



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Tese de Doutorado

Avaliação da Resposta Transitória de Aterramentos Encapsulados por Concreto

Gabriel Vidal Negreiros Bezerra

Salvador - Bahia - Brasil

© Gabriel Vidal Negreiros Bezerra, Novembro, 2024

Gabriel Vidal Negreiros Bezerra

Avaliação da Resposta Transitória de Aterramentos Encapsulados por Concreto

Tese de Doutorado apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Universidade Federal da Bahia

Escola Politécnica

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Fernando Augusto Moreira, Prof. Doutor

Universidade Federal da Bahia - UFBA

Coorientador: Tarso Vilela Ferreira, Prof. Doutor

Universidade Federal de Sergipe - UFS

Salvador - Bahia - Brasil

Novembro, 2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Bernadete
Sinay Neves, Escola Politécnica – UFBA.

B574 Bezerra, Gabriel Vidal Negreiros.

Avaliação da resposta transitória de aterramentos encapsulados
por concreto / Gabriel Vidal Negreiros Bezerra. – Salvador, 2024.
167 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Augusto Moreira.

Coorientador: Prof. Dr. Tarso Vilela Ferreira.

Tese (doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia
Elétrica, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2024.

1. Energia elétrica - Distribuição. 2. Linhas elétricas
subterrâneas. I. Moreira, Fernando Augusto. II. Ferreira, Tarso
Vilela. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.


CDD: 621.319

Gabriel Vidal Negreiros Bezerra


Avaliação da Resposta Transitória de Aterramentos Encapsulados por Concreto

Tese de doutorado aprovada como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia.


Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDO AUGUSTO MOREIRA**
Data: 10/02/2025 11:51:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fernando Augusto Moreira - UFBA
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **TARSO VILELA FERREIRA**
Data: 10/02/2025 13:47:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Tarso Vilela Ferreira - UFS
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **FELIPE MENDES DE VASCONCELLOS**
Data: 10/02/2025 21:11:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Felipe Mendes de Vasconcellos - UFBA
Membro

Documento assinado digitalmente
 **VITALY FELIX RODRIGUEZ ESQUERRE**
Data: 11/02/2025 19:22:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Vitaly Félix Rodriguez Esquerre - UFBA
Membro

Documento assinado digitalmente
 **ANTONIO CARLOS SIQUEIRA DE LIMA**
Data: 13/02/2025 17:45:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Antônio Carlos Siqueira de Lima - UFRJ
Membro

Documento assinado digitalmente
 **ALEXANDRE PIANTINI**
Data: 13/02/2025 13:39:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alexandre Piantini - USP
Membro

Salvador - Bahia - Brasil, 13 de dezembro de 2024.

Dedico este trabalho à Deus, minha amada esposa e meus queridos filhos.

Agradecimentos

Àquele que era antes do tempo e espaço existirem; àquele que nos deu a vida, o universo e a si mesmo; meus maiores e mais profundos agradecimentos. Meu Senhor e Salvador, obrigado por me conceder força e perseverança.

Agradeço à minha amada esposa Valdice Vidal, por desde o início ter acreditado e me apoiado nesta jornada de estudos. Agradeço, por ter sempre me dado suporte para que fosse possível realizar a presente pesquisa. Sem seu apoio, nem início haveria.

Agradeço ao Prof. Fernando Augusto Moreira por sua orientação, dedicação, paciência e conselhos durante essa caminhada. Sim, um bom orientador faz diferença. Sem seu apoio a caminhada seria consideravelmente mais difícil.

Agradeço ao Prof. Tarso Vilela Ferreira pela sua orientação e encorajamento; o primeiro professor a ter me inserido no mundo da pesquisa e o primeiro a ter acreditado no meu potencial ainda na graduação. Sua parceria e apoio sempre fez e fará diferença.

Agradeço ao Prof. Rafael Alipio por suas contribuições quanto à análise dos resultados da pesquisa, assim como por sua importante parceria em uma das publicações realizadas. Sua experiência e leveza foram de grande valia.

Agradeço ao Prof. José Pissolato Filho e ao Dr. Anderson Ricardo Justo de Araújo, da Universidade Estadual de Campinas, pela cooperação e suporte na utilização do *FEKO*.

Agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, lugar que me formou como engenheiro e pesquisador. Agradeço sobretudo aos professores Edson Guedes da Costa e George Rossany Lira, que tanto contribuíram para a minha formação.

O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano.

Isaac Newton

*A experiência nunca falha, apenas as nossas opiniões falham,
ao esperar da experiência aquilo que ela não é capaz de oferecer.*

Leonardo da Vinci

É justo que muito custe o que muito vale.

Ma. Teresa D'Ávila

Resumo

O correto dimensionamento do sistema de aterramento garante confiabilidade e segurança no funcionamento das linhas de transmissão sob condições de descargas atmosféricas. Quanto a isso, ao longo do tempo, esforços têm sido realizados buscando-se novas técnicas para aprimoramento da resposta transitória dos aterramentos, principalmente para solos de alta resistividade. Nesse sentido, uma das técnicas há muito conhecida é a utilização de materiais de baixa resistividade ao redor dos eletrodos de aterramentos, tais como a bentonita e o concreto. No entanto, apesar do tempo decorrido, poucos trabalhos na literatura realizam um estudo aprofundado sobre a caracterização da resposta transitória de aterramentos encapsulados por concreto, o que teria especial importância na avaliação dos mesmos para uso em aterramentos de torres de linhas de transmissão. Diante do exposto, e visando contribuir com o estado da arte, neste trabalho, a resposta transitória de eletrodos de aterramento encapsulados por concreto é investigada. Para isso, realizaram-se simulações através do método dos elementos finitos, considerando uma rigorosa modelagem eletromagnética. Foram analisados aterramentos encapsulados por concreto do tipo eletrodo vertical (haste) com 3 e 30 m, assim como de eletrodo horizontal (contrapeso) com 15, 30, 45 e 60 m. Consideraram-se excitações de correntes impulsivas de primeira descarga e descarga subsequente. O efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo foi considerado. Além disso, solos com resistividades baixa, média e alta ($300 \Omega.m$ a $4000 \Omega.m$) foram avaliados. Diferentes comprimentos de revestimento de concreto foram levados em consideração, a fim de verificar situações de encapsulamento parcial ou total. Para todos esses casos, a impedância harmônica (de 60 Hz a 4 MHz) foi simulada, sendo calculadas a respectiva elevação de potencial no aterramento e a impedância impulsiva. Ao todo, foram avaliados 150 aterramentos diferentes, sendo cada um submetido a duas descargas, totalizando 300 respostas impulsivas. Os resultados indicam que a concretagem do eletrodo, em solos de média e alta resistividade produziu reduções médias na impedância impulsiva de até 40%, para a haste vertical com 3 m, considerando primeira descarga e subsequente. Já para os eletrodos horizontais, a redução na impedância impulsiva, em solos de média e alta resistividade, foi de até 22%, para primeira descarga, enquanto que para descarga subsequente os resultados variaram consideravelmente entre 10% a 26%, a depender do comprimento do eletrodo e da resistividade do solo. Além disso, constatou-se que o uso de concreto no aterramento reduz o comprimento efetivo do eletrodo.

Palavras-chave: Aterramento Encapsulado por Concreto. Dependência da Frequência dos Parâmetros do Solo. Descargas Atmosféricas. Linhas de Transmissão. Impedância impulsiva. Transitórios Eletromagnéticos.

Abstract

Grounding system design ensures safety compliance for transmission lines under lightning conditions. In this regard, over time, efforts have been made to seek new techniques to improve the transient response of grounding, mainly for high resistivity soils. In this sense, one of the long-known techniques is the use of low resistivity materials around the grounding electrodes, such as bentonite and concrete. However, despite the elapsed time, few works in the literature carry out an in-depth study on the characterization of the transient response of concrete-encased groundings; which would have special importance in the evaluation of them for use in transmission line tower grounding. Given the above, in order to contribute to the state of the art, in this work, the transient response of concrete encapsulated electrodes is investigated. For this purpose, simulations were performed using the finite element method, considering a rigorous electromagnetic modeling. Concrete-encapsulated groundings of the vertical electrode type (rod) with 3 and 30 m, as well as horizontal electrode (counterpoise) with 15, 30, 45 and 60 m, were analyzed. First and subsequent stroke impulsive current excitations were considered. The effect of frequency dependence of soil parameters was taken into account. In addition, soils with low, medium and high resistivities ($300 \Omega.m$ to $4000 \Omega.m$) were evaluated. Different lengths of concrete casing were taken into account in order to verify situations of partial or total encapsulation. For all these cases, the harmonic impedance (from 60 Hz to 4 MHz) was simulated, and the respective ground potential rise and impulsive impedance were calculated. In total, 150 different groundings were evaluated, each subjected to two discharges, totaling 300 impulsive responses. The results indicate that the concreting of the electrode in high resistivity soils produced average reductions in impulsive impedance of up to 40% for the 3 m vertical rod, considering first and subsequent stroke. For the horizontal electrodes, the reduction in impulsive impedance in high resistivity soils was up to 22% for first stroke, while for subsequent stroke the results varied considerably between 10% and 26%, depending on the electrode length and soil resistivity. Furthermore, it was found that the use of concrete in grounding reduces the effective length of the electrode.

Keywords: Concrete encased grounding. Frequency dependence of electric parameters of Soil. Ground enhancing compound. Impulse Impedance. Lightning response. Low resistivity material. Transmission line tower footing.

Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Exemplos de aterramentos elétricos.	8
Figura 2.2 – Esboço dos principais fenômenos que ocorrem em sistemas de aterramento. Efeito: (a) resistivo, (b) capacitivo, (c) indutivo, (d) dependência da frequência da resistividade e permissividade do solo, (e) propagação de ondas através dos eletrodos e a (f) ionização do solo.	9
Figura 2.3 – Componentes da corrente e circuito equivalente de um eletrodo elementar (vertical ou horizontal) de aterramento.	10
Figura 2.4 – Tipos de aterramentos quanto ao emprego de materiais aditivos: (a) convencional, (b) com tratamento químico e (c) encapsulado por concreto.	11
Figura 2.5 – Modelo de haste concretada desenvolvida por Rodrigues (2012).	13
Figura 2.6 – Impedância harmônica $Z(j\omega)$: simulação para aterramento com eletrodo horizontal convencional, modelado como cilindro condutor perfeito (PEC), de comprimento $L = 30$ m, raio 8 mm, enterrado a uma profundidade de 0,5 m, em um solo com resistividade de 4000 Ω .m. Solo com parâmetros dependentes da frequência. Amplitude da impedância (curva contínua azul) e ângulo (curva tracejada laranja). R_{BF} resistência de baixa frequência analítica. Z_{60Hz} impedância harmônica à 60 Hz.	16
Figura 2.7 – Estrutura básica de uma torre de LT aterrada e o respectivo fluxo da corrente (setas amarelas) quando da incidência de uma DA no(s) cabo-guarda.	18
Figura 2.8 – Estrutura de aterramento de torres de linhas de transmissão (vista superior).	19
Figura 2.9 – Sapatas da fundação de torre autoportante de linha de transmissão.	20
Figura 2.10 – Esboço das principais grandezas que definem as características elétricas do concreto: (a) Resistividade da solução porosa, (b) Porosidade e (c) Conectividade.	22

