



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

**Análise de Sistemas de Aterramento  
com Hastes Concretadas Submetidos a  
Correntes Impulsivas**

Gabriel Vidal Negreiros Bezerra

Campina Grande - Paraíba - Brasil  
©Gabriel Vidal Negreiros Bezerra, Março, 2017

Gabriel Vidal Negreiros Bezerra

**Análise de Sistemas de Aterramento  
com Hastes Concretadas Submetidos a Correntes  
Impulsivas**

Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Orientadores:

Edson Guedes da Costa, Doutor.

Helder Alves Pereira, Doutor.

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Março, 2017

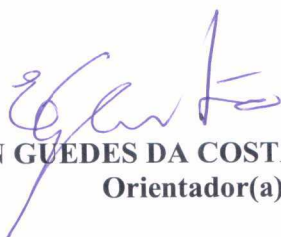
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

B574a	<p>Bezerra, Gabriel Vidal Negreiros. Análise de Sistemas de Aterramento com hastes concretadas submetidos a correntes impulsivas / Gabriel Vidal Negreiros Bezerra. – Campina Grande-PB, 2017. 110 f. : il. color.</p> <p>Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2017. "Orientação: Prof. Dr. Edson Guedes da Costa, Prof. Dr. Helder Alves Pereira". Referências.</p> <p>1. Aterramentos - Concreto. 2. Hastes Concretadas. 3. Impedância Transitória. 4. Impulso de Corrente. 5. Ionização do Solo. 6. Simulações. I. Costa, Edson Guedes da. II. Pereira, Helder Alves. III. Título.</p>
CDU 621.316(043)	

**"ANÁLISE DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO COM HASTES CONCRETADAS  
SUBMETIDAS A CORRENTES IMPULSIVAS"**

**GABRIEL VIDAL NEGREIROS BEZERRA**

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 30/03/2017**



**EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG  
Orientador(a)**



**HELDER ALVES PEREIRA, Dr., UFCG  
Orientador(a)**



**ALEXANDRE JEAN RENÉ SERRES, Dr., UFCG  
Examinador(a)**

**GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, D.Sc., UFCG  
Examinador(a)**



**RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG  
Examinador(a)**

**CAMPINA GRANDE - PB**

*Dedico este trabalho à Deus, minha amada esposa e família.*

---

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pois, mesmo sendo tão grande, se faz tão perto em toda a minha vida. Mostrou-me que, mesmo tendo criado a ciência de todo o universo, foi capaz de descer e se tornar um de nós.

Agradeço a minha esposa, Valdice Vidal, pelo apoio, presença e carinho a mim ofertados. Uma boa esposa faz toda diferença.

Agradeço pelos ensinamentos, dedicação e presteza do Prof. Helder Alves Pereira, bem como seu esforço em me orientar neste trabalho.

Agradeço Prof. Edson Guedes da Costa por sua essencial orientação durante todo o curso do mestrado bem como na elaboração deste trabalho.

Agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG, sobretudo aos professores George Rossany e Tarso Vilela, que acreditaram no meu potencial e tanto contribuíram para a minha formação.

Agradeço ao CNPq pelo suporte financeiro durante o início da pesquisa.

*O homem sábio é forte, e o homem  
de conhecimento consolida a força.  
Provérbios 24:5*

# Resumo

Neste trabalho é realizada uma avaliação da resposta impulsiva de aterramento com haste concretada, considerando o efeito da ionização do solo. Para isso, o aterramento foi representado e simulado utilizando uma ferramenta computacional de simulação em três dimensões por meio do método dos elementos finitos. A representação computacional, bem como a validação da mesma, foi feita tomando-se como base dados experimentais apresentados na literatura. O fenômeno da ionização do solo foi implementado ponto a ponto, utilizando o equacionamento do modelo dinâmico de ionização do solo, possibilitando que aterramentos com diferentes formatos geométricos sejam avaliados. Avaliou-se a impedância transitória de uma haste concretada padronizada para solos com diferentes resistividades. Além disso, procedeu-se com uma análise da resposta impulsiva da haste concretada para diferentes parâmetros geométricos, a saber: raio do concreto envolvente, comprimento vertical da haste concretada, comprimento vertical do concreto envolvente e profundidade da haste concretada em relação ao nível do solo. Por fim, propõem-se limites práticos e sugestões de dimensões para a haste concretada, de forma que a resposta impulsiva seja otimizada.

**Palavras-chave:** Aterramentos. Concreto. Hastes Concretadas. Impedância Transitória. Impulso de Corrente. Ionização do Solo. Simulações.



# Abstract

In this research, was performed an impulsive response evaluation of concrete encased groundings, considering de soil ionization effect. In order to achive this, the groudng was represented and simulated in three dimensions using a finite element method software. The computational representation and validation were performed using experimental data presented in the literature. The soil ionization effect was implemented in a point form, allowing evaluate groudngs with different geometric formats. It was studied the transient impedance of a standard concrete encased rod placed in soils with different resistivity values. Furthermore, was performed a transient response analysis for different geometric parameters of the concrete encased rod, namely: the concrete radius, the vertical length of the concrete encased rod, the vertical length of the concrete encased rod, the surrounding concrete and the depth of the concrete encased rod in relation to the soil surface. Finally, practical limits and suggested dimensions for the concrete encased rod are proposed, in order to optimize the impulse response.

**Keywords:** Concrete encased grounding. Current impulse. Grounding. Simulations. Soil ionization. Transient Impedance.

---

## Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Haste de aterramento vertical. . . . .	23
Figura 2.2 – Esboço da constituição de uma malha de aterramento. . . . .	23
Figura 2.3 – Esboço do fenômeno da ionização do solo. . . . .	25
Figura 2.4 – Gráfico da variação da impedância harmônica em função da frequência. . . . .	27
Figura 2.5 – Esboço de aterramento convencional. . . . .	28
Figura 2.6 – Esboço de aterramento com tratamento químico. . . . .	29
Figura 2.7 – Esquema de aterramento de haste vertical concretada. . . . .	30
Figura 2.8 – Modelo de haste concretada desenvolvida por Rodrigues [42]. . . . .	30
Figura 2.9 – Exemplos de topologias de sistemas de aterramento. . . . .	32
Figura 2.10 – Ilustração do processo de discretização de uma haste de aterramento envolvida por concreto fincada em um solo homogêneo. Representação com simetria radial (axissimétrica). . . . .	36
Figura 2.11 – Representação do módulo do <i>Comsol</i> mais adequado a depender da maior dimensão do objeto e do comprimento de onda. . . . .	39
Figura 3.1 – Haste de aterramento. . . . .	54
Figura 3.2 – Curvas do processo de ionização de desionização do solo. . . . .	55
Figura 3.3 – Campo elétrico na superfície do eletrodo <i>versus</i> magnitude da corrente, obtido com o modelo de Liew e Darveniza [47]. . . . .	56
Figura 3.4 – Perfil de ionização do solo assumido por Sekioka et al. [90]. . . . .	58
Figura 3.5 – Método para determinar a característica impulsiva de uma haste de aterramento, conforme Bellaschi, Armington e Snowden [93]. . . . .	59
Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia para realização dos estudos do presente trabalho. . . . .	64
Figura 4.2 – Simulação considerando e desconsiderando o fenômeno da ionização o solo. . . . .	65
Figura 4.3 – Função degrau $u$ utilizada para transição entre $f_{ion}$ e $f_{deion}$ . . . . .	69
Figura 4.4 – Representação geométrica da haste nua no <i>Comsol</i> . . . . .	71
Figura 4.5 – Representação geométrica da haste concretada no <i>Comsol</i> . . . . .	73

Figura 5.1 – Exemplo de simulação utilizando o modelo de ionização implementado no presente trabalho. Gráficos da resistividade no solo, durante impulso de corrente aplicado em uma haste nua fincada em solo com 50 $\Omega$ .m de resistividade. . . . .	77
Figura 5.2 – Forma de onda da tensão aplicada na haste, no primeiro experimento de Liew e Darveniza [47] avaliado. . . . .	79
Figura 5.3 – Impedância e corrente obtidas pela simulação e respectivos valores experimentais obtidos por Liew e Darveniza [47]. . . . .	80
Figura 5.4 – Forma de onda da tensão aplicada na haste, no segundo experimento de Liew e Darveniza [47] avaliado. . . . .	81
Figura 5.5 – Impedância e corrente obtidas pela simulação e respectivos valores experimentais obtidos por Liew e Darveniza [47]. . . . .	82
Figura 5.6 – Impedância transitória e corrente em haste nua e concretada para solos de 50 $\Omega$ .m, 100 $\Omega$ .m, 500 $\Omega$ .m e 2500 $\Omega$ .m. . . . .	84
Figura 5.7 – Ilustração da variação do raio do concreto. . . . .	88
Figura 5.8 – Impedância da haste para diferentes raios de concreto envolvente em um solo de 500 $\Omega$ .m. . . . .	88
Figura 5.9 – Corrente obtida na haste para diferentes raios de concreto envolvente em um solo de 500 $\Omega$ .m. . . . .	89
Figura 5.10–Ilustração da variação do comprimento vertical da haste concretada. . . . .	91
Figura 5.11–Impedância da haste concretada para diferentes comprimentos em um solo de 500 $\Omega$ .m. . . . .	92
Figura 5.12–Corrente obtida na haste concretada para diferentes comprimentos em um solo de 500 $\Omega$ .m. . . . .	92
Figura 5.13–Ilustração da variação do comprimento vertical do concreto. . . . .	94
Figura 5.14–Impedância da haste concretada para diferentes comprimentos do concreto, em um solo de 500 $\Omega$ .m. . . . .	95
Figura 5.15–Corrente obtida na haste concretada para diferentes comprimentos do concreto em um solo de 500 $\Omega$ .m. . . . .	95
Figura 5.16–Ilustração da variação da profundidade da haste concretada em relação ao nível do solo. . . . .	97
Figura 5.17–Impedância da haste concretada para diferentes profundidades da haste, em um solo de 500 $\Omega$ .m. . . . .	98
Figura 5.18–Corrente obtida na haste concretada para diferentes profundidades da haste concretada em um solo de 500 $\Omega$ .m. . . . .	98

---

## Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Comparativo, em ordem cronológica, de características dos trabalhos da revisão bibliográfica e o presente trabalho, . . . . .	62
Tabela 3.2 – Continuação do comparativo de características dos trabalhos da revisão bibliográfica e o presente trabalho, em ordem cronológica. . . . .	63
Tabela 5.1 – Parâmetros da simulação de validação no <i>Comsol</i> . . . . .	78
Tabela 5.2 – Parâmetros das simulações de comparação entre haste nua e haste concretada, em solos com resistividade de 50 $\Omega\cdot\text{m}$ , 100 $\Omega\cdot\text{m}$ e 2500 $\Omega\cdot\text{m}$ . . . . .	83
Tabela 5.3 – Resistência de baixa frequência ( $R_b$ ) e impedância máxima ( $Z_{max}$ ) e mínima ( $Z_{min}$ ) para haste nua (Nua) e haste concretada (Concret.) em solos com diferentes resistividades ( $\rho_{solo}$ ). . . . .	85
Tabela 5.4 – Tabela de referência para a análise da resposta dos parâmetros. . . . .	87
Tabela 5.5 – Resistências e Impedâncias para variações no raio do concreto. . . . .	89
Tabela 5.6 – Resistências e Impedâncias para variação do comprimento total da haste. . . . .	93
Tabela 5.7 – Resistências e Impedâncias para variação do comprimento vertical do concreto. . . . .	96
Tabela 5.8 – Resistências e Impedâncias para variação da profundidade em que a haste concretada é fincada no solo. . . . .	99

---

## Lista de abreviaturas e siglas

EDP	Equação Diferencial Parcial
FDTD	Finite-Difference Time Domain Method - Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo
MEC	Método dos Elementos de Contorno
MEF	Método dos Elementos Finitos
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SOR	<i>Successive Over-Relaxation</i> - Método da Relaxação Sucessiva
SPDA	Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas

---

## Lista de símbolos

<b>A</b>	Potencial vetorial magnético
$A_{imp}$	Coefficiente impulsivo
<b>B</b>	Densidade de Fluxo magnético
<b>D</b>	Densidade de fluxo elétrico
$dV/dt$	Derivada do potencial escalar elétrico
$dZ/dt$	Derivada da Impedância transitória do aterramento
$E$	Campo elétrico
$\epsilon_0$	Permissividade do espaço livre
$\epsilon_r$	Permissividade relativa
<b>H</b>	Vetor intensidade de campo magnético
$h_{haste}$	Comprimento vertical da haste concretada
$h_{concreto}$	Comprimento vertical do concreto envolvente
$i(t)$	Corrente elétrica
$I_p$	Pico da corrente elétrica
$I_b$	Amplitude da corrente elétrica de baixa frequência
<b>J</b>	Vetor densidade de corrente de condução
$\mu_0$	Permeabilidade do espaço livre
$\mu_r$	Permeabilidade relativa

$profund.$	Profundidade da cabeça da haste em relação ao nível do solo
$\rho$	Resistividade
$R_b$	Resistência de baixa frequência do aterramento
$r_{concreto}$	Raio do concreto envolvente
$\sigma$	Condutividade
$v(t)$	Potencial escalar elétrico
$V_p$	Pico do potencial escalar elétrico
$V_b$	Amplitude da tensão elétrica de baixa frequência
$z(t)$	Impedância transitória do aterramento
$Z_p$	Impedância impulsiva
$Z(jw)$	Impedância harmônica
$Z_{max}$	Valor máximo da impedância transitória
$Z_{min}$	Valor mínimo da impedância transitória, após a ocorrência de $Z_{max}$

---

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização do Assunto</b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Motivação</b>	<b>18</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>20</b>
1.3.1	Geral	20
1.3.2	Específicos	20
<b>1.4</b>	<b>Metodologia</b>	<b>20</b>
<b>1.5</b>	<b>Organização do Trabalho</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>22</b>
<b>2.1</b>	<b>Sistemas de Aterramento</b>	<b>22</b>
2.1.1	Efeito da Ionização do Solo	24
2.1.2	Grandezas para Avaliação de Sistemas de Aterramento	25
2.1.3	Classificação	28
2.1.3.1	Tipos	28
2.1.3.2	Topologia	31
<b>2.2</b>	<b>Modelagem Matemática</b>	<b>33</b>
<b>2.3</b>	<b>Métodos Numéricos para Análise de Sistemas de Aterramento</b>	<b>33</b>
2.3.1	Método das Diferenças Finitas (FDTD)	33
2.3.2	Método dos Elementos de Contorno (MEC)	34
2.3.3	Método dos Elementos Finitos (MEF)	35
2.3.4	Descrição da Ferramenta Computacional - <i>Comsol</i>	38
<b>2.4</b>	<b>Considerações</b>	<b>39</b>
<b>3</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b>	<b>41</b>
<b>3.1</b>	<b>Aterramentos Concretados</b>	<b>41</b>
3.1.1	Considerações	51
<b>3.2</b>	<b>Modelagem Eletromagnética</b>	<b>52</b>
3.2.1	Considerações	53
<b>3.3</b>	<b>Modelos de Ionização do Solo</b>	<b>53</b>
3.3.1	Modelo Dinâmico	54



3.3.2	Modelo de Balanço Energético . . . . .	57
3.3.3	Modelo de Raio e Comprimento Efetivo . . . . .	58
3.3.4	Considerações . . . . .	60
<b>3.4</b>	<b>Contribuições do Trabalho . . . . .</b>	<b>60</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>64</b>
4.1	Visão Geral . . . . .	64
4.2	Implementação Pontual do Modelo Dinâmico de Ionização . . . . .	65
4.3	Validação da Implementação do Modelo de Ionização . . . . .	71
4.4	Estudo da Haste Concretada <i>Versus</i> Haste Nua . . . . .	72
4.5	Estudo dos Parâmetros Geométricos da Haste Concretada . . . . .	73
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES . . . . .</b>	<b>75</b>
5.1	Implementação do Modelo Dinâmico de Ionização . . . . .	76
5.2	Validação da Implementação do Modelo de Ionização . . . . .	78
5.2.1	Validação I . . . . .	78
5.2.2	Validação II . . . . .	81
5.3	Haste concretada <i>versus</i> Haste nua . . . . .	82
5.4	Resposta dos Parâmetros da Haste Concretada . . . . .	86
5.4.1	Raio do Concreto . . . . .	87
5.4.2	Comprimento total da haste . . . . .	90
5.4.3	Comprimento do Concreto . . . . .	94
5.4.4	Profundidade da haste . . . . .	96
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>100</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>103</b>

---

# Introdução

## 1.1 Contextualização do Assunto

O aterramento constitui um importante componente de um sistema elétrico de potência (SEP). Seu principal objetivo é proporcionar uma baixa impedância ao solo, uma vez que este não apresenta naturalmente uma impedância pequena o suficiente para as aplicações necessárias. Assim, o sistema de aterramento deve prover meios para a condução de corrente elétrica para a terra em condições normais, de falta e de surto; sem, no entanto, exceder qualquer limite de operação dos equipamentos ou afetar a continuidade do serviço [1]. Além disso, o aterramento deve reduzir os riscos de choques elétricos críticos em pessoas que estejam nas proximidades da instalação aterrada. Conforme [Kindermann e Campagnolo](#) [2], os objetivos principais do sistema de aterramento são:

- Obter valor de resistência de aterramento o mais baixo possível, para a condução de correntes de falta à terra;
- Manter os potenciais produzidos pelas correntes de falta dentro dos limites de segurança de modo a não causar fibrilação do coração;
- Fazer com que equipamentos de proteção sejam mais facilmente sensibilizados e isolem rapidamente as falhas à terra;
- Proporcionar um caminho de escoamento à terra para as descargas atmosféricas;
- Usar a terra como retorno de corrente de sistemas monofilares com retorno por terra (MRT);
- Escoar as cargas estáticas geradas nas carcaças dos equipamentos.

---

<sup>0</sup> Durante parte do desenvolvimento do presente trabalho, o autor recebeu apoio financeiro do CNPQ - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, para o desenvolvimento da pesquisa.

O sistema de aterramento pode ser solicitado, direta ou indiretamente, nas seguintes situações [3]:

- falta no sistema elétrico;
- surtos de manobra;
- incidência de descarga atmosférica em linhas de transmissão;
- incidência de descarga atmosférica no sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) da subestação.

Diante dessas solicitações, um sistema de aterramento, projetado incorretamente, pode tanto oferecer riscos de morte a vidas humanas bem como causar danificação de equipamentos do SEP [3–8]. Além de representar um problema técnico, a falha de equipamentos no interior de uma subestação pode implicar, também, elevado prejuízo econômico, tanto pelo valor do equipamento em si, quanto pela possibilidade de interrupção da continuidade do serviço de fornecimento de energia elétrica [7].

## 1.2 Motivação

O desenvolvimento de estudos na área de aterramentos proporcionou a criação de estratégias para diminuir a resistência do aterramento. Dentre elas, pode-se citar a utilização de tratamento químico do solo [9–14] e a utilização de concreto ao redor de eletrodos de aterramento [15–18].

A utilização de concreto no sistema de aterramento tem sido objeto de estudos e verificações [19–22]. Vários trabalhos apresentam estudos de aterramentos concretados submetidos a correntes de baixa magnitude [20, 21, 23–25]. Outros trabalhos consideram correntes de elevadas magnitudes, no entanto, desconsideram o efeito da ionização do solo [19, 25]. Contudo, na prática, os aterramentos podem ser submetidos a correntes impulsivas de elevada magnitude com componentes de altas frequências, promovendo ionização do solo. Esse tipo de situação, a qual o aterramento concretado pode ser submetido, apresenta grande importância para caracterização do mesmo, uma vez que correntes impulsivas podem promover elevados potenciais na superfície do solo, gerando risco à pessoas e equipamentos. Assim, dado à escassez de trabalhos na literatura que consideram o efeito da ionização do solo em estudos de aterramento concretado sob correntes impulsivas de elevada magnitude, o presente trabalho apresenta uma implementação de modelo de ionização do solo, de forma a possibilitar estudos mais aprofundados quanto ao aterramento concretado.

Aterramentos com hastes concretadas apresentam diferentes valores de resistência e impedância de aterramento a depender da resistividade do solo. Na literatura, os estudos de

haste de aterramento concretada, geralmente, fazem análises para um ou, no máximo, dois tipos de solos com diferentes resistividades. Cada trabalho da literatura realiza análises para hastes concretadas com dimensões geométricas diferentes, ficando difícil analisar, de forma padronizada, o comportamento da impedância transitória para diferentes resistividades do solo. Assim, o presente trabalho objetiva apresentar, também, uma análise da impedância transitória de uma haste concretada padronizada, para solos com diferentes resistividades. Dessa forma, pode-se realizar uma avaliação mais acurada, uma vez que assegura-se que a haste é a mesma, variando-se apenas a resistividade do solo.

Entre os trabalhos encontrados que apresentam estudos de aterramentos concretados sob correntes impulsivas [22, 26], não encontrou-se estudos que analisam o efeito que os parâmetros geométricos da haste concretada tem na impedância transitória. Entre esses parâmetros pode-se citar o raio do concreto que envolve o eletrodo metálico, comprimento total da haste, comprimento vertical do concreto e profundidade da haste em relação ao nível do solo. Dessa forma, o presente trabalho vem contribuir com uma caracterização da resposta impulsiva de hastes concretadas verticais quanto aos seus parâmetros geométricos.

As análises aqui realizadas apresentariam considerável complexidade se fossem conduzidas através de experimentos. Por esse motivo, a utilização de simulações computacionais apresenta-se como uma alternativa para realização de análises da resposta transitória de hastes concretadas, quanto à resistividade do solo e quanto aos parâmetros geométricos da haste, considerando o efeito da ionização do solo. Uma modelagem matemática que se adequa aos tipos de análises mencionadas anteriormente é a modelagem eletromagnética através do método dos elementos finitos (MEF). Com essa modelagem, é possível implementar o efeito da ionização do solo e analisar as correntes, potenciais e impedâncias para diferentes resistividades do solo e diferentes parâmetros geométricos da haste concretada.

Pelo exposto, neste trabalho são realizadas avaliações da resposta transitória de aterramento com haste concretada vertical, quando submetidas a correntes impulsivas. Nestas avaliações, o efeito da ionização é considerado. O trabalho compreende tanto a implementação de um modelo de ionização do solo, quanto a análise da resposta transitória da haste concretada para diferentes tipos de solos e diferentes formatos geométricos da haste concretada. Para isso, utilizou-se simulações computacionais, validando-as através de trabalhos da literatura, lançando mão de uma representação eletromagnética com método dos elementos finitos. Com isso, busca-se aprofundar o entendimento de aterramentos concretados sob solicitações impulsivas, possibilitando, assim, entender os tipos de solos para as quais são mais adequados bem como as geometrias de haste mais eficientes.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Geral

Analisar o comportamento de aterramento com haste concretada vertical sob excitação de correntes impulsivas, por meio de simulações computacionais.

### 1.3.2 Específicos

- Implementar ponto a ponto um modelo que represente o efeito de ionização do solo para estudos com correntes impulsivas.
- Comparar a resposta transitória de uma haste concretada e uma haste nua, para solos com diferentes resistividades.
- Avaliar o efeito que diferentes diâmetros do concreto que envolve o eletrodo acarretam no aterramento.
- Avaliar a resposta do aterramento para diferentes valores de comprimentos vertical da haste concretada.
- Avaliar a resposta do aterramento para diferentes valores de profundidade da haste concretada, em relação ao nível do solo.

## 1.4 Metodologia

O presente trabalho propõe-se a analisar o comportamento de hastes de aterramento concretadas, quando submetidas a correntes impulsivas. Para isso, utiliza-se a ferramenta de simulação computacional *Comsol Multiphysics*<sup>®</sup>, que utiliza o método dos elementos finitos, considerando um modelo eletromagnético, para solução de equações diferenciais. Implementou-se um modelo ionização do solo para que fosse possível considerar a ionização, nos pontos do solo em que o campo elétrico excede o gradiente de ionização do solo. Validou-se a implementação pontual do modelo de ionização por meio de resultados experimentais presentes na literatura. Subsequentemente, realizou-se estudos da influência da resistividade do solo e dos parâmetros geométricos da haste concretada.

## 1.5 Organização do Trabalho

O trabalho está organizado da seguinte forma: no [Capítulo 2](#) é apresentada uma fundamentação teórica dos conceitos e peculiaridades concernentes ao estudo de aterramentos sob excitação de correntes impulsivas, bem como uma descrição dos métodos dos elementos finitos (MEF); no [Capítulo 3](#) é realizada uma explanação do estado da arte

referente aos temas do trabalho; no [Capítulo 5](#) são apresentados os resultados e as análises; por fim, no [Capítulo 6](#) é descrita a conclusão deste trabalho e a apresentação das sugestões para trabalhos futuros.

---

# Fundamentação Teórica

## 2.1 Sistemas de Aterramento

Conforme [Visacro \[27\]](#), um aterramento elétrico consiste em uma ligação elétrica proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo. Tal sistema é constituído por três partes básicas:

- as conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos eletrodos;
- eletrodos de aterramento (qualquer corpo metálico colocado no solo);
- terra que envolve eletrodos.

O tipo de objeto ou sistema a ser conectado ao aterramento pode ser diverso e depende da aplicação. Tem-se como exemplos: um sistema eletrônico, carcaça de motor, condutores de proteção de uma instalação elétrica, neutro de transformadores, terminais de equipamentos de subestações, captosres de um SPDA, etc [\[27\]](#).

O eletrodo pode possuir diferentes formatos geométricos e material constituinte. No entanto, é usual que seja de um material condutor e, de alguma forma, esteja enterrado no solo. Algumas configurações usuais são: haste acobreada cilíndrica, cantoneira e malha em reticulado de cabos condutores. Entre elas, conforme ilustrado na [Figura 2.1 \[28\]](#), a haste vertical é a configuração que, provavelmente, é mais difundida, uma vez que possui um formato de fácil encravamento no solo; sendo eficaz para solos em que as camadas mais profundas possuem baixa resistividade, o que permite que tais camadas sejam acessadas pela haste ou eletrodo.

**Figura 2.1** – Haste de aterramento vertical.

(a) Haste



Fonte: [28]

(b) Componentes

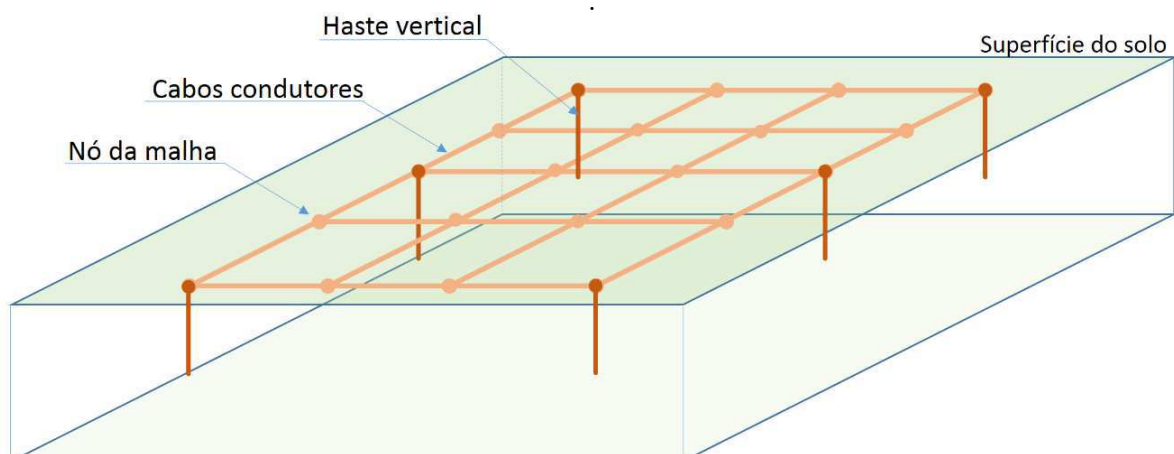


Fonte: [29]

Diversos fatores podem influenciar na resistência do aterramento, bem como no seu comportamento quando submetido a correntes impulsivas. No entanto, pode-se dividir esses fatores em basicamente dois grupos [27]:

- resistividade do solo nas adjacências do eletrodo;
- geometria do eletrodo (dimensões e formato).

No caso de subestações, a técnica de aterramento mais empregada é a utilização de hastas verticais conectadas a uma malha, composta por cabos e eletrodos condutores, enterrada em, aproximadamente, de 30 cm a 1 m em relação à superfície do solo [30]. A Figura 2.2 apresenta a constituição básica de uma malha de aterramento.

**Figura 2.2** – Esboço da constituição de uma malha de aterramento.

Fonte: Produzida pelo autor.



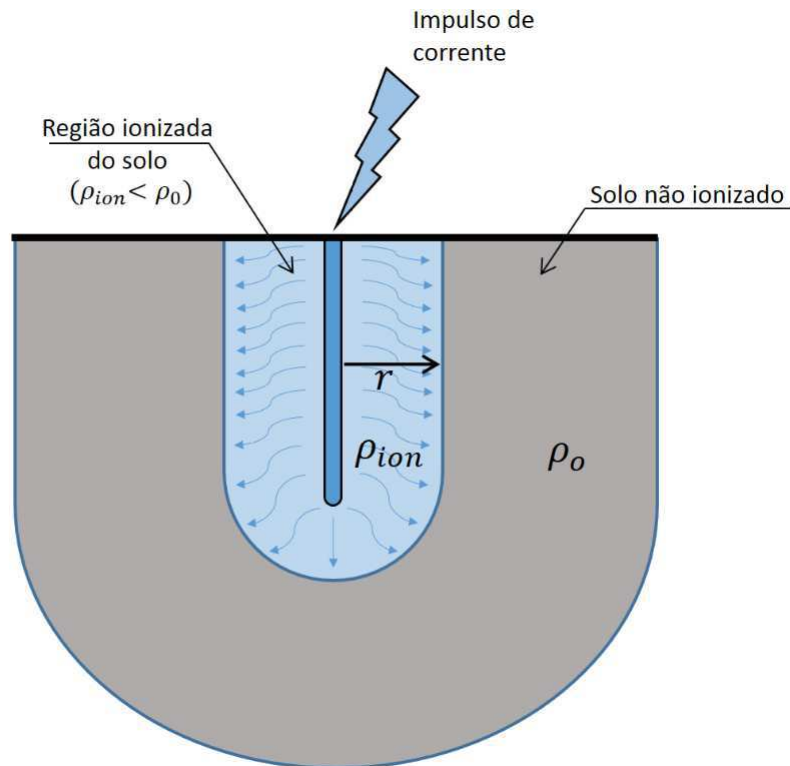
Quanto às características elétricas, um aterramento apresenta concomitantemente efeitos resistivos, capacitivos e indutivos, tendo, cada um, sua contribuição no comportamento global do aterramento, quando esse conduz correntes para a terra [27]. Dependendo da frequência e amplitude da forma de onda de corrente aplicado no aterramento, um desses efeitos pode ganhar mais expressividade em relação aos demais. A impedância do aterramento representa a combinação da resistência, capacitância e indutância do aterramento. Essa impedância pode ser calculada através do quociente da tensão e corrente no aterramento.

A impedância do aterramento é um parâmetro que está diretamente relacionado com os níveis de potenciais na superfície do solo, quando o aterramento conduz correntes. Assim, comumente, a eficiência do aterramento é medida em termos de sua impedância. Na próxima seção, apresenta-se as definições de resistência e impedância de aterramento utilizadas no presente trabalho.

### 2.1.1 Efeito da Ionização do Solo

Quando submetido a impulsos, o sistema de aterramento apresenta uma resposta diferente de quando o mesmo é submetido a correntes de baixas frequências [31]. Isso ocorre devido ao fato de que o aterramento não responde igualmente a diferentes tipos de formas de onda. Ou seja, devido às interações eletromagnéticas entre os elementos do sistema (quando há presença de correntes) há uma resposta dependente da frequência da forma de onda da tensão ou corrente aplicada. Um dos fenômenos que corroboram de forma mais pronunciada com o comportamento diferenciado do sistema quando submetido a correntes impulsivas é a ionização do solo. Esse fenômeno ocorre quando o aterramento é submetido a uma corrente de elevada amplitude. Essa corrente impulsiva produz um campo elétrico na região circunvizinha da haste que ultrapassa o gradiente de ionização do solo (tipicamente 300 a 1000 kV/m [32, 33]), ocorrendo uma ruptura dielétrica do solo, provocando uma redução da resistividade do solo na região ionizada, conforme a [Figura 2.3](#) apresenta. Após a ocorrência da ionização, segue-se o processo de desionização que consiste no restabelecimento gradual da resistividade do solo na região ionizada até retornar ao valor da resistividade inicial do solo ( $\rho_0$ ).

A [Figura 2.3](#) apresenta apenas um esboço da região de ionização. Na prática, como será esclarecido nos capítulos posteriores, essa região não possui um formato exatamente cilíndrico. Além disso, para eletrodos com formatos diferentes da uma haste vertical nua, a região de ionização é maior nas regiões onde o campo elétrico é mais intenso.

**Figura 2.3** – Esboço do fenômeno da ionização do solo.

Fonte: Produzida pelo autor.

### 2.1.2 Grandezas para Avaliação de Sistemas de Aterramento

Visacro e Rosado [31] e Greev [34] consideram como grandezas de maior importância para análise de sistemas de aterramentos: a resistência de baixa frequência, a impedância transitória, a impedância impulsiva, o coeficiente impulsivo e a impedância harmônica.

#### Resistência de Baixa Frequência

A resistência de aterramento é a grandeza mais utilizada para situações práticas de engenharia, podendo ser medida através de um equipamento terrômetro, também chamado de *Megger*. Esse tipo de equipamento utiliza formas de onda com frequência abaixo de 1 kHz e, por isso, a grandeza medida é denominada de resistência de baixa frequência. Além disso, o terrômetro utiliza formas de onda de baixa magnitude o que impossibilita a ocorrência de ionização do solo. Assim, no presente trabalho, define-se resistência de aterramento como:

$$R_b = \frac{V_b}{I_b}, \quad (2.1)$$

em que  $R_b$  é a resistência do aterramento, quando submetido a formas de onda de corrente e tensão de baixa frequência (ou frequência industrial) e amplitudes não ionizantes do solo, definidos como  $I_b$  e  $V_b$ , respectivamente. O valor de  $R_b$  é constante enquanto as características do solo ou do aterramento não são modificadas.

## Impedância Transitória

Outra grandeza que apresenta grande importância no presente estudo é o valor da impedância do aterramento durante a aplicação de tensão ou corrente impulsiva. Tais formas de onda apresentam elevada magnitude, componentes de frequências elevadas e promovem ionização do solo. Assim, no presente trabalho, define-se tal grandeza como sendo a impedância transitória:

$$z(t) = \frac{v(t)}{i(t)} \quad (2.2)$$

em que  $v(t)$  é tensão impulsiva (ionizante ou não) aplicada no aterramento e  $i(t)$  é a respectiva corrente impulsiva obtida. Assim,  $z(t)$  é função do tempo, podendo ser calculada através de medições de corrente e tensão. Geralmente, essas medições de tensão e corrente são realizadas com osciloscópio, durante um experimento de aplicação de impulso de corrente no aterramento. Além disso, define-se:

- $Z_{max}$ : máximo valor da impedância transitória.
- $Z_{min}$ : mínimo valor da impedância transitória, após a ocorrência de  $Z_{max}$ .

