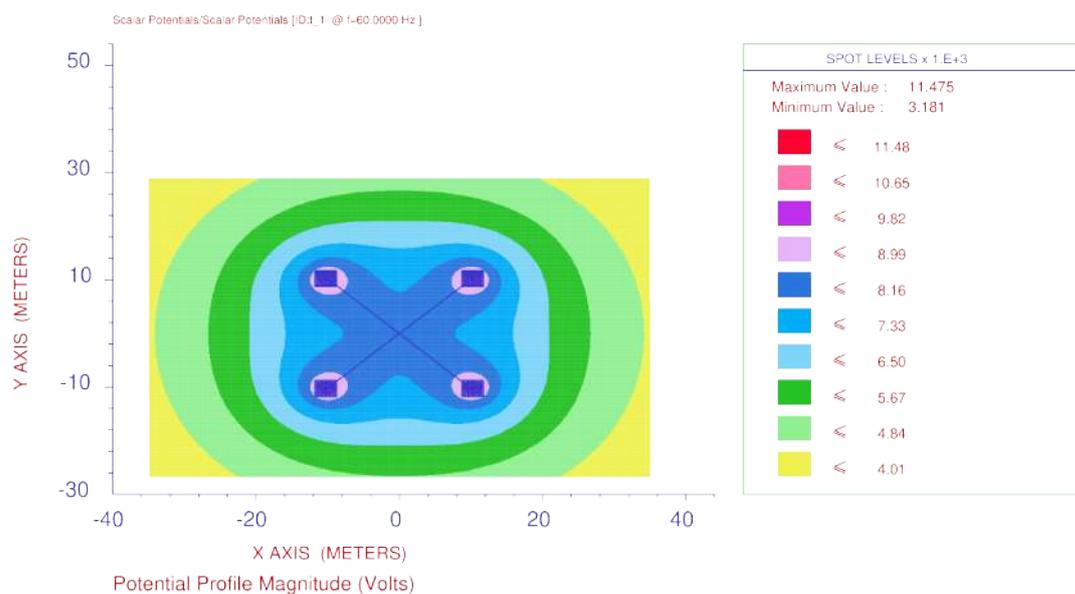
(b) GPR ( $\rho_C = 700 \Omega m$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.20: Caso (a) - concreto com cura por 7 dias ( $\rho_1 = 100 \Omega m$  e  $\rho_2 = 1000 \Omega m$ ).



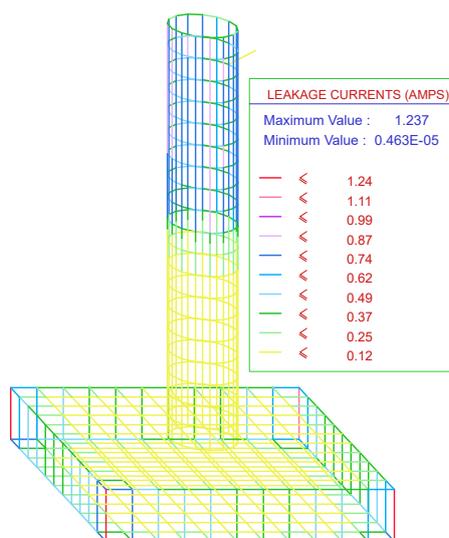
(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 340 \Omega m$ ).



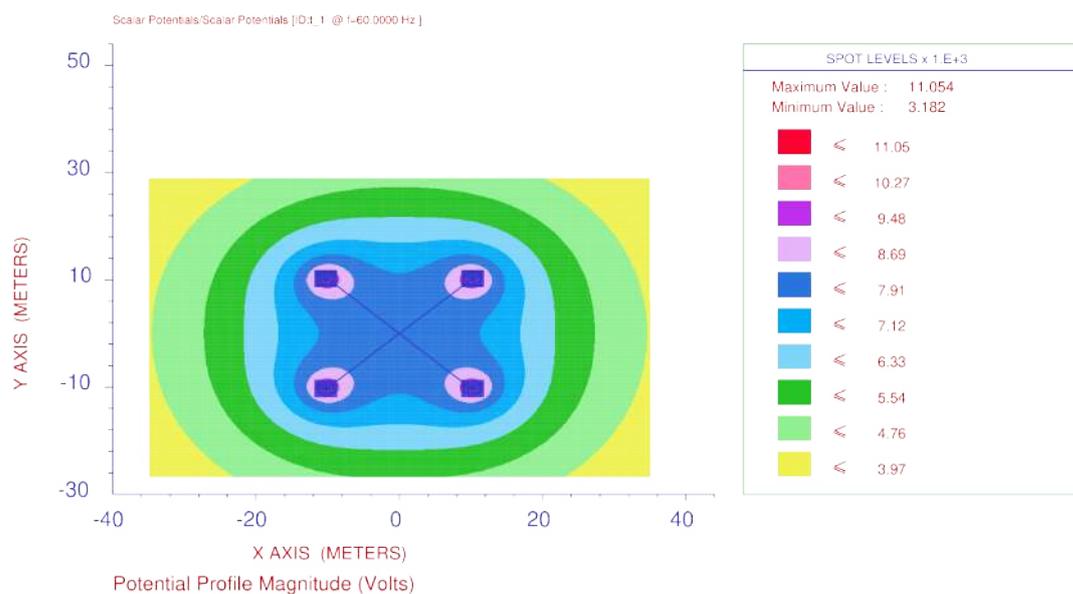
(b) GPR ( $\rho_C = 340 \Omega m$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.21: Caso (a) - concreto com cura por 14 dias ( $\rho_1 = 100 \Omega m$  e  $\rho_2 = 1000 \Omega m$ ).



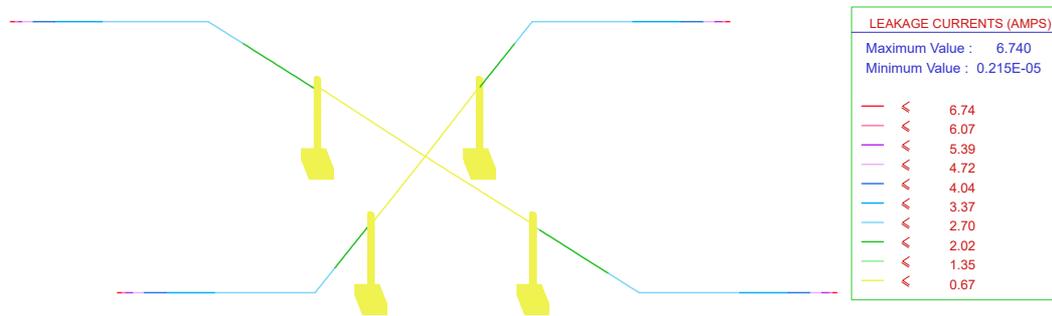
(a) Densidade de corrente d efuga( $\rho_C = 210 \Omega m$ ).



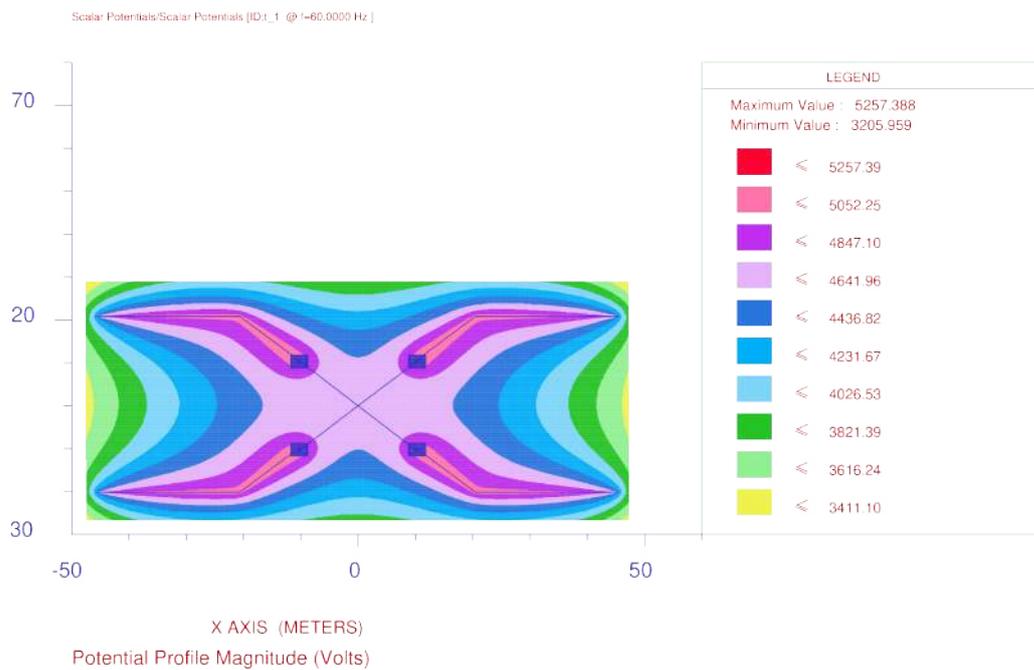
(b) GPR ( $\rho_C = 210 \Omega m$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.22: Caso (b) - concreto sem cura ( $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ).