Figura 2.11–Resistividade normalizada (ρ_n) e Permissividade relativa (ε_r) do Solo, considerando o modelo de Alipio e Visacro (2014), para solos de 300 Ω .m, 1000 Ω .m, 2000 Ω .m e 4000 Ω .m. Frequências entre 60 Hz e 4 MHz.	23
Figura 2.12–Formas de onda da corrente média de (a) primeira descarga (PRI) e (b) descarga subsequente (SUB) da Estação Morro do Cachimbo (MCS), representadas através da expressão proposta por Conti e Visacro (2007).	26
Figura 2.13–Situações de <i>flashover</i> (esquerda) e <i>backflashover</i> (direita) em linhas de transmissão.	28
Figura 2.14–Ocorrência de <i>backflashover</i> em uma linha de transmissão.	28
Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia para realização dos estudos do presente trabalho. O ponto preto indica as etapas onde existe obtenção de resultados.	48
Figura 4.2 – Arranjo de simulação para os estudos de aterramentos encapsulados por concreto. Eletrodo Horizontal - EH (contrapeso) à esquerda. Eletrodo Vertical - EV (haste) à direita. Imagem fora de escala para propósitos ilustrativos.	50
Figura 4.3 – Campo elétrico (em kV/m) para AEC-EH, com $L = 15$ m, $h_c = 2/4$ e $D_c = 20$ cm, em solo de 1000 Ω m, quando submetido a uma tensão de teste de 1 kV e 4 MHz. Escala de cor alterada para evidenciar comportamento do campo. Simulação considerando simetria por corte vertical.	52
Figura 4.4 – Campo elétrico (em kV/m) para AEC-EV, com $L = 3$ m, $h_c = 1/4$ e $D_c = 20$ cm, em solo de 1000 Ω m, quando submetido a uma tensão de teste de 1 kV e 4 MHz. Escala de cor alterada para evidenciar comportamento do campo. Simulação considerando simetria radial.	53
Figura 5.1 – Montagem para medição da elevação de potencial (GPR) resultante da circulação de uma corrente impulsiva por um eletrodo horizontal de 9,6 m enterrado em um solo de $\rho_0 = 1400$ Ω .m.	58
Figura 5.2 – Dependência da frequência da resistividade relativa ρ_r (a) e da permissividade relativa ε_r (b) para o solo analisado ($\rho_0 = 1400$ Ω .m). Dados de medições experimentais.	58
Figura 5.3 – Comparação entre o GPR (azul) medido por Alipio (2013) e o simulado através da impedância harmônica fornecida pelo Comsol; para impulsos de corrente (vermelho) com (a) 0,4 μ s e (b) com 1,4 μ s de tempo de frente.	59
Figura 5.4 – Esboço gráfico da Equação 5.3 para cálculo da resistência de baixa frequência para eletrodos encapsulados por concreto (ou outro material).	62

Figura 5.5 – Comparativo da impedância harmônica $Z(60Hz)$ e resistência de baixa frequência analítica (R_{LF}), considerando EV com 3 m , nu (azul) e concretado (vermelho); para as situações extremas de solo com 300 e 4000 $\Omega.m$	63
Figura 5.6 – Comparativo da impedância harmônica $Z(60Hz)$ e resistência de baixa frequência analítica (R_{LF}), considerando EH com 30 m , nu (azul) e concretado (vermelho); para as situações extremas de solo com 300 e 4000 $\Omega.m$	64
Figura 6.1 – Impedância harmônica $Z(j\omega)$ considerando solo com parâmetros constantes e com parâmetros dependentes da frequência , para AEC do tipo EV, com $L = 3 m$, $h_c = 1/4$ e $D_c = 20 cm$	66
Figura 6.2 – Impedância harmônica $Z(\omega)$ considerando solo com parâmetros constantes e com parâmetros dependentes da frequência , para AEC do tipo EV com $L = 30 m$, $h_c = 1/4$ e $D_c = 20 cm$	67
Figura 6.3 – GPR considerando solo com parâmetros constantes e com parâmetros dependentes da frequência , para AEC do tipo EV com $L = 3 m$, $h_c = 1/4$ e $D_c = 20 cm$; nas situações de PRI e SUB.	68
Figura 6.4 – GPR considerando solo com parâmetros constantes e com parâmetros dependentes da frequência , para AEC do tipo EV com $L = 30 m$, $h_c = 1/4$ e $D_c = 20 cm$; nas situações de PRI e SUB.	69
Figura 6.5 – Impedância harmônica $Z(j\omega)$ para AEC-EV com $L = 3 m$, $h_c = 4/4$, $D_c = 20 cm$ e diferentes resistividades de concreto ($\rho_c = 30$ a $150 \Omega.m$).	72
Figura 6.6 – Impedância harmônica $Z(j\omega)$ para AEC-EV com $L = 30 m$, $h_c = 4/4$, $D_c = 20 cm$ e diferentes resistividades de concreto ($\rho_c = 30$ a $150 \Omega.m$).	73
Figura 6.7 – GPR para AEC do tipo haste vertical com $L = 3 m$, $h_c = 4/4$, $D_c = 20 cm$, considerando diferentes resistividades de concreto ($\rho_c = 30$ a $150 \Omega.m$). Descargas: PRI e SUB.	74
Figura 6.8 – GPR para AEC do tipo haste vertical com $L = 30 m$, $h_c = 4/4$, $D_c = 20 cm$, considerando diferentes resistividades de concreto ($\rho_c = 30$ a $150 \Omega.m$). Descargas: PRI e SUB.	75
Figura 6.9 – Impedância impulsiva Z_p para AEC tipo haste vertical com $L = 3 m$, $h_c = 4/4$, $D_c = 20 cm$, considerando diferentes resistividades de concreto ($\rho_c = 30$ a $150 \Omega.m$). Descargas: PRI e SUB.	76
Figura 6.10 – Impedância impulsiva Z_p para AEC tipo haste vertical com $L = 30 m$, $h_c = 4/4$, $D_c = 20 cm$, considerando diferentes resistividades de concreto ($\rho_c = 30$ a $150 \Omega.m$). Descargas: PRI e SUB.	76

Figura 6.11–Elevação percentual na Impedância impulsiva para AEC tipo haste vertical com $L = 3$ m, $h_c = 4/4$, $D_c = 20$ cm, para resistividades de concreto (ρ_c) de 60 a 150 Ω .m. Percentual calculado em relação ao resultado de $\rho_c = 30$ Ω .m. Descargas: PRI e SUB.	77
Figura 6.12–Elevação percentual na Impedância impulsiva para AEC tipo haste vertical com $L = 30$ m, $h_c = 4/4$, $D_c = 20$ cm, para resistividades de concreto (ρ_c) de 60 a 150 Ω .m. Percentual calculado em relação ao resultado de $\rho_c = 30$ Ω .m. Descargas: PRI e SUB.	77
Figura 6.13–Impedância harmônica $Z(j\omega)$ para AEC-EV com $L = 3$ m, $D_c = 20$ cm e diferentes frações de concretagem (h_c), para ρ_{solo} de 300 a 4000 Ω .m.	78
Figura 6.14–Impedância harmônica $Z(j\omega)$ para AEC-EV com $L = 30$ m, $D_c = 20$ cm e diferentes frações de concretagem (h_c), para ρ_{solo} de 300 a 4000 Ω .m.	80
Figura 6.15–GPR para AEC-EV com $L = 3$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.	83
Figura 6.16–GPR para AEC-EV com $L = 30$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.	84
Figura 6.17–Impedância impulsiva Z_p (Ω) para AEC-EV com $L = 3$ e 30 m, $D_c = 20$ cm e diferentes frações de concretagem h_c . Descargas: PRI e SUB.	86
Figura 6.18–Redução percentual de Z_p (%) para AEC-EV com $L = 3$ e 30 m, considerando PRI e SUB. Referência para o cálculo: Z_p do eletrodo nu.	87
Figura 6.19–Impedância harmônica $Z(j\omega)$ para AEC-EH com $L = 15$ m, $D_c = 20$ cm e diferentes frações de concretagem (h_c), para ρ_{solo} de 300 a 4000 Ω .m.	90
Figura 6.20–Impedância harmônica $Z(j\omega)$ para AEC-EH com $L = 30$ m, $D_c = 20$ cm e diferentes frações de concretagem (h_c), para ρ_{solo} de 300 a 4000 Ω .m.	92
Figura 6.21–GPR para AEC-EH com $L = 15$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.	94
Figura 6.22–GPR para AEC-EH com $L = 30$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.	95
Figura 6.23–Impedância impulsiva Z_p (Ω) para AEC-EH com $L = 15$ a 60 m, $D_c = 20$ cm e diferentes frações de concretagem h_c . Descargas: PRI e SUB.	98

Figura 6.24–Redução percentual de Z_p (%) para AEC-EH com $L = 15$ a 60 m, considerando PRI e SUB. Referência para o cálculo: Z_p do eletrodo nu.	99
Figura A.1–Representação do módulo do Comsol mais adequado a depender da maior dimensão do objeto (L_c) e da maior frequência operacional de interesse (ou maior comprimento de onda λ de interesse).	117
Figura A.2–Malha de elementos finitos para um eletrodo vertical (EV) de 30 m, posicionado no eixo de um domínio cilíndrico de solo com raio de 50 m e altura de $30(EV)+50(solo)+1(ar) = 81$ m. Representação axissimétrica em relação ao eixo vertical $r = 0$. Simulação 2D, mas com resultado 3D, por conta da simetria cilíndrica.	120
Figura A.3–Impedância Harmônica $ Z(j\omega) $ para $r_{solo} = 10, 20, 30, 40, 50$ e 60 m. Considerando EVs com $L = 3$ e 30 m e solos com $\rho_{solo} = 300$ e $4000 \Omega.m$.	123
Figura A.4–Impedância Harmônica $ Z(j\omega) $ para $L_{seg} = 2,5; 5; 10; 20$ e 40 cm. Considerando EVs com $L = 3$ e 30 m e solos com $\rho_{solo} = 300$ e $4000 \Omega.m$ (assumindo $r_{solo} = 50$ m, $c_{min.} = 0,1$ m, $c_{max.} = 2$ m, $\Delta_{max.} = 1.3$).	124
Figura A.5–Impedância Harmônica $ Z(j\omega) $ para $c_{max.} = 1; 2; 4$ e 8 m. Considerando EVs com $L = 3$ e 30 m e solos com $\rho_{solo} = 300$ e $4000 \Omega.m$ (assumindo $L_{seg} = 5$ cm, $r_{solo} = 50$ m, $c_{min.} = 5$ cm, $\Delta_{max.} = 1.3$).	126
Figura A.6–Impedância Harmônica $ Z(j\omega) $ para $\Delta_{max.} = 1,1; 1,3; 1,5$ e $1,7$ m. Considerando EVs com $L = 3$ e 30 m e solos com $\rho_{solo} = 300$ e $4000 \Omega.m$ (assumindo $r_{solo} = 50$ m, $L_{seg} = c_{min.} = 5$ cm e $C_{max.} = 8$ m).	127
Figura B.1–Impedância harmônica $Z(j\omega)$ para AEC-EH com $L = 45$ m, $D_c = 20$ cm e diferentes frações de concretagem (h_c), para ρ_{solo} de 300 a $4000 \Omega.m$.	135
Figura B.2–GPR para AEC-EH com $L = 45$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.	137
Figura B.3–Impedância harmônica $Z(j\omega)$ para AEC-EH com $L = 60$ m, $D_c = 20$ cm e diferentes frações de concretagem (h_c), para ρ_{solo} de 300 a $4000 \Omega.m$.	139
Figura B.4–GPR para AEC-EH com $L = 60$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.	141