Para a avaliação de aterramentos concretados sob correntes impulsivas, a observação do comportamento de  $z(t)$  é uma das tarefas mais importantes, uma vez que os valores de  $z(t)$  repercutem diretamente nos valores de potencial na superfície do solo que, por sua vez, estão relacionados com a proteção de equipamentos e pessoas que transitam no nível do solo.

## Impedância Impulsiva

A impedância impulsiva é uma grandeza várias vezes utilizada em estudos de aterramentos submetidos a correntes impulsivas. Tal grandeza é definida como sendo a razão entre o pico da tensão aplicada no aterramento ( $V_p$ ) e o pico da corrente injetada ( $I_p$ ):

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p}. \quad (2.3)$$

O fato de ser uma grandeza escalar de fácil cálculo torna a impedância impulsiva ( $Z_p$ ) uma grandeza bastante escolhida para representar o efeito do aterramento sob correntes impulsivas. No entanto, nem sempre o pico da tensão ocorre no mesmo instante que o pico da corrente, o que faz com que  $Z_p$  seja diferente do valor máximo da impedância transitória  $Z_{max}$ . Por esse motivo, essa grandeza não é adotada no presente trabalho.

### Coeficiente Impulsivo

O coeficiente impulsivo ( $A_{imp}$ ) é definido com sendo a relação entre a impedância impulsiva ( $Z_p$ ) e a resistência de baixa frequência ( $R_b$ ):

$$A_{imp} = \frac{Z_p}{R_b}. \quad (2.4)$$

De uma forma geral, essa grandeza mede o quão maior a impedância impulsiva é em relação à resistência de baixa frequência, indicando a performance da resposta impulsiva em relação à resposta de baixa frequência do aterramento.

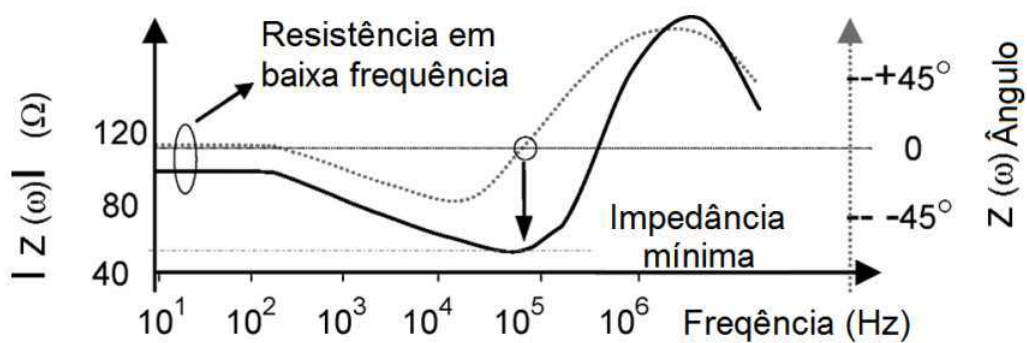
### Impedância Harmônica

A impedância harmônica, também conhecida como impedância complexa, consiste na relação entre tensão e corrente no domínio da frequência, sendo definida como:

$$Z(j\omega) = \frac{V(j\omega)}{I(j\omega)}. \quad (2.5)$$

Dessa forma, pode-se observar o comportamento da impedância do aterramento para diferentes tipos de valores de frequência. Visacro [35] apresenta um estudo de simulação da impedância harmônica de eletrodo horizontal aterrado no solo, conforme indicado na Figura 2.4.

**Figura 2.4** – Gráfico da variação da impedância harmônica em função da frequência.



Fonte: Reproduzida de Visacro [35].

Pode-se observar na Figura 2.4 que, para baixas frequências, o valor da impedância harmônica é constante, se aproximando do valor da resistência de baixa frequência  $R_b$ . No entanto, à medida que a frequência da forma de onda aplicada cresce, ocorrem variações no valor da impedância harmônica devido às variações nos pronunciamentos do efeito capacitivo e indutivo do aterramento.

## 2.1.3 Classificação

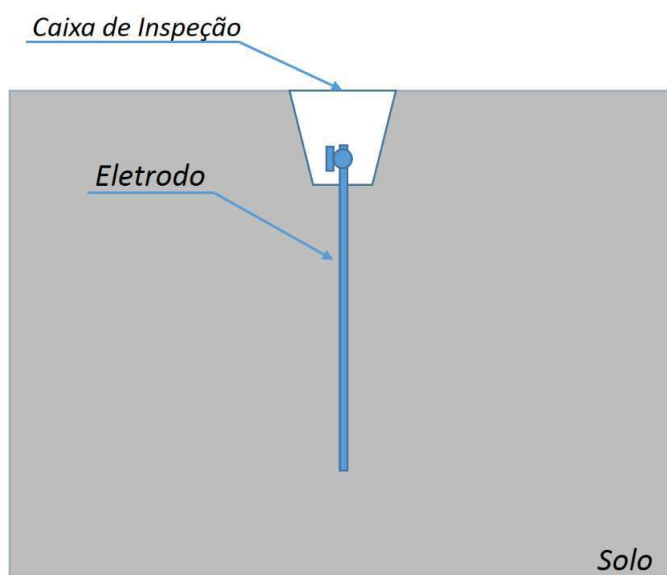
### 2.1.3.1 Tipos

Do ponto de vista da utilização e do emprego de materiais aditivos, os aterramentos podem ser classificados em três tipos: convencional, químico [26, 36, 37] e concretado.

#### Convencional

Os aterramentos convencionais são os mais simples em sua constituição. Consistem em interconexões de hastes (eletrodos) verticais nuas e cabos horizontais nus, ambos de material condutor exposto. Conforme a NBR 15715 [30], no caso de subestações, o sistema de aterramento é realizado com uma malha reticulada de cabos condutores nus, na qual, em alguns nós da malha, são fincadas hastes verticais de cobre.

**Figura 2.5** – Esboço de aterramento convencional.



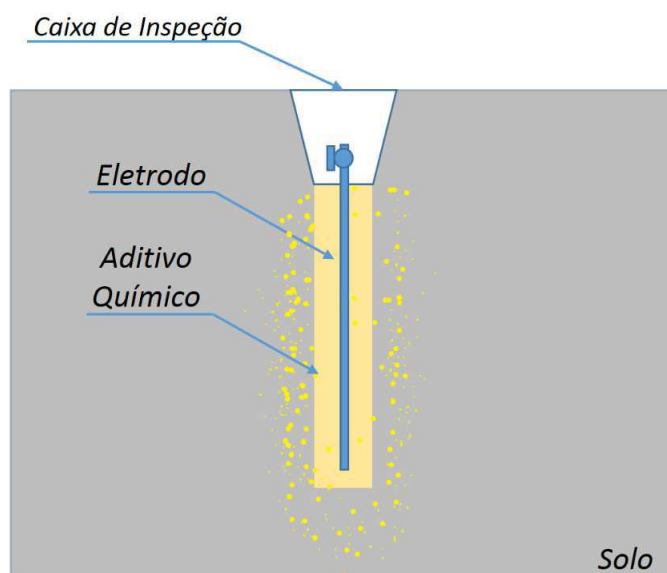
Fonte: Produzida pelo autor.

#### Químico

O aterramento com tratamento químico do solo é uma das técnicas empregadas em solos com elevada resistividade. Consiste na adição de sais no solo circunvizinho ao aterramento, sendo comum a utilização de cloreto de sódio, sulfato de cobre ou produtos químicos industrializados [27]. A estrutura básica de um aterramento com tratamento químico é apresentada na Figura 2.6. Embora seja uma alternativa de aterramento, conforme [38], o tratamento químico cria uma célula eletrolítica corrosiva. Além disso, é um tipo de aterramento que não consegue manter suas características constantes com o

tempo, sendo sujeito a fatores como lixiviação e variações hidro-climáticas. A [Figura 2.6](#) apresenta um esboço de como é realizado o tratamento químico do solo.

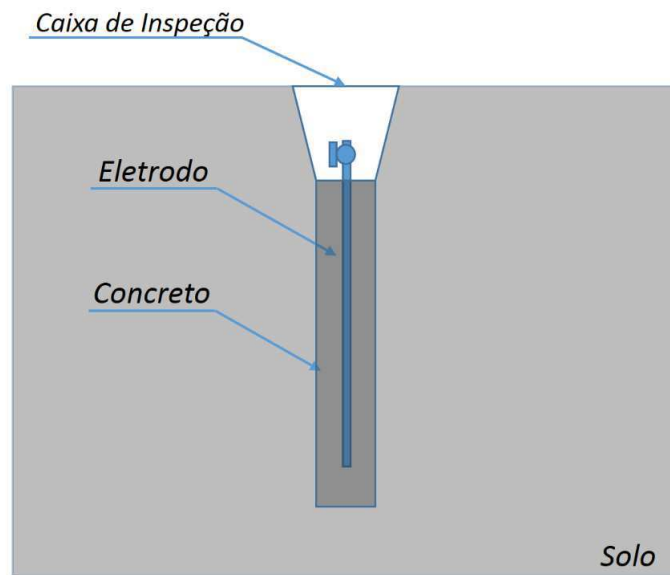
**Figura 2.6** – Esboço de aterramento com tratamento químico.



Fonte: Produzida pelo autor.

### Concretado

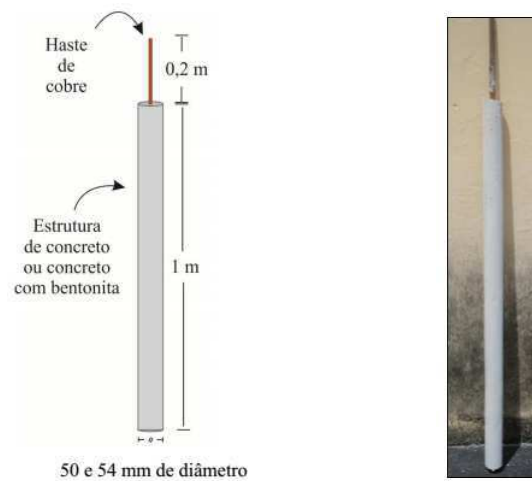
Os aterramentos concretados são constituídos basicamente de um eletrodo metálico envolvido, em seu redor, por uma camada de concreto, conforme ilustrado na [Figura 2.7](#). [Rowland](#) [39] indica que esse tipo de aterramento é recomendado para solos com resistividade acima de  $100 \Omega.m$ , não sendo a melhor opção para solo com resistividades menores que  $50 \Omega.m$ , uma vez que, nesses casos, a resistência ( $R_b$ ) da haste de aterramento concretada é maior que a de uma haste nua convencional. A literatura aponta que aterramentos concretados apresentam excelente desempenho em relação ao aterramento convencional, em solos com resistividade acima de  $100 \Omega.m$  e, principalmente, em solos com alta resistividade [17, 23, 26, 37, 40, 41]. Na [Figura 2.8](#), é apresentado um exemplo de haste concretada desenvolvida por [Rodrigues](#) [42]. Tal haste concretada consiste em um eletrodo de liga de cobre de 1,2 m, envolvido por um invólucro de concreto de 1 m de comprimento e 50 mm ou 54 mm de diâmetro.

**Figura 2.7** – Esquema de aterramento de haste vertical concretada.

Fonte: Produzida pelo autor.

**Figura 2.8** – Modelo de haste concretada desenvolvida por Rodrigues [42].

(a) Dimensões da Haste.      (b) Haste fabricada.



Fonte: Reproduzida de Rodrigues [42].

Conforme foi mencionado, as haste de aterramento concretadas apresentam características de desempenho melhores que as hastes nuas de aterramento, também chamadas de hastes convencionais. Entre essas características aprimoradas, estão:

- Menor variação da resistividade ao longo de variações climáticas durante o ano quando em comparação com aterramento convencional, [16] [43].

- Resistência equivalente ao aterramento convencional para solos com média resistividade, entre 50 e 100  $\Omega$ .m. Em casos de solos de alta resistividade (maior que 100  $\Omega$ .m), apresenta resistência de aterramento consideravelmente menor que o convencional [23, 26, 39].
- O concreto protege o eletrodo metálico contra corrosões o que aumenta a vida útil do aterramento, além de torná-lo uma opção versátil para casos de solos com estrutura química agressiva [38].
- Em geral, apresenta-se como melhor alternativa que métodos de tratamento químico, os quais têm sua resistência altamente variável com o tempo, além de estarem mais sujeitos a processos externos de dispersão no solo e corrosão [38, 44].

Outro tipo de aterramento concretado é praticado utilizando-se os fundamentos e colunas de concreto, com armação metálica, de construções ou prédios [39]. Embora esse tipo de aterramento apresente excelentes características em termos do valor da resistência de aterramento, [Harding e Harris \[45\]](#) aconselham não utilizar ligas de cobre em qualquer parte, uma vez que a presença do cobre nas proximidades da construção pode levar à corrosão galvânica do aço que compõe as vigas e estruturas do fundamento. Essa corrosão pode causar os seguintes efeitos danosos à estrutura:

- Redução da espessura das barras de aço;
- Perda de aderência entre o aço e o concreto;
- Aparição de fissuras nos concreto;
- Alteração da composição química do cimento.

Assim, em aterramentos concretados que utilizam a estrutura de prédios, deve-se sempre utilizar condutores e barras de aço ao invés de cobre, bem como evitar corrosão química do aço, utilizando uma mistura otimizada de cimento, cobrindo amplamente todas as armações de aço e evitando aditivos corrosivos. Embora os aterramentos estruturais sejam um tipo de aterramento concretado, o presente trabalho propõe-se a trabalhar apenas com hastes concretadas cilíndricas.

### 2.1.3.2 Topologia

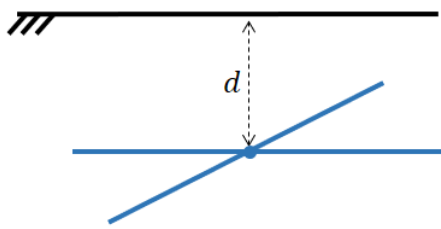
Quanto à sua topologia, diversos são os tipos de sistemas de aterramento existentes. No entanto, as variações estão basicamente na forma geométrica em que os condutores estão dispostos, interconectados entre si (abaixo do solo). Assim, quanto ao formato geométrico, conforme a [Figura 2.9](#), pode-se citar as topologias [27]:



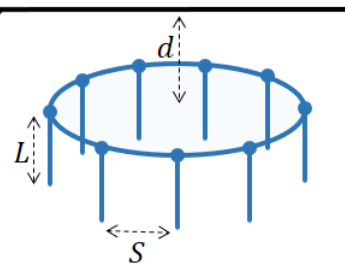
- estrela de quatro pontos, colocada num plano horizontal de profundidade  $d$ ;
- $n$  hastes verticais, dispostas em círculos;
- $n$  hastes verticais, dispostas uniformemente em uma área;
- $n$  hastes verticais, dispostas em linha reta;
- malha constituída por reticulado formado com eletrodos horizontais cobrindo uma área;
- conjunto de três hastes verticais interligadas, dispostas no vértice de um triângulo equilátero.

**Figura 2.9** – Exemplos de topologias de sistemas de aterramento.

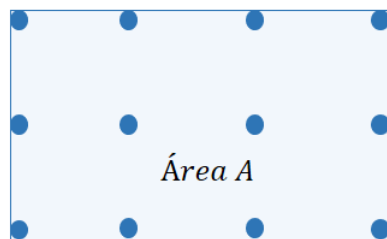
(a) Estrela de quatro pontas.



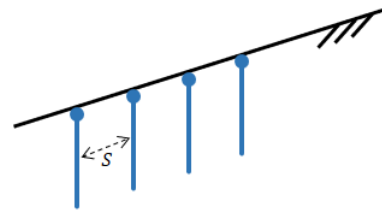
(b) Hastes em círculo.



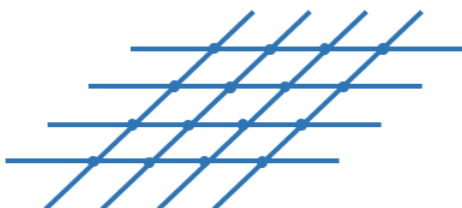
(c) Hastes dispostas em área.



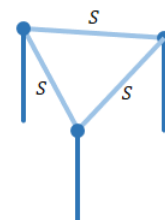
(d) Hastes verticais em linha.



(e) Malha reticulada.



(f) Hastes em triângulo.



Fonte: Adaptada de Visacro [27].

## 2.2 Modelagem Matemática

Diversas modelagens matemáticas foram propostas na literatura para analisar e simular sistemas de aterramento. No entanto, em sua maioria, podem ser classificados como [46]:

- Modelo de teoria de circuitos [47–50];
- Modelo de linha de transmissão [51–57];
- Modelo de teoria de campos eletromagnéticos [58–64];
- Modelo híbrido: uma composição de teorias de circuito e eletromagnética [65–68].

O presente trabalho utiliza um modelo de teoria de campos eletromagnéticos. Uma vez que o fenômeno real tem natureza eletromagnética, modelá-lo através de um modelo eletromagnético é uma alternativa que utiliza menos premissas simplificadoras que modelos de circuito e de linhas de transmissão [69].

## 2.3 Métodos Numéricos para Análise de Sistemas de Aterramento

Para que um problema de engenharia ou físico seja resolvido, este precisa ser modelado matematicamente e posteriormente resolvido por meio de métodos analíticos ou aproximados (numéricos). A resolução analítica é, sempre, a mais desejada, uma vez que fornece uma solução exata. Contudo, diversos problemas práticos não possuem solução exata acessível, sendo mais viável empregar esforços em uma solução aproximada, que atenda à aplicação desejada.

Os métodos numéricos utilizados em análise de sistemas de aterramento são variados. No caso de aterramentos, o método numérico irá resolver as equações de circuito ou equações eletromagnéticas provenientes do tipo de modelo que foi escolhido para representar o aterramento (os quais são apresentados na [seção 2.2](#)).

De uma forma geral, os métodos numéricos podem ser divididos em diferenciais e integrais; com solução no domínio do tempo ou no domínio da frequência.

Os métodos numéricos são ferramentas para solucionar uma equação governante do problema. Assim, a equação governante é a formulação física do problema e o método numérico a ferramenta para obtenção da solução aproximada.

### 2.3.1 Método das Diferenças Finitas (FDTD)

O método *finite-difference time domain* (FDTD), traduzido como método das diferenças no domínio do tempo, constitui um método em que o domínio de interesse

é discretizado através de uma malha de nós, ou seja um conjunto de pontos espaçados padronizadamente. A equação diferencial governante é transformada em uma equação de diferenças, de forma que os valores da função em um certo ponto é calculado através de uma média dos valores dos pontos imediatamente vizinhos a este ponto [70]. A equação de diferenças é inicialmente solucionada levando-se em conta as condições de contorno e premissas do problema [70].

Para que o FDTD possa ser utilizado em análises de surto e não ocorram problemas de instabilidades numéricas, faz-se necessário que o incremento espacial (distância entre o pontos) seja pequeno em relação a menor dimensão do objeto analisado [70]. O FDTD possui como vantagem:

- Implementação é simples, porém específica para cada equação diferencial;

Desvantagens:

- Solução limitada a um certo número de pontos;
- Em muitos casos são obtidos sistemas matriciais não simétricos ou não esparsos, o que torna a solução dos mesmos ineficiente do ponto de vista computacional;
- Difícil de aplicar em problemas com geometrias irregulares;
- Na tentativa de se formular o problema para geometrias irregulares, surgem condições de contorno não usuais (artificiais).

### 2.3.2 Método dos Elementos de Contorno (MEC)

O MEC é um método de formulação integral derivado do método dos resíduos ponderados. Nesse método, a equação diferencial governante do problema é colocada em uma forma integral (de domínio) e, após isso, é transformada em uma integral de contorno através da segunda identidade de Green. Assim, por exemplo, um problema bidimensional é transformado em um problema de cálculo de integral de linha do contorno, portanto, um problema unidimensional. Nesse método, o contorno a ser integrado é discretizado. Os pontos internos são calculados em função dos valores obtidos nos pontos do contorno, advindos da discretização. Possui como vantagens:

- a precisão dos resultados;
- envolve somente a discretização do contorno, o que diminui o custo computacional;
- diminuição da ordem do sistema de equações final;
- economia computacional;

- os valores dos pontos internos ao contorno são calculados em função das variáveis externas;
- representa com fidelidade problemas de contorno infinito ou semi-infinito, eliminando o efeito de bordas.

Possui as seguintes desvantagens:

- matriz do sistema final é cheia e não simétrica;
- exige o cálculo de integrais singulares;
- comercialmente menos utilizados;
- problemas de representação de não linearidades nas equações.

### 2.3.3 Método dos Elementos Finitos (MEF)

O MEF é um método numérico para resolução de equações diferenciais parciais. Foi inicialmente desenvolvido por engenheiros de Mecânica Estrutural, tendo sua formulação matemática concebida em 1943 por Courant [71]. Após isso, só em meados de 1968 que o método passou a ser utilizado em problemas eletromagnéticos. Desde então, sucessivos aprimoramentos e outros métodos derivados surgiram, visando tornar sua aplicação mais ampla, transpondo restrições ou dificuldades que o método inicial apresentava. O MEF possui as seguintes vantagens:

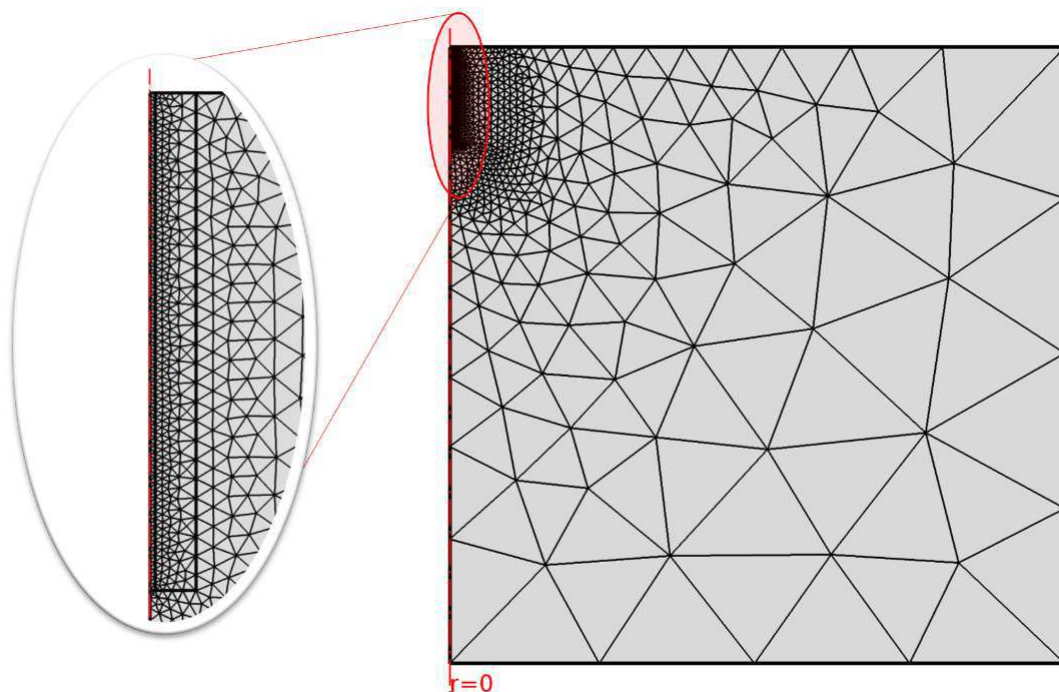
- Devido às funções interpoladoras a solução pode ser conhecida para qualquer ponto do domínio;
- A equação é resolvida na forma integral, ou seja, a equação diferencial é satisfeita segundo um critério de minimização de resíduos. Isso "relaxa" o problema e confere mais flexibilidade e generalidade ao método para resolver equações diferenciais;
- Os sistemas matriciais obtidos são, em geral, simétricos e esparsos o que torna eficiente a sua solução;
- Implementação é complexa, porém genérica;
- Não há problemas de se aplicar o MEF em domínios irregulares.

Essas vantagens explicam os motivos de diversos *softwares* de simulação disponíveis no mercado utilizarem esse método. A sua implementação genérica é uma dos pontos principais da sua popularidade. Conforme Jin [72], o método baseia-se nas quatro etapas seguintes:

- **Discretização do domínio em um número finito de sub-regiões:**

A discretização é a etapa base do MEF e constitui a divisão de um domínio contínuo em subdomínios discretos, conforme a [Figura 2.10](#). Esses subdomínios são os chamados "elementos finitos", e que podem ter diferentes formas geométricas. Para problemas em 2D: triângulos, retângulos, hexágonos, etc. No caso de problemas com geometrias em 3D: tetraedros, prismas retangulares, etc. De uma forma geral, os elementos finitos preferidos e utilizados em vários *softwares* são os triângulos e tetraedros. Segundo [72], essa constitui a principal etapa do processo, uma vez que afeta diretamente na precisão da solução bem como pode afetar diretamente o esforço computacional requerido nas etapas posteriores.

**Figura 2.10** – Ilustração do processo de discretização de uma haste de aterramento envolvida por concreto fincada em um solo homogêneo. Representação com simetria radial (axissimétrica).



Fonte: Produzida pelo autor.

Os elementos finitos podem ter diferentes tamanhos. No entanto, é conveniente que nas regiões de maior interesse do problema e em geometrias complexas haja uma maior densidade de elementos. Isso evita que ocorram erros ou discrepâncias no resultado final. Uma falta de atenção por parte do engenheiro quanto a esse ponto pode levá-lo a obter resultados na simulação que não são corretos. Assim, o problema não é método, mas sim desinformação do especialista que conduz a aplicação deste. Para contornar e evitar erros dessa natureza, alguns *softwares* que utilizam o MEF possuem um sistema de geração automatizada da malha de elementos finitos. No

entanto, a depender do problema e do modelo em questão, ainda assim, o usuário necessitará modificar ou aumentar manualmente o número de elementos em uma determinada região de interesse do problema.

- **Seleção das funções de interpolação:**

Como mencionado na seção anterior, o MEF transforma um problema contínuo, em que existem infinitos pontos no domínio a serem resolvidos, em um problema discreto, em que alguns pontos do domínio são resolvidos por aproximação. Caso contrário, jamais seria possível realizar os cálculos através de computadores. No entanto, a função de interpolação escolhida para o método permite calcular de forma aproximada a solução em qualquer ponto dentro de qualquer elemento finito. Obviamente, o usuário não poderá querer saber a solução aproximada em todos os pontos, pois isso incorreria no mesmo problema citado anteriormente. O que é possível é que o usuário informe uma quantidade finita de quaisquer pontos no domínio e, assim, o MEF retornará os valores aproximados. Dessa forma a função de interpolação de cada elemento confere flexibilidade ao método.

As funções de interpolação a serem escolhidas em geral são polinomiais, conforme [73]. Podem ser de primeiro grau, segundo grau ou de graus maiores. No entanto, embora as funções de graus maiores forneçam resultados mais precisos, aumentam a complexidade dos cálculos. Assim, as funções de primeiro e segundo grau são mais amplamente utilizadas e oferecem um custo benefício razoável, principalmente se nas regiões mais complexas (ou de maior interesse) do modelo houver uma maior quantidade de elementos. Isso aumenta a precisão dos resultados em tais regiões.

- **Formulação do sistema de equações:**

A formulação do sistema de equações constitui a estratégia que será adotada para a resolução da Equação Diferencial Parcial inerente ao problema (propagação térmica, averiguação de distribuição de campo elétrico e/ou magnético, etc), considerando um domínio discreto.

Existem diferentes formulações, no entanto, as mais utilizadas são:

- Formulação de *Rayleigh-Ritz*: é classificado como método variacional direto, uma vez que permite a solução do problema variacional sem recorrer à equação diferencial associada [74].
- Formulação de *Galerkin*: Classificado como um método variacional indireto, também chamado de método de resíduos ponderados.

- **Resolução do sistema de equações obtido:**

Essa etapa consiste na resolução do sistema de equações, (em geral descritas na forma matricial) obtidas pela formulação escolhida na seção anterior. Para resolução desse

sistema, pode-se utilizar diversos métodos, os quais são classificados em métodos diretos ou métodos iterativos [75].

Conforme Coelho e Pontes [73], os métodos diretos utilizam fatoração LU de maneira otimizada para trabalhar com matrizes esparsas através de técnicas de reordenação que buscam permutar as colunas da matriz de coeficientes de tal maneira a minimizar o número de elementos não nulos nas matrizes diagonal superior L e inferior U. Em problemas tridimensionais este método possui um custo computacional superior aos métodos iterativos.

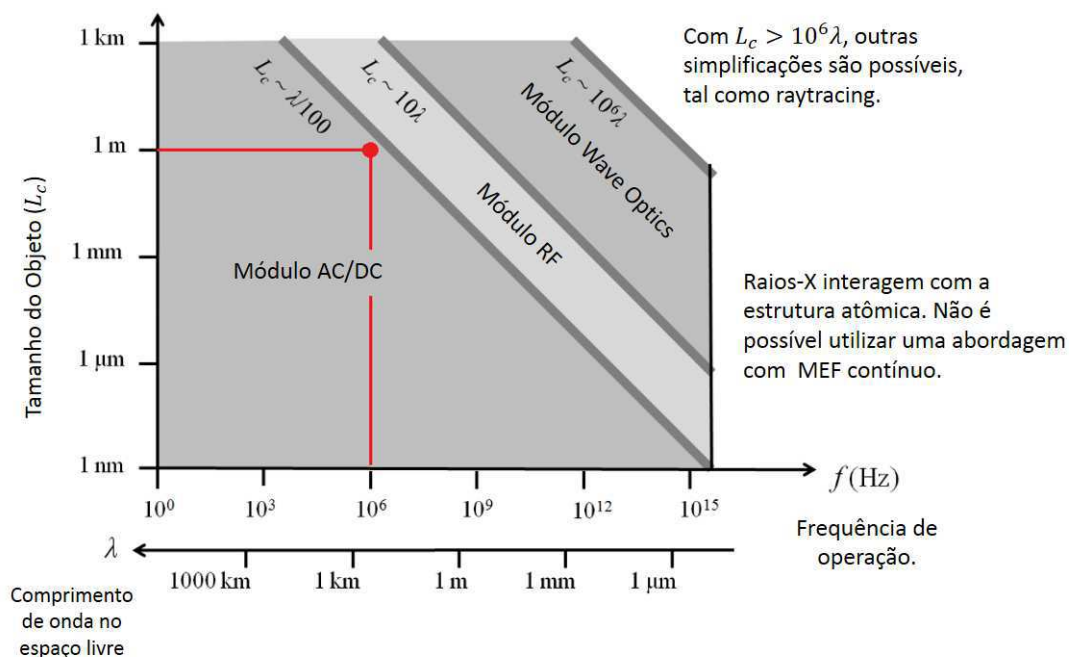
Os métodos iterativos utilizam algoritmos baseados no método do gradiente conjugado com a possibilidade da utilização de preconditionadores como o método *successive over-relaxation* (SOR) e o método de Jacobi como meio de aceleração da convergência da solução [73].

### 2.3.4 Descrição da Ferramenta Computacional - *Comsol*

Conforme já foi exposto, neste trabalho serão investigadas hastes de aterramento concretadas. Utilizou-se o *software Comsol*<sup>®</sup>, o qual faz uso do MEF como método de solução para problemas eletromagnéticos. Esse programa computacional permite ao usuário delimitar o problema eletromagnético (eletrostático, radiofrequência, variante no tempo, etc), bem como desenhar as geometrias inerentes ao sistema a ser estudado e definir as constantes físicas dos materiais envolvidos. Utilizou-se o sistema de discretização automático do *software* e um método de resolução do sistema de equações (*solver*) disponível no mesmo.

O *Comsol* apresenta módulos distintos para se trabalhar com problemas eletromagnéticos distintos. Dessa forma, cada módulo tem seu raio de ação ou validade. Para escolher entre os módulos AC/DC, RF ou Wave Optics, uma das premissas que deve ser avaliada para definir qual deles é mais adequado para solucionar um determinado problema é o tamanho elétrico (*electrical size*) da estrutura que se está simulando [76]. Uma forma simples de se verificar isso é comparando a maior dimensão do objeto ( $L_c$ ) com o comprimento de onda ( $\lambda = c/f$ ) da forma de onda de excitação (tensão, corrente, campo). Assim, se  $L_c < \lambda/100$  então depreende-se que se está trabalhando no regime quasi-estático e, assim, o módulo AC/DC seria o mais adequado. Para situações em que  $\lambda/100 < L_c < 10\lambda$ , aproximadamente, o módulo mais adequado é o módulo RF. Já em problemas onde  $10\lambda < L_c < 10^6\lambda$  o mais indicado é utilizar o módulo Wave Optics. A Figura 2.11 apresenta de forma gráfica as relações anteriormente citadas. Vale salientar que, nesse processo de escolha, o mais importante não é a frequência em si, mas, sim, a comparação entre o maior comprimento do objeto e o comprimento de onda, ou o quociente entre eles, que é, justamente o tamanho elétrico (*electrical size*)  $L_{elctr} = L_c/\lambda$ .

**Figura 2.11** – Representação do módulo do *Comsol* mais adequado a depender da maior dimensão do objeto e do comprimento de onda.



Fonte: Reproduzida de Frei [76].

Observando-se a [Figura 2.11](#), pode-se notar que, para casos de hastes de aterramento com comprimentos da ordem de 1 m sendo submetidas a impulsos de corrente com componentes de frequências principais da ordem de 1 MHz (em seu espectro), a utilização do módulo AC/DC é viável. Logo, pode-se fazer o uso do módulo AC/DC para as situações previstas no atual trabalho de dissertação.

## 2.4 Considerações

Neste capítulo foram tratados os conceitos fundamentais para o entendimento do tema do trabalho. Apresentou-se a função e a classificação dos aterramentos. Apresentou-se o conceito de ionização e desionização do solo. Foram definidas as grandezas de interesse ao estudo de aterramentos. Classificou-se as topologias e tipos de aterramentos, apresentando-se as características e aplicações de aterramentos concretados. Apresentou-se os diferentes tipos de modelagem matemática de aterramentos utilizados na literatura, bem como os diferentes tipos de métodos numéricos para resolução de modelos eletromagnéticos. Além disso, foi descrita a ferramenta computacional utilizada no trabalho.

No próximo capítulo, serão apresentados os trabalhos da revisão bibliográfica que compõem o estado da arte. São descritos trabalhos principalmente sobre aterramentos concretados e modelos de ionização do solo. Ao término, são tecidas considerações acerca



do estado da arte em relação às contribuições do presente trabalho.