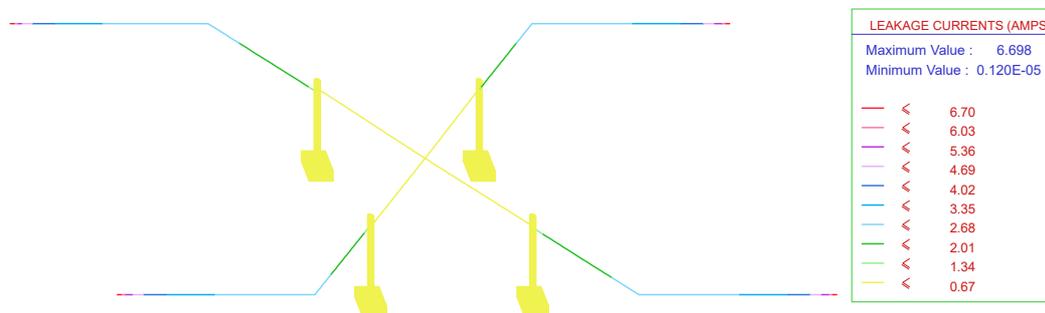
(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 700 \Omega\text{m}$ ).



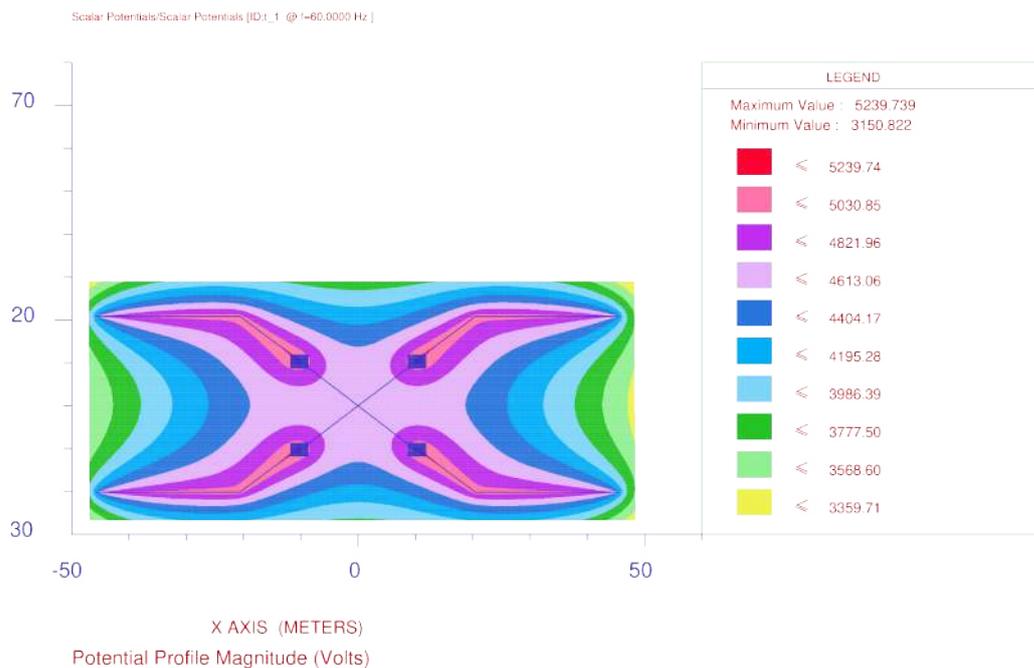
(b) GPR ( $\rho_C = 700 \Omega\text{m}$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.23: Caso (b) - concreto com cura por 7 dias ( $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ).



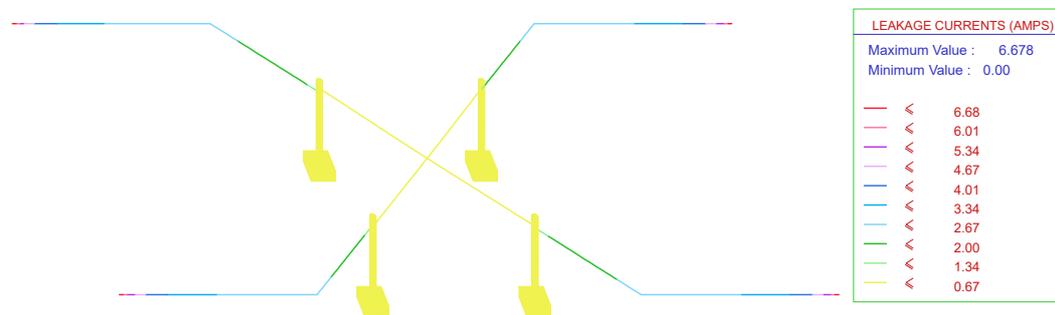
(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 340 \Omega\text{m}$ ).



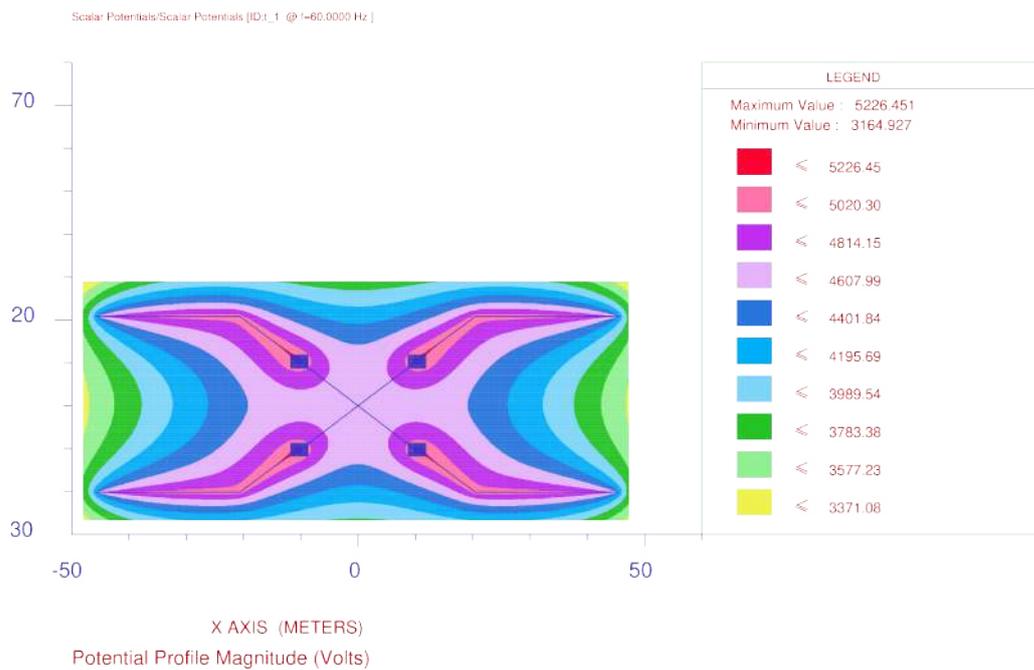
(b) GPR ( $\rho_C = 340 \Omega\text{m}$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.24: Caso (b) - concreto com cura por 14 dias ( $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ).