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Parâmetros $h(\sigma_0)$, γ e $\frac{\epsilon_\infty}{\epsilon_0}$ do modelo de Alipio e Visacro (2014).	24
Tabela 2.2 – Parâmetros para geração de PRI (CONTI; VISACRO, 2007).	26
Tabela 2.3 – Parâmetros para geração de SUB (CONTI; VISACRO, 2007).	26
Tabela 3.1 – Comparativo ente os trabalhos da revisão bibliográfica e as contribuições do presente trabalho, em ordem cronológica.	45
Tabela 3.2 – Continuação do comparativo ente a revisão bibliográfica e as contribuições do presente trabalho, em ordem cronológica.	46
Tabela 4.1 – Casos avaliados no presente trabalho. Onde L é o comprimento do eletrodo, ρ_{solo} a resistividade de baixa frequência do solo, D_c o diâmetro do concreto, h_c a fração de concretagem do eletrodo e PRI e SUB os tipos de descargas.	54
Tabela 5.1 – Comparação do GPR simulado em relação ao GPR experimental para os casos da Figura 5.3a e Figura 5.3b.	59
Tabela 5.2 – Comparação entre a resistência de baixa frequência analítica (R_{LF}) e a impedância à 60 Hz (Z_{60Hz}) estimada pelo <i>Vector Fitting</i> ; para EV com 3 m considerando as situações de eletrodo nu e concretado (com diâmetro de concretagem igual a 20 cm).	63
Tabela 5.3 – Comparação entre a resistência de baixa frequência analítica (R_{LF}) e a impedância à 60 Hz (Z_{60Hz}) estimada pelo VF; para EH com 30 m considerando as situações de eletrodo nu e concretado (com diâmetro de concretagem igual a 20 cm).	63
Tabela 6.1 – Impedância impulsiva Z_p (Ω) considerando modelos de solo com parâmetros constantes e com parâmetros dependentes da frequência , para AEC do tipo EV com $L = 3$ m, $h_c = 1/4$ e $D_c = 20$ cm.	68
Tabela 6.2 – Impedância impulsiva Z_p (Ω) considerando modelos de solo com parâmetros constantes e com parâmetros dependentes da frequência , para AEC do tipo EV com $L = 30$ m, $h_c = 1/4$ e $D_c = 20$ cm.	69

Tabela B.1 – Funções racionais (resíduos e polos) para eletrodos verticais (EV) , com L = 3m e $D_c = 20\text{cm}$, para diferentes ρ_{solo} . Situações: sem concreto ($h_c = 0$) e totalmente concretado ($h_c = 4/4$).	129
Tabela B.2 – Funções racionais (resíduos e polos) para eletrodos verticais (EV) , com L = 30m e $D_c = 20\text{cm}$, para diferentes ρ_{solo} . Situações: sem concreto ($h_c = 0$) e totalmente concretado ($h_c = 4/4$).	130
Tabela B.3 – Funções racionais (resíduos e polos) para eletrodos horizontais (EH) , com L = 15m e $D_c = 20\text{cm}$, para diferentes ρ_{solo} . Situações: sem concreto ($h_c = 0$) e totalmente concretado ($h_c = 4/4$).	131
Tabela B.4 – Funções racionais (resíduos e polos) para eletrodos horizontais (EH) , com L = 30m e $D_c = 20\text{cm}$, para diferentes ρ_{solo} . Situações: sem concreto ($h_c = 0$) e totalmente concretado ($h_c = 4/4$).	132
Tabela B.5 – Funções racionais (resíduos e polos) para eletrodos horizontais (EH) , com L = 45m e $D_c = 20\text{cm}$, para diferentes ρ_{solo} . Situações: sem concreto ($h_c = 0$) e totalmente concretado ($h_c = 4/4$).	133
Tabela B.6 – Funções racionais (resíduos e polos) para eletrodos horizontais (EH) , com L = 60m e $D_c = 20\text{cm}$, para diferentes ρ_{solo} . Situações: sem concreto ($h_c = 0$) e totalmente concretado ($h_c = 4/4$).	134
Tabela B.7 – Valor de pico do GPR (Mega-Volts) para AEC- EV com L = 3 m , $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.	142
Tabela B.8 – Valor de pico do GPR (Mega-Volts) para AEC- EV com L = 30 m , $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.	143
Tabela B.9 – Valor de pico do GPR (Mega-Volts) para AEC- EH com L = 15 m , $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.	143
Tabela B.10 – Valor de pico do GPR (Mega-Volts) para AEC- EH com L = 30 m , $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.	143
Tabela B.12 – Valor de pico do GPR (Mega-Volts) para AEC- EH com L = 60 m , $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.	144
Tabela B.11 – Valor de pico do GPR (Mega-Volts) para AEC- EH com L = 45 m , $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.	144
Tabela B.13 – Impedância impulsiva Z_p (Ω) para AEC- EV com L = 3 m , $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.	144

Tabela B.14–Impedância impulsiva Z_p (Ω) para AEC- EV com $L = 30$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.	145
Tabela B.15–Impedância impulsiva Z_p (Ω) para AEC- EH com $L = 15$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.	145
Tabela B.16–Impedância impulsiva Z_p (Ω) para AEC- EH com $L = 30$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.	145
Tabela B.17–Impedância impulsiva Z_p (Ω) para AEC- EH com $L = 45$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.	146
Tabela B.18–Impedância impulsiva Z_p (Ω) para AEC- EH com $L = 60$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.	146

Lista de abreviaturas e siglas

AEC	Aterramento Encapsulado por Concreto
DA	Descarga Atmosférica
EH	Eletrodo Horizontal
EMT	<i>Electromagnetic Transient</i> : transitório eletromagnético
EV	Eletrodo Vertical
GEC	<i>Grounding Enhancing Compound</i> : composto aprimorador de aterramento
GPR	<i>Ground Potential Rise</i> . Elevação de potencial no ponto de injeção da corrente
LRM	<i>Low Resistivity Material</i> : material de baixa resistividade
LT	Linha de Transmissão
MEF	Método dos Elementos Finitos
MoM	<i>Method of Moments</i> : Método dos Momentos
PEC	<i>Perfect Electric Conductor</i> : condutor elétrico perfeito
PRI	Primeira Descarga
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SUB	Descarga Subsequente
VF	<i>Vector Fitting</i> : Software para estimação de sistemas através de funções racionais

Lista de símbolos

A	Potencial vetorial magnético
A_{imp}	Coefficiente impulsivo
B	Densidade de Fluxo magnético
c_0	Velocidade da luz no vácuo
D	Densidade de fluxo elétrico
E	Campo elétrico
ϵ_0	Permissividade elétrica do espaço livre
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa
H	Intensidade de campo magnético
L	Comprimento do eletrodo (vertical ou horizontal)
h_c	Comprimento do encapsulamento de concreto
$i(t)$	Corrente elétrica no domínio do tempo
I_p	Pico da corrente elétrica
J	Densidade de corrente de condução
μ_0	Permeabilidade magnética do espaço livre
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
<i>profund.</i>	Profundidade do aterramento em relação ao nível do solo
ρ	Resistividade elétrica

ρ_c	Resistividade elétrica do concreto
ρ_{solo}	Resistividade elétrica do solo
D_c	Diâmetro ou espessura do encapsulamento de concreto
R_{BF}	Resistência de baixa frequência
σ	Condutividade elétrica
σ_c	Condutividade elétrica do concreto
$v(t)$	Potencial elétrico no tempo (tensão)
V_p	Pico da tensão elétrica
$z(t)$	Impedância transitória
$\mathbf{Z}(j\omega)$	Impedância harmônica
$ \mathbf{Z} $	Amplitude da impedância harmônica
$\angle \mathbf{Z}$	Ângulo da impedância harmônica
Z_p	Impedância impulsiva
Z_{BF}	Impedância de baixa frequência
Z_{60Hz}	Impedância harmônica à 60 Hz

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Geral	3
1.2.2	Específicos	3
1.3	Material e Métodos: um Panorama	4
1.4	Organização do Trabalho	5
1.5	Publicações Resultantes da Pesquisa	5
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1	Sistemas de Aterramento	7
2.1.1	Fenômenos Inerentes aos Aterramentos	9
2.1.2	Classificação dos Sistemas de Aterramento	11
2.1.3	Grandezas para Avaliação de Sistemas de Aterramento	13
2.2	Aterramento de Torres de Linhas de Transmissão	17
2.3	Aterramentos Encapsulados por Concreto (AEC)	20
2.3.1	A Característica Higroscópica do Concreto	21
2.3.2	Condução de Corrente pelo Concreto	22
2.4	O Fenômeno da Dependência da Frequência do Solo	23
2.5	Descargas Atmosféricas	25
2.6	<i>Flashover e Backflashover</i>	26
3	ESTADO DA ARTE	29
3.1	Aterramentos Encapsulados por Concreto (AEC)	29
3.1.1	Considerações	43
3.2	Contribuições do Presente Trabalho	44
4	METODOLOGIA	47
4.1	Visão Geral	47
4.2	Arranjo de Simulação no Comsol	49
4.3	Casos Estudados	53
4.4	O Métodos dos Elementos Finitos em Simulações de Aterramentos	55

5	VALIDAÇÃO	57
5.1	Validação do Arranjo de Simulação e Efeito da Dependência da Frequência do Solo no Consol	57
5.2	Validação da Modelagem de Aterramentos Concretados	60
6	RESULTADOS E ANÁLISES	65
6.1	O Efeito da Dependência da Frequência do Solo em AECs	65
6.2	Análise de Sensibilidade da Resistividade do Concreto	70
6.3	AEC tipo Eletrodo Vertical (EV)	77
6.4	AEC tipo Eletrodo Horizontal (EH)	89
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	102
7.1	Conclusões	102
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	104
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
A	CONFIGURAÇÕES PERTINENTES AO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	116
A.1	Equação Governante	116
A.2	Condições de Contorno	118
A.3	Malha dos Elementos Finitos	119
B	RESULTADOS COMPLEMENTARES	128
B.1	Funções racionais obtidas com o <i>Vector Fitting</i>	129
B.2	Impedância Harmônica e GPR - Complementares	135
B.3	Tabelas com Valores de Pico do GPR e Impedância Impulsiva	142

Introdução

O sistema de aterramento tem uma notável importância na proteção e confiabilidade dos sistemas de energia elétrica. Entre seus principais objetivos estão: proporcionar proteção contra descargas atmosféricas (DA) em linhas de transmissão (LT), facilitar sensibilização do sistema de proteção durante a ocorrência de faltas ou defeitos, proteção de pessoas que circulam em uma instalação, escoamento de cargas estáticas, bem como promover o correto funcionamento de equipamentos que necessitam de uma conexão efetiva com a terra.

Na maioria das aplicações é desejável que o sistema de aterramento apresente idealmente uma impedância mais próxima possível de zero (VISACRO, 2007). Contudo, sob uma perspectiva de engenharia, comumente, valores de impedância próximos à zero são praticamente inviáveis do ponto de vista econômico e/ou técnico. Assim sendo, a busca por técnicas e inovações que possibilitem o melhoramento e otimização do aterramento de forma viável consiste em um campo ativo de pesquisa.

Os aterramentos podem estar sujeitos a correntes e fenômenos tanto de baixa frequência quanto de alta frequência. A resposta de baixa frequência dos aterramentos é bem conhecida e facilmente medida com testadores de aterramento padrão (também conhecido como terrômetros). Por outro lado, em várias situações típicas, o aterramento do sistema de potência está sujeito não apenas a correntes de baixa frequência, mas também a fenômenos transitórios de alta frequência, como as DAs (VISACRO, 2007; VISACRO; ROSADO, 2009).

Estima-se que cerca de 40% a 70% das falhas em linhas de transmissão provêm de descargas atmosféricas (TU; HE; ZENG, 2006; VISACRO et al., 2015). A incidência de DA em LTs pode ocasionar sobretensões e campos elétricos superiores à rigidez dielétrica do ar, com conseqüente formação de arco elétrico entre os dois terminais de uma (ou mais) cadeia de isoladores da LT. Tais rupturas podem ser classificadas em descarga disruptiva no isolamento (*flashover*) e descarga disruptiva de retorno (*backflashover*) (VISACRO, 2007). Este último fenômeno é a principal razão para interrupções não programadas de LTs

(IEEE Std.1243, 1997). Sabe-se que altos valores de impedância de aterramento em torres de LT são um dos principais fatores que contribuem para a ocorrência de *backflashover* (WESTINGHOUSE-CORP., 1964; VISACRO et al., 2015; SILVEIRA; VISACRO, 2019). Quanto a isso, ao longo dos anos, diversos esforços têm sido feitos no sentido de desenvolver sistemas de aterramento com resposta transitória otimizada, a fim de corroborar com a redução das taxas de *backflashover*. Esta busca por técnicas que reduzam a impedância de aterramento é de particular importância em solos de média e alta resistividade, que notadamente tendem a produzir impedâncias de aterramento mais altas do que solos de baixa resistividade (TU; HE; ZENG, 2006).