---

## Estado da Arte

Neste capítulo, apresenta-se a pesquisa bibliográfica realizada, apontando-se trabalhos da literatura concernentes ao tema do presente estudo. Por motivos de organização, a revisão bibliográfica é dividida em seções. Na [seção 3.1](#), são apresentados trabalhos que envolvem aterramentos concretados, materiais para redução da resistência de aterramento e resposta impulsiva de aterramentos. Na [seção 3.2](#), são apresentados estudos que envolvem simulação de aterramentos, sob o enfoque da modelagem eletromagnética utilizada para representar o sistema. Na [seção 3.3](#), são apresentados trabalhos de modelos do efeito da ionização do solo, quando o aterramento é submetido à correntes impulsivas. Ao término de cada seção, apresentam-se considerações gerais sobre o tema de que trata a seção e, ao fim do capítulo, na [seção 3.4](#), indicam-se as contribuições do presente trabalho para evolução do estado da arte.

### 3.1 Aterramentos Concretados

O emprego de concreto em hastes de aterramento é uma técnica que foi concebida e estudada, inicialmente, por [Ufer \[15\]](#) em meados de 1964. Por este motivo, este tipo de aterramento é, também, conhecido como aterramento tipo Ufer (ou, em inglês, *concrete-encased grounding*). Posteriormente, em 1970, [Fagan e Lee \[16\]](#) validaram o trabalho de Ufer, e, nos resultados de seu trabalho, averiguaram que eletrodos de aterramentos reforçados com concreto apresentaram eficiência equivalente à de eletrodos convencionais, em solos de baixa e média resistividade; e, em solos de alta resistividade, apresentaram resultados superiores. Além disso, [Fagan e Lee \[16\]](#) indicaram que, em casos de construções, prédios ou estruturas que possuam diversas colunas com eletrodos concretados em sua base, a eficiência do aterramento é, para solos com diferentes resistividades, melhor que o sistema de aterramento convencional. Pontuou-se, também, que, caso a estrutura de aço das colunas da construção fossem interconectadas, obtém-se um excelente sistema de aterramento estático e para descargas atmosféricas. [Fagan e Lee \[16\]](#) realizaram ensaios

conjuntamente com a *Westinghouse Electric Company*, utilizando impulsos de corrente; no entanto, nesses experimentos, tinha-se como objetivo analisar a integridade física do aterramento e não a resposta do aterramento quanto a solicitações impulsivas.

Em 1970, no trabalho de Wiener [43], também é apresentado um estudo comparativo entre eletrodos envolvidos por concreto e eletrodos convencionais. O estudo evidencia que o desempenho das hastes concretadas, no que diz respeito à corrosão, é melhor em relação às hastes convencionais.

Em 1970, Harding e Harris [45] apontaram objeções quanto à utilização do aterramento estrutural, o qual consiste na utilização da estrutura de aço e concreto da fundação de construções como sistema de aterramento. Tais objeções são embasadas pelo perigo de corrosão das barras de aço estrutural devido à passagem de correntes contínuas ou devido à presença de pares eletrolíticos (tais como aço e cobre). A corrosão do aço promove diminuição da seção das barras, perda de contato entre o aço e o concreto, fissuras no concreto, alteração química do cimento, acarretando, assim, o enfraquecimento mecânico da estrutura ou prédio, podendo ocasionar perigo de desmoronamento. Os autores apontam um caso em que a fundação de uma torre de 115 kV chegou a explodir quando uma corrente de falta de 20 kA percorreu o aterramento, devido à ocorrência de um *flash over* na isolação. Nesse caso, a própria fundação da torre estava sendo utilizada como aterramento. Os autores sugerem que nunca seja utilizado hastes ou cabos de cobre para aterramento nas proximidades uma fundação, uma vez que isso cria um par galvânico entre o aço da fundação e o cobre do aterramento, gerando uma corrente contínua entre ambos e, conseqüentemente, corrosão eletrolítica do aço. Além disso, aponta-se que a utilização de revestimento de zinco ou níquel para proteger o aço só é eficiente contra a corrosão química, mas tem pouco valor contra a corrosão eletrolítica. Por outro lado, as medidas para redução da corrosão eletrolítica são opostas à eficiência do aterramento, uma vez que implicam na isolação de partes metálicas do mesmo. Por fim, uma boa solução para os problemas de corrosão e estruturais mencionados é a utilização um sistema de aterramento independente da estrutura do prédio; substituição do cobre por aço no aterramento e evitar aditivos corrosivos no concreto. Embora os autores tenham feito objeções à técnica de aterramento estrutural, a utilização de hastes concretadas de forma independente não foi desabonada, desde que seguidas as precauções apresentadas.

Em 1975, Preminger [17] realiza uma avaliação da viabilidade da substituição de aterramentos via tubulação subterrânea de água por aterramentos envolvidos por concreto. Seu estudo comparativo é feito em relação a dois tipos de aterramento: haste concretada disposta horizontalmente no solo (sistema americano) e anel concretado, também disposto horizontalmente no solo (sistema alemão). Segundo os cálculos matemáticos do autor, a técnica de concretagem de hastes apresenta um limite de redução de resistência de aterramento. Por exemplo, dada uma razão de  $\rho_{concreto}/\rho_{solo} = 0,1$  entre a resistividade

do concreto e do solo, considerando-se uma haste concretada superdimensionada, com eletrodo metálico de 2,5 cm de diâmetro e 28 m de altura, envolvida por um invólucro de concreto de 40 cm de diâmetro, a redução da resistência de aterramento (em relação a mesma haste sem concreto) é de 29%. Já para o caso em que  $\rho_{concreto}/\rho_{solo} = 0,5$  a redução na resistência de aterramento, utilizando o concreto, é de 16%.

Em 1995, Rowland [39] apresentou em seu trabalho metodologias práticas para a utilização da estrutura da fundação de construções como sistema de aterramento eficiente, de baixa resistência, capaz de conduzir correntes de falta e de surto. No trabalho, é mostrado que o concreto é um material com característica alcalina e com poder de atração e retenção de umidade, tornando-o um composto com uma resistividade de aproximadamente  $30 \Omega \cdot m$ , o qual, unido a vergalhões e estruturas de aço, pode constituir um excelente sistema de aterramento. Para situações em que o solo apresenta resistividade de  $50 \Omega \cdot m$  ou menor, eletrodos envolvidos por concreto apresentam resistência maior que um eletrodo nu. No entanto, nas situações em que o solo apresenta resistividade maior que  $100 \Omega \cdot m$ , os eletrodos envolvidos por concreto apresentam resistência menor. Prédios que apresentam aproximadamente vinte colunas de fundação, com suas estrutura de aço interconectadas, podem fornecer uma resistência de aterramento menor que  $5 \Omega$ . O autor também recomenda que se evite a utilização de cobre nesse tipo de aterramento, devido a sua vulnerabilidade a danos físicos durante o tempo de vida da estrutura. Além disso, aponta que a utilização de cabos de aço trançado é economicamente mais viável que a utilização de cobre.

Em 1997, Durhan e Durhan [41] apresentaram em seu trabalho a importância do correto dimensionamento e escolha de aterramento para instalações localmente isoladas. O trabalho apresenta dez casos de estudo, entre eles um no qual dimensiona-se o aterramento de uma instalação cujo solo apresenta característica rochosa, possuindo uma resistividade de aproximadamente  $500 \Omega \cdot m$ . Nesse caso, os autores apontam que a utilização de três hastes nuas reduz a resistência de aterramento para no mínimo  $76 \Omega$ , o que está acima dos  $25 \Omega$  permitido para a situação, segundo a norma local da *National Electrical Code*. Segundo os cálculos dos autores, utilizando-se apenas uma única haste concretada, a resistência do aterramento seria de  $10,6 \Omega$  e, no caso de três hastes concretadas, a resistência seria de  $4,6 \Omega$ . Para melhor desempenho, aconselha-se que as hastes estejam separadas por uma distância de 2,2 vezes o comprimento da haste. Também é apontado que o concreto é alternativa melhor que os aditivos químicos para redução de resistência.

Em 1997, Switzer e Stidham [44] apresentaram um estudo de avaliação da durabilidade e da performance, quanto à resistência do aterramento, de diversos tipos de eletrodos durante cinco anos; ao todo cerca de dezenove tipos de eletrodos em cinco lugares diferentes. Os três eletrodos de aterramento que apresentaram melhor performance, quanto a manutenção das características ao longo do tempo e quanto ao valor da resistência de aterramento, são eletrodos proprietários (patenteados). Entre esses, um é constituído por

uma haste simples envolta por um composto de baixa resistividade (aproximadamente  $0,12 \Omega \cdot m$ ) que após determinado tempo de cura assume uma forma rígida similar à do concreto e, dessa forma, não desprende compostos químicos no solo. Os outros dois são aterramentos químicos, os quais, embora tenham apresentado desempenho razoável, foram inferiores ao primeiro.

Em 1997, Yamamoto et al. [77] realizaram um estudo avaliando a impedância de surto em postes de distribuição com estrutura de concreto reforçado. O estudo foi realizado utilizando modelos de escala reduzida. Uma das grandes fragilidades do trabalho é o fato de os impulsos aplicados terem sido de baixa magnitude, da ordem de 20 mA e 3 Volts, o que difere do fenômeno real em que as correntes são da ordem de kiloampère. As baixas correntes utilizadas não são capazes de promover ionização do solo, fenômeno que faz com que a resistividade do solo decaia exponencialmente. Assim, a utilização de formas de onda de baixa magnitude, inevitavelmente, proporciona a medição de resistências de aterramento elevadas em relação às medições com correntes impulsivas da ordem de kiloampère. Dessa forma, no estudo apresentado, os valores medidos de impedância impulsiva foram da ordem de  $242 \Omega$ .

Em 1998, Grcev [78] apresentou um trabalho apontando diretrizes básicas para projeto de aterramentos de linhas transmissão. O trabalho foca o comportamento do sistema de aterramento quando é submetido a correntes impulsivas, apresentando as melhores práticas para obtenção de baixas impedâncias transitórias e, conseqüentemente, baixas tensões transitórias. O autor aponta que os dois fenômenos que mais incidem na reposta transitória de aterramentos são a ionização do solo e o efeito da propagação, sendo este último dependente das dimensões do aterramento. Além disso, o autor afirma que a forma mais correta de avaliar se o efeito da propagação terá uma contribuição que se deva levar em conta é avaliar o comprimento elétrico do aterramento e não o comprimento físico; ou seja, identificar se o comprimento físico é comparável ao comprimento de onda da frequência mais alta da forma de onda de interesse no estudo transitório. O autor acrescenta que o comprimento de onda da onda eletromagnética no solo depende da resistividade do solo. O autor propõe que o comprimento do eletrodo seja o menor possível em relação ao comprimento crítico ( $l_c$ ), o qual é dado pela expressão  $l_c = 0,6 \cdot (\rho_{solo}/F_c)^{0,43}$ ; em que  $F_c$  é a frequência crítica, assumindo valores de 0,1 MHz para descarga atmosférica principal e 1 MHz para a descarga de retorno. Assim, aconselha-se que os eletrodos de aterramento tenham o menor comprimento possível para que apresentem menores valores de impedância transitória, bem como exista múltiplos caminhos (ou ramos de escoamentos de corrente) do ponto da descarga aos eletrodos de aterramento.

Em 1999, Meng et al. [79] apresentaram um método para redução da resistência de aterramento em regiões com solos de alta resistividade. O procedimento é similar ao frequentemente utilizado na construção da fundação de torres de linhas de transmissão

em solos rochosos; que consiste na utilização de explosivos em buracos e preenchendo-os com concreto. Tal método consiste na utilização de explosivos, os quais são inseridos no interior do solo através de buracos cavados, para criação intencional de rachadura ou fissuras internas nos solo. Após isso, segue-se a aplicação sob pressão de material de baixa resistividade (os autores sugerem menor que  $5 \Omega \cdot m$ ), que passa a preencher as fissuras criadas. Assim, são gerados mais caminhos alternativos para a corrente, ocasionando uma redução da resistência do aterramento. O método é aconselhável para solos com resistividade acima de  $100 \Omega \cdot m$ . Foram apresentados resultados da aplicação da técnica em três diferentes subestações. Os resultados foram da redução da resistência de  $3,4 \Omega$  para  $0,43 \Omega$ ; de  $2,0 \Omega$  para  $0,35 \Omega$  e de  $0,6 \Omega$  para  $0,26 \Omega$ , respectivamente para cada uma das três subestações nas quais o método foi aplicado. Os buracos cavados para inserção de explosivos e, posteriormente, do material de baixa resistividade apresentaram profundidades de 40 e 100 m. Embora a técnica apresente excelentes resultados, os próprios autores citam que sua implementação é economicamente custosa.

Em 2000, Hallmark [38] apresentou as vantagens da utilização de cimento condutivo em sistemas de aterramento, quer em hastes verticais, quer em eletrodos horizontais. Tal cimento condutivo é composto por cimento Portland e carbono. No artigo, é afirmado que a resistividade do concreto comumente utilizado em aplicações de engenharia civil é de cerca de  $30 \Omega \cdot m$ , enquanto que a do cimento condutivo é de aproximadamente  $0,2 \Omega \cdot m$ , o que é muito melhor que a resistividade do solo que envolve hastes de aterramento nuas, comumente utilizadas. Além disso, o cimento condutivo é apresentado como um material que protege o eletrodo contra corrosão, suporta descargas atmosféricas, não varia sua resistividade com a umidade do solo e não desprende elementos químicos no solo. Outra questão levantada pelos autores é que o cimento que contém bentonita é passível de quebra ou fissões, expondo o eletrodo à corrosão. O trabalho apresenta sugestões práticas quantos aos aspectos construtivos para a concepção e instalação de aterramento vertical e horizontal, utilizando o cimento condutivo.

Em 2000, Kurtovic e Vujevic [80] realizaram uma análise de condutores de aterramento envolvidos por materiais de baixa resistividades. Os autores avaliaram o aumento do raio equivalente do condutor, devido à utilização de materiais que o envolve, tanto por meio de expressões matemáticas aproximadas quanto por meio de simulação computacional 2D, utilizando o método dos elementos de contorno. Os autores concluíram que as expressões matemáticas aproximadas utilizadas são suficientemente precisas. No entanto, os autores afirmaram que a adição de material envolvente nos condutores de uma malha de aterramento ocasiona uma redução pouco significativa da resistência de aterramento, o que contraria diversos trabalhos da literatura.

Em 2001, Radazovic e Kostic [9] apresentaram um estudo experimental avaliando a variação das propriedades de bentonita utilizada em aterramentos, quando esses são

submetidos a uma corrente de falta. O estudo foi desenvolvido por meio de um experimento utilizando um sistema de alta tensão de 35 kV, realizando-se um curto circuito fase-terra intencional. O objetivo do estudo foi identificar se, mesmo após ser submetida a uma corrente de falta, a bentonita permaneceria com sua propriedade de baixa resistividade. Segundo a conclusão dos autores, após a aplicação da corrente no aterramento, verificou-se que a resistência de aterramento sofreu apenas uma alteração de curta duração, devido ao estresse térmico durante a aplicação da corrente. Os autores concluíram, assim, que a bentonita conserva propriedades, mesmo após uma corrente de falta.

Em 2004, os trabalhos de [Chen \[81\]](#) e [Chen et al. \[82\]](#) apresentaram estudos para hastes concretadas utilizando uma mistura com escória produzida por fábricas de aço. São estudados diferentes concentrações de água, cimento e da escória. Nos resultados, apresenta-se uma redução de 48% da resistência de aterramento em relação às hastes sem o aditivo. Além disso, aponta-se a viabilidade econômica da utilização do aditivo.

Em 2005, [Birchal, Vale e Visacro \[83\]](#) desenvolveram um *software* em linguagem C que aplica computação paralela para resolver cálculos de resistência de sistemas de aterramento concretados, utilizando o método dos elementos de contorno. Uma vez que simulações de sistemas de aterramento de maior escala requerem um considerável esforço computacional (resultando em elevado tempo de simulação), os autores utilizaram o conceito de computação paralela de forma a reduzir o tempo de simulação nesse tipo de aplicação. Basicamente, o *software* divide o cálculo de uma matriz de coeficientes para ser efetuado por até dez processadores. Tal matriz é cheia, sendo seus elementos resultados de integrais que necessitam ser calculadas durante a aplicação do método numérico. A construção da matriz de coeficientes é o passo mais computacionalmente dispendioso, sendo este dividido para cálculos paralelos em outros processadores. Os resultados apresentados indicam que, utilizando-se dez processadores paralelos, o tempo de simulação é reduzido para menos de um sexto. Vale salientar que este trabalho apresenta mais um método de simulação computacional de aterramentos que propriamente uma análise de aterramentos concretados.

Em 2009, [Baldwin, Rifaat e Malik \[84\]](#) apresentam de forma resumida a história dos aterramentos encapsulados por concreto, bem como as objeções de [Harding e Harris \[45\]](#) e as contribuições de [Preminger \[17\]](#). Os autores pontuam de forma resumida as precauções que são sugeridas na utilização de aterramentos concretados.

No trabalho de [Bezerra e Kanashiro \[23\]](#), realizado em 2010, é apresentado um estudo comparativo entre simulações computacionais e medições em campo para aterramento convencional e aterramento concretado. O trabalho apresenta, também, o valor da resistência de aterramento convencional e concretado para solos com diferentes resistividades, bem como para diferentes quantidades de hastes em linha. Para o caso de duas hastes em linha, foram observadas reduções da resistência em 11,6 %, 29,5 % e 31 % para solos com as

respectivas resistividades: 100  $\Omega$ .m, 1000  $\Omega$ .m e 3000  $\Omega$ .m. Em todos os casos o aterramento concretado apresentou resistências inferiores em relação ao convencional. Foram realizadas, também, simulações computacionais utilizando o *software* CDEGS-MALZ, o qual utiliza o método dos momentos para realização das simulações computacionais. No entanto, todas as simulações e medições foram realizadas para frequência industrial, não sendo analisado o comportamento transitório ou impulsivo da haste concretada. Além disso, o solo foi considerado homogêneo nas simulações.

Em 2011a, Velev et al. [85] avaliaram, por meio de simulações, dois tipos de aterramento concretado: um com apenas uma camada envolvente de concreto ao redor da haste de cobre e outro com duas camadas de concreto com diferentes resistividades. Foi utilizada como excitação a aplicação de uma tensão contínua de 10 kV na cabeça da haste simulada, o que é mais conveniente para simulação de faltas. A haste com apenas uma camada envolvente de concreto apresentou uma redução de resistência de 26,7% em relação à haste convencional. Já a haste com dois tipos de concreto envolvente, apresentou uma redução de 47,5%. Os autores utilizaram o software ANSYS, o qual utiliza o MEF para resolução de problemas. A equação governante utilizada foi a equação de Laplace  $-\nabla(\sigma \cdot \nabla\phi) = 0$ , conjuntamente com as condições de contorno de potencial escalar igual a zero no contorno que representa as bordas infinitas do solo.

Em 2011b, Velev et al. [86] apresentaram fórmulas matemáticas mais precisas para cálculo da resistência de aterramento para diferentes tipos de aterramentos envolvidos por concreto. Essas fórmulas desenvolvidas são comparadas com resultados de simulações por MEF e com dados de medições de mais de um ano. Os autores concluíram que as fórmulas forneceram resultados precisos, sendo uma boa opção para situações de projeto rápido.

Em 2012, Androvitsaneas, Gonos e Stathopoulos [37] apresentaram um estudo com medições de resistência de aterramento para baixa frequência, avaliando hastes envolvidas por: concreto, bentonita e três tipos de compostos químicos. O trabalho apresentou medições de resistência de aterramento das hastes durante um período de um ano. Os resultados indicam que a haste concretada apresentou a menor variação de resistência durante as variações de precipitação pluvial no decorrer do ano.

Em 2012, Rodrigues [42] apresentou um estudo predominantemente experimental de aterramentos com hastes concretadas. Foram analisadas hastes de aterramento nuas, concretadas e concretadas com dois tipos de concentração de bentonita. O trabalho analisou tanto a resistência do aterramento quanto a resposta a impulsos de corrente. As correntes aplicadas atingiram valores de 6 kA e foram obtidas por meio de um gerador de impulso de corrente. Também foram analisadas as tensões de toque e passo. Ficou evidenciada no trabalho a dificuldade de se avaliar hastes concretadas que foram plantadas no solo, uma vez que o efeito da acomodação do solo ao redor da haste pode afetar a resposta global do aterramento.



Em 2013, no trabalho de [Lim, Gomes e Kadir \[18\]](#) são apresentados resultados de aterramentos concretados, em que o concreto é misturado com bentonita em sua preparação. A estrutura de aterramento utilizada é de uma gaiola de aço concretada. O estudo apontou que a adição de bentonita ao concreto diminuiu em 10% a resistência do aterramento. Os resultados apresentam-se verossímeis, uma vez que a bentonita tem propriedades de retenção da umidade do solo, o que diminui mais ainda a resistência do concreto.

Em 2013, [Liu e Madsen \[87\]](#) utilizaram o MEF, por meio do *software Comsol*, para realizar um desenvolvimento da resposta em frequência de um aterramento com haste simples e de um aterramento com haste concretada. No entanto, no trabalho não é explicitado a equação governante utilizada. Em posse da resposta em frequência, computada no *Comsol* de 0 a 100 MHz, os autores realizaram uma síntese de circuitos os quais apresentam resposta em frequência equivalente à calculada pelo MEF, de forma que o circuito modelo seja utilizável em simulações de sistemas elétricos (utilizando, por exemplo, o amplamente difundido *Eletromagnetic Transient Program - Alternative Transients Program*, EMTP/ATP). O solo foi modelado através de uma estratificação em três camadas, auxiliada por algoritmos genéticos. O trabalho apresentou um importante avanço no sentido de estudar aterramentos concretados sob correntes impulsivas.

Em 2013, no trabalho de [Almaguer et al. \[88\]](#), foi apresentada uma representação computacional de hastes simples e concretadas, utilizando o modelo de linha de transmissão. Os resultados são comparados entre si e com a equação analítica.

O trabalho de [Lima, Paulino e Guimarães \[24\]](#), em 2013, apresentou um estudo da impedância transitória de um dos pés da fundação de uma torre de transmissão. O arranjo consiste basicamente em uma ferragem metálica concretada ao redor. No entanto, utilizou-se como excitação um gerador de impulso que apenas conseguia fornecer correntes da ordem de miliampères. Assim, o estudo potencialmente pode fornecer dados que não são tão compatíveis com situações reais de ocorrência de faltas e surtos impulsivos com correntes de elevadas magnitudes no sistema elétrico.

Em 2014, na pesquisa de [Androvitsaneas, Gonos e Stathopulos \[26\]](#), é apresentado um estudo experimental, em campo, da impedância impulsiva de haste convencional, envolvida com bentonita e envolvida com concreto de fundação. Utilizou-se um gerador de impulso de corrente capaz de produzir correntes de 1,8 kA. Os autores verificaram tanto impulsos de polaridade positiva quanto de polaridade negativa, uma análise que poucos trabalhos apresentam. Em todas as situações a haste concretada apresentou menores valores de impedância impulsiva. Para o caso de impulsos de polaridade positiva, a impedância impulsiva da haste com concreto apresentou uma redução de resistividade de aproximadamente 70% em relação à impedância impulsiva da haste nua no solo natural. No caso da bentonita, essa redução foi de aproximadamente 55%. O trabalho apresenta uma considerável relevância, uma vez que apresenta dados experimentais de aterramentos

concretados sob correntes impulsivas.

Em 2014, Coelho e Almaguer [89] avaliaram estruturas de concreto com armações de metal submetidas a impulsos de corrente, utilizando o MEF, por meio do *Comsol*. As simulações foram realizadas no domínio do tempo e utilizando o módulo AC/DC do *Comsol*. O domínio foi discretizado utilizando uma malha extrafina adaptativa (*Extrafine Adaptive Mesh*). O estudo constitui, até o momento, um dos mais completos trabalhos que conseguem integrar o efeito da ionização do solo em estudos de aterramentos concretados submetidos a impulsos. O trabalho apresenta resultados da impedância impulsiva para simulações com e sem consideração da ionização do solo, evidenciando-se a discrepância entre essas duas situações. Para a representação da ionização do solo avaliou-se dois modelos distintos: o proposto por Liew e Darveniza [47] e o proposto por Sekioka et al. [90]. Em [91] é apresentado um trabalho similar com haste convencional.

No trabalho de Pountourelis, Peppas e Pyrioti [25], em 2015, foi apresentado um estudo de aterramentos com hastes envolvidas por substâncias de baixa resistividade. O trabalho foi realizado por meio de simulações no programa Opera-3D, o qual utiliza o MEF para resolver a equação de Laplace  $-\nabla(\sigma \cdot \nabla\phi) = 0$  conjuntamente com a equação  $J = \sigma \cdot E$ . O módulo utilizado foi o TOSCA Current Flow, que analisa problemas de campos eletrostáticos e magnetostáticos. Nas simulações, foi utilizada uma corrente contínua de 5 kA (estacionária), aplicada na cabeça das hastes. Os autores justificaram a utilização de uma corrente de 5 kA contínua devido a intenção de ser evitada a necessidade de levar em conta o efeito de ionização do solo no estudo.

Em 2015, Yunus et al. [92] avaliaram diferentes estruturas de aterramentos submetidas a impulsos de corrente, dentre elas um poste de concreto com haste interna de aço. Os autores analisaram o valor da redução percentual da impedância impulsiva ( $Z_p$ ) em relação à resistência de baixa frequência ( $R_b$ ); ou seja, avaliou-se a expressão  $100\% \cdot (R_b - Z_p) / R_b$ , para cada estrutura de aterramento. O poste de concreto foi a estrutura que apresentou maior valor percentual calculado segundo a expressão anteriormente mencionada, a saber 49,8%. A estrutura de aterramento que obteve o segundo maior valor de redução percentual de  $Z_p$  em relação a  $R_b$  foi um aterramento (convencional) em estrela, com três pontas e com uma haste em cada ponta. Para esse aterramento em estrela, a redução percentual foi de 36,4%. Dessa forma, no trabalho, ficou evidente a boa característica de um aterramento envolvido por concreto, quanto à sua resposta impulsiva.

Em 2016, Pereira et al. [19] apresentaram um estudo comparativo entre um sistema de aterramento com três hastes nuas em linha e outro com três hastes concretadas em linha, com dimensões similares. No estudo, verificou-se a resistência do aterramento, pelo método de Wenner, de ambos aterramentos em períodos chuvosos e períodos secos. As medições apontaram que, mesmo em períodos secos, o aterramento concretado apresentou resistência de aterramento mais baixa que o aterramento com hastes nuas. Enquanto o

aterramento concretado apresentou resistência de 275,7  $\Omega$ , o aterramento convencional, com hastes nuas, apresentou uma resistência de 537,0  $\Omega$ , uma diferença de quase 200%. Os autores atribuíram esse comportamento à capacidade higroscópica (retenção de umidade) do concreto, bem como ao aumento da área de contato entre aterramento e solo, devido ao invólucro de concreto.

Em 2016, Cabral et al. [20] publicaram um estudo de várias configurações de aterramento concretado, em modelo de escala reduzida. Os autores avaliaram cinco configurações de aterramento, para as quais foi avaliado a impedância impulsiva do aterramento com e sem concreto. Esses estudos foram realizados para dois tipos de solo: um de 55  $\Omega$ .m e outro de 5000  $\Omega$ .m. Observou-se que, no solo de 55  $\Omega$ .m, a utilização de concreto chegou a reduzir a impedância impulsiva do aterramento em até 180%, no caso da configuração de haste vertical e de contrapeso. Já para o solo de 5000  $\Omega$ .m, a adição de concreto chegou a reduzir a impedância impulsiva em no máximo 32%, no caso da configuração de malha quadrada com quatro alvéolos. Uma fragilidade do trabalho é o fato de ter sido utilizado impulsos de tensão de baixa magnitude, a saber 5 V. Dessa forma, os experimentos realizados não conseguem levar em conta o efeito da ionização do solo quando o aterramento é submetido à correntes de falta ou descargas atmosféricas, as quais são as situações práticas em que o aterramento é solicitado de forma mais severa. Dessa forma, embora o trabalho apresente uma ideia do comportamento do aterramento quando utiliza-se concreto, deixa a desejar na exatidão necessária para um estudo mais aprofundado.

O trabalho apresentado por Tronchoni et al. [21], em 2016, foi desenvolvido pelos mesmos autores do trabalho [20], sendo apresentado a mesma pesquisa de uma forma mais detalhada e com resultados novos. Utilizou-se o mesmo arranjo experimental, no entanto, aplicou-se uma tensão nos aterramentos de até 8 V, enquanto que em [20] a tensão foi de até 4 V. Além disso, o solo utilizado nos experimentos possuía resistividade de 280  $\Omega$ .m e 326  $\Omega$ .m, enquanto que em [20] foi de 55  $\Omega$ .m e 5000  $\Omega$ .m. Os resultados obtidos por Tronchoni et al. [21] indicaram uma redução máxima no valor de impedância impulsiva de 44,6% para a topologia de malha com concreto, e uma redução mínima de 23% para a topologia contrapeso. O trabalho também apresenta uma representação computacional dos sistemas de aterramentos concretados, sendo avaliados através do modelo de linhas de transmissão tipo  $\pi$ . Utilizou-se o *Alternative Transient Program - ATP* para realização das simulações, obtendo-se resultados razoavelmente próximos dos medidos experimentalmente. No entanto, assim como o trabalho [20], ressalta-se que as tensões aplicadas nos modelos de escala reduzida não são suficientes para ocasionar ionização do solo, fenômeno de grande importância na avaliação de impedância impulsiva de aterramentos.

Em 2016, Androvitsaneas, Gonos e Stathopoulos [22] apresentaram um estudo experimental avaliando a resistência de baixa frequência e a impedância impulsiva de haste

nua, haste concretada e haste envolvida com bentonita, tanto em períodos secos quanto em períodos chuvosos. O trabalho é fruto de uma pesquisa que levou cerca de quatro anos de observação e apresenta resultados de considerável relevância. Para a medição da resistência de baixa frequência, utilizou-se um terrômetro e, para a medição da impedância impulsiva, realizou-se experimentos de aplicação de impulso de corrente através de gerador de impulso capaz de fornecer tensões de até 11 kV, chegando a produzir correntes nas hastes de até 106 A. Aplicou-se em cada uma das diferentes hastes de aterramento impulsos com polaridade positiva e negativa, para verificação da resposta impulsiva. O solo no qual as haste foram dispostas apresenta resistividade entre 170 a 400  $\Omega$ .m na camada superior do solo, a qual apresenta profundidade de 1 m. Essa variação da resistividade é dada pela variação da precipitação e umidade do solo entre os períodos secos e chuvosos. Observou-se que, no período seco, a haste concretada apresentou impedância impulsiva 64,6% menor que a haste nua, para impulsos de polaridade positiva, e uma redução de 70,7% para impulsos de polaridade negativa. Já no período chuvoso avaliado, a redução da impedância impulsiva da haste concretada foi de 46,6%, para polaridade positiva, e 47,5% para polaridade negativa. Os autores observaram que as hastes envolvidas por concreto e por bentonita apresentam resistência de baixa frequência e impedância impulsiva consideravelmente menores que a haste nua. No entanto, entre o concreto e a bentonita, observou-se que o concreto apresentou maior constância e estabilidade no valor da resistência de aterramento durante a passagem por períodos chuvosos e secos, sendo apontado como a melhor escolha em relação a bentonita. Embora a bentonita seja o material para melhoramento de resistência de aterramento mais famoso entre todos os demais, os autores afirmam que o concreto comum é mais eficiente e mais barato que a pasta de bentonita. Apesar de suas característica higroscópica, a bentonita necessita de um solo com teor de umidade elevada e constante, para que suas características sejam mantidas. Por outro lado, a haste com concreto apresentou menores valores de impedância impulsiva que a com bentonita no período seco; e no período chuvoso apresentou valores de impedância impulsiva muito próximos ao da haste com bentonita. Por fim os autores concluem que, a bentonita e o concreto, de fato, reduzem a resistência de baixa frequência e a impedância impulsiva do aterramento, no entanto, o concreto apresentou-se um pouco melhor que a bentonita e, considerando-se que o concreto é mais estável no tempo bem como mais barato, ele é apontado como o melhor material para melhoramento de aterramentos.

### 3.1.1 Considerações

Após a realização da revisão bibliográfica descrita nesta seção, foi observado que a maior parte dos trabalhos analisam aterramentos concretados para baixas correntes e baixas frequências, sendo mais escassos os que avaliam a resposta impulsiva desse tipo de aterramento. Dos trabalhos que estudam aterramentos concretados sob correntes impulsivas, foi encontrado apenas um que realiza simulações considerando o efeito da

ionização do solo, os demais são trabalhos experimentais.

Poucos trabalhos avaliam a resposta transitória de aterramentos concretados para solos com diferentes resistividades. Não foram encontrados estudos que consideram a ionização do solo e avaliam a resposta transitória de hastes concretadas do ponto de vista de seus parâmetros geométricos e formato. Os trabalhos que consideram os parâmetros geométricos da haste concretada avaliam apenas a resistência de baixa frequência, não avaliando a resposta transitória nem considerando o efeito da ionização do solo.

## 3.2 Modelagem Eletromagnética

Quanto à modelagem eletromagnética, os trabalhos da literatura, em geral, utilizam a equação de Laplace. A modelagem através da equação de Laplace é derivada das equações:

$$\nabla \cdot J = Q_j, \quad (3.1)$$

$$J = \sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} + J_e, \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \sigma \nabla V = 0. \quad (3.3)$$

Em que  $Q_j$  é uma fonte de corrente externa,  $J_e$  é densidade de corrente gerada externamente. No caso particular em que não existem densidade de cargas iniciais, nem densidade de corrente gerada externamente, o sistema de equações se resume a:

$$J = \sigma E, \quad (3.4)$$

$$\nabla \cdot \sigma \nabla V = 0. \quad (3.5)$$

Esse equacionamento atém-se a analisar um determinado problema eletromagnético através da observação da tensão e corrente, no entanto, sem serem considerados possíveis efeitos indutivos.

No caso em que se deseja avaliar a propagação da onda eletromagnética, pode-se utilizar a equação do potencial vetorial magnético ( $\mathbf{A}$ ) como equação governante:

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times A) + \sigma \mu_0 \frac{\partial A}{\partial t} + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left( \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial A}{\partial t} \right) = 0. \quad (3.6)$$

A equação (3.6) pode ser obtida da equação (3.7):

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (3.7)$$

introduzindo-se o potencial vetorial magnético  $A$  como sendo

$$B = \nabla \times A \quad (3.8)$$

e inserindo-se o potencial escalar elétrico  $V$  como

$$E = -\nabla V - \frac{\partial A}{\partial t}. \quad (3.9)$$

Apesar dessa modelagem ser uma das mais completas, não foram encontrados trabalhos na literatura que fazem uso da mesma. Tal fato pode ser atribuído à complexidade inerente a esse tipo de modelagem.