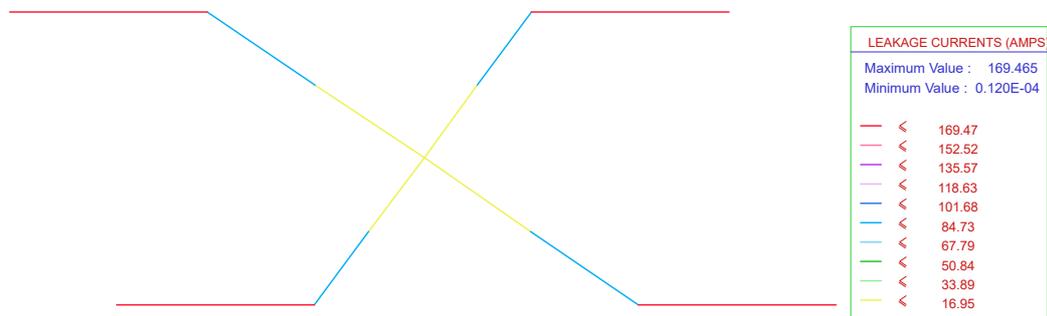
(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 210 \Omega\text{m}$ )



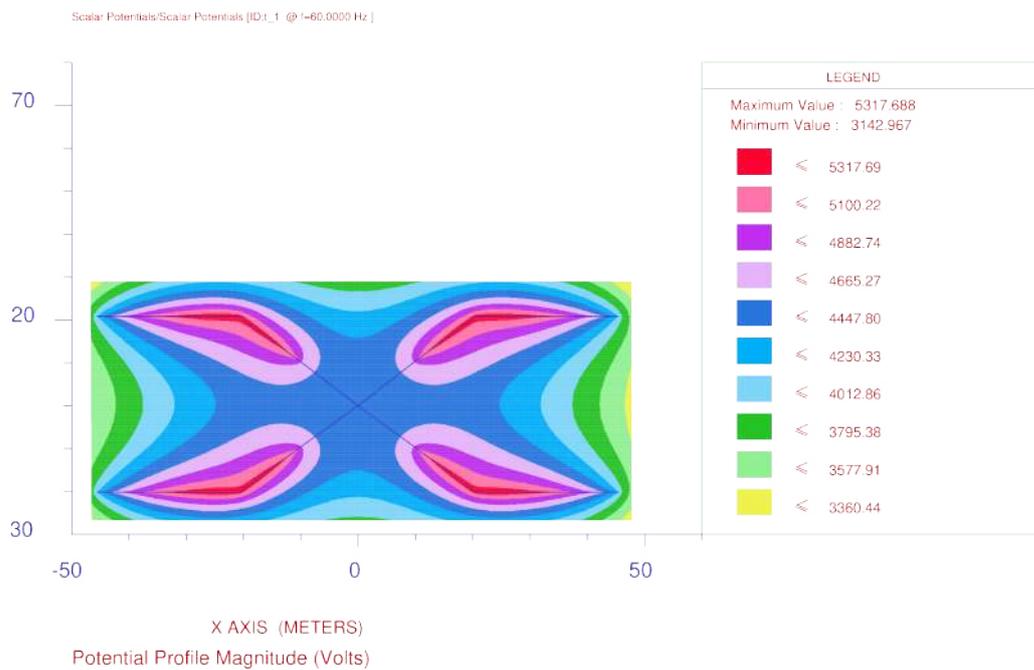
(b) GPR ( $\rho_C = 210 \Omega\text{m}$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.25: Caso (c) - Densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ).



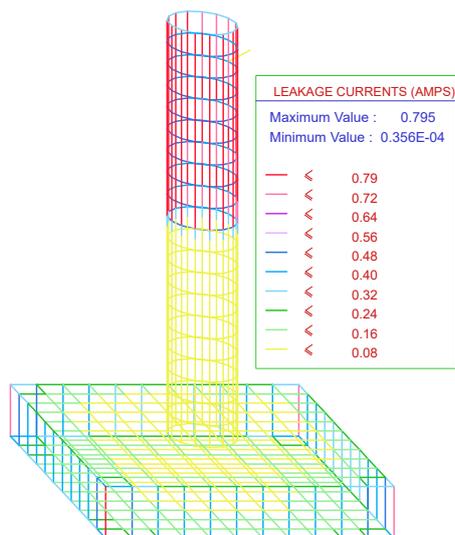
(a) Densidade de corrente de fuga.



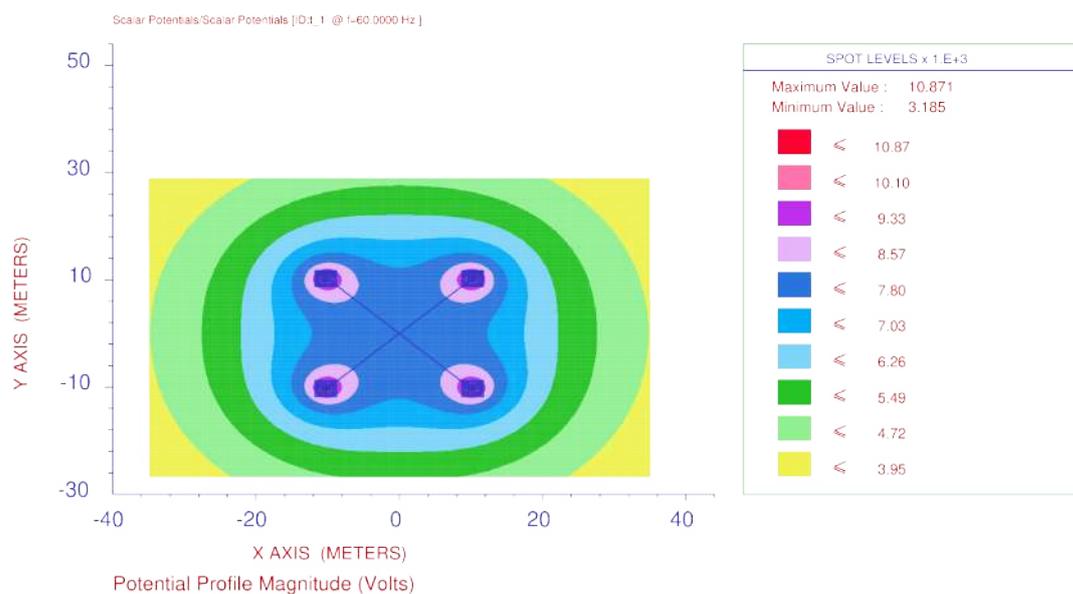
(b) GPR.

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.26: Caso (d) - Densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ).

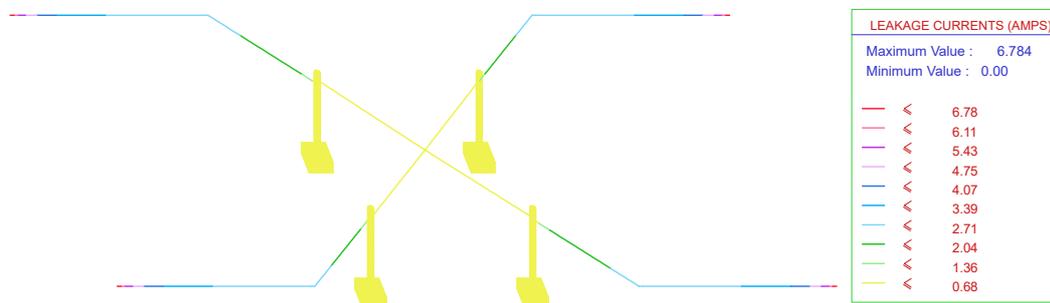


(a) Densidade de corrente de fuga.

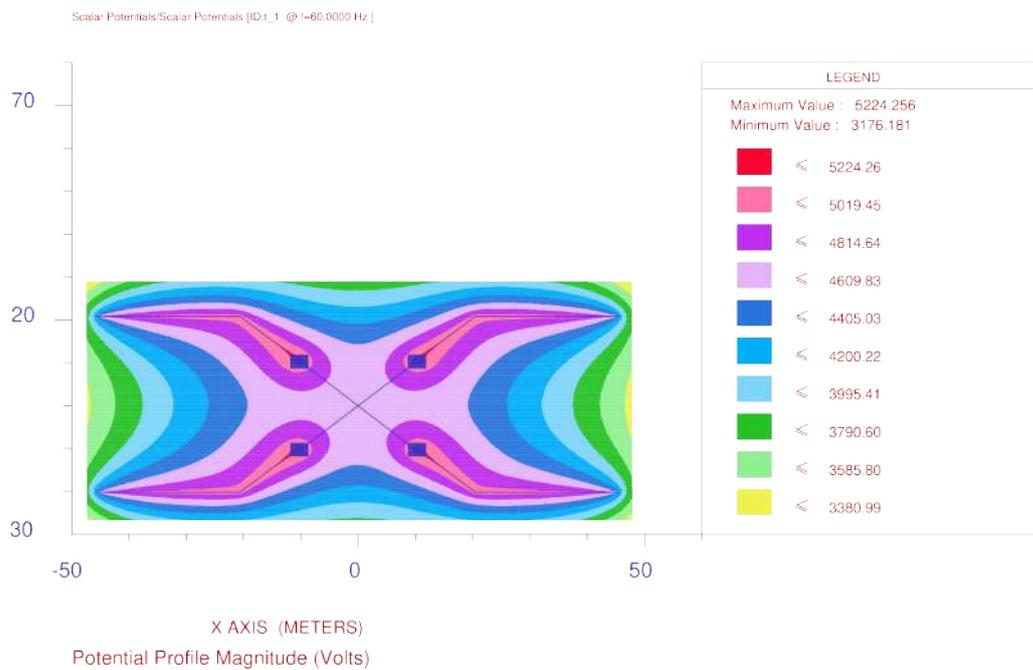


(b) GPR.