Uma das técnicas conhecidas para melhorar a impedância de aterramento é o uso de materiais de baixa resistividade ao redor dos eletrodos de aterramento, também conhecidos como *Low Resistivity Material* (LRM), *Grounding Enhancing Compounds* (GEC) e *Grounding Backfill Material*. Dentre esses materiais, alguns dos mais conhecidos são o concreto de fundação, a bentonita e os cimentos condutivos (HE; ZENG; ZHANG, 2013; UFER, 1964). Estudos têm indicado que o concreto é superior à bentonita tanto na resposta à DA quanto na estabilidade de suas propriedades frente às variações climáticas e pluviométricas (FAGAN; LEE, 1970; ANDROVITSANEAS; GONOS; STATHOPULOS, 2014; ANDROVITSANEAS; GONOS; STATHOPULOS, 2017; TRONCHONI et al., 2017). Além disso, o concreto possui a vantagem de ter baixo custo quando comparado à bentonita e ao cimento condutivo, além de haver mais aplicações relatadas na literatura.

1.1 Motivação

O uso do concreto como material para melhoria do aterramento foi inicialmente identificado por UFER em 1964, o qual realizou várias medições de resistência de baixa frequência (R_{BF}) em fundações de instalações militares no Arizona, EUA. Foi observado que, devido à sua característica higroscópica que possibilita reter a umidade do solo, o concreto apresentava excelentes características como material aprimorador de aterramento.

No entanto, desde então, poucos estudos foram realizados sobre a resposta transitória (alta frequência) de aterramento encapsulado em concreto (AEC) (FAGAN; LEE, 1970; ANDROVITSANEAS; GONOS; STATHOPULOS, 2014; ANDROVITSANEAS; GONOS; STATHOPULOS, 2017; TRONCHONI et al., 2017; ANDROVITSANEAS; GONOS; STATHOPULOS, 2016). Aqueles trabalhos que analisaram a resposta transitória de AEC usualmente consideraram casos particulares de pequenas hastes verticais com até 2,5 m (FAGAN; LEE, 1970; ANDROVITSANEAS; GONOS; STATHOPULOS, 2014; ANDROVITSANEAS; GONOS; STATHOPULOS, 2017; ANDROVITSANEAS; GONOS; STATHOPULOS, 2016). Após buscas na literatura, não foi encontrado nenhum trabalho que apresente uma análise sistemática da resposta transitória de AECs, indicando o efeito

que o percentual de concretagem do eletrodo tem na resposta transitória. Além disso, observou-se também poucos trabalhos que avaliam a resposta impulsiva para AEC do tipo eletrodo horizontal, o que teria especial importância para os estudos de aterramento contrapeso de LTs (TRONCHONI et al., 2017).

A caracterização da resposta transitória de AEC, principalmente da sua impedância impulsiva (Z_p), abre caminhos para um estudo mais aprofundado do seu uso em LTs. Isso se dá pelo fato de que Z_p é uma importante grandeza para que possa ser estimada a taxa de ocorrência de *backflashover* em LTs, de forma simplificada e precisa (VISACRO et al., 2015; VISACRO; SILVEIRA, 2016; VISACRO, 2018). Além disso, a concretagem de cabos contrapeso de LTs é uma técnica promissora para melhorar o aterramento de torres específicas, posicionadas em locais mais vulneráveis à incidência de descargas atmosféricas (e consecutiva ocorrência de *backflashover*), tais como no topo de montanhas e/ou em solos de alta resistividade (MENG et al., 1999).

Diante do exposto, o presente trabalho propõe-se a contribuir com o estado da arte apresentando uma análise original e aprofundada da resposta transitória de aterramentos encapsulados por concreto, considerando aterramentos do tipo eletrodo vertical e eletrodo horizontal, com comprimentos variados, dispostos em solos de baixa, média e alta resistividade. Além disso, o efeito da dependência da frequência que a permissividade e resistividade do solo possuem são levados em conta.

1.2 Objetivos

Nesta seção é apresentado de forma concisa o objetivo geral da tese, assim como os objetivos específicos que contribuem para que o objetivo geral seja alcançado.

1.2.1 Geral

Avaliar a resposta transitória de aterramentos encapsulados por concreto (AEC), em situações de primeiras descargas e subsequentes, considerando o efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo.

1.2.2 Específicos

- a) Avaliar a resposta transitória de AECs do tipo: eletrodo vertical (haste) e eletrodo horizontal (contrapeso);
- b) Avaliar o comportamento dos AECs quando submetidos à primeira descarga (PRI) e descarga subsequente (SUB);
- c) Analisar o comportamento do AEC para solos com baixa, média e alta resistividade ($300 \Omega.m \leq \rho_{solo} \leq 4000 \Omega.m$);

- d) Investigar a importância do fenômeno da dependência da frequência dos parâmetros do solo para simulações de AECs;
- e) Analisar a sensibilidade dos resultados quanto ao valor da resistividade do concreto (ρ_c);
- f) Estimar funções de transferência que representem a impedância harmônica dos AECs avaliados;
- g) Apresentar a elevação de potencial no solo (GPR) para PRI e SUB, em cada caso estudado;
- h) Calcular a impedância impulsiva (Z_p) para as situações supracitadas;
- i) Avaliar a redução percentual de Z_p promovida pelo encapsulamento de concreto;
- j) Estudar o efeito que a fração de encapsulamento (h_c) tem na resposta transitória.

1.3 Material e Métodos: um Panorama

O presente trabalho se presta a avaliar o comportamento de aterramentos concretados, quando submetidos a correntes impulsivas oriundas de descargas atmosféricas. Para se atingir esse objetivo, realizaram-se os seguintes passos:

1. Cálculo da impedância harmônica do aterramento via simulação computacional;
2. Estimação da função de transferência da impedância harmônica;
3. Cálculo do GPR e da impedância impulsiva do aterramento quando submetido a correntes de descargas atmosféricas, assim como a redução percentual na impedância impulsiva advinda do encapsulamento de concreto;
4. Análise dos resultados obtidos.

Para o Passo 1 calculou-se a impedância harmônica do aterramento utilizando um *software* de simulação computacional baseado no Métodos dos Elementos Finitos (MEF) denominado *Comsol Multiphysics* (COMSOL, 2017). Em todas as simulações com o Comsol utilizou-se um modelo de solo cujos parâmetros resistividade e permissividade são dependentes da frequência (ALIPIO; VISACRO, 2014) de forma a se obter uma modelagem mais precisa possível em relação ao atual estado da arte.

No Passo 2 utilizou-se a conhecida ferramenta *Vector Fitting* (GUSTAVSEN; SEMLYEN, 1999; GUSTAVSEN, 2006; DESCHRIJVER et al., 2008) que possibilita a estimação de sistemas através de funções racionais. Assim, o VF foi empregado para se estimar uma função de transferência que representasse a impedância harmônica do aterramento, possibilitando os cálculos a serem realizados no próximo passo.

No Passo 3, em posse da função de transferência estimada, pôde-se calcular o GPR e a impedância impulsiva (Z_p) do aterramento quando submetido à uma entrada (descarga atmosférica) utilizando convolução ou funções nativas do Matlab (à exemplo: *lsim()*). Além disso, foi calculada a redução percentual na impedância impulsiva, promovida pelo encapsulamento de concreto.

Por fim, no Passo 4, em posse do valores de Z_p e da redução percentual de Z_p , realizaram-se análises evidenciando-se o resultado que o encapsulamento de concreto promove na resposta transitória de diferentes tipos de aterramentos, sendo tecidas as respectivas conclusões.

1.4 Organização do Trabalho

Para possibilitar a melhor compreensão da temática abordada, o trabalho está organizado da seguinte forma: no [Capítulo 2](#) é apresentada uma fundamentação teórica dos conceitos básicos relativos aos aterramentos encapsulados por concreto e da resposta transitória de aterramentos sob excitação de correntes impulsivas; no [Capítulo 3](#) é realizada uma explanação cronológica do estado da arte quanto aos aterramentos encapsulados por concreto, evidenciando-se as contribuições da presente pesquisa; no [Capítulo 4](#) são apresentadas, de forma detalhada, a metodologia e procedimentos utilizados para a obtenção dos resultados; no [Capítulo 5](#) é realizado um estudo de validação das metodologias adotadas, assegurando a confiabilidade dos métodos empregados; no [Capítulo 6](#) são apresentados os resultados e análises quanto ao estudo da resposta transitória de aterramentos encapsulados por concreto; por fim, no [Capítulo 7](#) são apresentadas as conclusões, bem como sugestões para trabalhos futuros.

1.5 Publicações Resultantes da Pesquisa

Durante o desenvolvimento da presente pesquisa alguns trabalho foram publicados contendo os avanços obtidos até então. A seguir, são apresentadas as publicações realizadas:

1. BEZERRA, G. V. N.; MOREIRA, F. A.; FERREIRA, T. V.; VASCONCELLOS, F. M. Avaliação da resposta em frequência de aterramentos considerando solo com parâmetros dependentes da frequência utilizando o mef. In: *Congresso Brasileiro de Automática - CBA*. [S.l.: s.n.], 2020.
2. BEZERRA, G. V. N.; MOREIRA, F. A.; FERREIRA, T. V. Malhas de aterramento encapsuladas por concreto. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE*. [S.l.: s.n.], 2023.

3. BEZERRA, G. V. N.; MOREIRA, F. A.; FERREIRA, T. V.; ALIPIO, R. S. Concrete encased grounding: Lightning response analysis considering the frequency dependence of soil. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 66, n. 3, p. 879–889, abr. 2024.

Fundamentação Teórica

No presente capítulo são apresentadas as bases teóricas para o estudo da resposta transitória de aterramentos. Inicialmente, na [seção 2.1](#), são apresentados os conceitos básicos, principais grandezas e classificações para estudo de aterramentos. Em seguida, na [seção 2.2](#), são indicadas as principais características de aterramentos de LTs. Posteriormente, na [seção 2.3](#) os aterramentos encapsulados por concreto e seu princípio de funcionamento são abordados. Já na [seção 2.4](#) é apresentado o fenômeno da dependência da frequência que o solo possui e sua importância no estudo da resposta transitória. Após isso, na [seção 2.5](#), são indicados os principais tipos de descargas atmosféricas às quais os aterramentos estão sujeitos, bem como as correntes de descargas utilizadas no presente estudo. Por fim, na [seção 2.6](#), são abordados os fenômenos *flashover* e *backflashover*, sendo que o último possui especial importância na motivação do presente estudo.

2.1 Sistemas de Aterramento

Um aterramento elétrico consiste em uma ligação elétrica proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo ([VISACRO, 2005a](#)). Tal sistema é constituído por três partes básicas:

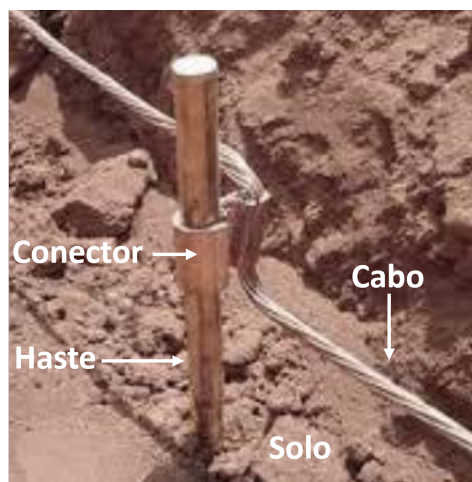
- a) as conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos eletrodos;
- b) eletrodos de aterramento (qualquer corpo metálico enterrado no solo);
- c) solo que envolve eletrodos.

O tipo de objeto ou sistema a ser conectado ao aterramento pode ser diverso e depende da aplicação. Tem-se como exemplos: a estrutura de uma torre de linha de transmissão, carcaça de motor, condutores de proteção de uma instalação elétrica, neutro de transformadores, terminais de equipamentos de subestações, captadores de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), um sistema eletrônico, etc ([VISACRO, 2005a](#)).