### 3.2.1 Considerações

Quanto ao presente trabalho, escolheu-se utilizar a modelagem eletromagnética através da equação de Laplace, mais especificamente utilizando as Equações 3.1 a 3.3. Tal escolha foi realizada pela maior facilidade da modelagem, além de ser um equacionamento utilizado de forma recorrente na literatura. Assim, embora a modelagem eletromagnética escolhida não represente efeitos indutivos, a mesma é suficiente para análise da ionização do solo para hastes de aterramento não muito longas, evitando-se, dessa forma, que o efeito indutivo torne-se mais pronunciado.

## 3.3 Modelos de Ionização do Solo

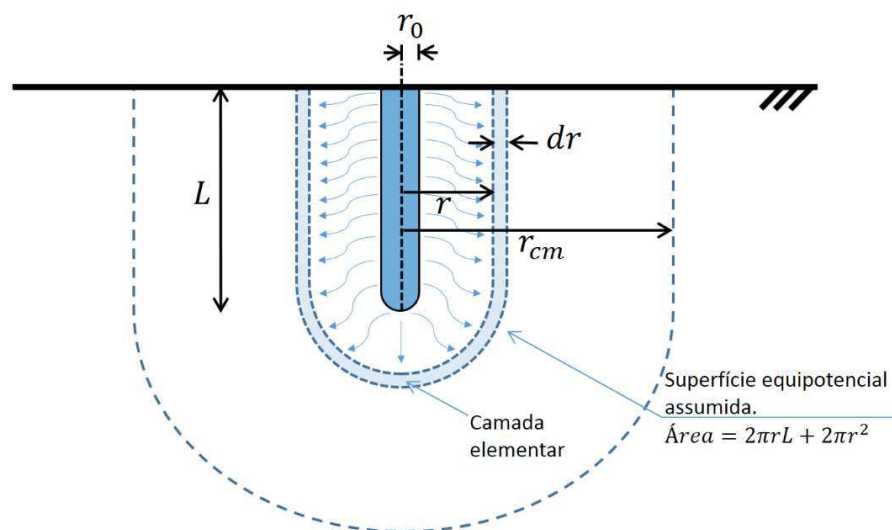
Os modelos de ionização do solo destinam-se a descrever o processo de variação da resistividade do solo quando este é submetido a correntes impulsivas que produzem valores de campos elétricos ( $E$ ), no solo, acima do gradiente de ionização ( $E_c$ ). Quando o campo elétrico ultrapassa o gradiente de ionização ocorre a ruptura dielétrica do solo. Durante a aplicação de corrente impulsiva de elevada magnitude no aterramento, ocorre tanto o processo de ionização do solo quanto o processo de desionização do solo. A ionização do solo se inicia quando  $E > E_c$ , levando ao decaimento da resistividade do solo, e, após isso, ocorre o processo de desionização do solo. Esses dois fenômenos ocorrem, um após o outro, durante a aplicação do impulso (enquanto há corrente).

De acordo com a pesquisa bibliográfica realizada, boa parte dos modelos de ionização do solo derivam de três principais modelos: modelo dinâmico (MD), proposto por Liew e Darveniza [47]; modelo de balanço de energia (MB), proposto por Sekioka et al. [90]; e modelo do raio e comprimento efetivo (MRCE), proposto por Bellaschi, Armington e Snowden [93]. Os dois primeiros (MD e MB) são modelos que consideram a resistividade do solo variável, já o último (MRCE) é um modelo que considera a variação da geometria do eletrodo para representar o efeito da ionização. Os autores do MB desenvolveram o modelo de forma a representar o processo de ionização de forma mais fiel à física do fenômeno, criando um modelo mais refinado que o MD. No caso do MRCE, essa representação da física do fenômeno é mais distante da realidade.

### 3.3.1 Modelo Dinâmico

Em 1974, Liew e Darveniza [47] propuseram um modelo dinâmico para ionização do solo descrito por equações em função do tempo e da densidade de corrente ( $\mathbf{J}$ ). Os autores consideraram que, dada uma haste nua fincada no solo, o solo se ioniza gradativamente em regiões elementares as quais são coaxiais em relação à haste de aterramento, conforme apresentado na Figura 3.1. O comprimento da haste é dado por  $L$ , o raio da haste é denominado  $r_0$  e o raio máximo que a ionização do solo atinge é dado por  $r_{cm}$ . Para modelar o fenômeno da ionização, os autores dividiram a região na qual ocorre a ionização (delimitada por  $r_{cm}$ ) em sub-regiões elementares com espessura  $dr$  e que apresentam um formato aproximado das superfícies equipotenciais ao redor da haste. Assim, quando a densidade de corrente ( $\mathbf{J}$ ) a uma distância  $r$  do eletrodo ultrapassa o valor da densidade de corrente crítica do solo ( $\mathbf{J}_c$ ), então, a região elementar (que possui raio  $r$ ) entra em processo de ionização.

Figura 3.1 – Haste de aterramento.



Fonte: Adaptada de Liew e Darveniza [47].

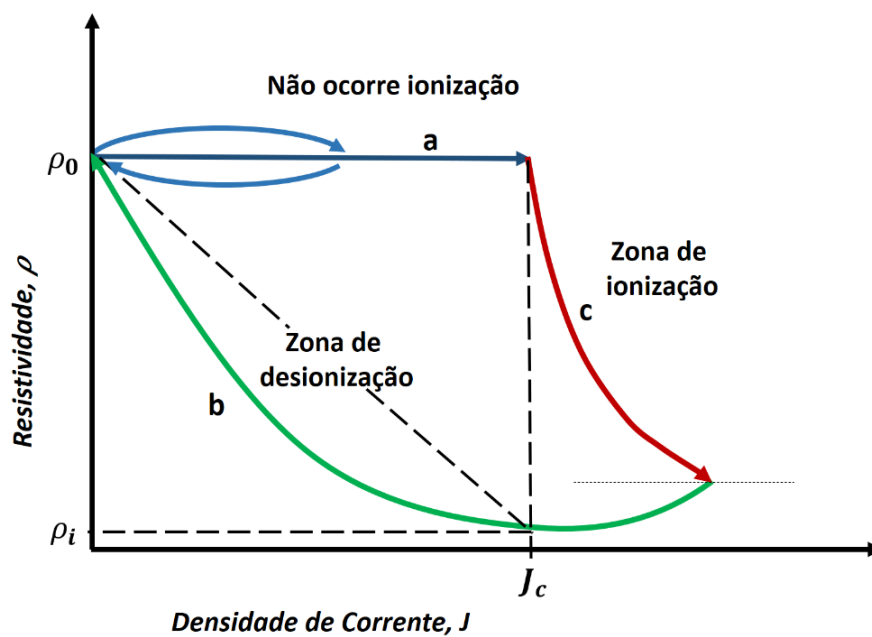
As camadas elementares mais próximas ao eletrodo entram em ionização primeiro, seguindo-se as camadas mais externas. Quanto menor for o valor da espessura  $dr$  considerada, mais refinado será o cálculo do modelo.

Embora o formato das camadas elementares adotado se aproxime do formato das superfícies equipotenciais geradas ao redor de uma haste cilíndrica, na prática as equipotenciais tem formato diferente. Vale salientar que a forma que a modelagem da ionização é apresentada por Liew e Darveniza [47] restringe-se a um aterramento composto por uma única haste nua. Assim, o modelo apresentado pelos autores não é capaz, por si só, de modelar a ionização em aterramentos com mais de uma haste ou aterramentos

envolvidos por materiais aditivos. Além disso, o modelo foi desenvolvido para situações em que a corrente atinge até no máximo 15 kA.

Cada camada elementar entra em processo de ionização e desionização de forma independente das demais. Liew e Darveniza [47] assumiram que o processo de ionização em cada camada elementar se dá pela variação da resistividade no tempo, conforme equacionamento que será exposto em seguida. O início da ionização em uma camada elementar é determinado quando o valor da densidade de corrente nessa camada ultrapassa o valor da densidade de corrente crítica, conforme a Figura 3.2 apresenta.

**Figura 3.2** – Curvas do processo de ionização e desionização do solo.



Fonte: Adaptada de Liew e Darveniza [47].

O equacionamento proposto para a resistividade em cada camada elementar do solo considera que a densidade corrente crítica  $J_c$  é dada por:

$$J_c = \frac{g_c}{\rho_0}, \quad (3.10)$$

onde  $g_c = E_c$  é campo elétrico crítico ou gradiente de ionização do solo, que, conforme medições de [47], para solos com resistividade de  $50 \Omega \cdot m$ , assume valores de 100 kV/m a 300 kV/m. Assim, os trechos "a", "b" e "c", descritos na Figura 3.2, são calculados conforme os passos apresentados a seguir:

- Para densidades de corrente  $J < J_c$ :

$$\rho = \rho_0, \quad (3.11)$$

em que  $J_c$  consiste na densidade de corrente crítica e  $\rho_0$  constitui resistividade estática do solo para baixas correntes.



- Para densidades de corrente  $J > J_c$  durante o processo de ionização:

$$\rho = \rho_0 \left( e^{\frac{-t}{\tau_1}} \right), \quad (3.12)$$

em que  $t$  é o tempo contado a partir do instante em que se inicia a ionização e  $\tau_1$  é a constante de tempo de ionização que depende do tipo de solo.

- Para o processo de desionização:

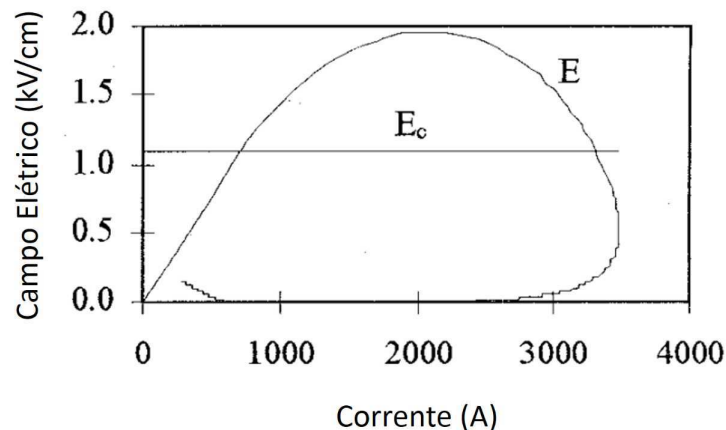
$$\rho = \rho_i + (\rho_0 - \rho_i) \left( 1 - e^{\frac{-t}{\tau_2}} \right) \left( 1 - \frac{J}{J_c} \right)^2, \quad (3.13)$$

em que  $\tau_2$  é a constante de tempo de desionização,  $\rho_i$  é o valor de resistividade quando  $J = J_c$  durante o decaimento da corrente.

Os resultados apresentados por Liew e Darveniza [47] mostram que o modelo desenvolvido possui boa exatidão e representatividade quando comparado com as medições realizadas. No entanto, uma questão que os próprios autores citaram é a necessidade de escolha ou identificação dos parâmetros  $g_c$ ,  $\tau_1$  e  $\tau_2$  que variam para cada tipo de solo (no artigo, por exemplo, foram utilizados valores  $g_c = 300 \text{ kV/m}$ ,  $\tau_1 = 2 \text{ } \mu\text{s}$  e  $\tau_2 = 4,5 \text{ } \mu\text{s}$ ). Outro ponto a ser observado é que os cálculos foram realizados para uma única haste, sendo que para sistemas com mais hastes a corrente é distribuída entre as hastes e a densidade de corrente nos arredores das mesmas diminui, levando a um decréscimo de resistividade menos pronunciado que com uma única haste. Além disso, os autores comentaram que o modelo apresenta discrepâncias quando se considera impulsos de amplitudes maiores que 15 kA.

Em 1996, Almeida e Barros [94] indicaram que o modelo de Liew e Darveniza [47] produz campos elétricos na superfície do eletrodo (haste) que são consideravelmente maiores que o campo crítico ( $E_c$ ), o que não condiz com a realidade física. A Figura 3.3 apresenta claramente essa situação.

**Figura 3.3** – Campo elétrico na superfície do eletrodo *versus* magnitude da corrente, obtido com o modelo de Liew e Darveniza [47].



Fonte: Reproduzida de Almeida e Barros [94].

Frente a essa situação, Almeida e Barros [94] propuseram um modelo que, similarmente ao que foi proposto por Liew e Darveniza [47], considera que a região ao redor da haste de aterramento é dividida por camadas elementares de espessura  $dr$ , que são regiões onde presume-se uma condição aproximada de equipotencial; no entanto apresenta equacionamento da ionização diferente do modelo de [47], em alguns aspectos. Assim, o processo de ionização e desionização é modelado através das seguintes equações:

- Para o processo de ionização:

$$\rho_k = \frac{E_c}{I} A_k, \quad (3.14)$$

em que  $\rho_k$  consiste na resistividade da  $k$ -ésima camada elementar ao redor do eletrodo;  $E_c$  é o campo elétrico crítico;  $I$  é a corrente e  $A_k$  é área da superfície da camada elementar número  $k$ . Além da região de ionização, contida por  $r_c m$ , a resistividade do solo permanece igual a  $\rho_0$ , de forma que os processos de ionização e desionização só ocorrem nas proximidades do eletrodo.

- Para o processo de desionização:

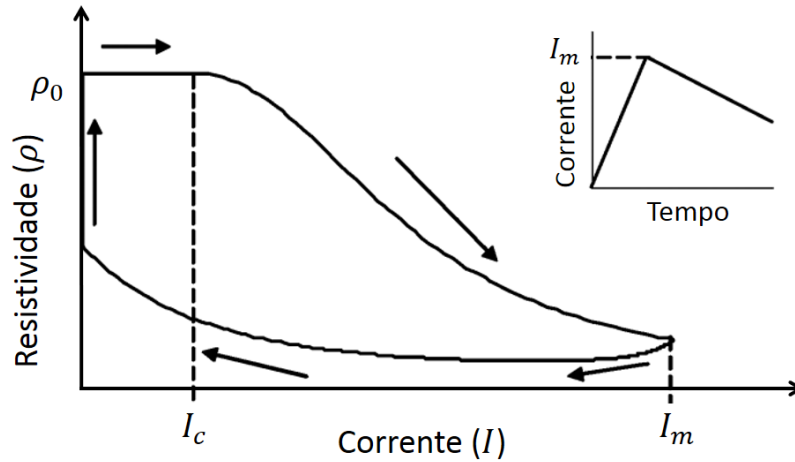
$$\rho_k = \rho_{ki} + (\rho_0 + \rho_{ki}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \left(1 - \frac{E_k}{E_c}\right)^2 \quad (3.15)$$

em que  $\tau$  é a constante de tempo de desionização;  $E_k$  é o campo elétrico na camada elementar número  $k$  e  $\rho_{ki}$ ; a resistividade da  $k$ -ésima no ponto em que o campo elétrico é igual a  $E_c$  durante o processo de desionização;  $\rho_k$  resistividade da  $k$ -ésima camada elementar.

O trabalho de Almeida e Barros [94] apresenta resultados com boa proximidade do efeito físico real, no entanto não foram encontrados outros trabalhos na literatura que utilizam esse modelo. Já no caso do modelo proposto por Liew e Darveniza [47], encontrou-se trabalhos que utilizam e implementam esse modelo.

### 3.3.2 Modelo de Balanço Energético

Em 2006, Sekioka et al. [90] propuseram um modelo matemático de ionização do solo baseado em balanço energético. Esse modelo baseia-se na similaridade que existe entre o processo de ionização do solo e o processo de ruptura dielétrica do ar (ou descarga no ar) [95], o qual tem como um dos principais princípios de estudo o balanço energético. Dessa forma o processo de ionização é assumido como similar à ocorrência de arcos elétricos em disjuntores durante uma interrupção de corrente. Assim, diante dessa similaridade de fenômenos, modelou-se o processo de ionização através de uma abordagem de balanço energético. O perfil de ionização assumido pelos autores é apresentado na Figura 3.4.

**Figura 3.4** – Perfil de ionização do solo assumido por Sekioka et al. [90].

Fonte: Reproduzida de Sekioka et al. [90].

Sekioka et al. [90] apresentaram a seguinte equação geral da resistividade que rege o processo de ionização e desionização do solo:

$$\rho = \rho_0 \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \left[1 + \frac{1}{g_0 Q_0} \int i^2 \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) dt\right]^{-1}, \quad (3.16)$$

na qual  $\rho_0$  representa a resistividade estática do solo;  $t$  é tempo contado à partir do instante que inicia-se a ionização do solo;  $i$  corresponde à corrente injetada no solo;  $g_0$  [Sm] é a condutância estática do solo antes de se iniciar a ionização;  $Q_0$  [J/m] é uma constante que descreve a evolução do mecanismo de condução de corrente, advinda da teoria de descargas elétrica no ar; e  $\tau$  representa a constante de tempo relacionada com o tempo em que o solo leva para recuperar o valor inicial de resistividade após ocorrer o processo de ionização. O valor de  $\tau$  é calculado por:

$$\tau = \frac{Q_0}{P}, \quad (3.17)$$

sendo que  $P$  [W/m] é dissipação de potência no processo,

$$P = \lambda S, \quad (3.18)$$

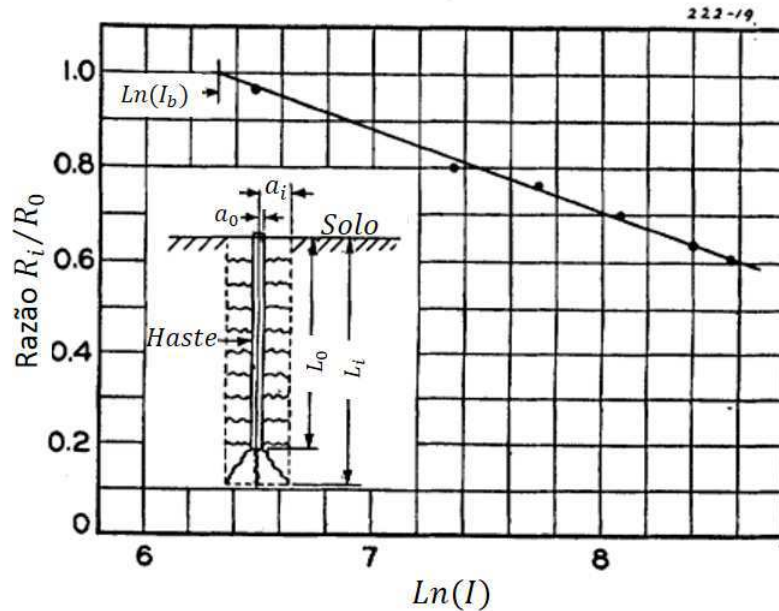
a qual é diretamente proporcional a área da superfície do segmento conforme o modelo de arco de Cassie [96]. A constante  $\lambda$  [W/m<sup>3</sup>] é definida por  $\lambda = E_c^2/\rho_0$ .

### 3.3.3 Modelo de Raio e Comprimento Efetivo

O modelo de raio e comprimento efetivo, também chamado de modelo de variação geométrica, desenvolvido por Bellaschi, Armington e Snowden [93] calcula a impedância impulsiva do aterramento através da consideração de que, durante o processo de ionização

do solo o raio e o comprimento da haste de aterramento comportam-se como que alterados. Essa aproximação deve-se ao fato de que, quando uma haste de aterramento é submetida a uma corrente impulsiva ionizante, o processo de ruptura dielétrica do solo cria caminhos de plasma com resistividade baixa, o que, de uma forma macroscópica, pode ser visto como um aumento do raio e comprimento do eletrodo. Assim, o raio e comprimento efetivo da haste passam a ser maiores que os reais. A Figura 3.5 apresenta a razão  $R_i/R_0$  pela corrente  $I$  (em logaritmo natural).  $R_i$  representa a resistência impulsiva;  $R_0$  a resistência para baixa frequência;  $I_b$  a corrente crítica, a partir da qual ocorre a ionização;  $a_0$  e  $L_0$  o raio e comprimento real da haste;  $a_i$  e  $L_i$  o raio e comprimento efetivo da haste devido ao efeito da ionização.

**Figura 3.5** – Método para determinar a característica impulsiva de uma haste de aterramento, conforme Bellaschi, Armington e Snowden [93].



Fonte: Reproduzido de Bellaschi, Armington e Snowden [93].

A razão  $R_i/R_0$  é determinada através da expressão:

$$\frac{R_i}{R_0} = \frac{L_0 \left[ \ln \left( \frac{4L_i}{a_i} \right) - 1 \right]}{L_i \left[ \ln \left( \frac{4L_0}{a_0} \right) - 1 \right]}, \quad (3.19)$$

em que

$$L_i = L_0 + kI, \quad (3.20)$$

$$a_i = \frac{Ia_0L_0}{I_bL_i}, \quad (3.21)$$

onde o fator  $k$  é uma constante apenas para faixa limitada de valores de corrente.

Embora o modelo proposto por [93] represente um esforço significativo para modelagem de hastes de aterramento submetidas a correntes impulsivas, esse modelo apresenta-se

mais distante do fenômeno físico real que os modelos propostos por [47] (MD) e Sekioka et al. [90] (MB), uma vez que considera um eletrodo com diâmetro aumentando até o raio máximo da região ionizada do solo.

### 3.3.4 Considerações

Após diversos testes de validação, observou-se que o modelo dinâmico proposto por Liew e Darveniza [47] foi o que melhor se aproximou de dados experimentais apresentados na literatura. Embora o modelo proposto por Almeida e Barros [94] apresente-se como um melhoramento ao modelo de Liew e Darveniza [47], após alguns testes desenvolvidos durante o presente trabalho, chegou-se a resultados discrepantes em relação aos dados experimentais. Já o modelo de balanço energético proposto por Sekioka et al. [90], embora se proponha a descrever o fenômeno de ionização de forma mais refinada, nos desenvolvimentos do presente trabalho, apresentou-se como tendo difícil implementação e entendimento. Assim, para a implementação do fenômeno da ionização do solo, no presente trabalho, foi escolhido o modelo dinâmico de ionização proposto por Liew e Darveniza [47], como base para os estudos com hastes de aterramento concretadas submetidas à correntes impulsivas, considerando o efeito da ionização.

## 3.4 Contribuições do Trabalho

Entre os trabalhos que versam sobre aterramentos concretados que foram analisados, observou-se que a maioria considerou correntes de baixas magnitudes e baixas frequências, avaliando a resistência de aterramento. São mais escassos os trabalhos que fizeram uma avaliação de aterramentos concretados para correntes impulsivas de elevadas magnitudes. Dos estudos que admitiram correntes de elevada magnitude, observou-se que: ou são estudos experimentais ou são estudos de simulação que não consideram o efeito da ionização do solo. No entanto, não foram encontrados estudos que fazem avaliação da resposta transitória de aterramentos concretados, quanto à resistividade do solo e quanto aos parâmetros geométricos da haste concretada, considerando o efeito da ionização do solo. Por fim, o presente trabalho contribui para sanar as lacunas presentes no estado da arte, apresentando um estudo da resposta transitória de hastes concretadas quanto à resistividade do solo e quanto aos parâmetros geométricos da haste concretada, considerando o efeito da ionização do solo.

Para que fosse possível avaliar de forma confiável, hastes concretadas com diferentes formas geométricas sob correntes impulsivas, fez-se necessário implementar de forma pontual um modelo de ionização do solo. Ou seja, uma representação da ionização que não fosse isotrópica, como Liew e Darveniza [47] e Bellaschi, Armington e Snowden [93] apresentaram, mas que considerasse cada ponto (ou micro região) do solo de forma

independente. Dessa forma, garante-se que, quando o módulo do campo elétrico ultrapassar o valor do campo crítico em um dado ponto ou micro região do solo, esse ponto ou micro região irá entrar em processo de ionização independentemente dos demais pontos do solo. Assim, garante-se uma análise confiável de aterramentos que não são compostos por uma única haste nua (tal como [Liew e Darveniza \[47\]](#) avaliaram), podendo-se avaliar aterramentos com diferentes formas geométricas e diferentes materiais.

A [Tabela 3.1](#) e a [Tabela 3.2](#) apresentam um esboço comparativo entre as características dos trabalhos (listados em ordem cronológica) que foram avaliados na revisão bibliográfica e as características do presente trabalho, evidenciando-se as contribuições da presente pesquisa.

Tabela 3.1 – Comparativo, em ordem cronológica, de características dos trabalhos da revisão bibliográfica e o presente trabalho,.

ITEM	AUTOR																						
	Ufer [15]	Fagan e Lee [16]	Wiener [43]	Harding e Harris [45]	Preminger [17]	Rowland [39]	Durhan e Durhan [41]	Switzer e Stidham [44]	Yamamoto et al. [77]	Meng et al. [79]	Hallmark [38]	Kurtovic e Vujevic [80]	Radazovic e Kostic [9]	Chen [10] [11]	Birchal, Vale e Visacro [83]	Baldwin, Rifaat e Malik [84]	Bezerra e Kanashiro [23]	Velev et al. [85]	Velev et al. [86]	Androvitsaneas, Gonos e Stathopoulos [37]	Rodrigues [42]	PRESENTE TRABALHO	
Análise de Aterramento Concretado	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Análise da Resposta Impulsiva		X																			X	X	
Consideração da Ionização do Solo																					X	X	
Avaliação para Diferentes Solos														X				X					X
Avaliação do Diâmetro do Concreto														X				X					X
Avaliação da Altura Total da Haste Concretada														X				X					X
Avaliação da Altura do Concreto Envolvente														X									X
Avaliação da Profundidade da Haste Concretada																							X

**Tabela 3.2** – Continuação do comparativo de características dos trabalhos da revisão bibliográfica e o presente trabalho, em ordem cronológica.

ITEM	AUTOR											
	Lim, Gomes e Kadir [18]	Liu e Madsen [87]	Almaguer et al. [88]	Lima, Paulino e Guimarães [24]	Androvitsaneas, Gonos e Stathopoulos [26]	Coelho e Almaguer [89]	Pountourelis, Peppas e Pyrioti [25]	Yunus et al. [92]	Pereira et al. [19]	Cabral et al. [20] [21]	Androvitsaneas, Gonos e Stathopoulos [22]	PRESENTE TRABALHO
Análise de Aterramento Concretado	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Análise da Resposta Impulsiva		X	X	X	X	X		X			X	X
Consideração da Ionização do Solo						X		X			X	X
Avaliação para Diferentes Solos			X									X
Avaliação do Diâmetro do Concreto												X
Avaliação da Altura Total da Haste Concretada												X
Avaliação da Altura do Concreto Envolvente												X
Avaliação da Profundidade da Haste Concretada												X



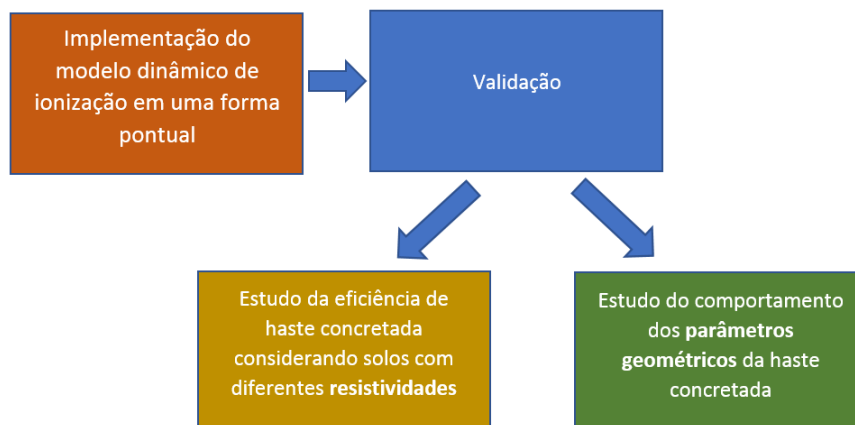
## Metodologia

Neste capítulo, são apresentadas as metodologias para o desenvolvimento dos estudos e análises do presente trabalho. Inicialmente, é apresentada uma visão geral da sequência dos estudos e desenvolvimentos do presente trabalho. Após isso, é apresentada a metodologia para implementação do modelo dinâmico de ionização do solo. Subsequentemente, apresenta-se a metodologia para a validação da implementação do modelo de ionização. Em seguida, é apresentada a metodologia para a análise comparativa entre a haste concretada e a haste nua para diferentes tipos de solos. Por fim, é indicada a metodologia para a análise da resposta dos parâmetros geométricos da haste concretada.

### 4.1 Visão Geral

No estado da arte, observando-se as lacunas existentes, utilizou-se no presente trabalho uma metodologia que avalia hastes concretadas tanto para diferentes tipos de solo quanto para diferentes características geométricas da haste concretada. A [Figura 4.1](#) apresenta um fluxograma das atividades desenvolvidas no presente trabalho.

**Figura 4.1** – Fluxograma da metodologia para realização dos estudos do presente trabalho.



Fonte: Produzida pelo autor.

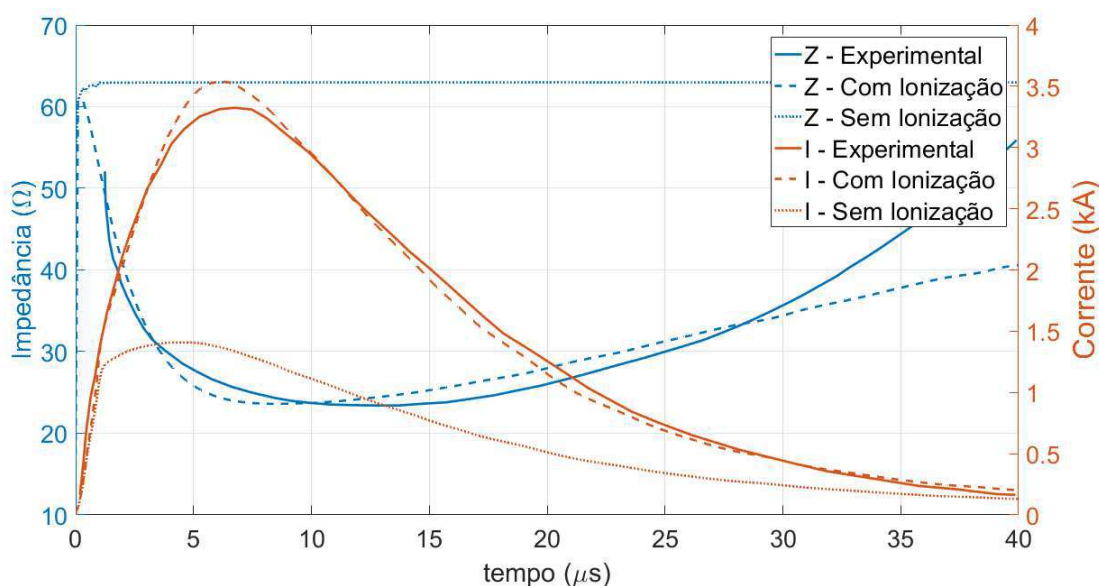
A primeira etapa do presente trabalho foi desenvolver uma implementação pontual do modelo de ionização proposto por Liew e Darveniza [47], após isso essa implementação foi validada com base em dados experimentais para que posteriormente pudesse ser utilizada como base para estudos com haste concretada para solos com diferentes resistividades e para estudos de avaliação dos parâmetros geométricos da haste concretada.

## 4.2 Implementação Pontual do Modelo Dinâmico de Ionização

A implementação pontual do modelo dinâmico da ionização do solo é um dos pontos cruciais da presente pesquisa. Uma vez que o estudo envolve aplicações de correntes ou tensões de elevadas magnitudes em sistemas de aterramentos, a ocorrência de ionização do solo nas proximidades do aterramento é forçosamente esperada. Independentemente do tipo de aterramento que um estudo se proponha a avaliar (quer concretado ou não), se tal estudo é realizado para correntes impulsivas, a consideração do efeito da ionização é um grande pré-requisito para que se obtenha resultados verossímeis.

Para ilustrar a importância da representação da ionização do solo, são apresentados na Figura 4.2 resultados de corrente e impedância transitória de uma mesma simulação computacional em duas situações: com representação do fenômeno da ionização do solo e sem representação da ionização do solo. Além disso, também são apresentados os resultados experimentais de referência, os quais foram obtidos através de um experimento realizado por Liew e Darveniza [47], no qual aplica-se um impulso de tensão de aproximadamente 90 kV de amplitude (conforme a Figura 5.2 apresentada na próxima seção).

Figura 4.2 – Simulação considerando e desconsiderando o fenômeno da ionização o solo.



Fonte: Produzida pelo autor.

Pode-se observar, na [Figura 4.2](#), que o pico da corrente para a simulação em que é desconsiderada a ionização ("I - Sem Ionização") apresenta uma diferença no valor de pico de -57,6% em relação à corrente experimental. Já no caso da corrente para a simulação na qual considera-se a ionização do solo ("I - Com Ionização"), a diferença no valor de pico em relação à corrente experimental foi de 6,4%. Assim, fica evidente a considerável discrepância nos resultados de simulações computacionais que não consideram e não representam o efeito da ionização do solo, indicando a elevada importância de se levar em conta esse efeito nos estudos de aterramentos submetidos a correntes impulsivas.

Quanto à impedância transitória, a [Figura 4.2](#) indica de forma clara, que simulações que consideram o efeito da ionização não apresentam o comportamento transitório da impedância experimentalmente averiguado. Assim, a impedância permanece praticamente constante durante toda a aplicação do impulso de tensão, não condizendo com o fenômeno de ionização que ocorre na prática.

O fenômeno da ionização é não linear e possui uma razoável dificuldade para ser aplicado em simulações. No presente trabalho, a implementação do efeito de ionização foi realizada tomando como base o modelo de [Liew e Darveniza \[47\]](#). No entanto, ampliou-se a generalidade da região de ionização, de forma que, enquanto [Liew e Darveniza \[47\]](#) propõem um modelo de ionização de camada coaxiais cilíndricas com formato de semi-circunferência na região próxima à extremidade inferior da haste, a implementação proposta neste trabalho não possui um formato pré-definido para a região de ionização, pois a única restrição para ocorrência da ionização em um ponto do solo é a condição de que o módulo do campo elétrico ultrapasse o valor de campo elétrico crítico. Assim, a região de ionização observada será resultado dos valores que o campo elétrico toma no espaço, podendo resultar em formas geométrica diversas. Esse tipo de representação é apresenta maior grau de similaridade com fenômeno real de ionização do solo.