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.27: Caso (e) - Densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ).

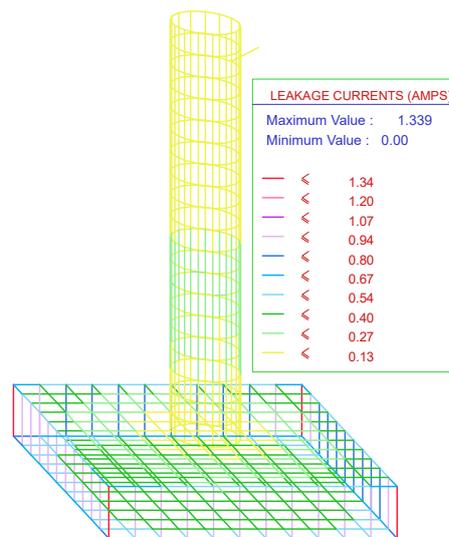
(a) Densidade de corrente de fuga.



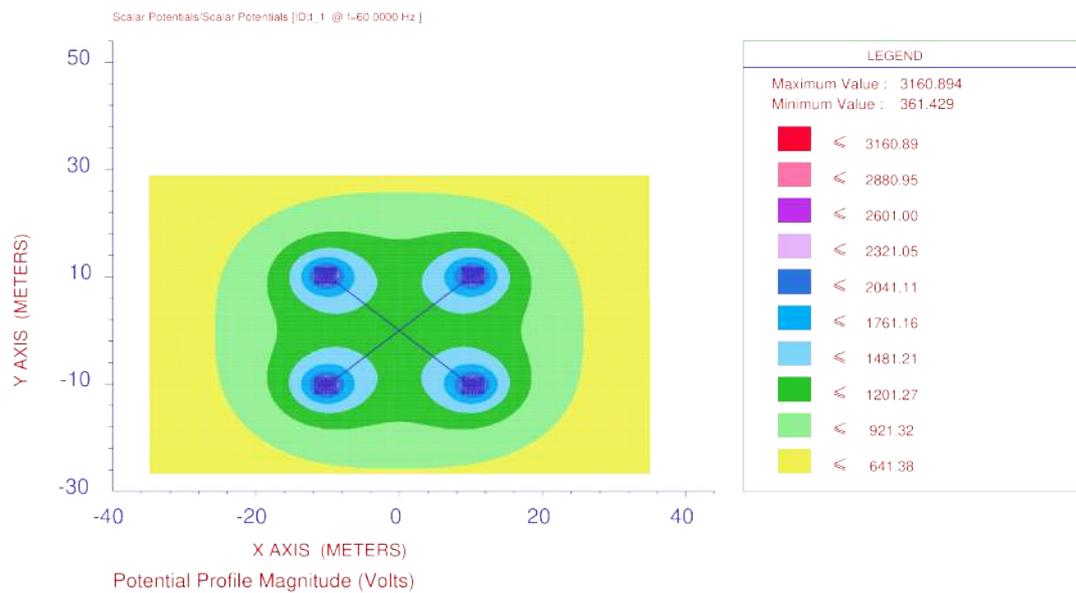
(b) GPR.

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.28: Caso (a) - concreto sem cura ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ).



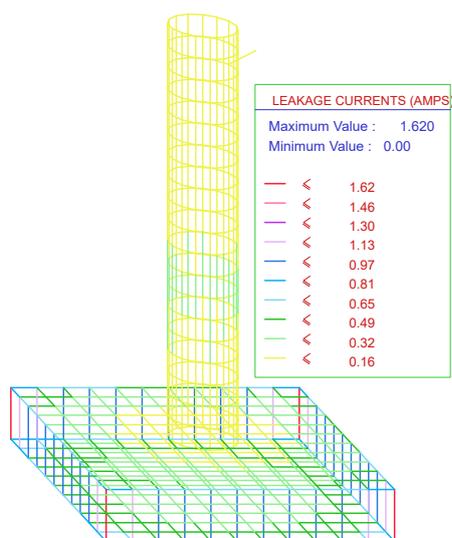
(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 700 \Omega\text{m}$ ).



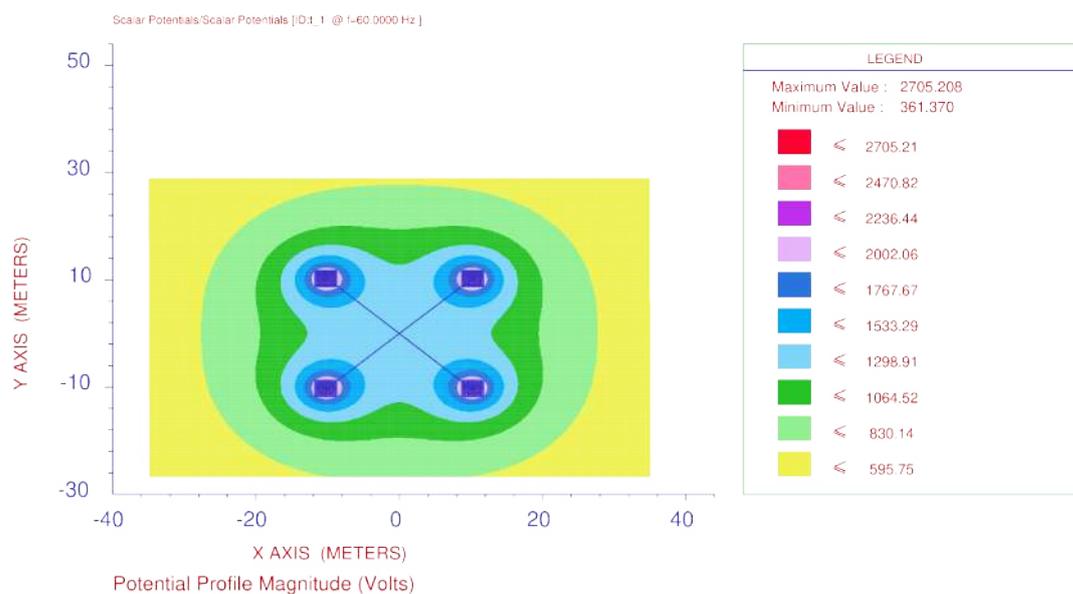
(b) GPR ( $\rho_C = 700 \Omega\text{m}$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.29: Caso (a) - concreto com cura por 7 dias ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ).



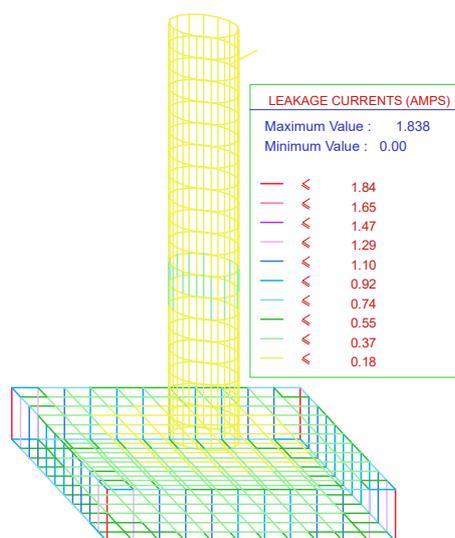
(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 700 \Omega\text{m}$ ).