O eletrodo pode possuir diferentes formatos geométricos e material constituinte.

No entanto, é imperativo que seja de um material condutor e, de alguma forma, esteja enterrado no solo. Algumas configurações usuais de sistemas de aterramento são: eletrodo vertical (com haste cobreada maciça), eletrodo horizontal (com cabo trançado) e malha horizontal (com uma combinação de cabos reticulados e hastes). À exemplo, na [Figura 2.1](#), são apresentadas uma haste vertical e uma malha. Via de regra, as hastes verticais são eficazes para solos em que as camadas mais profundas possuem baixa resistividade, o que permite que tais camadas sejam acessadas pela haste, fornecendo um caminho de baixa impedância para a condução da corrente. Por outro lado, os eletrodos horizontais e as malhas permitem que uma maior área superficial do solo seja coberta, possibilitando uma maior equalização dos potenciais na superfície do solo, além de permitir uma expansão horizontal do sistema de aterramento, quando o uso de hastes não for suficiente para atingir os valores desejados para tensão de passo, tensão de toque e impedância.

Figura 2.1 – Exemplos de aterramentos elétricos.



(a) Haste vertical.

Fonte: adaptada de [Saber Elétrica \(2022\)](#).



(b) Malha de aterramento

Fonte: adaptada de [Jef Techno \(2022\)](#).

Diversos fatores podem influenciar na impedância do aterramento, bem como no seu comportamento quando submetido a correntes impulsivas. No entanto, pode-se mencionar os seguintes fatores como sendo os principais ([VISACRO, 2005a](#)):

- a) resistividade do solo nas adjacências do eletrodo;
- b) geometria do eletrodo, malha ou sistema de aterramento (dimensões e formato);
- c) forma de onda da excitação (amplitude e componentes de frequências).

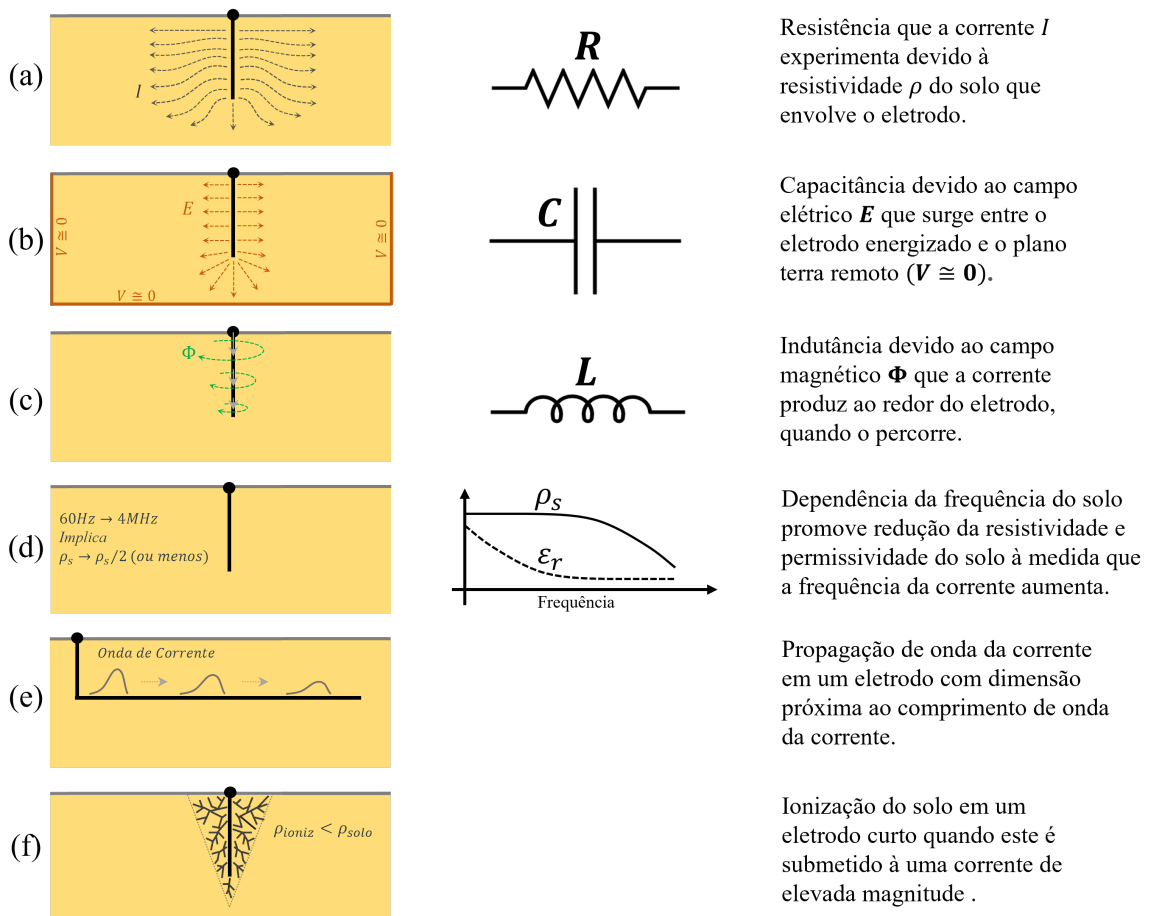
No caso do aterramento de torres de LTs, geralmente utilizam-se aterramentos do tipo eletrodo horizontal (também chamados de cabos contrapeso), com cabos nus de cobre ou aço cobreado, enterrados à uma profundidade de aproximadamente 0,5 m ([IEEE Std.1243, 1997](#)). Já no caso de subestações, a técnica de aterramento mais empregada são as malhas, fabricadas com cabos nus horizontais conectados entre si, de forma a criar uma

malha reticulada, enterrada à uma profundidade de 30 cm a 1 m em relação à superfície do solo, podendo ser combinada com hastes verticais (IEEE Std.80, 2013).

2.1.1 Fenômenos Inerentes aos Aterramentos

Para a compreensão e estudo dos sistemas de aterramento é necessário entender os fenômenos físicos inerentes aos mesmos. Neste sentido, os principais fenômenos observados no comportamento elétrico de sistemas de aterramento são os efeitos: (a) resistivo, (b) capacitivo, (c) indutivo, (d) dependência da frequência da resistividade e permissividade do solo, (e) propagação de ondas através dos eletrodos e a (f) ionização do solo (conforme apresentado na Figura 2.2). Cada um desses fenômenos tem sua contribuição no comportamento global do aterramento, quando esse conduz correntes para a terra (VISACRO, 2005a). Dependendo das dimensões físicas do aterramento, assim como a frequência e amplitude da corrente aplicada, um desses efeitos pode ganhar mais expressividade quanto aos demais.

Figura 2.2 – Esboço dos principais fenômenos que ocorrem em sistemas de aterramento. Efeito: (a) resistivo, (b) capacitivo, (c) indutivo, (d) dependência da frequência da resistividade e permissividade do solo, (e) propagação de ondas através dos eletrodos e a (f) ionização do solo.



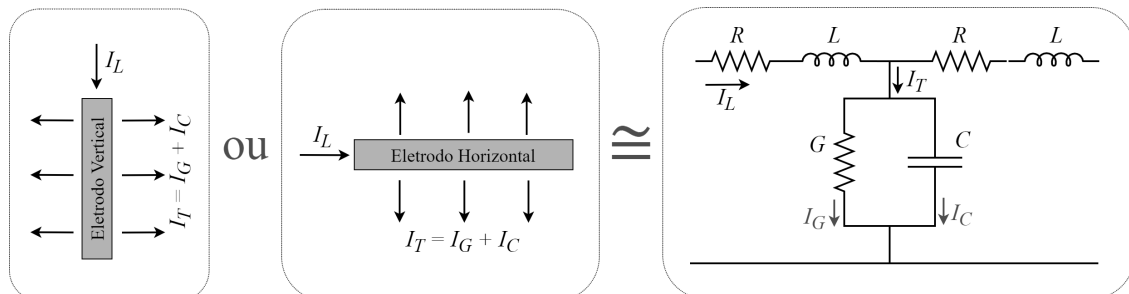
Fonte: produzida pelo autor.

A resposta de eletrodos de aterramentos quando submetidos a descargas atmosféricas é um estudo complexo pois pode abarcar quase todos fenômenos citados anteriormente (VISACRO, 2007). O fenômeno da dependência da frequência que os parâmetros do solo têm possui grande importância pois reduz consideravelmente a resistividade e permissividade do solo à medida que a frequência aumenta (ALIPIO; VISACRO, 2014). Já o fenômeno da propagação de ondas torna-se importante no caso de eletrodos longos (caso dos aterramentos de LTs), quando o comprimento do eletrodo tem ordem de grandeza próxima ao comprimento de onda da corrente injetada (GRCEV, 1998). Por fim, o fenômeno da ionização do solo (que é não linear) é ocasionado pela elevada amplitude da corrente da descarga injetada no solo, produzindo valores de campo elétrico acima do gradiente de ionização do solo (E_c) e conseqüente decaimento exponencial da resistividade do solo (LIEW; DARVENIZA, 1974).

Muitos trabalhos desconsideram o efeito da ionização do solo, uma vez que, além de simplificar a análise, os resultados obtidos são conservadores em relação aos que consideram o fenômeno. Além disso, o efeito da ionização é pronunciado apenas para eletrodos curtos. No caso de eletrodos longos (a exemplo dos contrapesos de LTs), o efeito da ionização promove reduções pouco significativas na impedância (VISACRO, 2007).

Os fenômenos resistivo, indutivo e capacitivo do aterramento são os mais elementares e podem ser representados de forma circuital. Considerando um segmento elementar de eletrodo (vertical ou horizontal) enterrado no solo, a corrente que nele se estabelece tem duas componentes: componente longitudinal (I_L) que percorre o eletrodo e a componente transversal (I_T) que sai do eletrodo para o meio externo. Na Figura 2.3 são apresentadas essas componentes de corrente e o respectivo circuito equivalente desse pequeno eletrodo (ou porção elementar).

Figura 2.3 – Componentes da corrente e circuito equivalente de um eletrodo elementar (vertical ou horizontal) de aterramento.



Fonte: adaptada de Visacro (2007).

A corrente longitudinal (I_L) produz perdas internas no condutor e também estabelece um campo magnético dentro e fora do eletrodo. Quanto a isso, a resistência série (R) e a indutância série (L) são, respectivamente, responsáveis por esses fenômenos. Tais parâmetros também produzem uma queda de tensão ao longo do eletrodo, na presença de

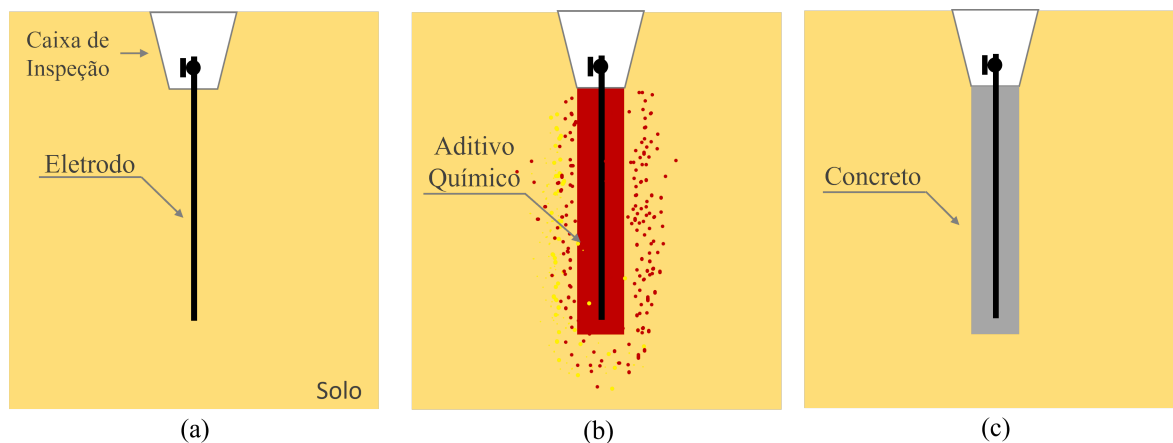
uma corrente. Por outro lado, a corrente transversal ($I_T = I_G + I_C$) é a soma da corrente de condução dispersa no solo (I_G) com a corrente de deslocamento capacitiva (I_C). No circuito da [Figura 2.3](#), a condutância (G) está relacionada com a corrente de condução (I_G) que se dissipa do eletrodo para o solo. Já a capacitância (C), está relacionada com a corrente de deslocamento capacitiva (I_C) que surge quando o eletrodo é excitado com uma corrente variante no tempo, produzindo um campo elétrico variante. Toda essa fenomenologia ocorre em um pequeno eletrodo ou uma porção elementar de eletrodo. Caso o sistema de aterramento seja mais complexo ou tenha outras partes, é necessário que as conexões série/paralelo entre eletrodos consideradas, bem como eventuais acoplamentos capacitivo, indutivo e resistivo também sejam contabilizados ([VISACRO, 2007](#)).