O equacionamento da ionização e desionização foi embasado no modelo de [Liew e Darveniza \[47\]](#). Sendo assim, o que determina se um ponto qualquer do solo entra em processo de ionização é a condição do módulo do campo elétrico nesse ponto ( $|\mathbf{E}_{\text{ponto}}|$ ) ser maior que o gradiente de ionização do solo em questão ( $E_{\text{crítico}}$ ). Assim, o processo de ionização e desionização está centrado nos valores que a resistividade toma em cada etapa. De forma simplificada, o processo divide-se em três etapas:

- **Sem ionização:** quando  $|\mathbf{E}_{\text{ponto}}| < E_{\text{crítico}}$ , o valor da resistividade é igual ao valor estático inicial:

$$\rho_{\text{ponto}} = \rho_0 \quad (4.1)$$

- **Ionização:** quando  $|\mathbf{E}_{\text{ponto}}| > E_{\text{crítico}}$ , a resistividade no ponto deixa de ter valor  $\rho_0$  e passa a decair conforme a expressão:

$$\rho_{\text{ponto}} = \rho_0 \cdot e^{(-t/\tau_1)} \quad (4.2)$$

- **Desionização:** após ter ocorrido a ionização, quando novamente o campo elétrico no ponto for  $|\mathbf{E}_{\text{ponto}}| < E_{\text{crítico}}$ , a resistividade do solo no ponto em questão passa a elevar-se suavemente de acordo com a expressão:

$$\rho_{\text{ponto}} = \rho_i + (\rho_0 - \rho_i) \cdot \left(1 - e^{-t/\tau_2}\right) \cdot \left(1 - \frac{|\mathbf{E}_{\text{ponto}}|}{E_{\text{crítico}}}\right)^2 \quad (4.3)$$

em que  $\rho_{\text{ponto}}$  é o valor da resistividade no ponto avaliado,  $\rho_0$  é o valor estático e inicial da resistividade do solo,  $\tau_1$  é a constante de tempo da ionização,  $\tau_2$  é a constante de tempo da desionização,  $|\mathbf{E}_{\text{ponto}}|$  é o módulo do campo elétrico no ponto avaliado e  $\rho_i$  é o valor da resistividade quando  $|\mathbf{E}_{\text{ponto}}| = E_{\text{crítico}}$  dada pela função da ionização.

Para realização da implementação do fenômeno de ionização do solo no *Comsol*, utilizou-se equações diferenciais de domínio (*domain differential equation*). Esse tipo de representação torna a passagem do processo de ionização para o processo de desionização mais suave. A transição entre a [Equação 4.2](#) e [Equação 4.3](#), que descrevem a resistividade do solo, é delicada, uma vez que, durante os cálculos numéricos, o *Comsol* necessita calcular derivadas referentes ao modelo eletromagnético adotado. Assim, uma forma eficiente de se evitar problemas dessa natureza é definir a resistividade do solo através de uma equação diferencial ao invés de uma equação algébrica simples. Essa equação diferencial foi obtida através de derivação e manipulação algébrica da [Equação 4.2](#) e [Equação 4.3](#), fornecidas por [47]. Inicialmente, calculou-se a derivada da [Equação 4.2](#), denominando-a de  $f_{\text{ion}}$ :

$$f_{\text{ion}} = \frac{d}{dt}\rho_{\text{ponto}} = -\rho_0 \cdot \frac{e^{(-t/\tau_1)}}{\tau_1}. \quad (4.4)$$

Substituindo-se (4.2) em (4.4), tem-se:

$$f_{\text{ion}} = \frac{d}{dt}\rho_{\text{ponto}} = -\frac{\rho_{\text{ponto}}}{\tau_1}. \quad (4.5)$$

Essa primeira equação diferencial determina o comportamento da derivada da resistividade durante a ionização. A segunda derivada necessária ao desenvolvimento do modelo é a derivada da [Equação 4.3](#), a qual foi denominada de  $f_{\text{deion}}$ . Para facilitar os cálculos, considerou-se uma variável auxiliar:  $M = (\rho_0 - \rho_i) \cdot \left(1 - |\mathbf{E}_{\text{ponto}}|/E_{\text{crítico}}\right)^2$ . Dessa forma:

$$f_{\text{deion}} = \frac{d}{dt}\rho_{\text{ponto}} = \frac{d}{dt}\left(\rho_i + M \cdot \left(1 - e^{-t/\tau_2}\right)\right), \quad (4.6)$$

$$= \frac{d}{dt}\left(\rho_i + M \cdot \left(1 - e^{-t/\tau_2}\right)\right), \quad (4.7)$$

$$= \frac{d}{dt}\left(M \cdot \left(1 - e^{-t/\tau_2}\right)\right), \quad (4.8)$$

$$= \frac{dM}{dt} \cdot \left(1 - e^{-t/\tau_2}\right) + M \cdot \frac{d}{dt}\left(1 - e^{-t/\tau_2}\right), \quad (4.9)$$

$$= \frac{dM}{dt} \cdot \left(1 - e^{-t/\tau_2}\right) + M \cdot \left(\frac{e^{-t/\tau_2}}{\tau_2}\right); \quad (4.10)$$

e da [Equação 4.3](#) tem-se que:

$$\rho_{ponto} = \rho_i + M \cdot (1 - e^{-t/\tau_2}), \quad (4.11)$$

$$M \cdot (e^{-t/\tau_2}) = \rho_i + M - \rho_{ponto}. \quad (4.12)$$

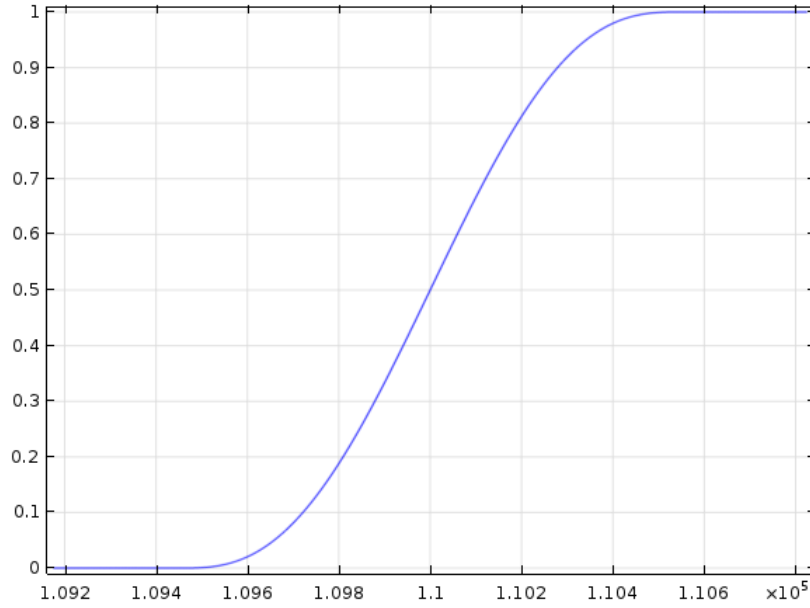
Logo, substituindo-se [\(4.12\)](#) no segundo termo da soma de [\(4.10\)](#) obtém-se:

$$f_{deion} = \frac{d}{dt} \rho_{ponto} = \frac{dM}{dt} \cdot (1 - e^{-t/\tau_2}) + \left( \frac{\rho_i + M - \rho_{ponto}}{\tau_2} \right), \quad (4.13)$$

Pode ser observado que, quando o solo ioniza-se e depois passa para o processo de desionização, ocorre uma transição da derivada da resistividade do solo, a qual passa de  $f_{ion}$  para  $f_{deion}$ . Para realizar uma transição suave de  $f_{ion}$  para  $f_{deion}$ , utilizou-se uma função degrau unitário suavizada denominada de  $u$ , que consiste em uma função degrau com transição de 0 para 1 contínua, possuindo um formato sigmoide. Além disso, determinou-se a função degrau  $u$  como estando centrada exatamente no valor do campo elétrico crítico do solo  $E_{crit}$ . No presente caso estudado, tomou-se  $E_{crit} = 110$  kV/m. A função  $u$  também foi definida como sendo uma função que possui duas derivadas contínuas.

O campo elétrico de cada ponto do solo simulado é mapeado através da função  $u$ . Dessa forma, a depender dos valores que o módulo do campo elétrico toma no tempo, em cada ponto do solo  $u$  poderá assumir os valores 1 ou 0 (independentemente dos valores de  $u$  nos demais pontos do solo). Como a função degrau suavizada  $u$  foi definida como sendo uma função com transição contínua,  $u$  poderá assumir valores entre 1 e 0, no entanto, essa região de transição foi definida como tendo comprimento de um centésimo do valor do campo crítico ( $E_{crit}/100$ ). Isso faz com que a região de transição não afete o comportamento do modelo, sendo apenas uma região de transição suave para evitar problemas nos cálculos numéricos. A [Figura 4.3](#) apresenta a função degrau utilizada. Note-se que a mesma está centrada em  $1.1 \cdot 10^5$ , que é o valor de campo elétrico crítico que será utilizado na próxima seção ([seção 5.2](#)).

Quando  $u = 1$ , em um determinado ponto do solo, significa que esse ponto que está sendo avaliado está em processo de ionização, uma vez que o módulo do campo elétrico está tomando valores acima do valor do campo elétrico crítico. Já no caso em que  $u = 0$ , em um determinado ponto do solo, significa que esse ponto pode estar em processo de desionização, caso previamente já tenha ocorrido o processo de ionização, ou pode estar inerte (com resistividade igual a resistividade estática do solo), caso não tenha ocorrido o processo de ionização previamente.

**Figura 4.3** – Função degrau  $u$  utilizada para transição entre  $f_{ion}$  e  $f_{deion}$ .

Fonte: Produzida pelo autor.

O módulo campo elétrico foi utilizado como argumento da função degrau. Uma vez que o campo elétrico é uma função do tempo e do espaço, tem-se que a função  $u(|\mathbf{E}|)$  é uma função do espaço e do tempo, fornecendo os pontos do espaço nos quais está ocorrendo a ionização, em um dado instante de tempo. De forma que, se, para um dado ponto do espaço, o valor de  $u(|\mathbf{E}_{\text{ponto}}|) = 0$  então, neste ponto, tem-se  $|\mathbf{E}_{\text{ponto}}| < E_{\text{crit}}$  e, portanto, não está ocorrendo ionização no ponto. Caso contrário, se em um dado ponto  $u(|\mathbf{E}|) = 1$  então está ocorrendo ionização no ponto específico, no instante específico.

Em posse de  $f_{ion}$ ,  $f_{deion}$  e da função degrau  $u$ , pode-se escrever a seguinte equação diferencial, que irá reger a resistividade ( $\rho_{\text{ponto}}$ ) em cada ponto do solo, em função do módulo do campo elétrico  $|\mathbf{E}|$ :

$$\frac{d}{dt}\rho_{\text{ponto}} = u(|\mathbf{E}_{\text{ponto}}|) \cdot f_{ion} + (1 - u(|\mathbf{E}_{\text{ponto}}|)) \cdot f_{deion}. \quad (4.14)$$

Pode-se observar que, considerando o valor inicial de  $\rho_{\text{ponto}} = \rho_0$  para todos os pontos do solo; e considerando o valor inicial de  $\rho_i = \rho_0$ ; então, nos instantes iniciais nos quais  $|\mathbf{E}_{\text{ponto}}|$  não for maior ou igual a  $E_{\text{crit}}$ , tem-se que  $u(|\mathbf{E}_{\text{ponto}}|) = 0$  e, portanto, o primeiro termo da soma na [Equação 4.14](#) será zero.

Por outro lado, o fato de  $u(|\mathbf{E}_{\text{ponto}}|) = 0$  implica  $(1 - u(|\mathbf{E}_{\text{ponto}}|)) = 1$ , fazendo com que  $\frac{d}{dt}\rho_{\text{ponto}} = f_{deion}$ . No entanto, nessa condição inicial, como  $\rho_i = \rho_0$ , então tem-se que  $M = 0$  e, além disso, como  $\rho_{\text{ponto}} = \rho_0$ , então chega-se a  $f_{deion} = 0$ . Logo, obtém-se  $\frac{d}{dt}\rho_{\text{ponto}} = 0$ , o que faz com que a condição inicial  $\rho_{\text{ponto}} = \rho_0$  permaneça.

Contudo, quando em um ponto qualquer do solo atinge-se a condição em que

$|\mathbf{E}_{\text{ponto}}| \geq E_{\text{crit}}$ , logo,  $u(|\mathbf{E}_{\text{ponto}}|) = 1$ , e portanto,  $(1 - u(|\mathbf{E}_{\text{ponto}}|)) = 0$ , fazendo com que  $\frac{d}{dt}\rho_{\text{ponto}} = f_{\text{ion}}$ , o que indica que o processo de ionização inciou-se.

Após a ocorrência da ionização, quando volta-se a ter  $|\mathbf{E}_{\text{ponto}}| < E_{\text{crit}}$ , tem-se que  $u(|\mathbf{E}_{\text{ponto}}|) = 0$  e  $(1 - u(|\mathbf{E}_{\text{ponto}}|)) = 1$ , mas  $f_{\text{ion}} \neq 0$ , visto que  $\rho_i \neq 0$  pois, do momento que inicia-se a ionização até o momento em que volta-se a ter a condição  $|\mathbf{E}_{\text{ponto}}| < E_{\text{crit}}$ , tem-se que  $\rho_i = \rho_{\text{ponto}}$ , e portanto  $M \neq 0$  e  $f_{\text{deion}} \neq 0$ ; assim, quando o processo de ionização termina, inicia-se o processo de desionização sendo  $\frac{d}{dt}\rho_{\text{ponto}} = f_{\text{deion}}$ .

Para que, durante o processo de ionização,  $\rho_i$  assumisse valores iguais aos da resistividade do ponto  $\rho_{\text{ponto}}$  e, por fim, quando a ionização fosse interrompida, guardasse o último valor da resistividade do ponto durante a ionização, utilizou-se, também, uma equação diferencial de domínio, dada por:

$$\frac{d}{dt}\rho_i = u(|\mathbf{E}_{\text{ponto}}|) \cdot \left(-\frac{\rho_i}{\tau_1}\right), \quad (4.15)$$

assumindo o valor inicial de  $\rho_i$  como sendo igual a  $\rho_0$ . Pode-se observar que, com a [Equação 4.15](#),  $\rho_i$  imita o comportamento de  $\rho_{\text{ponto}}$  do início ao fim da ionização no ponto, uma vez que a expressão  $-\frac{\rho_i}{\tau_1}$  possui formato idêntico à [Equação 4.5](#). A utilização da função degrau  $u$  na [Equação 4.15](#) garante que, quando o processo de ionização se encerra no ponto, tem-se que  $\frac{d}{dt}\rho_i = 0$ . Assim, com derivada nula,  $\rho_i$  não varia, mas é igual ao último valor de  $\rho_{\text{ponto}}$  no processo de ionização, podendo ser utilizada como parâmetro da expressão da desionização apresentada na [Equação 4.13](#).

Logo, com a sequência de equações descritas nos parágrafos anteriores, implementou-se corretamente as etapas de: não ionização (regime estático), ionização e desionização. Além disso, vale salientar que, com esse modelo, basta apenas inserir a forma de onda de excitação (corrente ou tensão) no aterramento, que a ionização e desionização será representada apenas no pontos do solo nos quais o módulo do campo elétrico for maior que o valor do campo elétrico crítico (ou gradiente de ionização do solo). Caso seja aplicada uma forma de onda de tensão ou corrente de baixa amplitude no aterramento, o modelo fornecerá corretamente o resultado de resistência de aterramento, sem ocorrência de ionização em qualquer ponto do solo. Assim, independentemente da geometria do eletrodo, malha ou sistema de aterramento, o modelo calculará se ocorrerá ionização ou não do solo e, mais do que isso, em quais pontos ou micro regiões do solo a ionização ocorrerá.

Por fim, utilizando-se a [Equação 4.14](#) pode-se modelar o efeito da ionização em cada ponto do solo, o que torna a representação da ionização e desionização mais fiel ao fenômeno real. Vale salientar que, embora o modelo proposto nesta seção seja fortemente embasado no equacionamento proposto por [Liew e Darveniza \[47\]](#), difere no quesito de ser uma representação pontual. Já na trabalho de [Liew e Darveniza \[47\]](#), a representação que foi proposta é isotrópica em relação a uma haste nua vertical. Essa diferença, constitui um avanço considerável, uma vez que isso permite modelar eletrodos de quaisquer formatos

geométricos (e não só hastes verticais), considerando o fenômeno da ionização e desionização do solo. Tal contribuição pode ser amplamente explorada em trabalhos futuros, para estudos envolvendo aterramentos de diferentes tipos submetidos a correntes impulsivas.

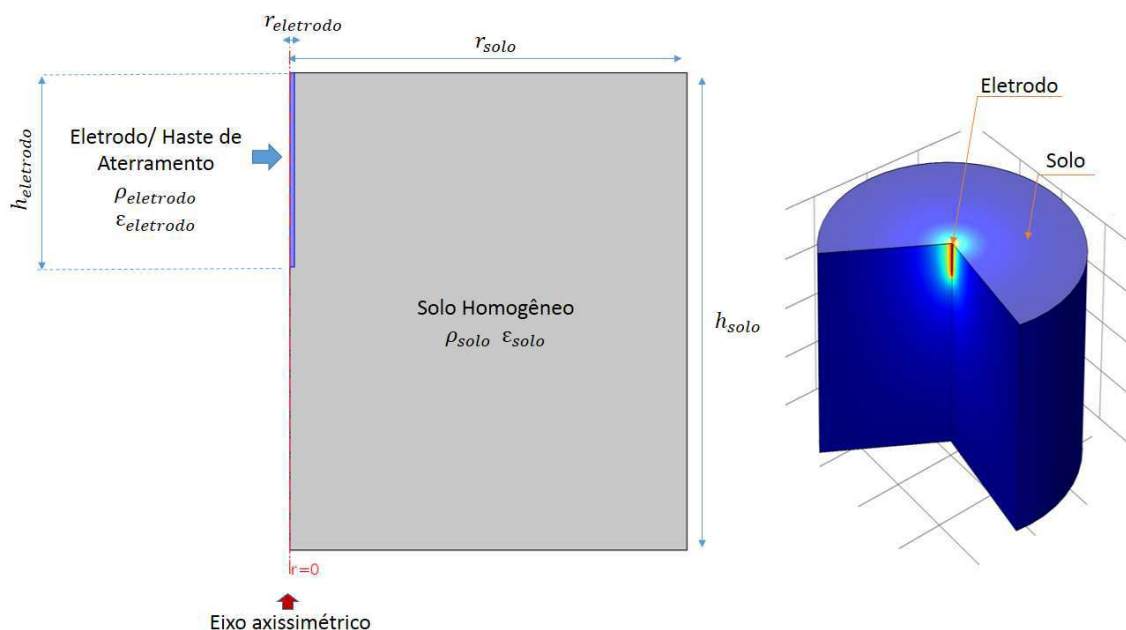
### 4.3 Validação da Implementação do Modelo de Ionização

Nesta seção, é apresentada a metodologia utilizada para realização do estudo de validação da implementação pontual do modelo dinâmico de ionização do solo mencionada na seção seção 4.2. Para tal, reproduziu-se, no *Comsol*, dois dos experimentos realizados por Liew e Darveniza [47], buscando-se verificar se a implementação do efeito da ionização utilizada reproduz os efeitos e fenômenos experimentais.

A literatura apresenta poucos trabalhos com resultados experimentais de hastes concretadas sob impulsos de corrente, por isso, para validação utilizou-se o trabalho de Liew e Darveniza [47], que estuda hastes nuas sob impulsos de corrente. Vale salientar que, em [47], são apresentados resultados com riqueza de detalhes, além de ser o trabalho adotado como base para modelar o efeito da ionização do solo. Assim, todos esses fatores mencionados apontam que o estudo apresentado em [47] é uma referência sólida para a validação da implementação do modelo de ionização.

O sistema foi modelado no *Comsol* utilizando uma representação axissimétrica 2D, conforme a Figura 4.4 apresenta. Esse tipo de representação geométrica possibilita que o tempo de simulação seja mais reduzido que quando se utiliza uma representação 3D pura no *Comsol*.

**Figura 4.4** – Representação geométrica da haste nua no *Comsol*.



Fonte: Produzida pelo autor.



Para a realização da validação, representou-se por meio de simulações no *Comsol* dois dos experimentos realizados por Liew e Darveniza [47]. No primeiro experimento foi aplicada uma forma de onda de tensão com formato aproximado de 90 kV 5/15  $\mu\text{s}^1$  em uma haste nua vertical com raio de 6,35 mm e comprimento 0,61 m. O solo considerado possuía 50  $\Omega\cdot\text{m}$  de resistividade, um gradiente de ionização de 110 kV/m e constantes de tempo  $\tau_1 = 2\mu \mu\text{s}$  e  $\tau_2 = 4,5 \mu\text{s}$ .

No segundo experimento realizado por Liew e Darveniza [47] e que foi reproduzido por meio de simulação, aplicou-se uma forma de onda de tensão de aproximadamente 200 kV 4/12  $\mu\text{s}$  na mesma haste utilizada no primeiro experimento e com o mesmo solo.

No estudo de validação, avaliou-se as diferenças entre o valor de pico experimental e simulado da corrente, bem como as similaridades entre as formas de onda da corrente e da impedância transitória.

## 4.4 Estudo da Haste Concretada *Versus* Haste Nua

Embora a técnica de utilização de concreto em aterramentos possa fornecer efetiva diminuição da resistência de baixa frequência, a mesma não é recomendada para todos os casos, conforme Rowland [39] sugeriu. A razão entre a resistividade do concreto e a resistividade do solo ( $\rho_{concreto}/\rho_{solo}$ ) indica o quão efetiva será a redução no valor da resistência de aterramento, por se substituir uma haste nua por uma concretada [17]. Assim, do ponto de vista de  $R_b$ , a utilização de hastes concretadas torna-se mais eficiente quanto maior for a resistividade do solo. No entanto, do ponto de vista da impedância transitória  $Z(t)$ , poucos trabalhos analisaram o comportamento da haste concretada para diferentes tipos de solos.

Para avaliar o comportamento da impedância transitória do ponto de vista da resistividade do solo, realizou-se simulações no *Comsol* considerando solos com resistividade de 50  $\Omega\cdot\text{m}$ , 100  $\Omega\cdot\text{m}$ , 500  $\Omega\cdot\text{m}$  e 2500  $\Omega\cdot\text{m}$ . Para cada tipo de solo, avaliou-se a impedância transitória tanto para uma haste nua quanto para uma haste concretada. Assim, com essa análise comparativa buscou-se avaliar a eficiência da haste concretada em relação à haste nua para diferentes resistividades de solo.

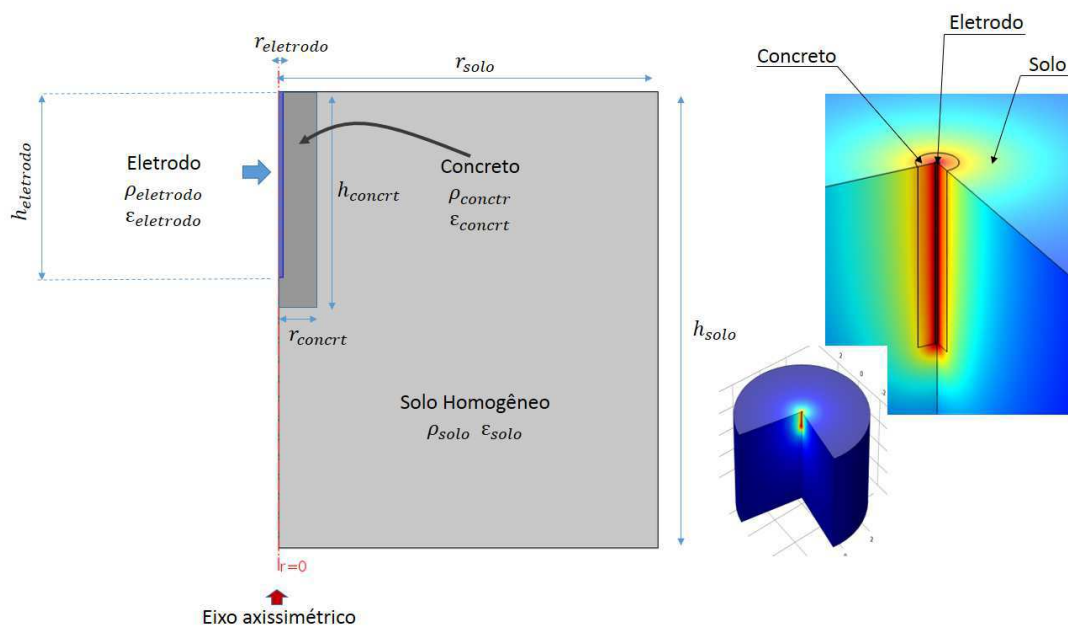
Na avaliação, a haste concretada apresenta o mesmo comprimento da haste nua (61 cm), diferindo apenas por um invólucro de concreto que possui raio de 5 cm e mesma comprimento vertical que o eletrodo interno. Assim, nas simulações o que foi variado foi apenas a resistividade do solo, sendo mantidas as características das hastes.

<sup>1</sup> Conforme a Norma IEEE Std. 4 [97], o formato de uma tensão ou corrente impulsiva pode ser descrito através de uma notação  $T_f/T_c \mu\text{s}$ , em que  $T_f$  é o tempo de frente da forma de onda e  $T_c$  é o tempo de cauda. O tempo de frente é a proximadamente o tempo até a ocorrência do pico da forma de onda. Já o tempo de cauda é o tempo até a forma de onda atingir a metade do seu valor de pico, após a ocorrência do pico da tensão.

Visando assegurar maior confiabilidade aos resultados, realizou-se também, simulações para obtenção dos valores de resistência de baixa frequência ( $R_b$ ), tanto para a haste nua quanto para a concretada, em cada tipo de solo avaliado. Para obtenção dos valores de  $R_b$ , realizou-se simulações com aplicação de uma tensão de 1 kV (contínua) na extremidade superior do eletrodo da haste. Tal tensão, para as situações avaliadas, não promove ionização do solo, o que assegura que, de fato, o valor obtido é a resistência de baixa frequência.

Na Figura 4.5 é apresentada a representação geométrica realizada para as simulações com a haste concretada, utilizando-se uma representação axissimétrica com revolução em  $360^\circ$ .

**Figura 4.5** – Representação geométrica da haste concretada no *Comsol*.



Fonte: Produzida pelo autor.

## 4.5 Estudo dos Parâmetros Geométricos da Haste Concretada

Quanto ao estudo dos parâmetros geométricos da haste, realizaram-se variações em cada um dos parâmetros avaliados mantendo-se os demais constantes. Cada parâmetro foi variado em incrementos fixos para se facilitar a análise. Observou-se o quanto os valores incrementais de cada parâmetro contribuiu na redução percentual da resistência de baixa frequência, do valor máximo da impedância transitória e no valor mínimo da impedância transitória.

Os parâmetros geométricos avaliados foram:

- Raio do concreto que envolve o eletrodo;

- Comprimento vertical da haste concretada;
- Comprimento vertical do concreto que envolve o eletrodo (mantendo-se fixo o comprimento do eletrodo);
- Profundidade da haste concretada em relação ao nível do solo.

No presente trabalho, buscando-se interconectar todas as etapas e visando facilitar o entendimento das análises, os valores das constantes físicas do eletrodo, bem como os valores de campo elétrico crítico e as constantes de tempo de ionização e desionização foram mantidas iguais às dos experimentos realizados por [Liew e Darveniza \[47\]](#) utilizados na etapa de validação.

Nas análises, objetivou-se encontrar sugestões de valores práticos dos parâmetros geométricos da haste concretadas para sua utilização em projetos de aterramento. Uma vez que poucos trabalhos da literatura fornecem indicações de dimensões e formato otimizado para a haste concretada, o presente estudo indica valores de raio de concreto, comprimento de concreto e profundidade da haste que conferem resposta transitória satisfatória e facilidade para fabricação e uso em sistemas de aterramento.

---

## Resultados e Análises

Neste capítulo, é apresentado o desenvolvimento e os resultados do presente trabalho. Inicialmente, é apresentada, na [seção 5.1](#), os resultados de uma aplicação da implementação da metodologia utilizada para modelar o processo de ionização do solo. Essa metodologia é descrita na [seção 4.2](#) do [Capítulo 4](#). A representação pontual do modelo dinâmico de ionização do solo é uma das etapas cruciais do trabalho, uma vez que o presente estudo estuda hastes concretadas com diferentes geometrias e leva em conta correntes de elevadas magnitudes, as quais, facilmente, ocasionam ionização do solo.

Na [seção 5.2](#), é apresentado uma validação da implementação pontual do modelo de ionização apresentada na seção anterior. Para isso realizou-se uma simulação que reproduz os resultados experimentais de um trabalho da literatura, assegurando que a implementação do modelo dinâmico de ionização é adequada para estudos mais detalhados.

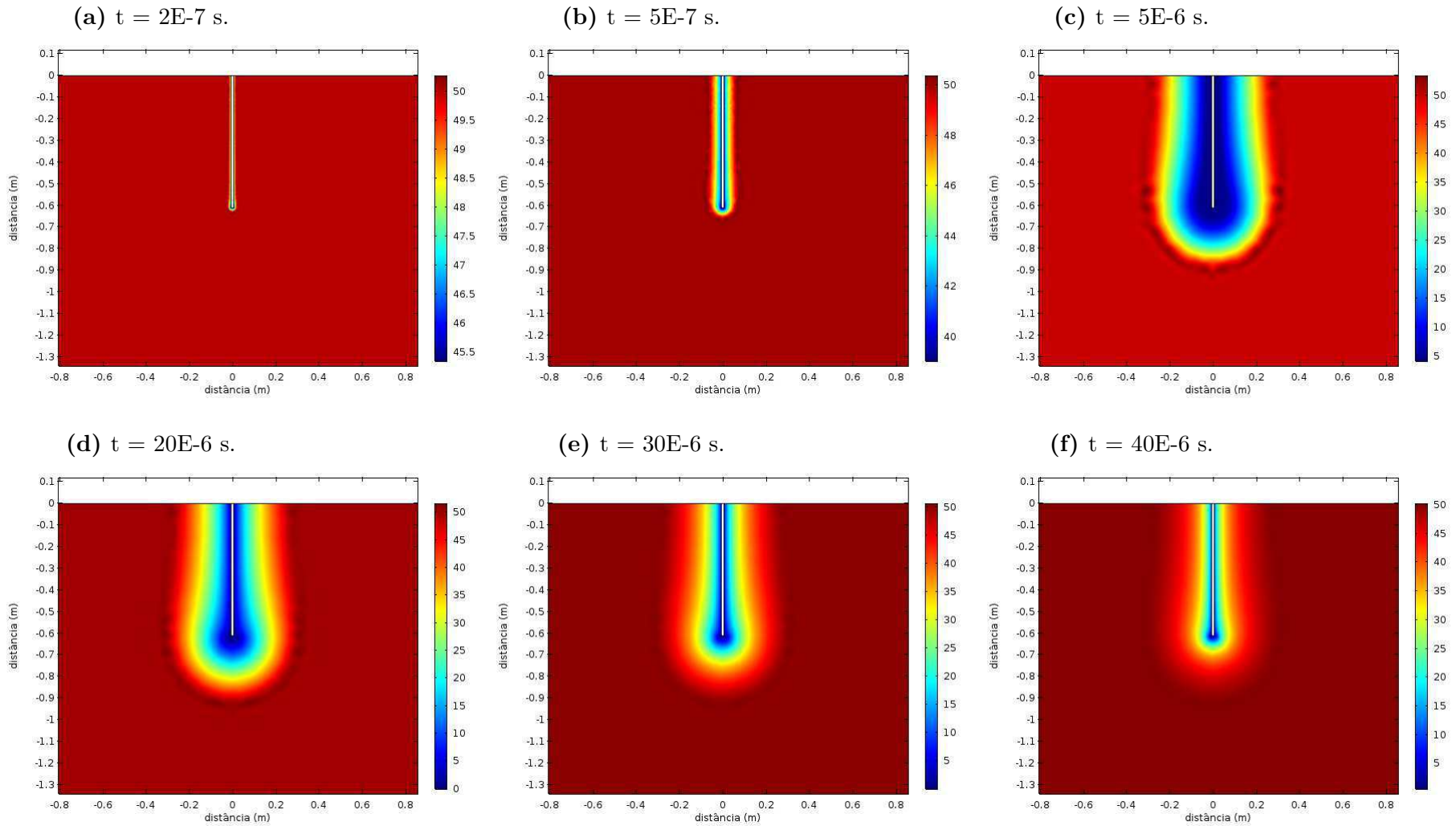
Na [seção 5.3](#), é apresentado um estudo comparativo entre uma haste de aterramento concretado e uma haste de aterramento nua (convencional). Essa análise comparativa é feita para três tipos de solos homogêneos de baixa, média e elevada resistividade, recorrendo-se sobre a eficiência de aterramentos concretados em relação ao aterramento convencional, bem como apontando-se as situações em que o aterramento envolvido por concreto é desaconselhado.

A [seção 5.4](#) apresenta uma análise apontando o efeito que cada parâmetro da haste concretada possui na resposta do aterramento. Para isso, avaliou-se o raio do invólucro de concreto, o comprimento vertical total da haste, o comprimento vertical do invólucro de concreto  $a$  e profundidade da haste no solo (como sendo a distância entre a cabeça da haste enterrada e a superfície do solo).

## 5.1 Implementação do Modelo Dinâmico de Ionização

O modelo de ionização dinâmico foi implementado conforme a [seção 4.2](#), possibilitando uma análise mais exata do fenômeno de ionização que o modelo dinâmico isotrópico. A [Figura 5.1](#) apresenta um exemplo de resultados obtidos através de uma simulação utilizando a implementação pontual do modelo dinâmico de ionização. A simulação consiste na aplicação de um impulso de tensão de com formato aproximado de 90 kV (5/15  $\mu$ s), na extremidade superior de uma haste de aterramento vertical de cobre. A resistividade estática do solo é de 50  $\Omega$ .m. Em cada uma das seis imagens, a barra colorida na lateral direita representa os valores de resistividade do solo. Pode-se observar que nas [Figuras 5.1a](#), [5.1b](#) e [5.1c](#) ocorre o processo de ionização, enquanto que nas [Figuras 5.1d](#), [5.1e](#) e [5.1f](#) ocorre o processo de desionização.

**Figura 5.1** – Exemplo de simulação utilizando o modelo de ionização implementado no presente trabalho. Gráficos da resistividade no solo, durante impulso de corrente aplicado em uma haste nua fincada em solo com  $50 \Omega.m$  de resistividade.



Fonte: Produzida pelo autor.

## 5.2 Validação da Implementação do Modelo de Ionização

Nesta seção são apresentados resultados que validam a implementação pontual do modelo de ionização apresentada na seção 5.1, a qual será utilizada subsequentemente para realização dos estudos com aterramentos concretados. Assim, assegura-se que os resultados apresentados nas próximas seções estarão embasados. A seguir, são apresentados os dois estudos de validação.

### 5.2.1 Validação I

No primeiro experimento, Liew e Darveniza [47] aplicaram uma forma de onda de tensão apresentada na Figura 5.2 (de aproximadamente 90 kV de pico) em uma haste com raio de 6,35 mm e comprimento 0,61 m.