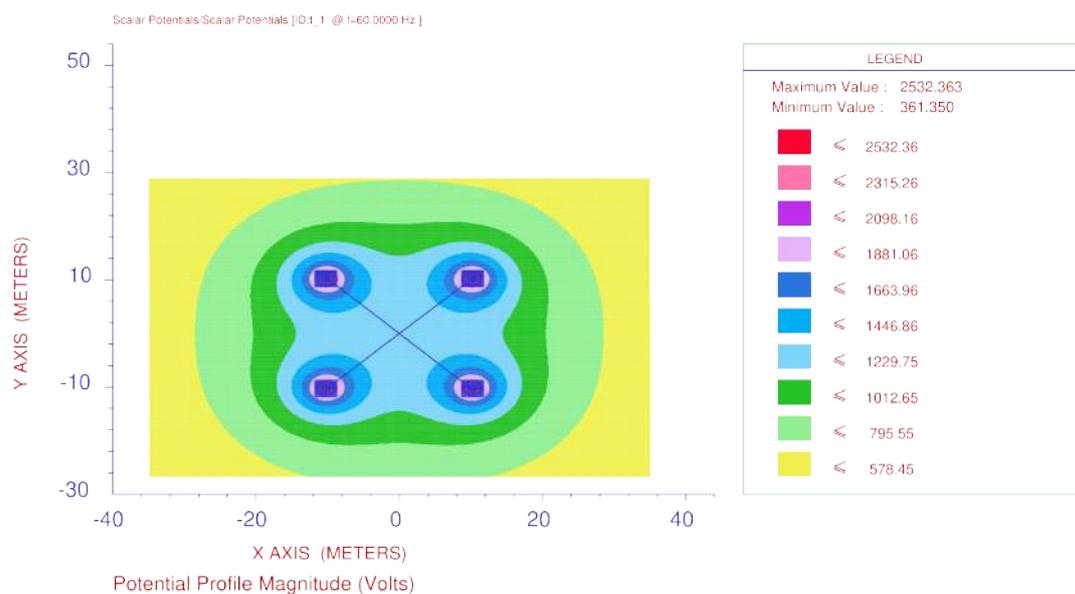
(b) GPR ( $\rho_C = 340 \Omega\text{m}$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.30: Caso (a) - concreto com cura por 14 dias ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ).



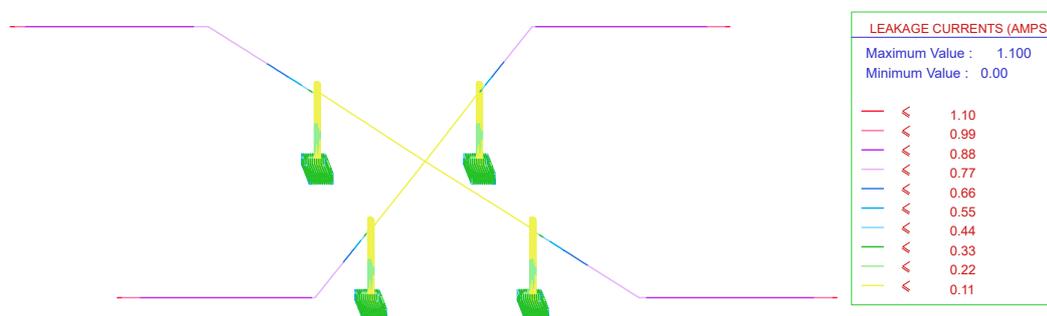
(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 700 \Omega\text{m}$ ).



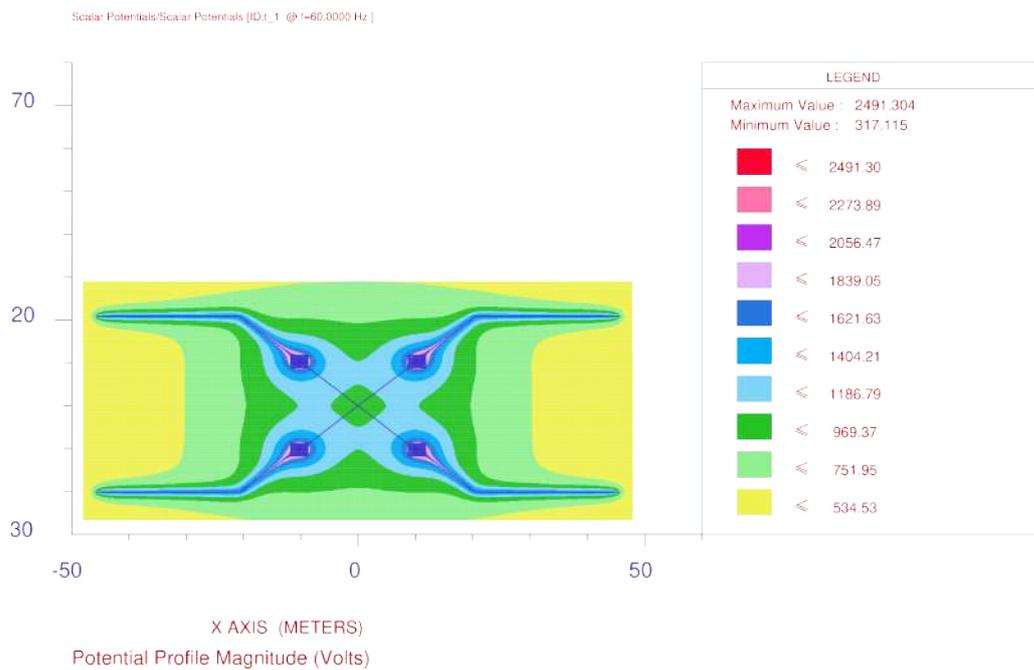
(b) GPR ( $\rho_C = 210 \Omega\text{m}$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.31: Caso (b) - concreto sem cura ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ).



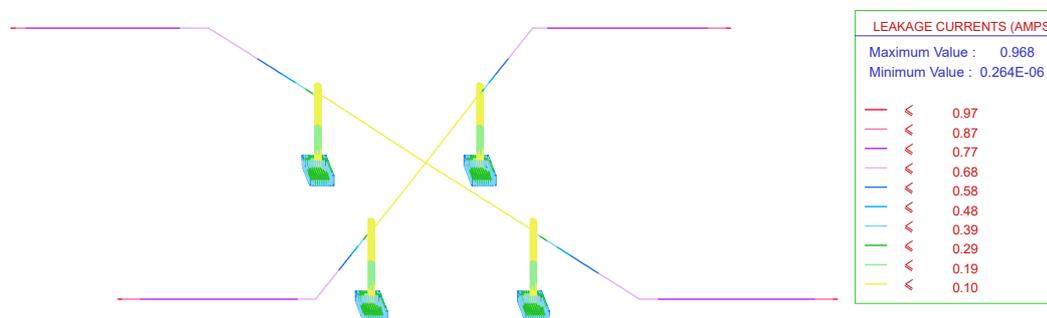
(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 700 \Omega\text{m}$ ).



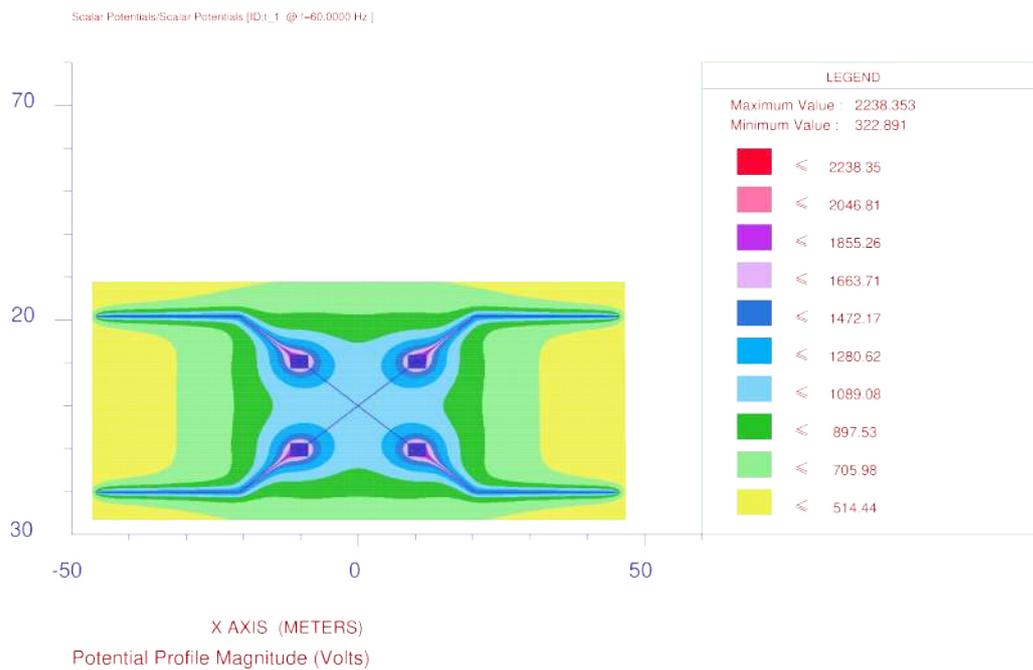
(b) GPR ( $\rho_C = 700 \Omega\text{m}$ ).

**Fonte:** Autoria própria.

Figura 4.32: Caso (b) - concreto com cura por 7 dias ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ).