A impedância do aterramento é uma grandeza física que consegue representar muitos dos fenômenos inerentes ao aterramento. Ela está diretamente relacionada com os níveis de tensão gerados, quando é injetada uma corrente no aterramento. Assim, comumente, a eficiência do aterramento é medida em termos de sua impedância, vista do ponto de injeção da corrente ([VISACRO; SILVEIRA, 2016; VISACRO, 2018](#)). Posteriormente, na [subseção 2.1.3](#), as principais grandezas para avaliação de aterramentos serão melhor apresentadas.

2.1.2 Classificação dos Sistemas de Aterramento

Do ponto de vista da utilização e do emprego de materiais aditivos, os aterramentos podem ser classificados em três principais tipos: convencional, químico e concretado ([NOR, 2006; ANDROVITSANEAS; GONOS; STATHOPULOS, 2012; ANDROVITSANEAS; GONOS; STATHOPULOS, 2014](#)). Na [Figura 2.4](#) é apresentado um esboço desses três tipos de aterramentos.

Figura 2.4 – Tipos de aterramentos quanto ao emprego de materiais aditivos: (a) convencional, (b) com tratamento químico e (c) encapsulado por concreto.



Fonte: produzida pelo autor.

Convencional

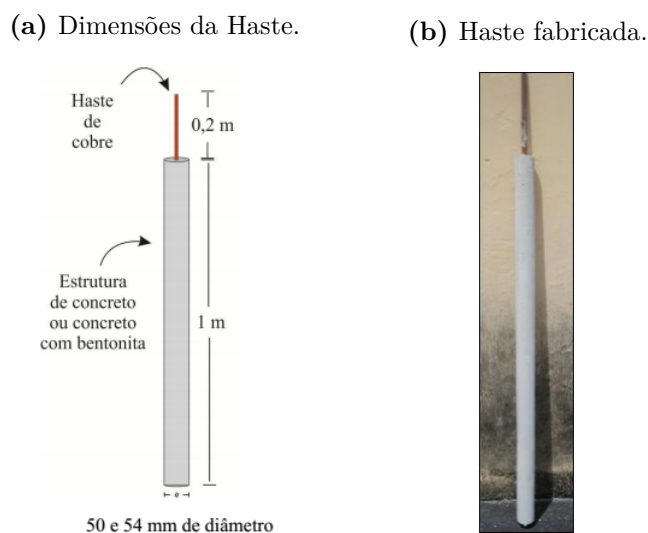
Os aterramentos convencionais são os mais simples em sua constituição. Consistem em interconexões de hastes (eletrodos) verticais nuas e cabos horizontais nus, ambos de material condutor exposto. Conforme a [NBR 15751 \(2009\)](#), no caso de subestações, o sistema de aterramento é realizado com uma malha reticulada de cabos condutores nus, na qual, em alguns nós da malha, são fincadas hastes verticais de cobre.

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 ([VISACRO, 2005a](#)). A estrutura básica de um aterramento com tratamento químico é apresentada na [Figura 2.4](#). Embora seja uma alternativa de aterramento, conforme [Hallmark \(2000\)](#), 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.

Concretado

Os aterramentos concretados são constituídos basicamente de um eletrodo metálico envolvido, em seu redor, por uma camada de concreto, conforme ilustrado na [Figura 2.4](#). A [IEEE Std.80 \(2013\)](#) cita o aterramento encapsulado por concreto como sendo uma técnica viável para utilização em subestações, atendo-se principalmente ao seu comportamento em baixa frequência. [Rowland \(1995\)](#) 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_{BF}) 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 ([ZIPSE, 2013](#); [PREMINGER, 1975](#); [DURHAN; DURHAN, 1997](#); [BEZERRA; KANASHIRO, 2010](#); [ANDROVITSANEAS; GONOS; STATHOPULOS, 2012](#); [ANDROVITSANEAS; GONOS; STATHOPULOS, 2014](#)). Na [Figura 2.5](#), é apresentado um exemplo de haste concretada desenvolvida por [Rodrigues \(2012\)](#). 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 2.5 – Modelo de haste concretada desenvolvida por Rodrigues (2012).

Fonte: Reproduzida de Rodrigues (2012).

Conforme foi mencionado, as hastes 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, (FAGAN; LEE, 1970; WIENER, 1970; ANDROVITSANEAS; GONOS; STATHOPULOS, 2017).
- Resistência equivalente ao aterramento convencional para solos com resistividade entre 50 e 100 Ω .m. Em casos de solos com resistividade maior que 100 Ω .m, apresenta resistência de aterramento menor que o convencional (ROWLAND, 1995; BEZERRA; KANASHIRO, 2010; ANDROVITSANEAS; GONOS; STATHOPULOS, 2014).
- 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 (WIENER, 1970; HALLMARK, 2000).
- 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 (ANDROVITSANEAS; GONOS; STATHOPULOS, 2017; SWITZER; STIDHAM, 1997).

2.1.3 Grandezas para Avaliação de Sistemas de Aterramento

Nos estudos e análise de sistemas de aterramento determinadas grandezas são de especial importância. Algumas delas fornecem informações quanto ao comportamento de baixa frequência do aterramento, outras fornecem informações quanto ao comportamento

de alta frequência e ainda outras conseguem exprimir o comportamento tanto em baixas quanto em altas frequências. Entre essas grandezas podem-se citar: a resistência de baixa frequência, a impedância transitória, a impedância impulsiva, o coeficiente impulsivo e a impedância harmônica (VISACRO; ROSADO, 2009; GRCEV, 2011).

Resistência de Baixa Frequência

A resistência de baixa frequência (R_{BF}) é uma das grandezas mais utilizadas para situações práticas de engenharia. Seu valor pode ser medido através de equipamentos chamados terrômetros. Esse tipo de equipamento utiliza formas de onda com frequência abaixo de 1 kHz e, por isso, a grandeza medida é denominada de impedância de baixa frequência. Assim, no presente trabalho, define-se resistência de aterramento como (VISACRO, 2007; GRCEV, 2007; GRCEV, 2009a):

$$R_{BF} = \frac{V_{BF}}{I_{BF}}, \quad (2.1)$$

em que R_{BF} é a resistência do aterramento, quando submetido a formas de onda de tensão e corrente de baixa frequência (ou frequência industrial) V_{BF} e I_{BF} , respectivamente. O valor de R_{BF} é aproximadamente constante enquanto as características do solo ou do aterramento não são modificadas.

Impedância Transitória

Outra grandeza utilizada na avaliação de aterramentos é o valor da impedância do aterramento no tempo, durante a incidência da 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 (GRCEV, 2007; GRCEV, 2009a; GRCEV, 2009b):

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

em que $i(t)$ é corrente impulsiva aplicada no aterramento e $v(t)$ é a respectiva tensão 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.

Impedância Impulsiva

A impedância impulsiva é uma grandeza muito utilizada em estudos de aterramentos submetidos a correntes impulsivas (GRCEV, 2009a; GRCEV, 2009b). Sua importância se dá por ser uma grandeza escalar que resume de forma concisa a resposta transitória de um aterramento. Além disso, a impedância impulsiva é um importante dado que possibilita a

estimação da taxa de ocorrência de *backflashover* em LTs, de forma simplificada e precisa (VISACRO et al., 2015; VISACRO; SILVEIRA, 2016; VISACRO, 2018). Tal grandeza é definida como sendo a razão entre o pico da tensão desenvolvida no aterramento (V_p) e o pico da corrente injetada (I_p) (MAZZETTI; VECA, 1983; GRCEV, 2007):

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

Embora usualmente o pico da tensão não ocorra no mesmo instante que o pico da corrente (o que faz com que Z_p seja diferente do valor máximo da impedância transitória $z(t)_{max}$), essa representação da impedância impulsiva possui um grande atrativo, que é a fácil obtenção da tensão máxima (V_p) multiplicando-se o pico da corrente I_p por Z_p , facilitando análises de sensibilidade (VISACRO, 2007).

Elevação do Potencial no Aterramento (GPR)

A IEEE Std.80 (2013) define a elevação de potencial no aterramento (*ground potential rise - GPR*) como sendo o produto da impedância impulsiva (Z_p) pela corrente injetada $i(t)$. Contudo, na prática, muitos trabalhos também chamam de GPR a tensão transitória $v(t)$ no ponto de injeção da corrente, o que é diferente da definição da norma (ALIPIO; VISACRO, 2014; VISACRO; SILVEIRA, 2016; VISACRO; SILVEIRA; OLIVEIRA, 2019). Diante do largo uso deste último conceito, no presente trabalho também o adotou-se.

Coefficiente 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_{BF}) (GRCEV, 2009a; GRCEV, 2009b):

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

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

Impedância Harmônica

A impedância harmônica $Z(\omega)$, também conhecida como impedância complexa, consiste na relação entre tensão e corrente no domínio da frequência. A impedância harmônica é uma grandeza de importância na análise de aterramentos. Uma vez que os aterramentos estão sujeitos a correntes com espectro de frequências variados, a compreensão da impedância do aterramento para diferentes faixas de frequência é uma informação valiosa. No estudo da resposta transitória de aterramentos a impedância harmônica é uma das grandezas de maior relevância, uma vez que condensa uma grande quantidade de

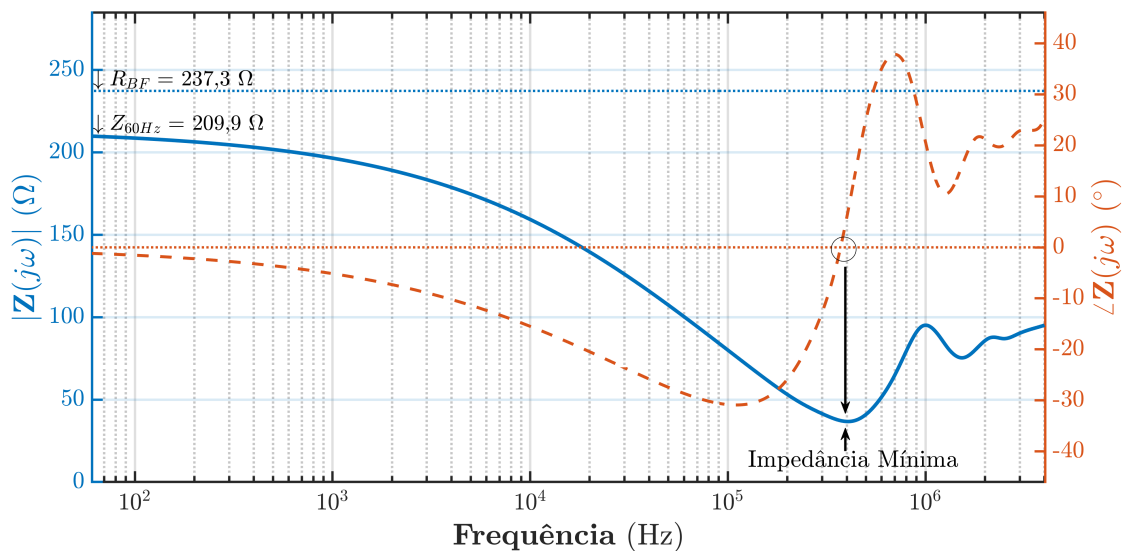
informação. Assim, a impedância harmônica é definida como (GRCEV, 2007; VISACRO, 2007; GRCEV, 2009a; GRCEV, 2009b):

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

sendo $\mathbf{V}(j\omega)$ e $\mathbf{I}(j\omega)$ a tensão e corrente no domínio da frequência, avaliadas no ponto de injeção da corrente. Uma vez que se trata de uma grandeza complexa, define-se a amplitude da impedância harmônica como sendo $|\mathbf{Z}| = |\mathbf{Z}(j\omega)|$ e o ângulo (ou fase) como sendo $\angle \mathbf{Z} = \angle \mathbf{Z}(j\omega)$.