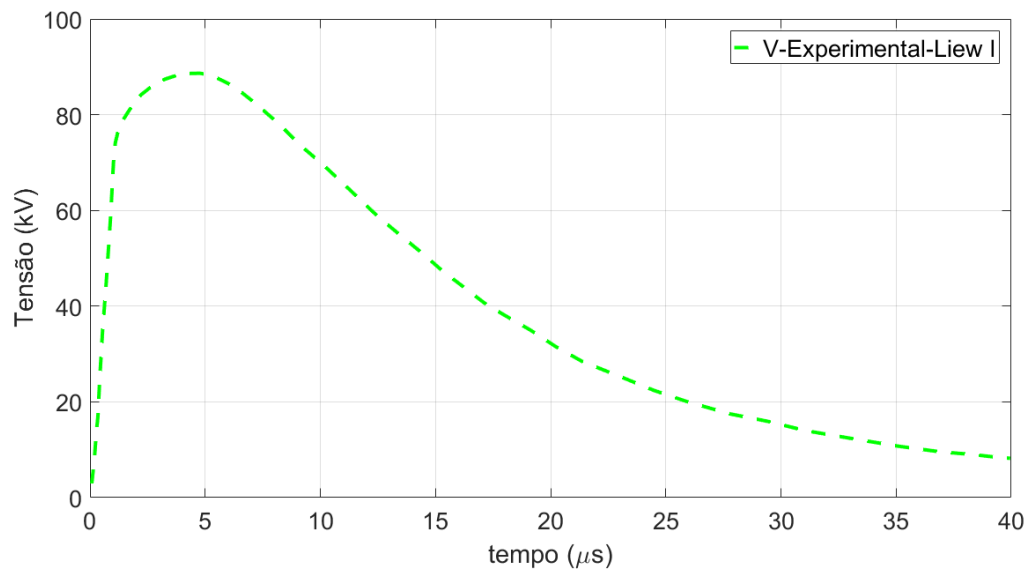
O solo no qual a haste foi fincada possui  $50 \Omega \cdot \text{m}$  de resistividade, um gradiente de ionização (campo elétrico crítico) de 110 kV/m e constantes de tempo  $\tau_1 = 2 \mu \text{s}$  e  $\tau_2 = 4,5 \mu \text{s}$ . Com esse arranjo experimental, a corrente que foi obtida apresentou um pico de aproximadamente 3,3 kA e o menor valor da impedância transitória medida foi de  $23,4 \Omega$ .

Para a realização da validação, modelou-se no *Comsol* o mesmo arranjo experimental, com solo e haste apresentando características idênticas às apresentadas em [47] e aplicou-se a mesma tensão, apresentada na Figura 5.2. A Tabela 5.1 apresenta os parâmetros utilizados nessa simulação de validação.

**Tabela 5.1** – Parâmetros da simulação de validação no *Comsol*.

Item	Valor	Descrição
$h_{\text{eletrodo}}$	0,61 m	Altura da haste de aterramento [47]
$r_{\text{eletrodo}}$	6,35 mm	Raio da haste de aterramento [47]
$\rho_{\text{eletrodo}}$	$16,7 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$	Resistividade do cobre (eletrodo)
$\epsilon_{\text{eletrodo}}$	$10 \cdot 10^6$	Permissividade relativa da haste
$h_{\text{solo}}$	10 m	Altura do solo no domínio de simulação.
$r_{\text{solo}}$	15 m	Raio do cilindro de solo simulado
$\rho_{0\text{solo}}$	$50 \Omega \cdot \text{m}$	Resistividade estática do solo [47]
$\tau_{1\text{solo}}$	$2 \mu \text{s}$	Constante de tempo de ionização do solo. [47]
$\tau_{2\text{solo}}$	$4,5 \mu \text{s}$	Constante de tempo de desionização do solo. [47]
$\epsilon_{\text{solo}}$	8	Permissividade relativa do solo
$E_c$	110 kV/m	Campo elétrico crítico do solo [47]

**Figura 5.2** – Forma de onda da tensão aplicada na haste, no primeiro experimento de Liew e Darveniza [47] avaliado.



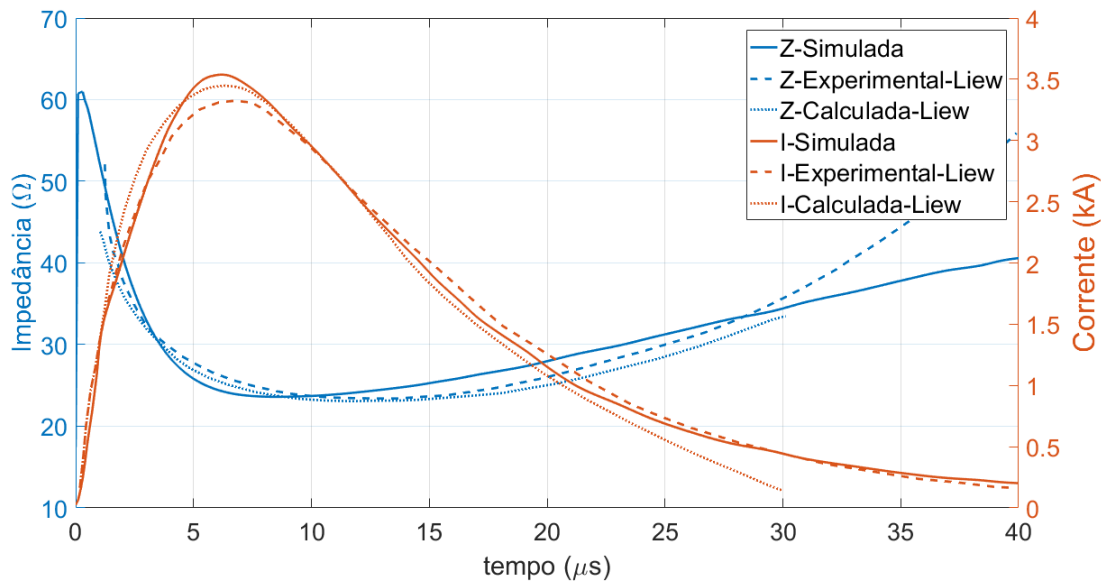
Fonte: Adaptado de Liew e Darveniza [47].

Os resultados da impedância e corrente obtidas após a simulação, bem como os valores experimentais e valores calculados apresentados por Liew e Darveniza [47] são apresentados na Figura 5.3. Observou-se que a corrente simulada apresentou forma de onda idêntica à experimental, diferindo apenas no valor de pico; sendo o valor de pico experimental de 3.538 A, enquanto o valor simulado de 3.324 A, resultando em uma diferença de 6,4%. Tal diferença não possui grande representatividade, uma vez que, na prática, os solos não são perfeitamente homogêneos e possuem granulometrias diferentes mesmo em um pequeno volume avaliado, o que deve ter levado a variações admissíveis entre modelo e experimento. No entanto, o fato da forma de onda simulada ser quase sobreposta à experimental é um forte indício de que o fenômeno foi representado satisfatoriamente. Além disso, pode-se observar que, a partir dos 20  $\mu\text{s}$ , a corrente simulada acompanha a forma de onda da corrente experimental de forma mais satisfatória que a corrente calculada por Liew e Darveniza [47], corroborando com a validação da implementação utilizada no presente trabalho.

A curva de impedância experimental foi extraída tal qual é apresentada em [47]; os autores apresentaram uma curva na qual os instantes iniciais não são descritos, mas apenas a partir de 2  $\mu\text{s}$ , aproximadamente.



**Figura 5.3** – Impedância e corrente obtidas pela simulação e respectivos valores experimentais obtidos por Liew e Darveniza [47].



Fonte: Produzida pelo autor.

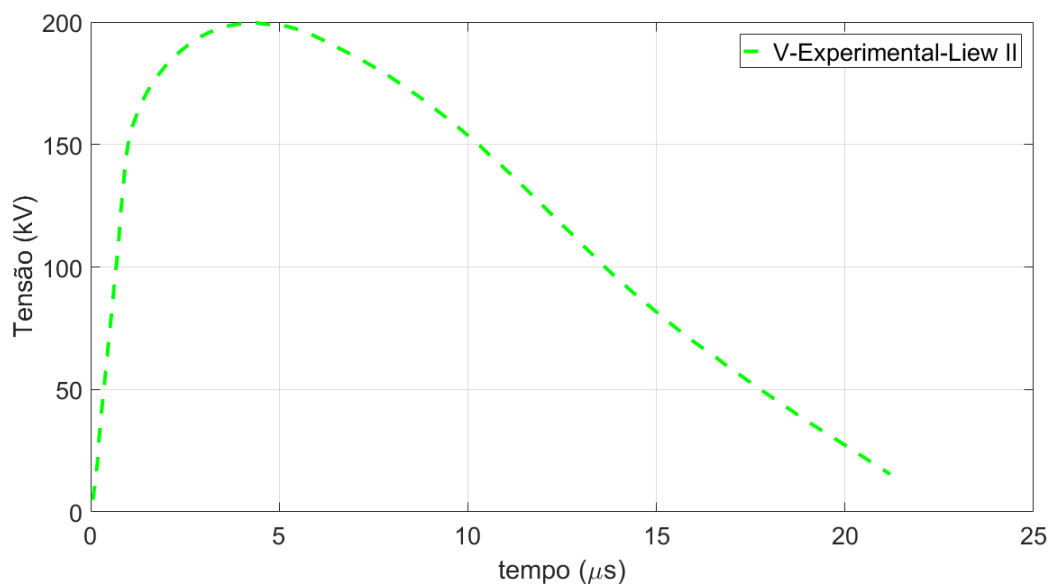
Pode-se observar que as curvas de impedância simulada e experimental apresentam grande similaridade até aproximadamente  $30 \mu\text{s}$ ; a partir daí apresenta discrepâncias. No entanto, antes desse instante de tempo, ocorrem tanto o valor de pico da impedância transitória, quanto o valor mínimo, os quais são os valores mais importantes a serem avaliados. Além disso, deve-se lembrar que, embora esteja-se utilizando o equacionamento matemático da ionização proposto por Liew e Darveniza [47], a implementação da ionização realizada no presente trabalho é pontual, enquanto a que é proposta em [47] é realizada por camadas elementares isotrópicas, com formato cilíndrico. Isso pode promover algumas discrepâncias, as quais poderiam ser sanadas pelo ajuste de  $\tau_1$  e  $\tau_2$ . No entanto, optou-se por não ajustar essas constantes de tempo para que a análise comparativa entre a implementação proposta e a implementação realizada por Liew e Darveniza [47] ficasse mais clara. Quanto à discrepância da impedância transitória após os  $30 \mu\text{s}$ , a mesma não afeta de forma significativa a análise uma vez que ocorre após os valores de máximo e mínimo de  $Z(t)$  e, além disso, pode ser observado que a respectiva curva de corrente após  $30 \mu\text{s}$  apresenta elevado grau de similaridade em relação à corrente experimental.

Vale salientar que, embora não tenha sido descrito na Figura 5.3 nos valores de tempo maiores que  $40 \mu\text{s}$ , a tendência é que o valor da impedância transitória convirja para o valor da resistência de baixa frequência do aterramentos. Isso ocorre por que à medida que a corrente decresce durante o processo de desionização o valor da resistividade do solo na região ionizada converge para o valor da resistividade estática (inicial) do solo ( $\rho_0$ ).

## 5.2.2 Validação II

No segundo experimento avaliado, Liew e Darveniza [47] aplicaram uma forma de onda de tensão apresentada na Figura 5.4 (de aproximadamente 200 kV de pico) na mesma haste e solo do primeiro experimento. Com esse arranjo experimental, a corrente que foi obtida apresentou um pico de 12,8 kA e o menor valor da impedância transitória medida foi de 14  $\Omega$ . Os parâmetros utilizados na simulação foram os mesmos apresentados na Tabela 5.1, sendo diferente, apenas, a forma de onda da tensão de excitação aplicada na haste.

**Figura 5.4** – Forma de onda da tensão aplicada na haste, no segundo experimento de Liew e Darveniza [47] avaliado.



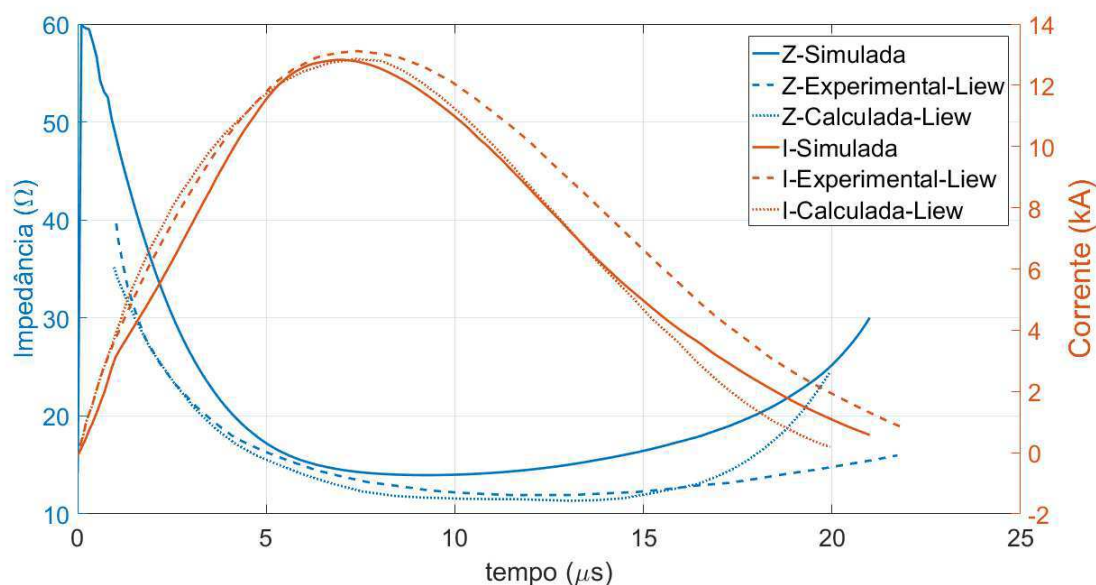
Fonte: Adaptado de Liew e Darveniza [47].

Os resultados da impedância e corrente obtidas após a simulação, bem como os valores experimentais e valores calculados apresentados por Liew e Darveniza [47] são apresentados na Figura 5.5. Observou-se que a corrente simulada apresentou forma de onda similar à experimental, apresentando, esta última, um valor de pico de 13,1 kA. Dessa forma, a diferença no pico da corrente simulada em relação à corrente experimental foi de -2,3%. Esta diferença no pico é pequeno e admissível, dada a natureza do fenômeno estudado. O fato da forma de onda da corrente simulada ser quase sobreposta à experimental é um forte indício de que o fenômeno foi representado satisfatoriamente.

A impedância transitória obtida da simulação bem como a impedância medida no experimento de Liew e Darveniza [47] são apresentadas na Figura 5.5. Observou-se que a curva de impedância simulada apresentou formato similar à curva experimental, no entanto, houve uma discrepância no valor mínimo da impedância transitória da haste, com diferença de 16,7 %. Provavelmente, no solo do experimento, devido a fatores externos,

a ionização se prolongou por um pouco mais de tempo que o equacionamento de Liew e Darveniza [47] previu. No entanto, tal fato não desabona o presente modelo, uma vez que a corrente que foi simulada foi quase sobreposta à corrente experimental, o que é um forte indício de que o fenômeno foi representado satisfatoriamente. Além disso, a corrente simulada não apresentou características inferiores à corrente calculada por Liew e Darveniza [47].

**Figura 5.5** – Impedância e corrente obtidas pela simulação e respectivos valores experimentais obtidos por Liew e Darveniza [47].



Fonte: Produzida pelo autor.

### 5.3 Haste concretada *versus* Haste nua

Buscando-se averiguar a eficiência da haste concretada em relação à haste nua para diferentes tipos de solo, nesta seção, serão apresentados resultados comparativos tanto da impedância transitória quanto da resistência de baixa frequência para uma haste de aterramento concretada e uma haste nua, considerando quatro tipos diferentes de solo. Esses quatro tipos são solos homogêneos com resistividade de  $50 \Omega \cdot m$ ,  $100 \Omega \cdot m$ ,  $500 \Omega \cdot m$  e  $2500 \Omega \cdot m$ . Para as quatro comparações, utilizou-se uma mesma haste nua (com 0,61 m de altura e 6,35 mm de raio) e uma mesma haste concretada padrão, composta por um eletrodo interno de cobre, com 0,61 m de altura e 6,35 mm de raio, envolvido por um invólucro cilíndrico de concreto com a mesma altura da haste de cobre e com raio de 5 cm. Considerou-se que o concreto possui resistividade de  $30 \Omega \cdot m$ , conforme Hallmark [38]. A forma de onda de tensão aplicada em todas as situações foi a mesma que a apresentada na Figura 5.2. Na Tabela 5.2, são apresentados de forma detalhada os parâmetros utilizados

nas simulações desta seção. Dessa forma, os resultados de impedância transitória e corrente obtidos das simulações são apresentados na [Figura 5.6](#).

**Tabela 5.2** – Parâmetros das simulações de comparação entre haste nua e haste concretada, em solos com resistividade de 50  $\Omega\cdot\text{m}$ , 100  $\Omega\cdot\text{m}$  e 2500  $\Omega\cdot\text{m}$ .

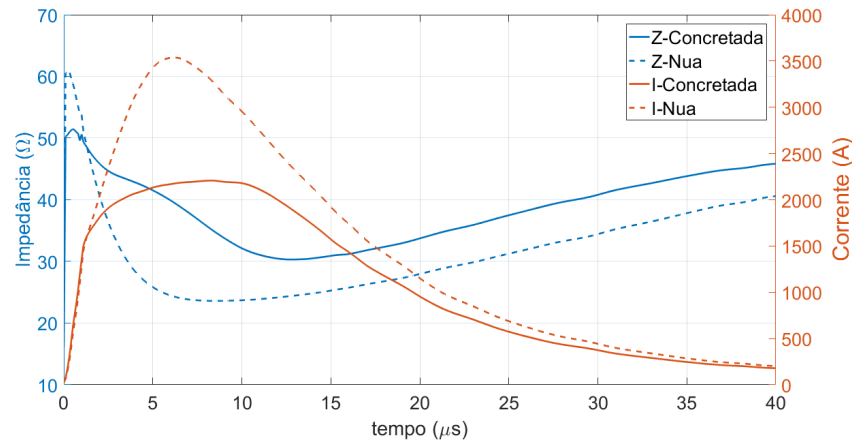
Item	Valor	Descrição
$h_{eletrodo}$	0,61 m	Altura do eletrodo [47]
$r_{eletrodo}$	6,35 mm	Raio do eletrodo [47]
$\rho_{eletrodo}$	$16,7 \cdot 10^{-9} \Omega\cdot\text{m}$	Resistividade do eletrodo (cobre)
$\epsilon_{haste}$	$10 \cdot 10^6$	Permissividade relativa da haste
$h_{solo}$	10 m	Altura do solo no domínio de simulação.
$r_{solo}$	15 m	Raio do cilindro de solo simulado
$\rho_{solo_0}$	50-100-500-2500 $\Omega\cdot\text{m}$	Resistividade estática do solo.
$\tau_{1_{solo}}$	2 $\mu\text{s}$	Constante de tempo de ionização do solo. [47]
$\tau_{2_{solo}}$	4,5 $\mu\text{s}$	Constante de tempo de desionização do solo. [47]
$\epsilon_{solo}$	8	Permissividade relativa do solo
$h_{concrct}$	0,61 m	Altura do cilindro de concreto.
$r_{concrct}$	5 cm	Raio do cilindro de concreto
$\rho_{concrct}$	30 $\Omega\cdot\text{m}$	Resistividade do concreto.
$\epsilon_{concrct}$	8	Permissividade relativa do concreto
$E_c$	110 kV/m	Campo elétrico crítico do solo [47]

Após a realização das simulações, montou-se a [Tabela 5.3](#), a qual apresenta os valores de resistência de baixa frequência ( $R_b$ ) e de impedância transitória máxima ( $Z_{max}$ ) e mínima ( $Z_{min}$ ), para haste nua e concretada, em cada tipo de solo. Além disso, nessa tabela, são apresentados as reduções percentuais de ( $R_b$ ) e de impedância transitória máxima ( $Z_{max}$ ) e mínima ( $Z_{min}$ ) da haste concretada em relação à haste nua, para cada respectiva resistividade do solo.

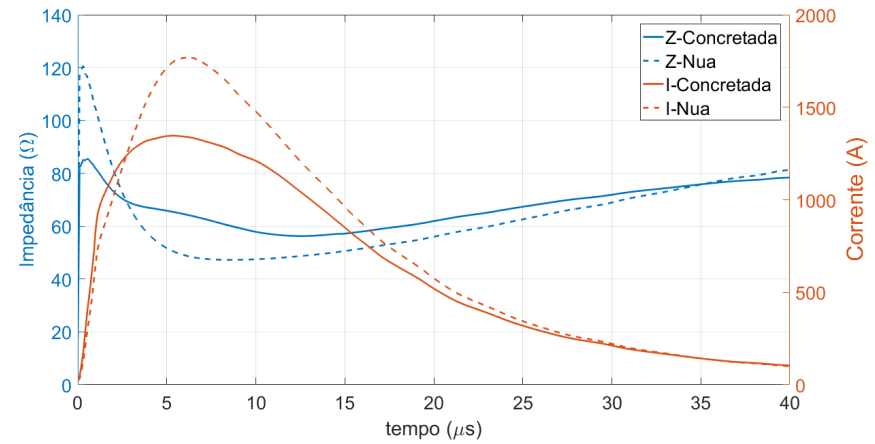
Na [Figura 5.6](#), pode-se observar que a presença do concreto não só reduz o pico da impedância transitória como suaviza a curva de impedância. Assim, nos quatro tipos de solo avaliado o  $dZ/dt$  da haste concretada apresenta menores valores que o da haste nua. Isso implica diretamente no  $dV/dt$  da onda de tensão que se propaga no solo durante a aplicação do impulso de tensão. Nos sistemas de aterramentos, é desejável que o  $dV/dt$  na superfície do solo seja sempre o menor possível, uma vez que isso evita o surgimento de tensões elevadas entre dois pontos distintos do aterramento, podendo levar a danificação de equipamentos eletrônicos conectados ao aterramento. Assim, pelos resultados apresentados, do ponto de vista da propagação de tensão no solo, pode-se observar que a haste concretada possui melhor resposta transitória que a haste nua, uma vez que apresenta curvas de impedância com valores de  $dZ/dt$  menores que a haste nua, para solos com baixa, média e elevada resistividade.

**Figura 5.6** – Impedância transitória e corrente em haste nua e concretada para solos de 50 Ω.m, 100 Ω.m, 500 Ω.m e 2500 Ω.m.

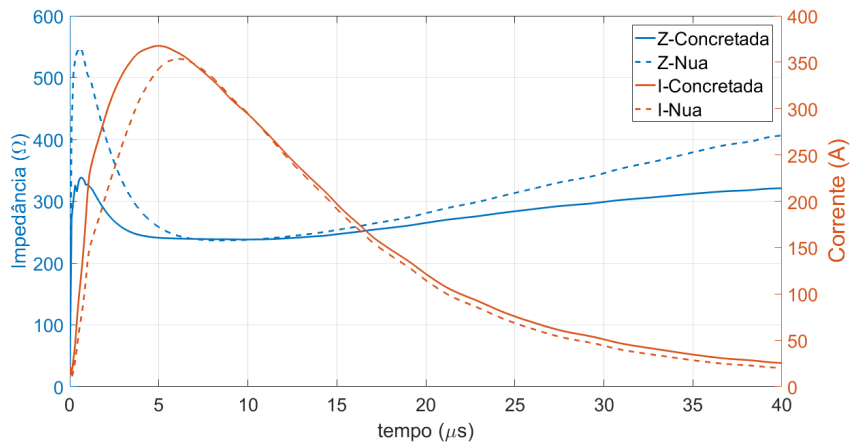
(a) Solo de 50 Ω.m.



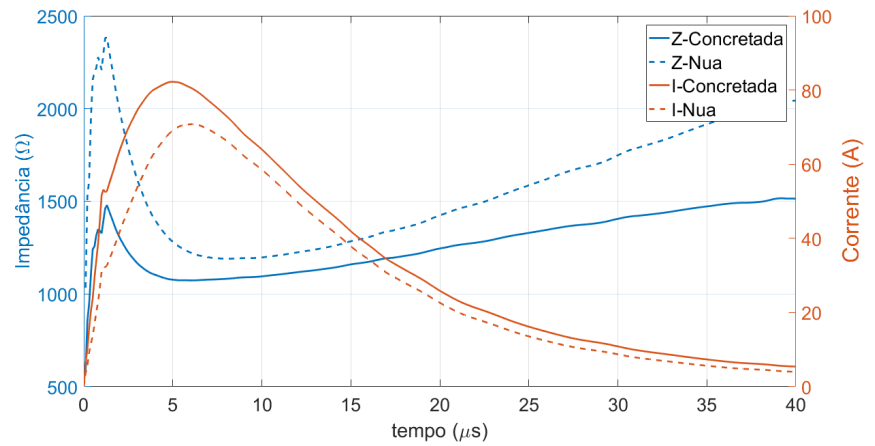
(b) Solo de 100 Ω.m.



(c) Solo de 500 Ω.m.



(d) Solo de 2500 Ω.m.



Fonte: Produzida pelo autor.

**Tabela 5.3** – Resistência de baixa frequência ( $R_b$ ) e impedância máxima ( $Z_{max}$ ) e mínima ( $Z_{min}$ ) para haste nua (Nua) e haste concretada (Concret.) em solos com diferentes resistividades ( $\rho_{solo}$ ).

$\rho_{solo}$ ( $\Omega.m$ )	$R_b$ ( $\Omega$ )			$Z_{max}$ ( $\Omega$ )			$Z_{min}$ ( $\Omega$ )		
	Nua	Concret.	(%)	Nua	Concret.	(%)	Nua	Concret.	(%)
<b>50</b>	62,9	52,0	<b>-17,3</b>	61,1	51,5	<b>-15,7</b>	23,6	30,3	<b>28,4</b>
<b>100</b>	120,5	85,4	<b>-29,1</b>	125,8	87,1	<b>-30,8</b>	47,2	56,2	<b>19,1</b>
<b>500</b>	629,2	364,8	<b>-42,0</b>	548,8	338,4	<b>-38,3</b>	236,5	238,3	<b>0,8</b>
<b>2500</b>	3145,8	1.748,7	<b>-44,4</b>	2363,4	1.474,2	<b>-37,6</b>	1189,5	1.072,9	<b>-9,8</b>

Da [Tabela 5.3](#), pode-se observar que, em um solo com resistividade de 50  $\Omega.m$ , a utilização de uma haste concretada ao invés de uma nua promove uma redução de -17,3% em  $R_b$ . À medida que o solo apresenta uma resistividade maior, a redução percentual do valor de  $R_b$  da haste concretada em relação à nua aumenta. No entanto, pode-se notar que, de um solo com 500  $\Omega.m$  para um com 2500  $\Omega.m$ , houve um aumento de eficiência em apenas 2,4%, o que indica que, em solos com alta resistividade (acima de 2500  $\Omega.m$ ), a resistência de baixa frequência da haste concretada não é muito menor que a da mesma haste em um solo com aproximadamente 500  $\Omega.m$ . Assim, o simples fato de um solo ter maior resistividade que outro não garante que o aterramento concretado será mais eficiente. Por outro lado, pode-se explorar alterações na geometria da haste de aterramento para se buscar maiores reduções no valor de  $R_b$ , o que será apresentado nas seções posteriores do presente trabalho.

Na análise da resposta impulsiva de aterramentos, o valor máximo da impedância transitória  $Z_{max}$  possui grande importância, uma vez que, durante a aplicação de um impulso de corrente no aterramento, os valores de potenciais no solo são diretamente proporcionais à impedância do aterramento. Por esse motivo, sempre é desejável desenvolver técnicas para redução do valor de  $Z_{max}$ , aumentando a eficiência do sistema de aterramento. Assim, do ponto de vista da impedância transitória, pode-se observar na [Tabela 5.3](#) que, em solos com resistividade maior ou igual a 100  $\Omega.m$ , a haste concretada apresenta eficiência de 30% ou mais em relação à haste nua. No entanto, embora continue superior a 30%, para um solo com resistividade de 2500  $\Omega.m$ , a eficiência é menor que para um solo de 500  $\Omega.m$ . Da mesma forma que a resistência de baixa frequência, o valor máximo da impedância transitória  $Z_{max}$  aparenta não reduzir indefinidamente com o aumento da resistividade do solo.

Em solos com resistividade de 50  $\Omega.m$  e 100  $\Omega.m$ , o valor mínimo da impedância transitória ( $Z_{min}$ ) da haste nua foi inferior ao da haste concretada. No caso de solo com resistividade de 500  $\Omega.m$ , a haste concretada apresentou um valor de impedância transitória mínima similar ao da haste nua. Já para o solo com resistividade de 2500  $\Omega.m$ , a haste concretada apresentou um valor mínimo de impedância transitória inferior ao apresentado pela haste nua, sendo o único caso avaliado em que a forma de onda da

impedância transitória  $Z(t)$  da haste concretada é inferior à da haste nua em todos os instantes de tempo. No entanto, embora  $Z_{min}$  tenha sido avaliado para tornar o trabalho mais detalhado, o valor de  $Z_{max}$  é o mais crítico na análise da resposta impulsiva, uma vez que determinará os valores de potenciais máximos no solo.

Após observar os resultados, para solos com resistividade maior que  $50 \Omega.m$ , concluiu-se que, para a forma de onda de tensão aplicada, a haste concretada apresenta-se mais eficiente que a haste nua tanto em relação a resistência de baixa frequência ( $R_b$ ) quanto em relação à impedância transitória  $Z(t)$  (dado um concreto com resistividade de  $30 \Omega.m$ ).

## 5.4 Resposta dos Parâmetros da Haste Concretada

Nesta seção são apresentados os resultados referentes à resposta transitória de uma haste de aterramento vertical concretada. A implementação pontual do modelo de ionização dinâmico foi realizada, de tal forma que ocorre ionização (e desionização) nas regiões do solo em que o módulo do campo elétrico ultrapassa o valor de campo elétrico crítico. Assim, com essa abordagem, pode-se avaliar diferentes configurações geométricas de uma haste de aterramento concretada fincada no solo, obtendo-se, dessa forma, um estudo detalhado da resposta do aterramento em função das suas características geométricas, entre as quais, avalia-se:

- raio do concreto envolvente;
- comprimento vertical total da haste;
- comprimento do concreto envolvente;
- profundidade da haste em relação ao nível do solo.

Para cada análise, utilizou-se como referência os parâmetros apresentados na [Tabela 5.4](#), mantendo-se todos os parâmetros fixos e variando-se apenas o parâmetro que está sob análise. Em cada subseção a seguir, apresenta-se qual o parâmetro que está sendo avaliado, sendo este o único que é variado para a realização da análise. Por exemplo, na [subseção 5.4.4](#), é avaliada a profundidade da haste (distância entre o topo da haste e a superfície do solo); assim, utilizou-se todos os parâmetros da [Tabela 5.4](#), variando-se apenas o parâmetro *profund.*, o qual tomará valores diferentes de zero. Considerou-se um solo com resistividade de  $500 \Omega.m$  para todas as análises, uma vez que, em um solo com essa resistividade, o valor de impedância mínima da haste concretada ( $Z_{min}$ -concretada) é próximo ao valor mínimo da impedância da haste nua ( $Z_{min}$ -nua), como pode ser observado na [Figura 5.6c](#) da [seção 5.3](#). Dessa forma, pode-se avaliar de forma mais precisa o aumento de eficiência

da haste concretada, em relação à haste nua, quando os parâmetros da haste concretada são variados.

**Tabela 5.4** – Tabela de referência para a análise da resposta dos parâmetros.

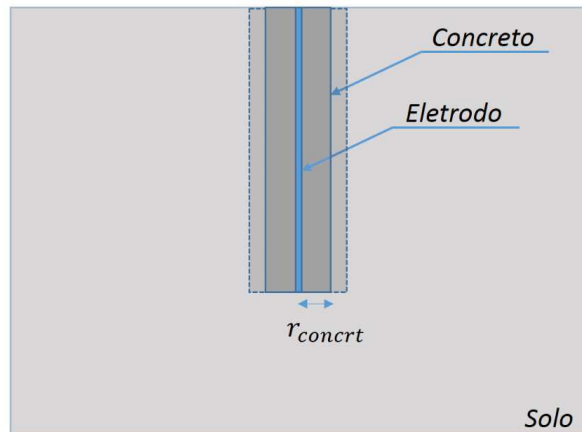
Item	Valor	Descrição
$h_{eletrodo}$	0,61 m	Altura do eletrodo de cobre
$r_{eletrodo}$	6,35 mm	Raio do eletrodo de cobre
$\rho_{eletrodo}$	$16,7 \cdot 10^{-9} \Omega.m$	Resistividade do eletrodo de cobre
$\epsilon_{eletrodo}$	$10 \cdot 10^6$	Permissividade relativa da haste
$h_{solo}$	10 m	Altura do solo simulado.
$r_{solo}$	15 m	Raio do cilindro de solo simulado
$\rho_{0_{solo}}$	500 $\Omega.m$	Resistividade estática do solo.
$\tau_{1_{solo}}$	2 $\mu s$	Constante de tempo de ionização do solo.
$\tau_{2_{solo}}$	4,5 $\mu s$	Constante de tempo de desionização do solo.
$\epsilon_{solo}$	8	Permissividade relativa do solo
$h_{concreto}$	0,61 m	Altura do cilindro de concreto.
$r_{concreto}$	5 cm	Raio do cilindro de concreto
$\rho_{concreto}$	30 $\Omega.m$	Resistividade do concreto.
$\epsilon_{concreto}$	8	Permissividade relativa do concreto
<i>profund.</i>	0 cm	Profundidade da haste em relação à superfície
$E_c$	110 kV/m	Campo elétrico crítico do solo [47]

### 5.4.1 Raio do Concreto

Nesta subseção, são apresentados os resultados obtidos para simulações nas quais varia-se o raio do concreto envolvente de uma haste concretada, conforme a [Figura 5.7](#) ilustra. Vale salientar que, aqui, entende-se por raio do concreto a medida que adicionada do valor do raio do eletrodo de cobre resulta no raio total da haste de aterramento concretada ( $r_{total} = r_{eletrodo} + r_{concreto}$ ). Para realização da análise, simulou-se uma haste de aterramento nua e uma haste de aterramento com valores de  $r_{concreto}$  de 2 cm a 10 cm, variando de 2 em 2 centímetros. Para isso, configurou-se o parâmetros de simulação conforme a [Tabela 5.4](#), variando-se apenas o parâmetro  $r_{concreto}$ .