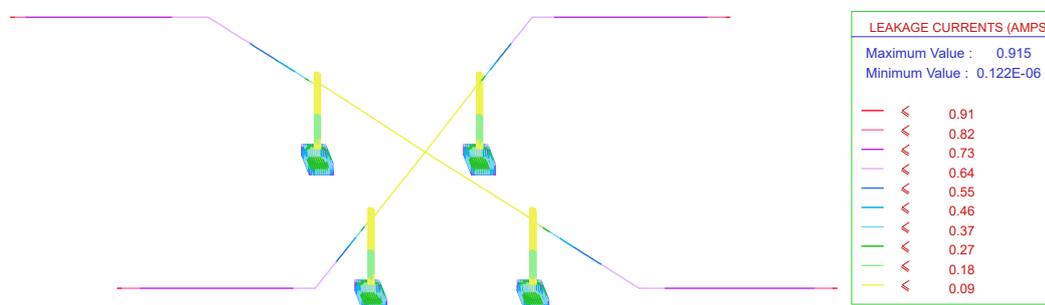
(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 340 \Omega\text{m}$ ).



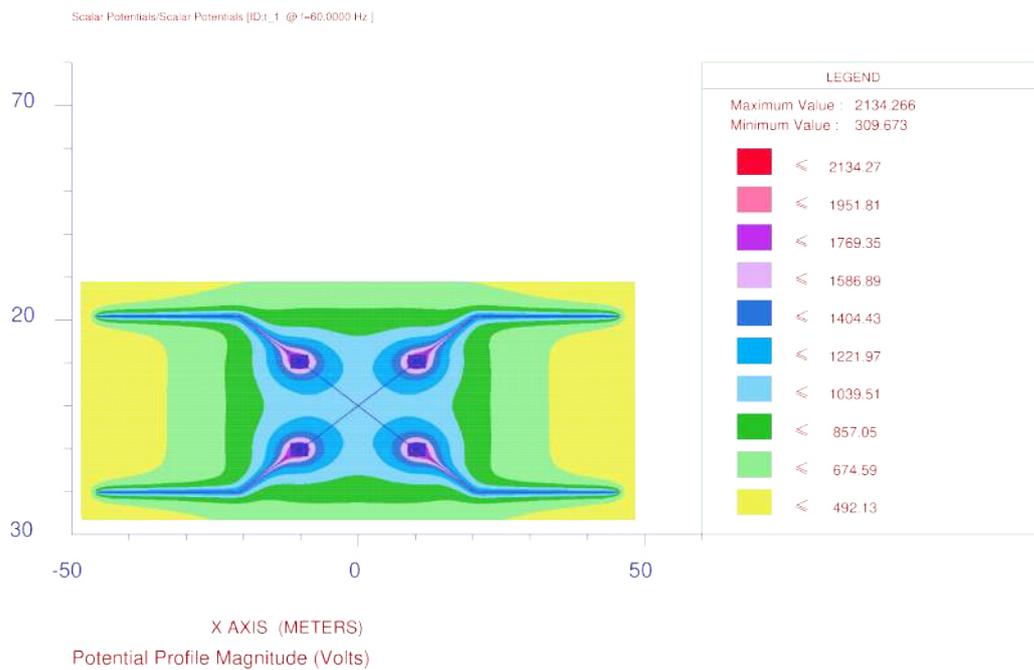
(b) GPR ( $\rho_C = 340 \Omega\text{m}$ ).

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.33: Caso (b) - concreto com cura por 14 dias ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ).



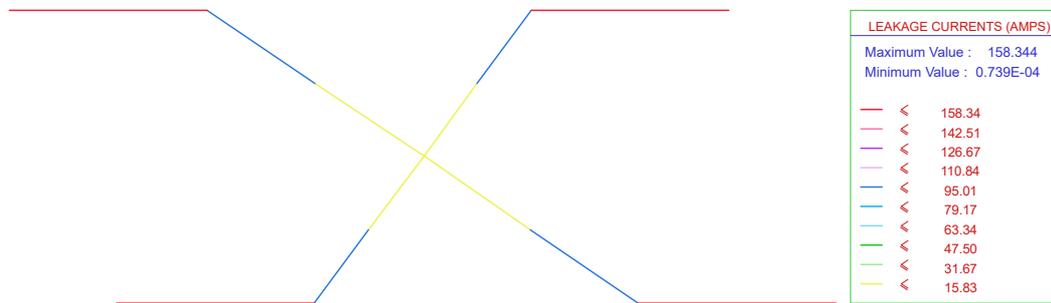
(a) Densidade de corrente de fuga ( $\rho_C = 210 \Omega\text{m}$ ).



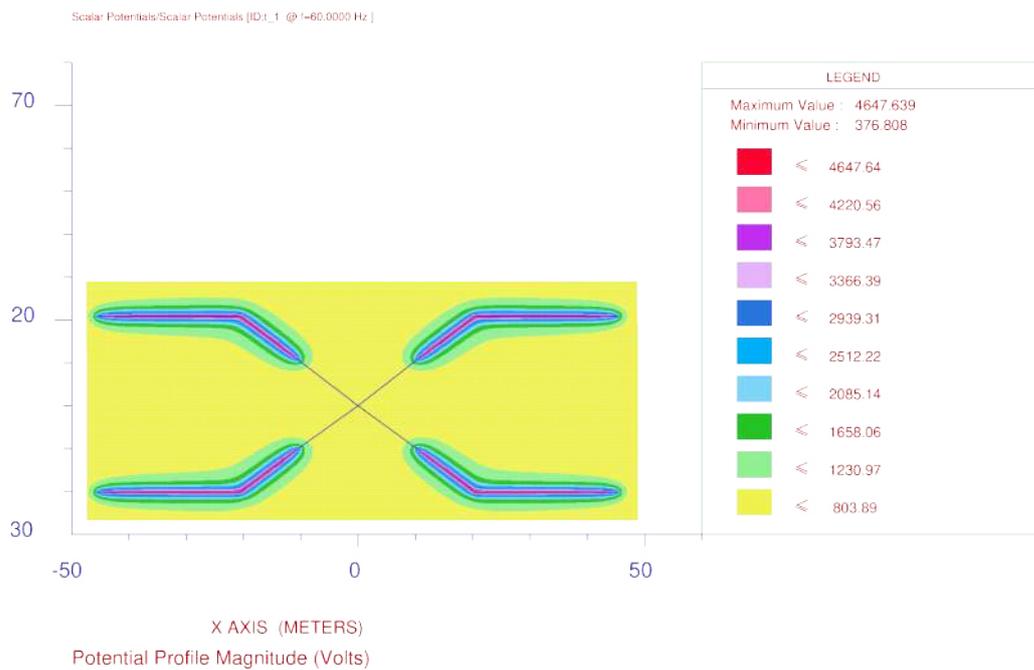
(b) GPR ( $\rho_C = 210 \Omega\text{m}$ ).

**Fonte:** Autoria própria.

Figura 4.34: Caso (c) - Densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ).



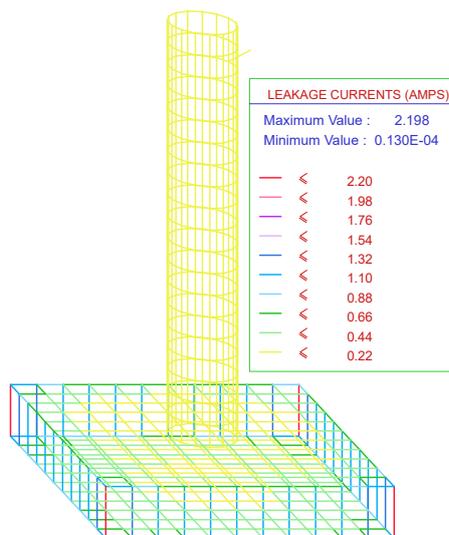
(a) Densidade de corrente de fuga.