Para exemplificar, na Figura 2.6 é apresentada a impedância harmônica (tanto amplitude quanto ângulo), resultante de uma simulação de um aterramento convencional (sem concreto) do tipo eletrodo horizontal, o qual foi modelado como sendo um cilindro condutor perfeito (PEC), com comprimento de $L = 30$ m, raio de 8 mm, enterrado a uma profundidade de 0,5 m, em um solo com resistividade de 4000 Ω .m, considerando o efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo (a ser melhor discutido na seção 2.4).

Figura 2.6 – Impedância harmônica $\mathbf{Z}(j\omega)$: simulação para aterramento com eletrodo horizontal convencional, modelado como cilindro condutor perfeito (PEC), de comprimento $L = 30$ m, raio 8 mm, enterrado a uma profundidade de 0,5 m, em um solo com resistividade de 4000 Ω .m. Solo com parâmetros dependentes da frequência. Amplitude da impedância (curva contínua azul) e ângulo (curva tracejada laranja). R_{BF} resistência de baixa frequência analítica. Z_{60Hz} impedância harmônica à 60 Hz.



Fonte: produzida pelo autor.

Pode-se observar na Figura 2.6 que, para baixas frequências, o valor da impedância harmônica é aproximadamente constante, se aproximando do valor da resistência de baixa frequência R_{BF} . No entanto, à medida que a frequência da forma de onda aplicada cresce, ocorrem variações no valor da impedância harmônica devido às variações nas contribuições

do efeito capacitivo e indutivo, bem como do efeito da dependência da frequência da resistividade e permissividade do solo e da propagação de ondas pelo eletrodo.

A impedância harmônica pode ser obtida através de sucessivas aplicações de tensão senoidal com diferentes frequências (dentro do intervalo de interesse); sendo medida a respectiva corrente para cada frequência. Após isso, divide-se cada fasor de tensão pelo seu respectivo fasor de corrente e, assim, obtém-se a impedância harmônica para cada frequência avaliada. Com esses dados, pode-se traçar uma curva tanto do módulo ($|\mathbf{Z}|$) quanto do ângulo ($\angle \mathbf{Z}$) da impedância harmônica, através da interpolação dos pontos. Notoriamente, esse método fornecerá uma impedância harmônica com resolução tão boa quanto maior for a quantidade de frequências avaliadas e quanto menor for o passo de amostragem das frequências.

A metodologia acima apresentada pode ser tanto aplicada em medições experimentais quanto em simulações computacionais. No presente trabalho, utilizou-se o *software Comsol Multiphysics*, o qual realiza o cálculo da impedância harmônica através de sucessivas aplicações de tensão nas frequências desejadas. Dessa forma, foi realizada uma varredura da impedância harmônica, tomando-se 70 frequências entre 60 Hz e 4 MHz, sendo plotada a curva de módulo e ângulo da impedância formada por esses pontos. Salienta-se que esse número de frequências a serem avaliadas foi escolhido empiricamente atentando-se ao custo-benefício entre tempo de simulação e resolução da curva de impedância harmônica. Além disso, a faixa de frequências analisada foi escolhida com base no espectro representativo de primeiras descargas e subsequentes (ALÍPIO et al., 2019).

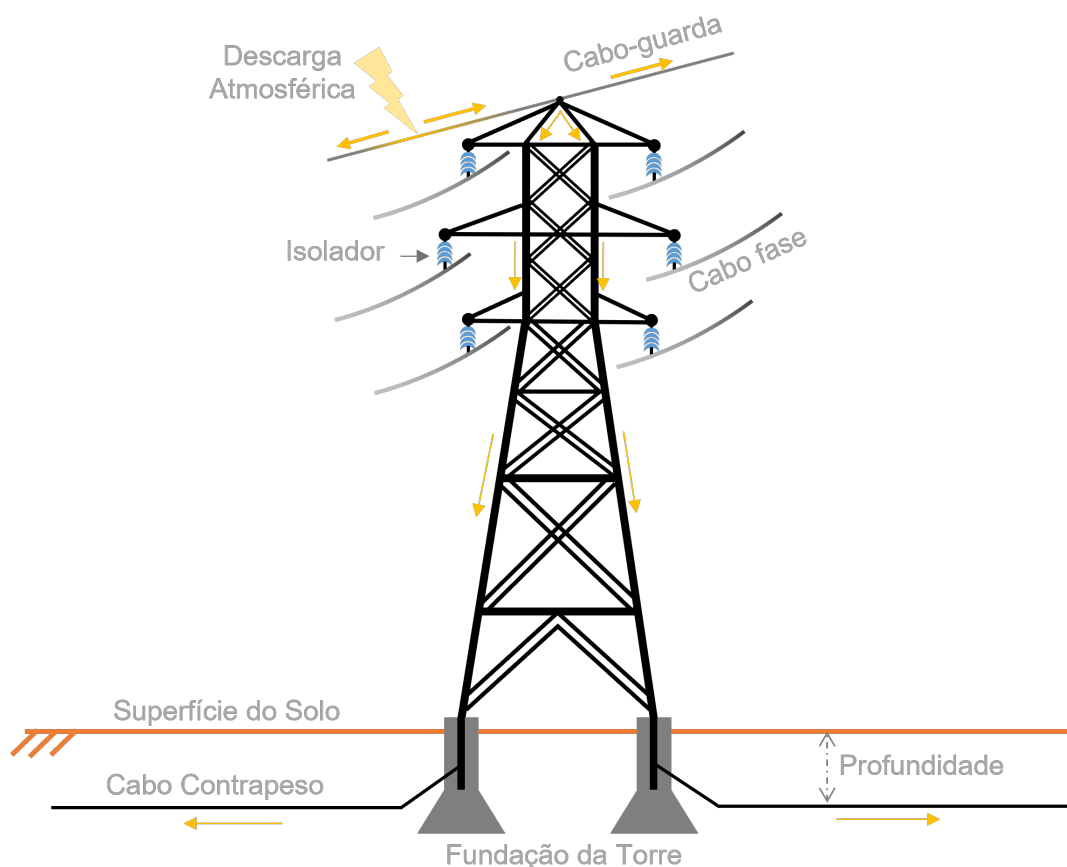
Na literatura, a forma mais usual de se realizar uma medição experimental da impedância harmônica de aterramentos é através da aplicação de uma corrente impulsiva $i(t)$ no aterramento; sendo medido o respectivo sinal da tensão $v(t)$. Em posse dos sinais de $v(t)$ e $i(t)$ calcula-se $\mathbf{V}(j\omega)$ e $\mathbf{I}(j\omega)$ utilizando Transformada de Fourier (ou algum algoritmo como *Fast Fourier Transform* - FFT). Finalmente, com os sinais da tensão e corrente no domínio da frequência obtém-se $\mathbf{Z}(j\omega)$ através da aplicação direta da Equação 2.5. Nessa metodologia, é importante que a forma de onda de $v(t)$ seja tal que $\mathbf{V}(j\omega)$ tenha em seu espectro frequências de interesse para avaliação de $\mathbf{Z}(j\omega)$.

2.2 Aterramento de Torres de Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão (LTs) apresentam elevada importância na interconexão das usinas de geração com os centros de consumo de energia elétrica. Via de regra os centros de consumo distam centenas de quilômetros dos centros de geração. Devido ao seu comprimento e por atravessar regiões com as mais variadas condições climáticas e níveis ceráunicos, as LT são comumente submetidas à incidência de descargas atmosféricas (Figura 2.7). Tais descargas podem provocar *flashover* ou *backflashover*, fenômenos estes

que produzem o surgimento de curtos circuitos e consequente desligamento da LT por parte do sistema de proteção. Os fenômenos do *flashover* e *backflashover* serão melhor detalhados na [seção 2.6](#).

Figura 2.7 – Estrutura básica de uma torre de LT aterrada e o respectivo fluxo da corrente (setas amarelas) quando da incidência de uma DA no(s) cabo-guarda.



Fonte: produzida pelo autor.

O sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) da LT é o principal meio de mitigar as indesejadas contingências advindas das incidências de DAs. O SPDA das LT é basicamente constituído do conjunto: cabos-guarda, estrutura metálica da torre e aterramento, conforme apresentado na [Figura 2.7](#). Todos os três estão conectados eletricamente entre si e fornecem um caminho para escoamento da corrente de DA para o solo. Os cabos-guarda ficam no topo da torre (acima dos condutores fase), sendo a primeira estrutura que receberá a corrente de DA ([VISACRO; SILVEIRA, 2016](#)). Após isso, as ferragens metálicas da própria estrutura mecânica da torre proporcionam um caminho de descida da corrente para o aterramento. Por fim, através do sistema de aterramento a corrente é dissipada no solo.

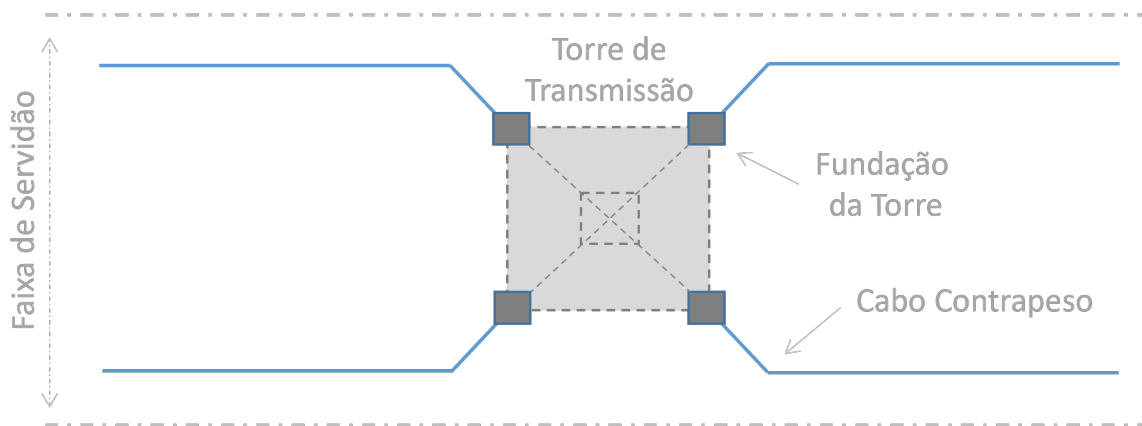
Como pode-se notar na [Figura 2.7](#), o aterramento da LT é a parte que mais exige atenção de todo o SPDA da LT, sem o qual não seria possível as correntes de descarga serem drenadas à terra. Mais que isso, ainda que a torre da LT esteja aterrada,

se a impedância do aterramento for elevada, a eficiência da proteção da LT pode ser comprometida (CHISHOLM; ANDERSON, 2004; VISACRO; SILVEIRA, 2016), como será discutido na seção 2.6. Por esse motivo, o correto dimensionamento do aterramento é essencial para uma proteção eficiente.

O aterramento das LTs geralmente é realizado através de eletrodos horizontais enterrados a uma profundidade de aproximadamente 0,5 m, sendo conectados aos pés da fundação da torre (VISACRO; SILVEIRA, 2016). Tais eletrodos são corriqueiramente chamados de cabos contrapeso e possuem comprimento que depende da resistividade aparente do solo e das exigências mínimas¹ de impedância de aterramento, o que via de regra está relacionado com o tipo e nível de tensão da LT.