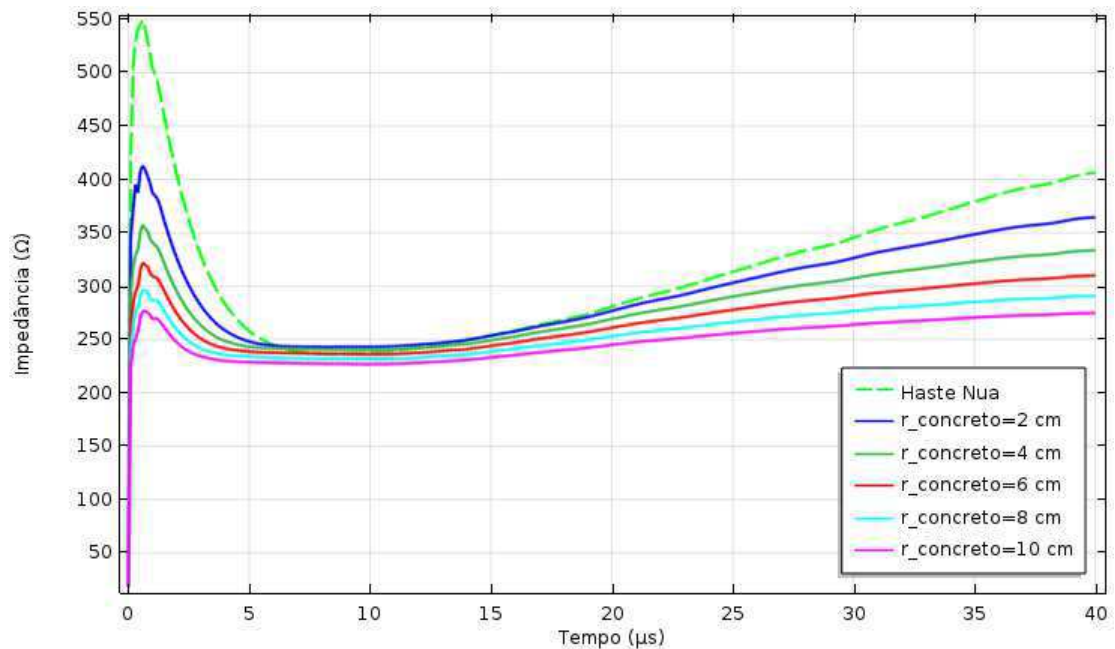
A [Figura 5.8](#) indica que o aumento do raio do concreto envolvente reduz o  $dZ/dt$  da impedância transitória, o que implica diretamente na redução do  $dV/dt$  da onda de tensão propagada no solo, evitando-se tensões capazes de danificar equipamentos eletrônicos conectados ao aterramento durante a incidência de um impulso ou surto de corrente no aterramento.



**Figura 5.7** – Ilustração da variação do raio do concreto.

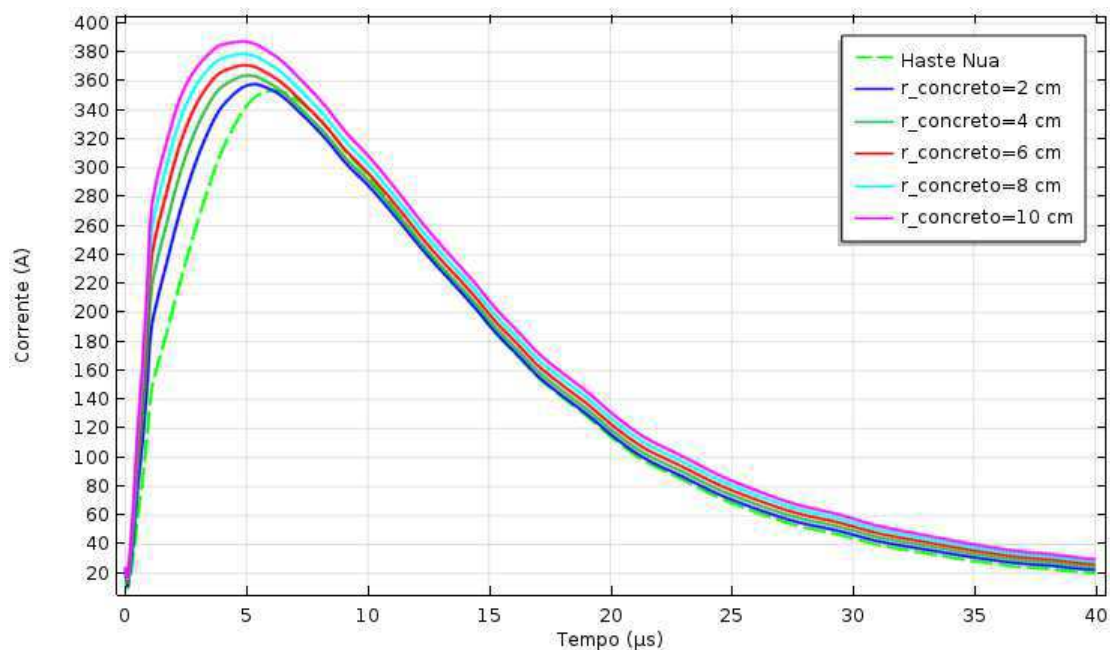
Fonte: Produzida pelo autor.

Na [Figura 5.8](#) são apresentadas as curvas de impedância transitória obtidas após as simulações para cada valor de raio de concreto, já na [Figura 5.9](#) são apresentadas as respectivas correntes.

**Figura 5.8** – Impedância da haste para diferentes raios de concreto envolvente em um solo de  $500 \Omega \cdot m$ .

Fonte: Produzida pelo autor.

**Figura 5.9** – Corrente obtida na haste para diferentes raios de concreto envolvente em um solo de  $500 \Omega.m$ .



Fonte: Produzida pelo autor.

Realizou-se, também, a verificação dos valores de resistência de baixa frequência ( $R_b$ ) das hastes através de simulações, aplicando-se na haste uma forma de onda contínua de tensão no valor de 1 kV. Assim, pôde-se construir uma tabela com os valores de resistência ( $R_b$ ) e com os valores de impedância transitória máxima e mínima, conforme a [Tabela 5.5](#). Além disso, na tabela, estão apresentados os valores de redução percentual de  $R_b$ ,  $Z_{max}$  e  $Z_{min}$  em relação à haste nua, permitindo que seja avaliado de forma mais precisa a redução nos valores de resistência e impedância transitória quando varia-se o raio do concreto envolvente.

**Tabela 5.5** – Resistências e Impedâncias para variações no raio do concreto.

$r_{concreto}$	$R_b$ ( $\Omega$ )	$R_b$ (%)	$Z_{max}$ ( $\Omega$ )	$Z_{max}$ (%)	$Z_{min}$ ( $\Omega$ )	$Z_{min}$ (%)
<b>0 cm - haste nua</b>	629,2	-	548,8	-	236,5	-
<b>2 cm</b>	454,7	<b>-27,7</b>	412,9	<b>-24,8</b>	243,0	<b>2,7</b>
<b>4 cm</b>	387,7	<b>-38,4</b>	357,5	<b>-34,9</b>	240,2	<b>1,6</b>
<b>6 cm</b>	346,1	<b>-45,0</b>	322,2	<b>-41,3</b>	236,1	<b>-0,2</b>
<b>8 cm</b>	316,5	<b>-49,7</b>	296,3	<b>-46,0</b>	231,7	<b>-2,0</b>
<b>10 cm</b>	283,8	<b>-54,9</b>	276,7	<b>-49,6</b>	226,9	<b>-4,1</b>

Pode-se observar na [Tabela 5.5](#) que o aumento de  $r_{concreto}$  reduz significativamente a resistência de baixa frequência da haste ( $R_b$ ). Por exemplo, para um  $r_{concreto} = 10$  cm, a redução percentual no valor da resistência da haste (em relação à haste nua) é de -54,9%, o que é uma redução expressiva. No entanto, como o foco da análise do presente trabalho

é avaliar o aterramento sob condições de impulsos de corrente, as melhores variáveis para se avaliar são  $Z_{max}$  e  $Z_{min}$ , sendo a mais importante das duas a impedância transitória máxima  $Z_{max}$ . Isso se deve ao fato de que os maiores valores de potencial na superfície do solo são diretamente proporcionais ao valor máximo da impedância transitória. Assim, um grande foco das análises do presente trabalho é  $Z_{max}$ .

Da [Tabela 5.5](#), observa-se que o aumento do raio do concreto ocasiona diminuições em  $Z_{max}$ , que vai desde -24,8%, quando  $r_{concreto} = 2$  cm, até -49,6%, quando  $r_{concreto} = 10$  cm. No entanto, à medida que o raio do concreto cresce, os incrementos de  $r_{concreto}$  passam a contribuir de forma menos expressiva com  $Z_{max}$ , como pode-se observar na [Figura 5.8](#). Por outro lado, o valor de  $Z_{min}$  teve variações muito pequenas, com o aumento do raio do concreto. De uma forma geral, os resultados apontam que o aumento do raio do concreto não só diminui consideravelmente a resistência de baixa frequência como, também, o valor máximo da impedância transitória, o que torna esse parâmetro uma característica da haste concretada que pode ser explorada para obtenção de aterramentos mais eficientes em solos de alta resistividade.

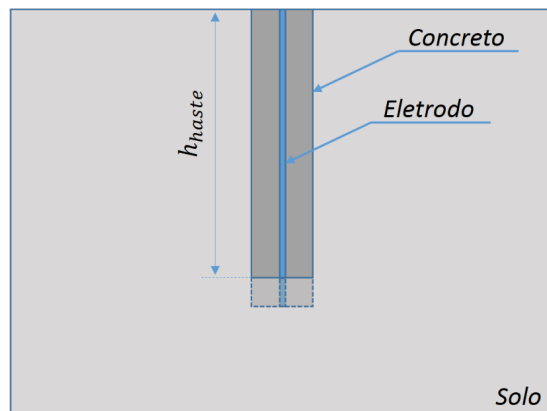
Os resultados mostraram que, de um raio com 8 cm para um com 10 cm, o incremento na redução percentual é de apenas 3,6% em  $Z_{max}$ . Assim, do ponto de vista técnico, hastes com raio maior que 10 cm não tendem a possuir um aprimoramento substancial em relação a uma haste de exatamente 10 cm de raio. Além disso, do ponto de vista de praticidade, convém que a haste não tenha um raio muito maior que 10 cm. Utilizar hastes concretadas com raio muito elevado pode exigir maior esforço para a perfuração do orifício no solo, principalmente quando o sistema de aterramento tem elevadas dimensões. Assim, sugere-se, como uma solução de custo benefício razoável, utilizar hastes concretas com 8 cm de raio de concreto envolvente, obtendo-se, dessa forma, um melhoramento de aproximadamente 50%, tanto na resistência de baixa frequência, quanto na impedância transitória, por haste.

#### 5.4.2 Comprimento total da haste

Nesta subseção, é apresentado o efeito que a variação do comprimento vertical da haste concretada tem na impedância transitória. A [Figura 5.10](#) ilustra a variação do comprimento vertical da haste concretada. Para tal, considerou-se que o eletrodo de cobre que é envolvido pelo concreto possui o mesmo comprimento vertical que o cilindro de concreto que o envolve, sendo assim, variou-se o comprimento de ambos igualmente. Simulou-se uma haste concretada com 40, 60, 80, 100 e 120 cm de comprimento e comparou-se com uma haste nua de 61 cm. A [Figura 5.11](#) apresenta os valores de impedância transitória obtidos nas simulações, já a [Figura 5.12](#) apresenta as respectivas correntes. Na [Tabela 5.6](#) pode-se observar os valores de resistência de baixa frequência ( $R_b$ ), de impedância transitória máxima ( $Z_{max}$ ) e mínima ( $Z_{min}$ ), bem como as variações percentuais

em relação aos valores obtidos na simulação da haste nua.

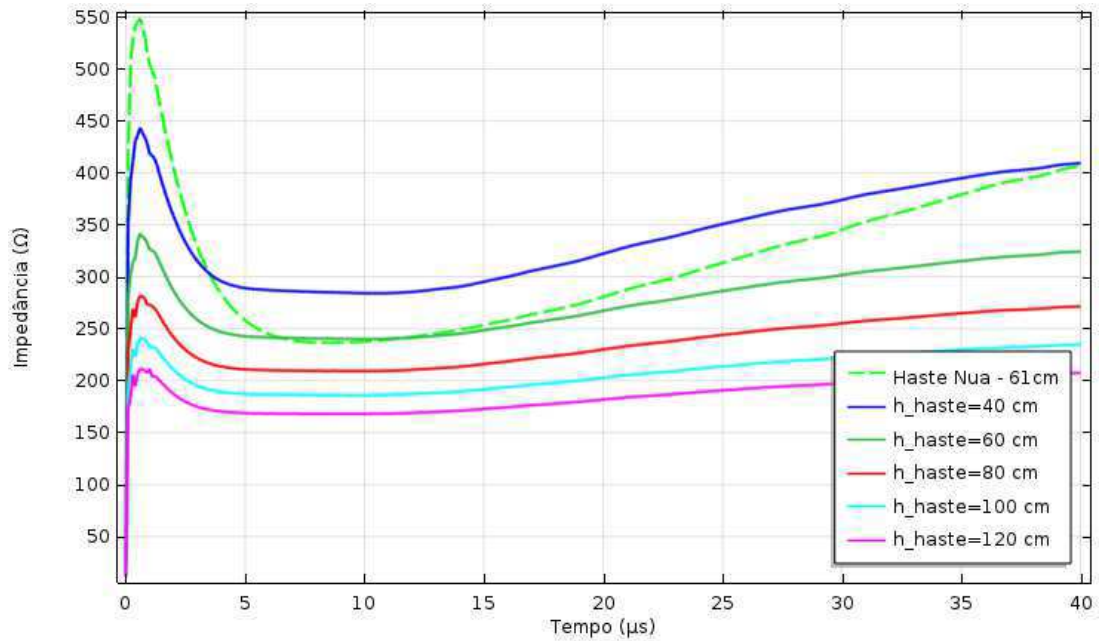
**Figura 5.10** – Ilustração da variação do comprimento vertical da haste concretada.



Fonte: Produzida pelo autor.

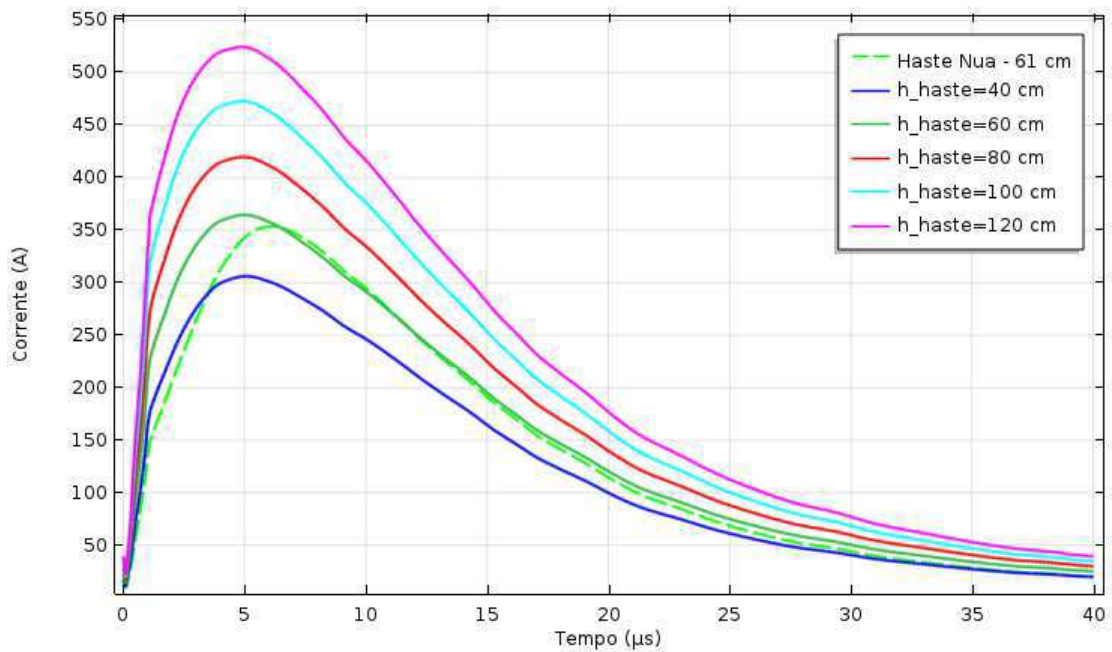
A [Figura 5.11](#) indica que o aumento no comprimento total da haste reduz consideravelmente o  $dZ/dt$  da curva de impedância transitória, sendo um parâmetro que pode ser explorado em projetos de aterramentos para que se evite tensões no solo com elevado  $dV/dt$ . Dessa forma, protege-se equipamentos eletrônicos, como por exemplo, relés digitais e sensores em subestações de alta tensão, durante a condução de correntes impulsivas ao aterramento devido à descargas atmosféricas ou surtos de manobra. O concreto suaviza o campo elétrico ao redor do eletrodo, fazendo com que a ionização ocorra de forma mais controlada. Por outro lado, nos casos em que a resistividade do solo é menor que a do concreto, a utilização de concretagem ao redor do eletrodo de aterramento ocasiona uma redução da resistência elétrica nas proximidades do eletrodo, o que implica em uma redução de impedância durante surtos de corrente. Já o aumento do comprimento da haste garante que a área de contato da haste concretada com o solo se eleve, o que, também, reduz a impedância transitória observada.

**Figura 5.11** – Impedância da haste concretada para diferentes comprimentos em um solo de 500  $\Omega$ .m.



Fonte: Produzida pelo autor.

**Figura 5.12** – Corrente obtida na haste concretada para diferentes comprimentos em um solo de 500  $\Omega$ .m.



Fonte: Produzida pelo autor.

**Tabela 5.6** – Resistências e Impedâncias para variação do comprimento total da haste.

$h_{\text{haste}}$	$R_b$ ( $\Omega$ )	$R_b$ (%)	$Z_{\text{max}}$ ( $\Omega$ )	$Z_{\text{max}}$ (%)	$Z_{\text{min}}$ ( $\Omega$ )	$Z_{\text{min}}$ (%)
<b>61 cm - haste nua</b>	629,2	-	548,8	-	236,5	-
<b>40 cm</b>	481,1	<b>-23,5</b>	443,5	<b>-19,2</b>	284,2	<b>20,2</b>
<b>60 cm</b>	368,9	<b>-41,4</b>	341,7	<b>-37,7</b>	240,1	<b>1,5</b>
<b>80 cm</b>	302,6	<b>-51,9</b>	281,8	<b>-48,7</b>	209,2	<b>-11,5</b>
<b>100 cm</b>	258,2	<b>-59,0</b>	241,2	<b>-56,0</b>	186,1	<b>-21,3</b>
<b>120 cm</b>	226,0	<b>-64,1</b>	211,5	<b>-61,5</b>	168,1	<b>-28,9</b>

Os resultados apresentados na [Tabela 5.6](#) indicam que o aumento do comprimento da haste concretada reduz os valores de impedância transitória, no entanto, à medida que o comprimento é elevado, os incrementos na redução da impedância diminuem. Isso pode ser verificado observando-se que, para uma haste concretada de 40 cm, um acréscimo de 20 cm provoca maior redução da impedância transitória que para uma haste de 100 cm. Isso indica que, assim como para hastes nuas, existe um comprimento efetivo para hastes concretadas, não sendo viável aumentar o comprimento indefinidamente para obter menores valores de impedância de aterramento. Esse fato já foi apontado para hastes de aterramento nuas, relacionando-se que o aumento do comprimento da haste eleva a indutância da haste, fazendo com que a corrente impulsiva não penetre em camadas mais profundas no solo. No entanto, as presentes simulações não levam em conta o efeito indutivo, o que mostra que, mesmo assim, existe um limite prático para comprimento de haste de aterramento concretadas, considerando-se a ionização do solo.

Diferentemente do raio do concreto ( $r_{\text{concreto}}$ ), os aumentos na altura da haste reduzem tanto  $Z_{\text{max}}$  quanto  $Z_{\text{min}}$ , o que, por sua vez, implica em tensões de passo menores na superfície do solo. Essa redução de  $Z_{\text{max}}$  e  $Z_{\text{min}}$  proporcionam reduções do  $dZ/dt$ , o que por sua vez reduz o  $dV/dt$  das tensões impulsivas que se propagam no solo após a condução de uma corrente impulsiva à terra.

Outro importante fato a ser observado é o de que uma haste concretada com 40 cm de altura apresentou um valor de  $R_b$  e  $Z_{\text{max}}$  quase 20% menor que o de uma haste nua convencional com 61 cm. Ou seja, uma haste concretada, mesmo apresentando altura menor que uma haste nua, pode ser mais eficiente quanto à resposta impulsiva. Logo, a adição de concreto ao aterramento pode permitir a redução do comprimento dos eletrodos, reduzindo o custo econômico do aterramento e, ainda assim, conferir tanto uma resistência de baixa frequência quanto uma impedância transitória consideravelmente menores que um aterramento convencional com hastes nuas. Assim, após analisar os resultados, pode-se observar que a altura da haste concretada é um parâmetro de grande importância no projeto de aterramento com hastes concretadas, do ponto de vista de resposta impulsiva.

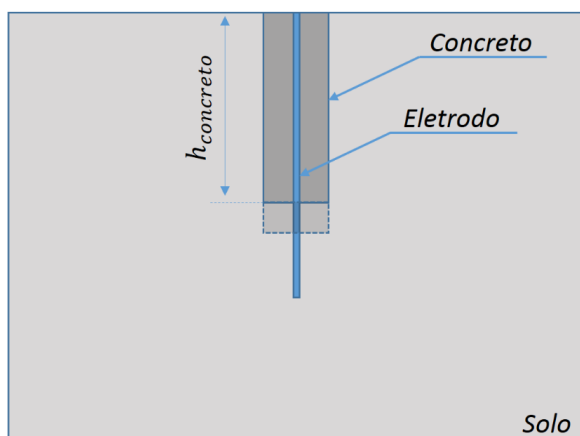
### 5.4.3 Comprimento do Concreto

Nesta subseção, apresenta-se a resposta da impedância transitória de uma haste concretada quando varia-se o comprimento vertical do cilindro de concreto que envolve o eletrodo de cobre ( $h_{concreto}$ ), conforme a Figura 5.13 ilustra. Considerou-se um eletrodo de cobre metálico com comprimento fixo de  $h_{eletrodo} = 61$  cm e variou-se o comprimento vertical do cilindro de concreto envolvente, assumindo valores de: 20, 40, 60, 80 e 100 cm. Assim, para valores de  $h_{concreto}$  menores que  $h_{eletrodo}$ , parte do eletrodo metálico fica exposto. Já para valores de  $h_{concreto}$  maiores que  $h_{eletrodo}$ , o eletrodo fica completamente envolvido, no entanto, na parte inferior da haste, há um excesso de concreto que não envolve o eletrodo. Após as simulações, obteve-se os resultados de impedância transitória e corrente apresentados na Figura 5.14 e na Figura 5.15, respectivamente.

A Tabela 5.7 apresenta os valores de resistência de aterramento ( $R_b$ ), os valores de impedância transitória máximo ( $Z_{max}$ ) e mínimo ( $Z_{min}$ ), bem como as variações percentuais em relação à haste nua ( $h_{concreto} = 0$  cm).

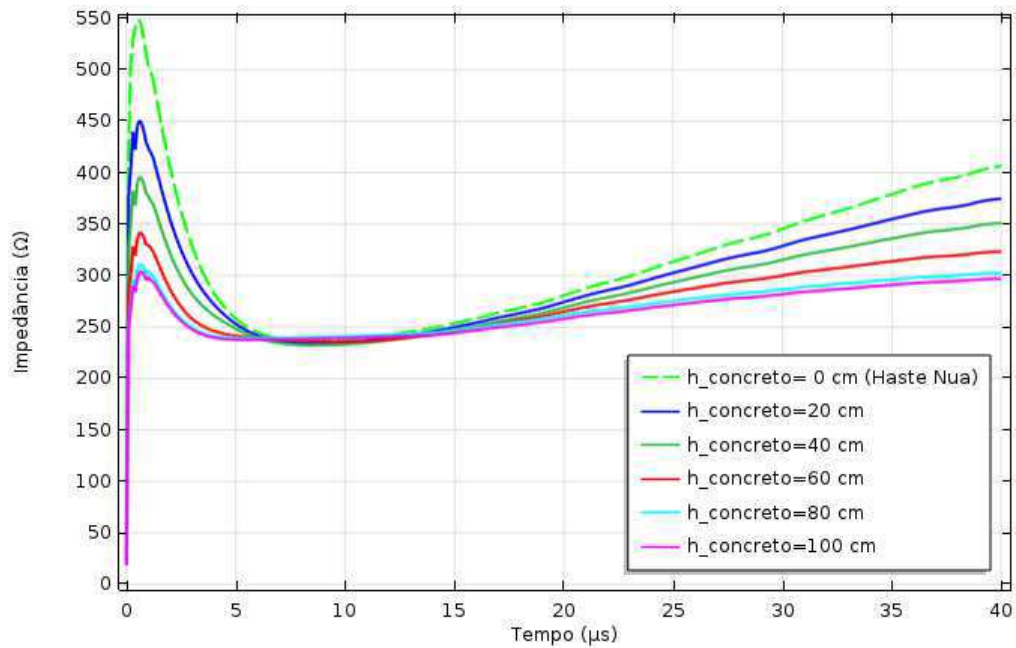
Observando-se a Tabela 5.7 bem como a Figura 5.14, nota-se que envolver, com concreto, qualquer percentual do eletrodo traz reduções no  $Z_{max}$  em relação a uma haste completamente nua. Por exemplo, tomando-se uma haste nua de 61 cm, cobrir aproximadamente 1/3 do seu comprimento traz uma redução de 17,8% no valor de  $Z_{max}$ , em relação ao eletrodo nu. Assim, nas condições avaliadas, a adição de concreto a uma haste nua por si só já traz um benefício tanto para a resistência de baixa frequência ( $R_b$ ) quanto para a impedância impulsiva  $Z(t)$ , mesmo que só uma parte do eletrodo seja envolvida com concreto.

**Figura 5.13** – Ilustração da variação do comprimento vertical do concreto.



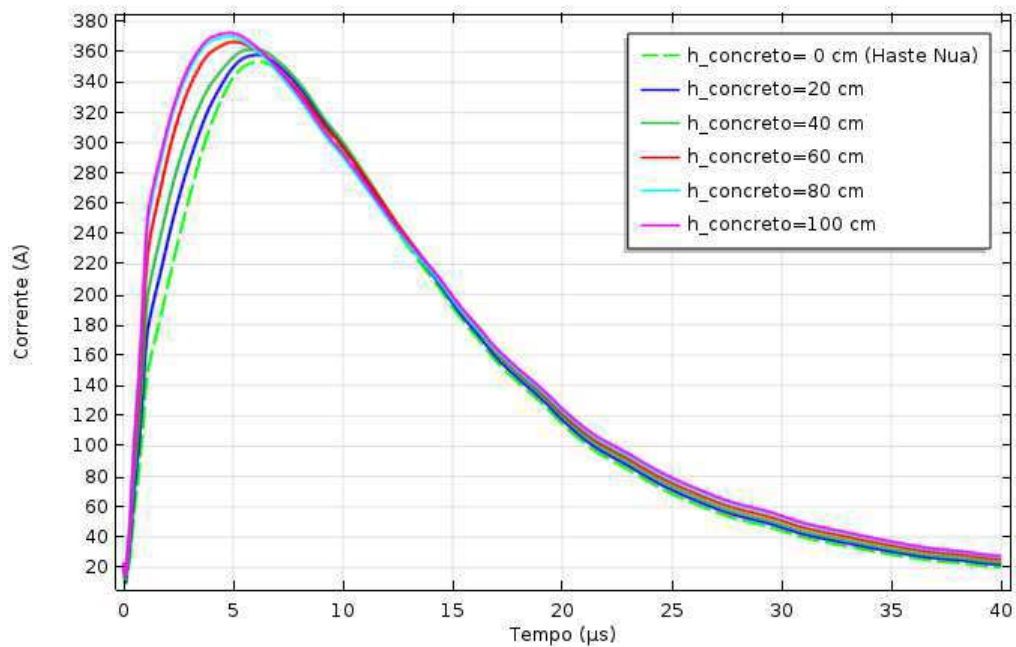
Fonte: Produzida pelo autor.

**Figura 5.14** – Impedância da haste concretada para diferentes comprimentos do concreto, em um solo de 500  $\Omega$ .m.



Fonte: Produzida pelo autor.

**Figura 5.15** – Corrente obtida na haste concretada para diferentes comprimentos do concreto em um solo de 500  $\Omega$ .m.



Fonte: Produzida pelo autor.



**Tabela 5.7** – Resistências e Impedâncias para variação do comprimento vertical do concreto.

$h_{concreto}$	$R_b$ ( $\Omega$ )	$R_b$ (%)	$Z_{max}$ ( $\Omega$ )	$Z_{max}$ (%)	$Z_{min}$ ( $\Omega$ )	$Z_{min}$ (%)
<b>0 cm (haste nua)</b>	629,2	-	548,8	-	236,5	-
<b>20 cm</b>	498,9	<b>-28,3</b>	451,0	<b>-17,8</b>	234,0	<b>-1,1</b>
<b>40 cm</b>	431,2	<b>-37,1</b>	396,0	<b>-27,8</b>	232,3	<b>-1,8</b>
<b>60 cm</b>	368,6	<b>-41,4</b>	342,1	<b>-37,7</b>	235,6	<b>-0,4</b>
<b>80 cm</b>	331,7	<b>-47,3</b>	311,0	<b>-43,3</b>	239,2	<b>1,1</b>
<b>100 cm</b>	323,0	<b>-48,7</b>	303,8	<b>-44,6</b>	237,7	<b>0,5</b>

Por outro lado, observou-se que utilizar  $h_{concreto} < h_{eletrodo} = 61$  cm, deixando uma porção do eletrodo exposta, não confere resposta impulsiva melhor que uma haste concretada com eletrodo completamente envolvido por concreto,  $h_{concreto} > h_{eletrodo} = 61$  cm; uma vez que, quanto mais coberto o eletrodo está, maiores são as reduções percentuais de  $Z_{max}$ . Por exemplo, um excesso de aproximadamente 20 cm de concreto (quando  $h_{concreto} = 80$  cm) na parte inferior da haste conferiu um acréscimo na redução percentual de  $Z_{max}$  no valor de 15,5% em relação à uma haste concretada em que  $h_{concreto} \cong h_{eletrodo}$ . No entanto, quando  $h_{concreto} = 100$  cm, equivalendo ao um excesso de 40 cm de concreto, observou-se que a redução percentual de  $Z_{max}$  foi de 44,6%, enquanto que para  $h_{concreto} = 80$  cm, equivalendo a um excesso de 20 cm, a redução foi de 43,3%. Assim, observou-se que, para um excesso de concreto maior que 20 cm, não há melhorias significativas na impedância impulsiva; isso pode ser observado visualmente na [Figura 5.14](#). Além disso, a resistência de baixa frequência ( $R_b$ ) segue um comportamento similar ao da impedância transitória máxima  $Z_{max}$ .

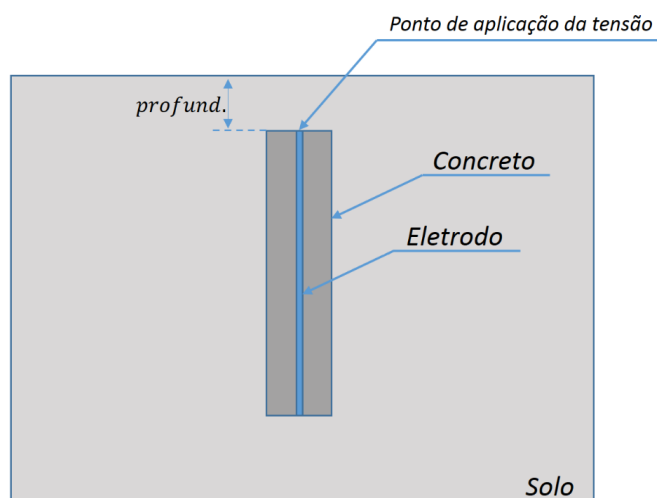
Quanto aos níveis de  $dZ/dt$ , observou-se que o excesso de concreto na região inferior do eletrodo não reduz de forma significativa a taxa de variação da impedância transitória no tempo. Isso já era esperado, uma vez que a componente de corrente longitudinal que sai da região inferior do eletrodo é consideravelmente inferior às componentes de corrente transversais, sendo esta última responsável pelo maior escoamento de corrente ao solo.

#### 5.4.4 Profundidade da haste

Nesta subseção, avaliou-se o efeito que a profundidade de inserção da haste no solo possui na resposta da impedância transitória. A [Figura 5.16](#) ilustra a definição de profundidade que é utilizada nesta seção. Vale salientar que, aqui, entende-se por profundidade a distância vertical entre a superfície do solo e a extremidade superior da haste (cabeça da haste). Assim, avaliou-se, por meio de simulações, uma haste nua fincada ao nível do solo (*profund.* = 0 cm), bem como uma haste concretada fincada em profundidades de: 0, 20, 40, 60, 80 e 100 cm, em relação ao nível do solo. Após as simulações, obteve-se os valores de impedância transitória apresentados na [Figura 5.17](#) e os respectivos valores de corrente, apresentados na [Figura 5.18](#). Além das simulações com

tensão impulsiva, realizou-se, também, simulações para obtenção do valor da resistência da haste para baixas frequências. Para tal, aplicou-se na haste uma tensão não ionizante de 1 kV contínua. A [Tabela 5.8](#) apresenta tanto os valores de resistência da haste para baixas frequências ( $R_b$ ) quanto os valores de máximo ( $Z_{max}$ ) e mínimo ( $Z_{min}$ ) da impedância transitória  $Z(t)$ . Além disso, a tabela apresenta também as variações percentuais da haste concretada em relação aos valores de  $R_b$ ,  $Z_{max}$  e  $Z_{min}$  da haste nua fincada no nível do solo ( $profund. = 0$  cm).

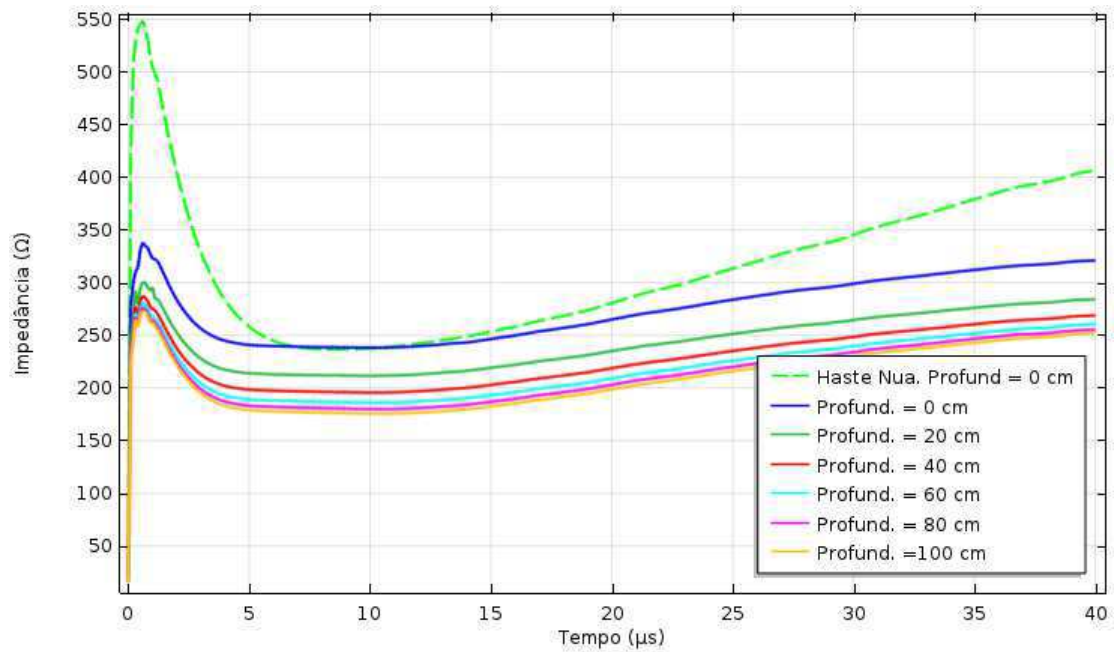
**Figura 5.16** – Ilustração da variação da profundidade da haste concretada em relação ao nível do solo.