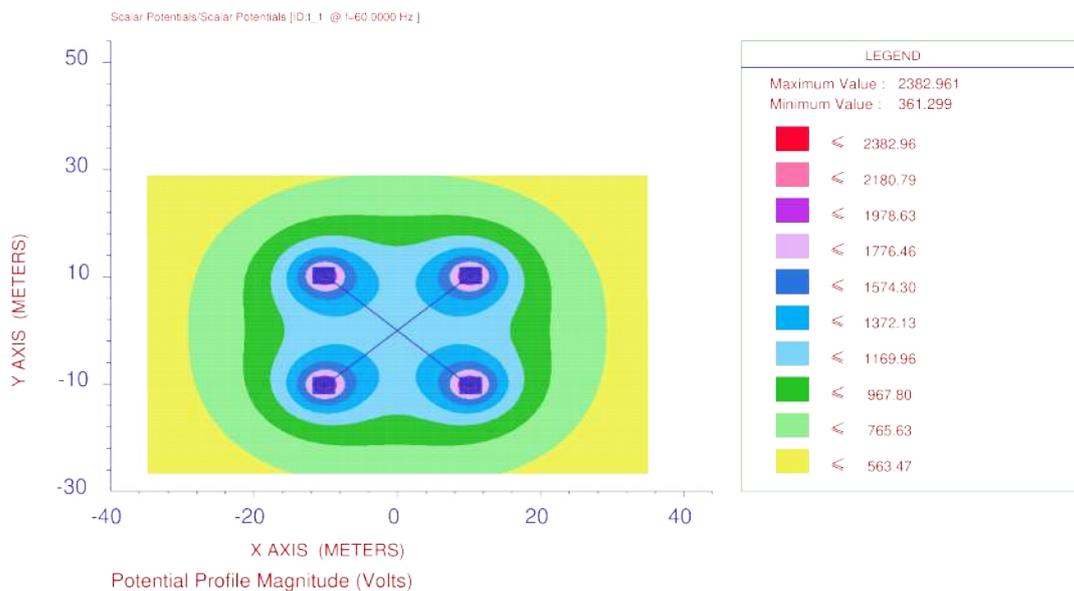
(b) GPR.

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.35: Caso (d) - Densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ).



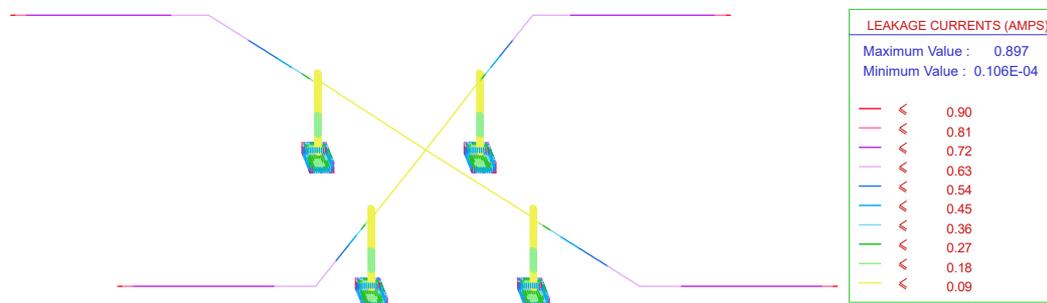
(a) Densidade de corrente de fuga.



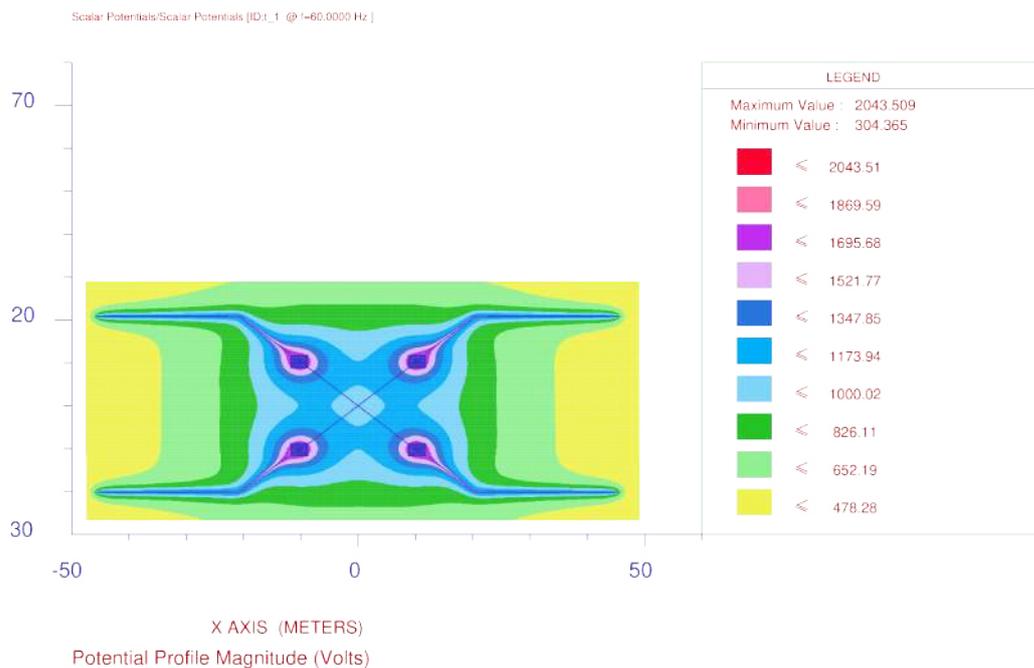
(b) GPR.

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.36: Caso (e) - Densidade de corrente de fuga e GPR ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ).



(a) Densidade de corrente de fuga.



(b) GPR.

**Fonte:** Autoria própria.

Com base nos níveis de tensões de toque e de passo obtidos no caso (c), modelo convencional de aterramento de linhas de transmissão, a Tabs. 4.7 e 4.8 apresenta as conclusões para os mesmos níveis apresentados nos casos (a) e (b) em solo não homogêneo.

Tabela 4.5: Solo de duas camadas ( $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ).

Casos	Dias	Impedância ( $\Omega$ )			Tensão de toque (V)			Tensão de passo (V)		
		<i>SC</i>	<i>CC7</i>	<i>CC14</i>	<i>SC</i>	<i>CC7</i>	<i>CC14</i>	<i>SC</i>	<i>CC7</i>	<i>CC14</i>
(a)	14 <sup>o</sup>	12,629	11,497	11,068	3805,15	3339,38	2375,49	1463,21	1265,48	1060,72
	542 <sup>o</sup>	46,716	35,772	26,517	40130	28200	17990	5550	3900	2490
(b)	14 <sup>o</sup>	5,253	5,237	5,229	409,37	417,15	409,83	160,82	160,39	159,97
	542 <sup>o</sup>	5,337	5,325	5,316	654,70	677,52	644,25	234,90	223,24	213,70
(c)	Não se Aplica	5,519			608,44			138,11		
(d)	Não se Aplica	10,867			2307,93			1495,03		
(e)	Não se Aplica	5,231			410,00			212,74		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.6: Solo de duas camadas ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ).

Casos	Dias	Impedância ( $\Omega$ )			Tensão de toque (V)			Tensão de passo (V)		
		<i>SC</i>	<i>CC7</i>	<i>CC14</i>	<i>SC</i>	<i>CC7</i>	<i>CC14</i>	<i>SC</i>	<i>CC7</i>	<i>CC14</i>
(a)	14 <sup>o</sup>	3,178	2,714	2,539	1416,43	945,71	656,80	496,30	412,36	351,71
	542 <sup>o</sup>	23,962	15,884	10,057	22350	12500	7796,58	2340	2640	1305,50
(b)	14 <sup>o</sup>	2,503	2,242	2,138	878,19	766,60	547,51	495,87	310,83	293,97
	542 <sup>o</sup>	6,210	5,579	4,474	4416,68	3585,72	3092,97	1475,75	1088,77	691,91
(c)	Não se Aplica	7,886			7057,14			1253,17		
(d)	Não se Aplica	2,389			612,25			360,36		
(e)	Não se Aplica	2,044			520,82			223,57		

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.7: Conclusões para solo não homogêneo ( $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$ ).

Casos	Dias	Atende critério de tensão de toque?	Atende critério de tensão de passo?
(a)	14 <sup>o</sup>	Não	Não
	542 <sup>o</sup>	Não	Não
(b)	14 <sup>o</sup>	Sim	Sim
	542 <sup>o</sup>	Sim	Sim

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.8: Conclusões para solo não homogêneo ( $\rho_1 = 1000 \Omega\text{m}$  e  $\rho_2 = 100 \Omega\text{m}$ ).

Casos	Dias	Atende critério de tensão de toque?	Atende critério de tensão de passo?
(a)	14 <sup>o</sup>	Sim	Sim
	542 <sup>o</sup>	Não	Não
(b)	14 <sup>o</sup>	Sim	Sim
	542 <sup>o</sup>	Sim	Sim

Fonte: Autoria própria.

### 4.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foi possível analisar o comportamento das fundações de concreto em torres de LTs em solo homogêneo, com resistividade elétrica uniforme, e em solos não homogêneos, com variação da resistividade ao longo das camadas. As simulações permitiram avaliar o impacto do concreto nos níveis de impedância em cada um dos casos, bem como os níveis de tensão de toque e de passo.