Fonte: Produzida pelo autor.

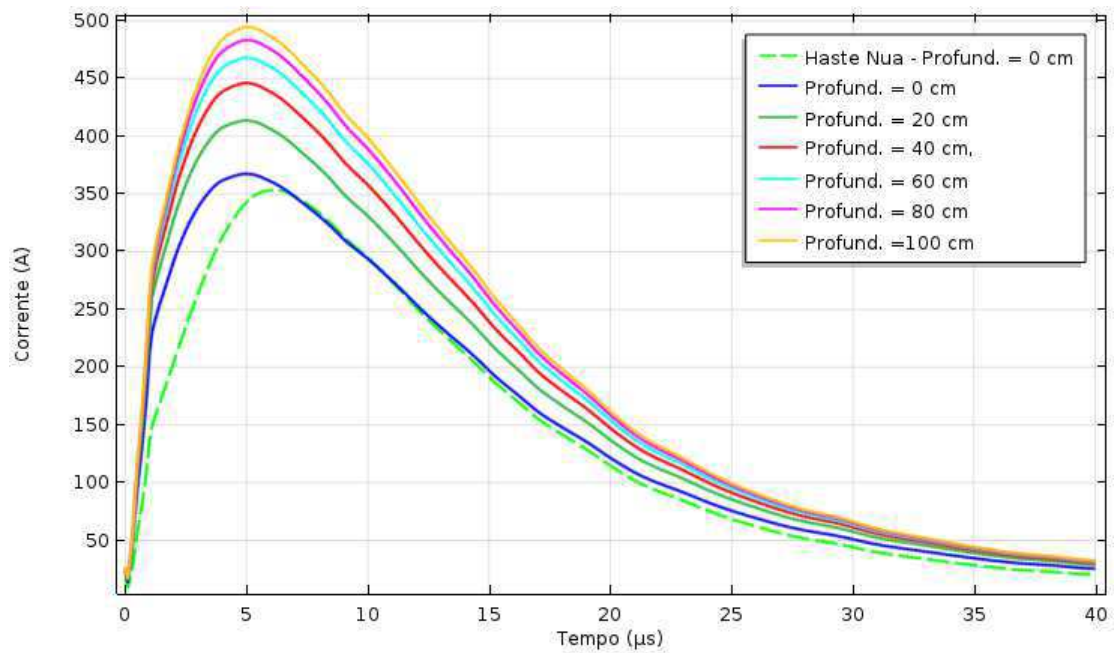
Pode-se observar na [Tabela 5.8](#) que a haste concretada com 20 cm de profundidade apresentou uma redução percentual de 45,2% no valor de  $Z_{max}$  em relação a haste nua com  $profund. = 0$  cm. No entanto, observou-se que, para profundidades maiores que 20 cm não há redução substancial no valor de  $Z_{max}$ . Por exemplo, a haste com  $profund. = 100$  cm apresenta um incremento em  $Z_{max}(\%)$  de apenas 4,9% em relação à haste com  $profund. = 20$  cm. Quanto aos valores de  $Z_{min}$ , observou-se que, para  $profund. > 40$  cm, não houve reduções percentuais significativas. Vale salientar que, embora  $Z_{min}$  esteja sendo avaliado para tornar o presente trabalho mais minucioso, o mesmo apresenta uma importância inferior à  $Z_{max}$  na presente análise. Além disso, observou-se que a redução percentual da resistência de baixa frequência ( $R_b$ ) da haste concretada em relação à haste nua praticamente permaneceu em aproximadamente 50% para quaisquer valores de profundidade.

**Figura 5.17** – Impedância da haste concretada para diferentes profundidades da haste, em um solo de 500 Ω.m.



Fonte: Produzida pelo autor.

**Figura 5.18** – Corrente obtida na haste concretada para diferentes profundidades da haste concretada em um solo de 500 Ω.m.



Fonte: Produzida pelo autor.

**Tabela 5.8** – Resistências e Impedâncias para variação da profundidade em que a haste concretada é fincada no solo.

profundidade	$R_b$ ( $\Omega$ )	$R_b$ (%)	$Z_{max}$ ( $\Omega$ )	$Z_{max}$ (%)	$Z_{min}$ ( $\Omega$ )	$Z_{min}$ (%)
<b>0 cm (haste nua)</b>	629,2	-	548,8	-	236,5	-
<b>0 cm</b>	297,1	<b>-52,8</b>	338,1	<b>-38,4</b>	238,3	<b>0,8</b>
<b>20 cm</b>	324,5	<b>-48,4</b>	300,9	<b>-45,2</b>	211,6	<b>-10,5</b>
<b>40 cm</b>	311,1	<b>-50,6</b>	287,6	<b>-47,6</b>	195,7	<b>-17,3</b>
<b>60 cm</b>	304,2	<b>-51,7</b>	280,9	<b>-48,8</b>	186,2	<b>-21,3</b>
<b>80 cm</b>	300,0	<b>-52,3</b>	276,7	<b>-49,6</b>	180,0	<b>-23,9</b>
<b>100 cm</b>	297,1	<b>-52,8</b>	273,8	<b>-50,1</b>	175,7	<b>-25,7</b>

Quanto à suavização da curva da impedância transitória e ao  $dZ/dt$ , observou-se que o aumento da profundidade da haste não reduziu de forma pronunciada a derivada da impedância transitória no tempo. Isso indica que a profundidade não é um parâmetro cujo aumento conferirá maior proteção a equipamentos eletrônicos (conectados ao aterramento), do ponto de vista da propagação da onda de tensão no solo e sua respectiva taxa de variação no tempo.

Por fim, após a análise da profundidade da haste, notou-se que, para as condições da simulação, um valor de *profund.* = 20 cm é suficiente para otimizar a resposta impulsiva da haste concretada, bem como para manter aproximadamente o mesmo valor de  $R_b$ . Observou-se que, dos parâmetros geométricos da haste concretada, a profundidade não é o parâmetro que traz maior eficiência à resposta impulsiva.

---

## Conclusões e Trabalhos Futuros

Nesta dissertação, foi realizada uma análise da reposta transitória de hastes concretadas sob correntes impulsivas, considerando o efeito da ionização do solo. Para tanto, foi realizado um estudo através de simulações computacionais, utilizando o método dos elementos finitos. Realizou-se uma implementação de modelo de ionização do solo, visando uma representação próxima ao fenômeno físico que ocorre durante a injeção de correntes impulsivas em aterramentos. Após a implementação do modelo de ionização, avaliou-se a impedância impulsiva de uma haste concretada vertical fincada em solos com diferentes resistividades. Adicionalmente, avaliou-se a resposta transitória do aterramento concretado, quando seus parâmetros geométricos são variados. O estudo permitiu aprofundar os conhecimentos sobre aterramentos concretados bem como definir limites práticos e sugestões para os parâmetros geométricos da haste concretada, objetivando uma resposta impulsiva mais eficiente.

Para a implementação pontual de modelo da ionização do solo, empregou-se o equacionamento do modelo dinâmico proposto por [Liew e Darveniza \[47\]](#). No entanto, implementou-se esse equacionamento em cada ponto do solo no domínio de simulação avaliado. Essa abordagem aumentou a generalidade e verossimilhança do modelo de ionização em relação ao fenômeno real, uma vez que o modelo simplificado proposto por [Liew e Darveniza \[47\]](#) é implementado através de curvas isotrópicas (cilíndricas) e coaxiais em relação à uma haste nua. Assim, para aterramentos concretados com diferentes formatos geométricos, a representação realizada por [Liew e Darveniza \[47\]](#) não é a mais adequada. Assim, como o modelo foi implementado de forma pontual ao invés de isotrópica, conseguiu-se transpor as limitações do modelo [Liew e Darveniza \[47\]](#), possibilitando a simulação de estruturas de aterramentos com os mais variados formatos e materiais, levando em conta a ionização do solo. A implementação do fenômeno da ionização no *Comsol* foi validada com base nos próprios resultados experimentais apresentados por [Liew e Darveniza \[47\]](#). Observou-se que essa parte do presente trabalho constitui uma contribuição considerável ao estado da arte, uma vez que poucos trabalhos da literatura implementam modelos de

ionização para aterramentos não convencionais e, entre esses, não foi encontrado nenhum trabalho que tenha implementado um modelo de ionização em uma forma pontual.

Utilizando a implementação da ionização desenvolvida, verificou-se a resposta transitória de uma haste concretada para solos com diferentes resistividades, a saber: 50  $\Omega$ .m, 100  $\Omega$ .m, 500  $\Omega$ .m e 2500  $\Omega$ .m. Observou-se que em todos os casos a haste concretada apresentou pico de impedância transitória ( $Z_{max}$ ) menor que o de uma haste nua submetida à mesma tensão impulsiva. Notou-se que o valor máximo da impedância transitória tende a diminuir à medida que o solo tem valores de resistividade maiores. No entanto, não houve aumento de eficiência da haste concretada quando a resistividade do solo foi modificada de 500  $\Omega$ .m para 2500  $\Omega$ .m. De uma forma geral, a haste concretada apresentou resposta transitória superior em relação a uma haste nua de mesmo comprimento. Uma vez que poucos trabalhos avaliam a resposta impulsiva considerando a ionização do solo, a análise realizada, considerando diferentes resistividades do solo, constitui uma contribuição à caracterização de aterramentos concretados.

Com base nos resultados obtidos, notou-se que o raio do concreto envolvente é um parâmetro que pode reduzir substancialmente o valor máximo da impedância transitória. Um valor de  $r_{concreto}$  igual a 8 cm, acrescentado ao redor de um eletrodo nu, foi suficiente para reduzir  $Z_{max}$  em 46%. Por outro lado, verificou-se que há uma tendência de saturação no valor de  $Z_{max}$ , à medida que se aumenta o raio do concreto, indicando que não é viável aumentar indefinidamente esse parâmetro da haste. Além disso, observou-se que o raio do concreto é um parâmetro que pode reduzir consideravelmente o  $dZ/dt$  da curva de impedância transitória e conseqüentemente o  $dV/dt$  no solo, evitando que durante a propagação do impulso de corrente no solo, surjam diferenças de potenciais capazes de danificar equipamentos e instrumentos eletrônicos conectados ao aterramento. No entanto, observou-se que o raio do concreto altera primordialmente o valor de  $Z_{max}$ , modificando pouco as outras porções da curva de impedância. Após a observação dos resultados, sugere-se, para aplicações práticas, a utilização de um valor de  $r_{concreto}$  de 8 cm, como sendo uma escolha de custo benefício e desempenho técnico satisfatórios.

Quanto ao comprimento vertical da haste concretada, observou-se que é um parâmetro capaz de deslocar a curva de impedância transitória por inteiro, bem como reduzir o valor máximo da impedância transitória. Assim, constitui um parâmetro que reduz tanto o  $dZ/dt$ , quanto os valores de  $Z(t)$ . Em um solo com resistividade de 500  $\Omega$ .m, uma haste concretada com comprimento vertical de 1,2 m e diâmetro do concreto de 5 cm apresentou 61,5% de redução em  $Z_{max}$ , comparando-se com a haste nua. Por outro lado, a literatura indica que o aumento inadvertido do comprimento do eletrodo eleva o valor da indutância do aterramento e, por sua vez, pode ocasionar elevação no valor do pico da impedância transitória.

Quanto ao comprimento vertical do concreto envolvente, observou-se que deixar

parte do eletrodo exposto não melhora a resposta impulsiva em relação a uma haste concretada completamente envolvida por concreto. Pelo contrário, se o eletrodo estiver totalmente envolvido e  $h_{concreto}$  for maior que  $h_{eletrodo}$ , obtém-se uma redução do valor de  $Z_{max}$ . Por exemplo, um excesso de aproximadamente 20 cm de concreto (em relação ao comprimento do eletrodo) na parte inferior da haste acrescentou uma redução percentual de 15,5% em relação à uma haste concretada na qual  $h_{concreto} = h_{eletrodo}$ . Por outro lado, envolver o eletrodo com concreto, mesmo que parte do eletrodo fique exposto, traz aprimoramentos na impedância transitória em relação a uma haste completamente nua. Observou-se que a partir de 20 cm de excesso de concreto não há grandes melhoramentos na resposta impulsiva. De forma similar ao raio do concreto, o comprimento vertical do concreto altera de forma considerável apenas o valor do pico da impedância transitória; o resto da curva apresenta poucas alterações. Assim, com base nos resultados obtidos, sugere-se que, na fabricação de hastes concretadas, envolva-se sempre o eletrodo por completo e utilize-se um excesso de concreto (na região inferior do eletrodo) de 20 cm de comprimento, no máximo.

Quanto à profundidade da haste concretada em relação ao nível do solo, notou-se que, para profundidades maiores que 20 cm, não há grandes melhorias em relação à impedância transitória. Assim, esse resultado sugere que sistemas de aterramento concretado mais complexos, tais como topologia de linha ou malha, sejam dispostos no solo a uma profundidade de 20 cm. Observou-se que a profundidade foi o parâmetro que menos influenciou na impedância transitória.

O presente trabalho abre caminho para trabalhos futuros no campo do estudo da resposta transitória de aterramentos concretados ou convencionais. Abaixo seguem algumas sugestões de trabalhos futuros:

- Realizar a implementação de uma representação eletromagnética que considere campos magnéticos e o efeito indutivo do aterramento. Com isso, pretende-se tornar a simulação de aterramentos mais robusta e precisa.
- Realizar simulações com sistemas de aterramento com mais de uma haste, considerando o efeito da ionização do solo. Com isso, pretende-se estudar topologias de aterramento mais complexas e sua resposta impulsiva.
- Investigar novas concepções de aterramento com reposta transitória otimizada.
- Caracterizar os parâmetros  $\tau_1$  e  $\tau_2$  do modelo dinâmico de ionização para diferentes solos, a partir das formas de onda de tensão e corrente experimentais.
- Avaliar a resposta transitória para aterramentos em solos estratificados em múltiplas camadas.

---

## Referências Bibliográficas

- 1 IEEE. *IEEE Std. 80*: IEEE guide for safety in ac substation grounding. New York, USA, 2013. 426 p. Citado na página 17.
- 2 KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. *Aterramento Elétrico*. [S.l.]: Porto Alegre: Sagra-DC Luzzatto, 2002. Citado na página 17.
- 3 VIJAYARAGHAVAN, G.; BROWN, M.; BARNES, M. *Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection*. Oxford: Newnes - Elsevier, 2004. v. 1. Citado na página 18.
- 4 DALZIEL, C. F. A study of the hazards of impulse currents. In: *AIEE Pacific General Meeting*. Vancouver, Canada: [s.n.], 1953. Citado na página 18.
- 5 BERNSTEIN, T. Effects of electricity and lightning on man and animals. *Journal of Forensic Science*, v. 18, n. 1, p. 384–392, Agosto 1973. Citado na página 18.
- 6 HANAFFI, F.; SIEW, W.; TIMOSHKIN, I. Step voltages in a ground-grid arising from lightning current. In: . Nagoya, Japan: [s.n.], 2015. Citado na página 18.
- 7 MARUNGSRI, B. et al. Study of tower grounding resistance effected back flashover to 500kv transmission line in thailand by using atp-empt. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communicatoin Engineering*, v. 2, n. 6, p. 1061–1068, Dezembro 2008. Citado na página 18.
- 8 HARID, N. et al. Experimental evaluation of potential rise and step and touch voltages at high voltage towers undes lightning impulses. In: . Innes House, Johannesburg: [s.n.], 2009. Citado na página 18.
- 9 RADAZOVIC, Z.; KOSTIC, M. Earthing grid parameters with conductor surrounded by an additional substance. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, IET*, v. 148, n. 4, p. 275–278, Julho 2001. Citado 3 vezes nas páginas 18, 45 e 62.
- 10 CHEN, S.-D. Granulated blast furnance slag used to reduce grounding resistance. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, IET*, v. 151, n. 3, p. 361–366, Maio 2004. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 62.
- 11 CHEN, L.-H. et al. A study of grounding resistance reduction agentusing granulated blast furnance slag. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 3, p. 973–978, Julho 2004. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 62.



- 12 EDUFUL, G.; COLE, J. E.; OKYERE, P. Y. Optimum mix of ground electrodes and conductive backfills to achieve a low ground resistance. In: *World Congress on Engineering and Computer Science*. San Francisco, USA: [s.n.], 2009. Citado na página 18.
- 13 AL-ARAINY, A. et al. Optimized pit configuration for efficient grounding of the power system in high resistivity soils using low resistivity materials. In: *IV International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization*. Kuala Lumpur, Malaysia: [s.n.], 2011. Citado na página 18.
- 14 LIM, S. C.; GOMES, C.; KADIR, M. Z. A. A. Characterizig of bentonite with chemical, physical and electrical perspectives for improvement of electrical grounding systems. *International Journal of Electrochemical Science*, v. 8, p. 11429 – 11447, Agosto 2013. Citado na página 18.
- 15 UFER, G. H. Investigation and testing of footing-type grounding electrodes for electrical installation. In: *IEEE Westen Appliance Technical Conference*. Los Angeles, U.S.A: [s.n.], 1964. Citado 3 vezes nas páginas 18, 41 e 62.
- 16 FAGAN, E. J.; LEE, M. R. H. The use of concrete-enclosed reinforcing rods as grounding electrodes. *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, v. 4, p. 337–348, Julho 1970. Citado 4 vezes nas páginas 18, 30, 41 e 62.
- 17 PREMINGER, J. Evaluation of concrete-encased electrodes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 1A-11, n. 6, p. 664 – 668, Dezembro 1975. Citado 6 vezes nas páginas 18, 29, 42, 46, 62 e 72.
- 18 LIM, S. C.; GOMES, C.; KADIR, M. Z. A. A. K. Preliminary grounding performance of bentonite mixed concrete steel cage under high soil resistivity condition. In: *XIII Pacific International Conference on Lightning*. Seoul, Korea: [s.n.], 2013. Citado 3 vezes nas páginas 18, 48 e 63.
- 19 PEREIRA, M. T. et al. Soil resistivity study and simulation with finite elements method. In: *International Conference on Environment and Electrical Engineering*. Florence, Italy: [s.n.], 2016. Citado 3 vezes nas páginas 18, 49 e 63.
- 20 CABRAL, R. J. et al. Comparative performance of impulsive grounding systems embedded in concrete: an experiment in reduced scale. In: *International Conference on Lightning Protection*. Estoril, Portugal: [s.n.], 2016. Citado 3 vezes nas páginas 18, 50 e 63.
- 21 TRONCHONI, A. B. et al. Impulsive grounding systems embedded in concrete: Theoretical and practical experiments. In: *International Universities Power Engineering Conference*. Coimbra, Portugal: [s.n.], 2016. Citado 3 vezes nas páginas 18, 50 e 63.
- 22 ANDROVITSANEAS, V. P.; GONOS, I. F.; STATHOPULOS, I. A. Experimental study on transient impedance of grounding rods encased in ground enhancing compounds. *Electric Power Systems Research*, v. 129, p. 109–115, Janeiro 2016. Citado 4 vezes nas páginas 18, 19, 50 e 63.
- 23 BEZERRA, S. R. C.; KANASHIRO, A. G. Sistema de aterramento elétrico com hastes envolvidas em concreto. In: *Simposio Brasileiro de Sisteamas Elétricos*. Belém, Brasil: [s.n.], 2010. Citado 5 vezes nas páginas 18, 29, 31, 46 e 62.

- 24 LIMA, A. B.; PAULINO, J. O. S.; GUIMARÃO, M. F. Transient ground impedance measurement using a very short current lead. In: *XII International Symposium on Lightning Protection*. Belo Horizonte, Brasil: [s.n.], 2013. Citado 3 vezes nas páginas 18, 48 e 63.
- 25 POUNTOURELI, A.; PEPPAS, G.; PYRIOTI, E. An investigation of non conventional grounding installations. In: *XIX International Symposium on High Voltage Engineering*. Pilsen, Czech Republic: [s.n.], 2015. Citado 3 vezes nas páginas 18, 49 e 63.
- 26 ANDROVITSANEAS, V. P.; GONOS, I. F.; STATHOPULOS, I. A. Transient impedance of grounding rods encased in ground enhancing compounds. In: *XII International Symposium on Lightning Protection*. Shanghai, China: [s.n.], 2014. Citado 6 vezes nas páginas 19, 28, 29, 31, 48 e 63.
- 27 VISACRO, S. *Aterramentos Elétricos*. São Paulo: Artliber, 2005. v. 1. Citado 6 vezes nas páginas 22, 23, 24, 28, 31 e 32.
- 28 PORTALELETRICISTA.COM.BR. [S.l.]. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- 29 HTTP://WWW.DIYADVICE.COM. [S.l.]. Citado na página 23.
- 30 ABNT. *NBR 15715: Sistemas de aterramento de subestações - requisitos*. Rio de Janeiro, Brasil, 2009. 53 p. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 28.
- 31 VISACRO, S.; ROSADO, G. Response of grounding electrodes to impulsive currents: an experimental evaluation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 51, n. 1, p. 161 – 164, Fevereiro 2009. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- 32 GRCEV, L.; POPOV, M. On high-frequency circuit equivalents of a vertical ground rod. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2, p. 1598–1603, Abril 2005. Citado na página 24.
- 33 EPRI. Transmission Line Grounding. *Electric Power Research Institut*, I, p. 7–23 a 7–29, 1982. Citado na página 24.
- 34 GRCEV, L. Lightning surge efficiency of grounding grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 3, p. 1692–1699, Julho 2011. Citado na página 25.
- 35 VISACRO, S. A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 1, p. 381–386, Janeiro 2007. Citado na página 27.
- 36 NOR, N. M. Effect of enhancement materials when mixed with sand under high impulse conditions. In: *IIX International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials*. Bali: [s.n.], 2006. Citado na página 28.
- 37 ANDROVITSANEAS, V.; GONOS, I.; STATHOPULOS, I. Performance of ground enhancing compounds during the year. In: *International Conference on Lightning Protection*. Vienna, Austria: [s.n.], 2012. Citado 4 vezes nas páginas 28, 29, 47 e 62.
- 38 HALLMARK, C. L. The use of conductive cement to extend and protect made ground electrodes. In: . [S.l.: s.n.], 2000. Citado 5 vezes nas páginas 28, 31, 45, 62 e 82.

- 39 ROWLAND, P. W. Industrial system grounding for power, static, lightning and instrumentations practical applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 31, n. 6, Novembro/Dezembro 1995. Citado 5 vezes nas páginas 29, 31, 43, 62 e 72.
- 40 ZIPSE, D. W. Grounding: The good, the bad and the stupid. In: . Chicago, USA: [s.n.], 2013. Citado na página 29.
- 41 DURHAN, M. O.; DURHAN, R. A. Grounding system design for isolated locations and plant systems. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, v. 33, n. 2, p. 374–382, Abril 1997. Citado 3 vezes nas páginas 29, 43 e 62.
- 42 RODRIGUES, M. A. de O. *Avaliação de Desempenho de Novas Concepções de Malhas de Aterramento*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Março 2012. Citado 5 vezes nas páginas 9, 29, 30, 47 e 62.
- 43 WIENER, P. A comparison of concrete encased grounding electrodes to driven ground rods. *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, v. 3, p. 282–287, Junho 1970. Citado 3 vezes nas páginas 30, 42 e 62.
- 44 SWITZER, W. K.; STIDHAM, C. R. *Long duration grounding performance program*. [S.l.], 1997. Citado 3 vezes nas páginas 31, 43 e 62.
- 45 HARDING, G.; HARRIS, C. A. Some engineering objections to using reinforcing steel as grounding electrodes. In: *IGA Group Annual Meeting*. Chicago, Illinois: [s.n.], 1970. Citado 4 vezes nas páginas 31, 42, 46 e 62.
- 46 LI, Z.-X. et al. A mathematical model for the transient lightning response from grounding systems. *Progress In Electromagnetics Research B*, v. 57, p. 47 – 61, 2014. Citado na página 33.
- 47 LIEW, A. C.; DARVENIZA, M. Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths. *Proc. Institute of Electrical Engineers*, v. 121, n. 2, p. 123 – 135, Fevereiro 1974. Citado 26 vezes nas páginas 9, 10, 33, 49, 53, 54, 55, 56, 57, 60, 61, 65, 66, 67, 70, 71, 72, 74, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 87 e 100.
- 48 WANG, J. A.; LIEW, A. C.; DARVENIZA, M. Extension of dynamic model of impulse behavior of concentrated grounds at high currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 3, p. 2160–2165, Julho 2005. Citado na página 33.
- 49 RAMAMOORTY, N. et al. Transient performance of grounding grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 4, p. 2053–2059, Outubro 1989. Citado na página 33.
- 50 GERI, A. Behaviour of grounding systems excited by high impulse currents: The model and its validation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 3, p. 1008–1017, Julho 1999. Citado na página 33.
- 51 DEVGAN, S. S.; WHITEHEAD, E. R. Analytical models for distributed grounding systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, v. 92, n. 5, p. 1763–1770, Sept./Oct. 1973. Citado na página 33.
- 52 VERMA, R.; MUKHEDKAR, D. Impulse impedance of buried ground wire. *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, v. 99, n. 5, p. 2003–2007, Sept./Oct. 1980. Citado na página 33.

- 53 MAZZETTI, C.; VECA, G. M. Impulse behavior of grounded electrodes. *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, v. 102, n. 9, p. 3148–3156, Sept. 1983. Citado na página 33.
- 54 VELAZQUEZ, R.; MUKHEDKAR, D. Analytical modeling of grounding electrodes. *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, v. 103, n. 6, p. 1314–1322, Junho 1984. Citado na página 33.
- 55 MENTER, F.; GRCEV, L. Emt-p-based model for grounding system analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 9, n. 4, p. 1838–1849, Outubro 1994. Citado na página 33.
- 56 LIU, F.; ZITNIK, M.; THOTTAPPILLIL, R. An improved transmission-line model of grounding system. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 43, n. 3, p. 348–355, Agosto 2001. Citado na página 33.
- 57 LIU, F.; THEETHAYI, N.; THOTTAPPILLIL, R. An engineering model for transient analysis of grounding system under lightning strikes: Nonuniform transmission-line approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2, p. 722–730, Abril 2005. Citado na página 33.
- 58 DAWALIBI, F. Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors, part i — single conductor. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 1, n. 4, p. 105–111, Outubro 1986. Citado na página 33.
- 59 DAWALIBI, F. Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors, part ii — ground networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 1, n. 4, p. 112–119, Outubro 1986. Citado na página 33.
- 60 GRCEV, L.; DAWALIBI, F. An electromagnetic model for transients in grounding systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 4, p. 1773–1781, Outubro 1990. Citado na página 33.
- 61 GRCEV, L. Computation of transient voltages near complex grounding systems caused by lightning currents. In: *International Symposium On Electromagnetic Compatibility*. Anaheim, USA: [s.n.], 1992. p. 393–400. Citado na página 33.
- 62 GRCEV, L.; DAWALIBI, F. Computer analysis of transient voltages in large grounding systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 2, p. 815–823, Abril 1990. Citado na página 33.
- 63 OLSEN, R. G.; WILLIS, M. C. A comparison of exact and quasi-static methods for evaluation of grounding systems at high frequencies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 2, p. 1071–1081, Abril 1996. Citado na página 33.
- 64 GRCEV, L.; HEIMBACH, M. Frequency dependent and transient characteristics of substation grounding system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 1, p. 172–178, Janeiro 1997. Citado na página 33.
- 65 ZHANG, B. et al. Numerical analysis of the influence between large grounding grids and two-end grounding cables by the moment method coupled with circuit equations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2, p. 731–737, Abril 2005. Citado na página 33.

- 66 PAPALEXOPOULOS, A. D.; MELIOPOULOS, A. P. Frequency dependent characteristics of grounding systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 2, n. 4, p. 1073–1081, Outubro 1987. Citado na página 33.
- 67 OTERO, A.; ALAMO, J. C. J. L. Frequency-dependent grounding system calculation by means of a conventional nodal analysis technology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 3, p. 873–877, Julho 1999. Citado na página 33.
- 68 OTERO, A.; ALAMO, J. C. J. L. Hem: A model for simulation of lightning-related engineering problem. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2, p. 1206–1209, Abril 2005. Citado na página 33.
- 69 SILVA, V. C. *Método de Elementos Finitos Aplicado à Solução de Problemas de Aterramento Elétrico*. Tese (Livre Docência) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Citado na página 33.
- 70 ALA, G. et al. Finite difference time domain simulation of soil ionization in grounding systems under lightning surge conditions. *Applied Numerical Analysis & Computational Mathematics*, v. 1, n. 1, p. 90–103, Março 2004. Citado na página 34.
- 71 COURANT, R. Variational Methods for The Solution of Problem of Equilibrium and Vibrations. *Bulletin of American Mathematical Society*, v. 49, p. 1–23, Janeiro 1943. Citado na página 35.
- 72 JIN, J.-M. *The finite element method in electromagnetics*. 3. ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- 73 COELHO, R. R. A.; PONTES, M. d. G. S. R. Projeto de malhas de aterramento através do método dos elementos finitos. In: *V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*. Foz do Iguaçu, PR - Brasil: [s.n.], 2014. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.
- 74 SADIKU, M. N. O. *Numerical Techniques in Electromagnetics*. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2001. Citado na página 37.
- 75 INC., C. *Comsol Multiphysics Use's Guide V 5.0*. Estocolmo - Suécia, 2015. Citado na página 38.
- 76 FREI, W. *A Computational Electromagnetics Modeling, Which Module to Use*. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://br.comsol.com/blogs/computational-electromagnetics-modeling-which-module-to-use/>>. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- 77 YAMAMOTO, k. et al. Study on surge impedance of reinforced concrete pole and grounding lead wire on distribution lines by experiment on reduced scale model. In: *International Symposium on High Voltage Engineering*. Montréal, Canada: [s.n.], 1997. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 62.
- 78 GRCEV, L. Improved design of power transmission line grounding arrangements for better protection against lightning. In: *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Roma, Italy: [s.n.], 1998. Citado na página 44.

- 79 MENG, Q. et al. A new method to decrease grounding resistances of substation grounding systems in high resistivity regions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 3, Julho 1999. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 62.
- 80 KURTOVIC, M.; VUJEVIC, S. Earthing grid parameters with conductor surrounded by an additional substance. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, IET*, v. 147, n. 1, p. 57–61, Janeiro 2000. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 62.
- 81 CHEN, S. D. Granulated blast furnace slag used to reduce grounding resistance. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 151, p. 360–366, Maio 2004. Citado na página 46.
- 82 CHEN, L.-H. et al. A study of grounding resistance reduction agent using granulated blast furnace slag. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, p. 937–978, Julho 2004. Citado na página 46.
- 83 BIRCHAL, M. A. S.; VALE, M. H. M.; VISACRO, S. Pencaps: A parallel application for electrode encased grounding systems project. In: SPRINGER (Ed.). *International Conference on High-Performance Computing*. Berlin Heidelberg: [s.n.], 2005. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 62.
- 84 BALDWIN, T. L.; RIFAAT, R.; MALIK, S. M. Concrete encapsulated electrodes. In: *IEEE Panel Section - Industrial & Commercial Power Systems Conference*. Calgary, Alberta: [s.n.], 2009. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 62.
- 85 VELEV, G. T. et al. A new approach for analysis of nonconventional grounding installations by means of fem. In: *XVII International Symposium on High Voltage Engineering*. Hannover, Germany: [s.n.], 2011. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 62.
- 86 VELEV, G. T. et al. Verification of analytical expressions for calculation of the resistance to ground of single conductive concrete encased grounding electrodes by fem. In: *XVII International Symposium on High Voltage Engineering*. Hannover, Germany: [s.n.], 2011. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 62.
- 87 LIU, J.; MADSEN, S. F. Transient analysis of an earthing system during lightning strike exposure. In: *International Conference on Lightning and Static Electricity*. Seattle, U.S.A: [s.n.], 2013. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 63.
- 88 ALMAGUER, H. A. D. et al. A feasibility study on the use of concrete pole bases as a grounding topology for distribution systems. In: *XII International Symposium on Lightning Protection*. Belo Horizonte, Brasil: [s.n.], 2013. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 63.
- 89 COELHO, R. A.; ALMAGUER, H. A. D. Modeling of grounding systems considering the soil ionization effect using comsol multiphysics software. In: *COMSOL Conference*. Curitiba, Brasil: [s.n.], 2014. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 63.
- 90 SEKIOKA, S. et al. Current-dependent grounding resistance model based on energy balance of soil ionization. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 1, p. 194–201, Jan. 2006. Citado 6 vezes nas páginas 9, 49, 53, 57, 58 e 60.
- 91 MAFRA, E. H.; COELHO, R. A.; ALMAGUER, H. A. D. A procedure for modeling grounding systems considering the soil ionization effect using comsol multiphysics. In: *International Conference on Grounding and Earthing*. Manaus, Brazil: [s.n.], 2014. Citado na página 49.

- 92 YUNUS, M. S. M. et al. Performance of earthing systems for different earth electrode configuration. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 51, n. 6, p. 5335–5342, Dezembro 2015. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 63.
- 93 BELLASCHI, P. L.; ARMINGTON, R. E.; SNOWDEN, A. E. Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds- part ii. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers - AIEE*, v. 61, n. 6, p. 349–364, Janeiro 1942. Citado 5 vezes nas páginas 9, 53, 58, 59 e 60.
- 94 ALMEIDA, M. E.; BARROS, M. T. C. de. Accurate modeling of rod driven tower footing. *IEEE Transactions of Power Delivery*, v. 11, n. 3, p. 1606–1609, Julho 1996. Citado 3 vezes nas páginas 56, 57 e 60.
- 95 MOUSA, A. M. The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes. *IEEE Transactions of Power Delivery*, v. 9, n. 3, p. 1669–1677, Julho 1994. Citado na página 57.
- 96 CASSIE, A. M. Arc rupture and circuit severity: A new theory. *CIGRE*, n. 102, Julho 1939. Citado na página 58.
- 97 IEEE. *IEEE Std. 4*: IEEE standard for high-voltage testing technics. New York, USA, 2013. 199 p. Citado na página 72.