Para os casos (a) e (b) em solo homogêneo, ficou comprovado que quanto menor a resistividade elétrica do concreto, maior é a densidade de corrente presente na fundação, confirmando que o concreto se comporta como material condutor. No entanto, os potenciais de superfície são elevados se a resistividade elétrica do concreto for maior do que a do solo.

Já para os casos (a) e (b) em solo não homogêneo, quando os níveis de resistividade elétrica do concreto são muito maiores que os do solo, o caso (a) não atende como sistema de aterramento. Por outro lado, o caso (b) se mostra mais eficiente e seguro que o caso (c).

# CONCLUSÕES

Através da análise dos resultados obtidos para diferentes modelos de solo e configurações dos sistemas de aterramento, fica evidente a importância de considerar as características do solo ao projetar sistemas de aterramento para torres de linhas de transmissão. Em solos com baixa resistividade, verificou-se que a fundação da torre pode atuar como um sistema eficiente de aterramento, desde que a resistividade do solo seja menor do que a resistividade do concreto.

Entretanto, nos cenários em que o solo é modelado em duas camadas, onde há uma variação significativa na resistividade entre as camadas, os resultados sugerem abordagens distintas. Quando a resistividade da camada superior é menor que a da camada inferior, a fundação isoladamente não oferece a proteção adequada. A combinação da fundação com condutores de contrapeso proporciona resultados similares ao sistema composto somente por contrapesos. Por outro lado, quando a resistividade da camada superior é maior que a da camada inferior, a fundação da torre pode ser considerada como o principal sistema de aterramento. A complementação da fundação com condutores de contrapeso melhora a eficiência e segurança do sistema em comparação a configurações apenas com condutores de contrapeso.

É importante destacar que, em situações onde a resistividade do concreto da fundação é maior do que as resistividades das camadas do solo, os níveis de tensões de toque e de passo tendem a aumentar consideravelmente, exigindo precauções adicionais para garantir a segurança operacional.

No decorrer deste trabalho, foram abordados estudos que evidenciam que a fundação inserida no solo atua como um material condutor, conforme descrito na Seção 14.6 do guia "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding" (IEEE, 2000). Nessa seção, são apontadas também algumas desvantagens, como a possibilidade de corrosão nas barras de aço quando expostas a níveis reduzidos de corrente contínua.

Portanto, o concreto presente na fundação terá impacto prático nos resultados e não pode

ser ignorado na modelagem do sistema de aterramento. É essencial considerar cuidadosamente as propriedades do solo, do concreto e da configuração da fundação para garantir a precisão e a segurança dos sistemas de aterramento em torres de linhas de transmissão. Dessa forma, para diferentes arranjos de fundações é necessário uma abordagem mais detalhada e precisa na modelagem para refletir com precisão o comportamento do sistema em condições reais.

Uma possível direção para estudos futuros seria investigar os efeitos da temperatura provocada pela corrente, durante faltas ou descargas atmosféricas, nas propriedades mecânicas da fundação. Essa análise poderia fornecer informações valiosas sobre como o aumento da temperatura pode impactar na eficácia dos sistemas de aterramento, contribuindo para o aprimoramento das práticas de projeto e segurança das torres de linhas de transmissão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. *NBR 5422 - Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica*. 1985. Citado na página 5.
- ABNT. *NBR 15751 - Sistemas de Aterramento de Subestações - Requisitos*. 2009. 1–53 p. Citado na página 7.
- ABNT. *NBR 7117 - Medição da Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo*. 2012. 1–72 p. Citado 2 vezes nas páginas 13 and 14.
- ABNT. *NBR 15221-1 - Tubos de Aço - Revestimento Anticorrosivo Externo - Parte 1 - Polietileno em Três Camadas*. 2015. 1–32 p. Citado na página 4.
- ARAUJO, C. C.; MEIRA, G. R. Correlation between concrete strength properties and surface electrical resistivity. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto, v. 15, n. 1, p. e15103, 2022. ISSN 1983-4195. Citado na página 2.
- CABRAL, R. J.; GAZZANA, D. S.; TRONCHONI, A. B.; DIAS, G. A. D.; LEBORGNE, R. C.; BRETAS, A. S.; TELLÓ, M. Comparative performance of impulsive grounding systems embedded in concrete: An experiment in reduced scale. In: *2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 2 and 25.
- DAWALIBI, F. P. *SES Engineering Guide - A Simple AC Total Interference Mitigation Study Using SES Software*. [S.l.: s.n.], 2014. 199 p. Citado na página 25.
- DAWALIBI, F. P.; DONOSO, F. Integrated Analysis Software for Grounding, EMF, and EMI. *IEEE Computer Applications in Power*, v. 6, n. 2, p. 19–24, 1993. Citado 2 vezes nas páginas 2 and 25.
- DAWALIBI, F. P.; DONOSO, F. Integrated Analysis Software for Grounding , EMF , and E. *IEEE Computer Applications in Power*, n. April, p. 19–24, 1993. Citado na página 26.
- FAGAN, E. J.; LEE, R. H. The use of concrete-enclosed reinforcing rods as grounding electrodes. *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, IGA-6, n. 4, p. 337–348, 1970. Citado na página 1.
- HE, J.; ZENG, R.; ZHANG, B. *Methodology and Technology for Power System Grounding*. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2013. 1–566 p. ISBN 9781118255001. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/9781118255001>>. Citado 4 vezes nas páginas 2, 13, 16, and 21.
- IEC. *Publication 60479-1 - Effects of Current Passing Through the Human Body*. 1984. Citado na página 9.
- IEEE. *Guide for Safety In AC Substation Grounding*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2000. 202 p. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7109076>>. Citado 4 vezes nas páginas 7, 15, 16, and 69.

- KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. *Aterramento Elétrico*. 3<sup>a</sup>. ed. Porto Alegre / RS: [s.n.], 1995. 1–113 p. Citado 2 vezes nas páginas 10 and 15.
- LAYSSI H., G. P. A. A.; SALEHI, M. Electrical resistivity of concrete. *Concrete International*, 37, 41-46, 2015. Citado na página 22.
- LEON, J. A. M. *Sistemas de Aterramento*. [S.l.]: Editora Érica, 1982. Citado na página 10.
- MARTINS-BRITTO, A. G. *Modeling of the Electromagnetic Interferences between Power Lines and Underground Metallic Pipelines and Impact Analysis*. 121 p. Tese (Master's Thesis) — University of Brasília, 2017. Citado na página 20.
- NEVILLE, A. *Propriedades do Concreto - 5<sup>ª</sup> Edição*. [S.l.]: Bookman Editora, 2015. ISBN 9788582603666. Citado 2 vezes nas páginas 21 and 22.
- PINTO, M. de O. *Energia Elétrica - Geração, Transmissão e Sistemas Interligados*. [S.l.]: Grupo GEN, 2013. Citado na página 5.
- RANDO, R. *Aterramento em atmosferas explosivas: práticas recomendadas*. [S.l.]: Editora Saraiva, 2021. 116 p. Citado na página 13.
- ROBBA, E. J. *Análise de sistemas de transmissão de energia elétrica*. [S.l.]: Blucher, 2020. Citado na página 5.
- RODRIGUES, R. B. B. F. d. B. Andre Nunes de S. J. E. *SPDA - SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: TEORIA, PRÁTICA E LEGISLAÇÃO*. [S.l.]: Saraiva, 2020. 216 p. ISBN 9788536532950. Citado na página 4.
- SANTOS, J. D. D. Palloma Ribeiro Cuba dos. *Análise dos Solos*. [S.l.]: Blucher, 2013. 121 p. Citado na página 12.
- SES. *SES Engineering Guide - A Simple AC Total Interference Mitigation Study Using SES Software*. Laval, Quebec, CA: Safe Engineering Services & technologies ltd., 2014. 199 p. Citado na página 26.
- SILVA, L. M. A. e. *Resistividade Elétrica Superficial do Concreto: Influência da Cura*. 68 p. Tese (Bachelor's Thesis) — Universidade Federal de Goiás, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 2 and 22.
- UFER, H. G. Investigation and testing of footing-type grounding electrodes for electrical installations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 83, n. 10, p. 1042–1048, 1964. Citado na página 1.
- VISACRO, S. A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007a. Citado na página 10.
- VISACRO, S. Direct strokes to transmission lines: Considerations on the mechanism of overvoltage formation and their influence on the lightning performance of lines. *Journal of Lightning Research*, 2007b. Citado 2 vezes nas páginas 8 and 9.