Na Figura 2.8 é apresentada a estrutura básica do aterramento de uma torre (autoportante) de linha transmissão. Como pode-se observar na figura, a faixa de servidão delimita a distância máxima que os eletrodos podem percorrer em uma angulação de 45°; por esse motivo, a partir de determinado comprimento, os cabos passam a ficar paralelos entre si. Embora na Figura 2.8 se apresente uma estrutura com quatro cabos contrapeso, existem situações em que apenas um ou dois cabos são necessários para atender às exigências normativas quanto à impedância de aterramento.

Figura 2.8 – Estrutura de aterramento de torres de linhas de transmissão (vista superior).



Fonte: produzida pelo autor.

Um ponto importante a se notar é que a fundação da torre é normalmente construída com concreto e barras de aço, estando dentro solo, como pode ser observado na Figura 2.9. Por esse motivo, a fundação da torre consiste, por si só, um sistema de aterramento, mesmo quando da ausência de cabos contrapesos. Como será visto ao longo deste trabalho, o concreto consiste em um material aprimorador de aterramento e que pode contribuir com resposta transitória do mesmo.

¹ As exigências mínimas podem ser determinadas por norma, diretrizes de projeto da transmissora ou concessionária, contrato de leilão, etc.

Figura 2.9 – Sapatas da fundação de torre autoportante de linha de transmissão.



Fonte: extraído de [Joung \(2009\)](#).

2.3 Aterramentos Encapsulados por Concreto (AEC)

A utilização de eletrodos encapsulados por concreto como sistema de aterramento tem sido reportada na literatura como uma forma efetiva para reduzir tanto a resistência de baixa frequência do aterramento (R_{BF}) ([UFER, 1964](#); [WIENER, 1970](#)) quanto a impedância impulsiva (Z_p) no caso de incidência de descargas atmosféricas ([ANDROVIT-SANEAS; GONOS; STATHOPULOS, 2014](#); [BEZERRA et al., 2024](#)). Em várias situações, a própria fundação da instalação já dispõe de vergalhões de aço (ou estruturas metálicas) envolvidas por concreto, oferecendo naturalmente uma alternativa de aterramento. Isso ocorre, por exemplo, nas fundações de torres de linhas de transmissão, fundações de pórticos de subestações bem como nas fundações de instalações industriais e prediais ([HE; ZENG; ZHANG, 2013](#)).

O concreto se destaca como um elemento aprimorador de aterramento por possuir capacidade de condução de altas correntes e baixo custo. Além disso, não somente reduz a impedância de aterramento, mas também a estabiliza durante diferentes estações do ano. Dessa forma, a utilização do concreto como elemento aprimorador de aterramento é baseada principalmente nas seguintes propriedades ([HE; ZENG; ZHANG, 2013](#)):

- a) O concreto possui uma resistividade relativamente uniforme e boa condutividade. Possui característica alcalina e tem propriedade higroscópica, que o permite absorver água do solo e retê-la na sua estrutura. Dessa forma, tanto a umidade quanto a concentração de íons exigidas para que funcione como um eletrólito são satisfeitas.
- b) Devido à sua característica higroscópica, o concreto consegue preservar uma alta

umidade e conseqüentemente manter uma baixa resistividade por um tempo considerável. Por esse motivo, o concreto promove o chamado aumento do diâmetro equivalente do eletrodo que envolve. Dessa forma, o concreto além de promover um aprimoramento na eficiência do aterramento (quando $\rho_{solo} > \rho_c$) ainda possui uma propriedade elétrica estável.

- c) Em solos com alta resistividade ($\rho_{solo} > 1000 \Omega.m$), o efeito higroscópico do concreto torna a sua resistividade mais baixa que o solo ao seu redor, promovendo uma redução na impedância do aterramento, quando comparado com um aterramento convencional (sem concreto).

2.3.1 A Característica Higroscópica do Concreto

O concreto é um meio poroso, que possui propriedades higroscópicas. Geralmente, durante o longo processo de endurecimento das partículas de cimento de silicato, a quantidade de água utilizada para hidratá-la totalmente constitui 20–25% do peso do cimento, o que significa que a relação cimento/água está na faixa de 0,2 a 0,25 (HE; ZENG; ZHANG, 2013). Na prática, a proporção de cimento para água usada na indústria geralmente é muito maior que esse valor. Essa quantidade de água formará uma rede interligada de orifícios e vasos capilares .

A literatura reporta que o concreto enterrado no solo possui uma resistividade na faixa de 30 a 150 $\Omega.m$ (UFER, 1964; IEEE Std.80, 2013; ANDROVITSANEAS et al., 2018). Geralmente, a resistividade de um bloco de concreto enterrado em solo com alto teor de água tem cerca de 25 a 45 $\Omega.m$ (HE; ZENG; ZHANG, 2013). Portanto, em um solo com resistividade acima de 150 $\Omega.m$, utilizar concreto no entorno do eletrodo promoverá uma impedância de aterramento menor do que para o caso de eletrodo convencional (sem concreto). O concreto que cobre os condutores de metal aumenta a condutividade da região ao redor do eletrodo de aterramento, o que é semelhante ao uso de um tratamento químico para diminuir a resistividade do solo ao redor do eletrodo (IEEE Std.80, 2013). Portanto, a propriedade higroscópica do concreto é um dos grandes motivos da redução da resistência de aterramento em aterramentos encapsulados por concreto.

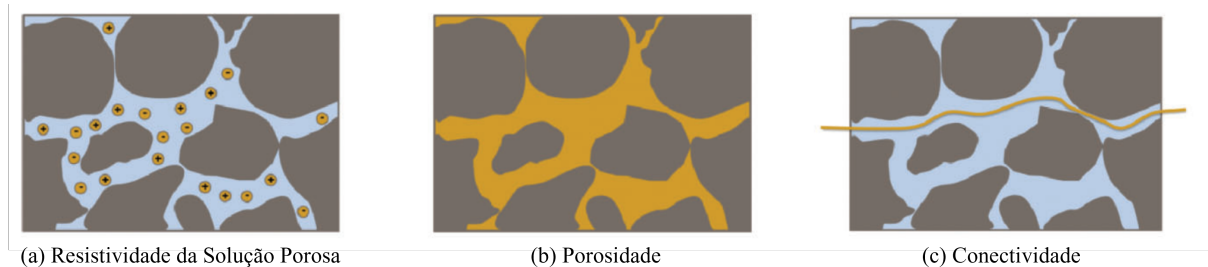
O efeito do concreto aplicado a um eletrodo de aterramento pode ser considerado como um aumento no diâmetro equivalente do condutor de metal (quando o solo possui resistividade maior que a do concreto) (HE; ZENG; ZHANG, 2013). Por outro lado, vale salientar que o concreto não se trata de um material com resistividade inferior a 5 $\Omega.m$, que pode ser considerado equivalente a um condutor metálico no cálculo da resistência de aterramento. A resistividade do concreto absorvido por água é de cerca de 30 $\Omega.m$ e, por esse motivo, é necessário considerar um fator de conversão no cálculo da resistência de baixa frequência do aterramento para tratar o conjunto eletrodo-concreto como um condutor metálico de diâmetro equivalente que será menor que o diâmetro (ou espessura)

real do concreto (HE; ZENG; ZHANG, 2013).

2.3.2 Condução de Corrente pelo Concreto

A condução elétrica em materiais cimentícios ocorre principalmente através do fluido de fase, ou seja, a solução que se encontra entre os poros. Inicialmente, no processo de mistura e fabricação do concreto, a solução entre os poros é basicamente água. Contudo, à medida que a água e o cimento reagem, o cimento irá liberar íons condutores nessa solução. Esses íons são carregados positiva ou negativamente e são principalmente: potássio (K^+), sódio (Na^+), cálcio (Ca^{2+}), hidróxido (OH^-) e sulfato (SO_4^{2-}). No entanto, a composição e concentração exatas dependerão da química e tipo do cimento, a quantidade de água inicialmente adicionada à mistura e o grau de hidratação dos materiais cimentícios (SPRAGG et al., 2013). Na Figura 2.10 são apresentadas as principais grandezas que influenciam nas características elétricas do concreto.

Figura 2.10 – Esboço das principais grandezas que definem as características elétricas do concreto: (a) Resistividade da solução porosa, (b) Porosidade e (c) Conectividade.



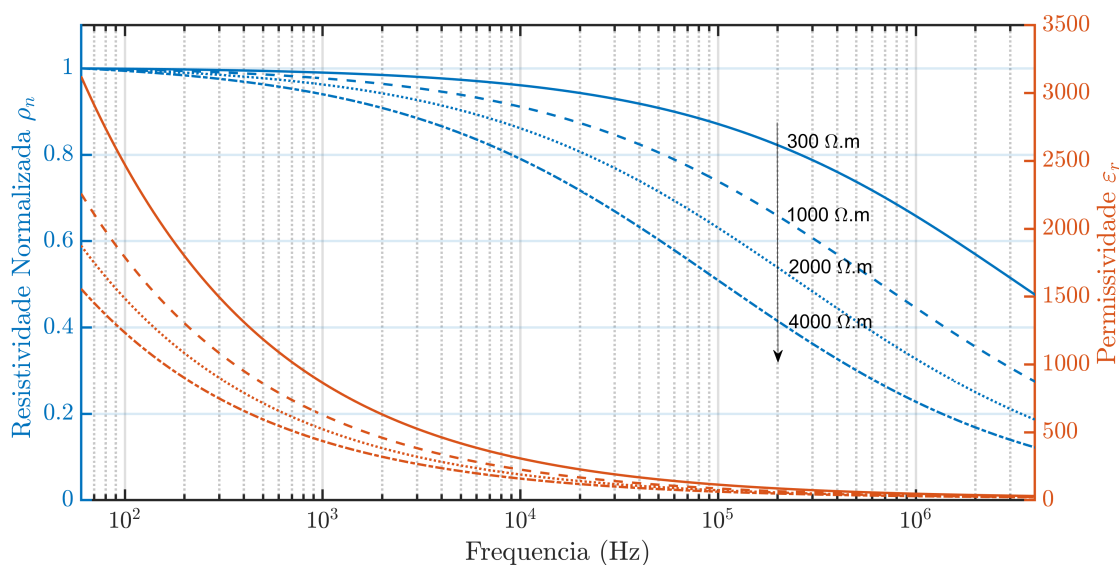
Fonte: extraído de Spragg et al. (2013).

A primeira grandeza indicada na Figura 2.10 é a resistividade do fluido de fase, que está relacionada com a presença de íons na solução, proporcionando um meio propício à condução de corrente. A segunda é a porosidade, grandeza relacionada com a quantidade de poros ou espaços dentro do concreto, definindo o quanto do volume do concreto está disponível para ser preenchido pelo fluido de fase. Por fim, a terceira grandeza é a conectividade. Note-se que, para haver condução de corrente, não basta haver fluido de fase e porosidade. Pois, se os poros estiverem preenchidos pelo fluido de fase, mas estiverem hermeticamente isolados uns dos outros, não haverá caminhos de baixa impedância para passagem da corrente. Assim, é necessário que haja conectividade entre os poros formando caminhos completos para o estabelecimento da corrente.

2.4 O Fenômeno da Dependência da Frequência do Solo

A dependência que os parâmetros do solo possuem da frequência já é conhecida e reportada há pelo menos 90 anos. Possivelmente, um dos primeiros trabalhos a estudar essa característica foi o de [Smith-Rose \(1934\)](#). Após isso, surgiram outros trabalhos, como os de [Scott, Carroll e Cunningham \(1964\)](#), [Scott \(1966\)](#), [Smith e Longmire \(1975\)](#), [Messier \(1980\)](#), [Messier \(1985\)](#), [Visacro e Portela \(1987\)](#). Mais recentemente, estudos envolvendo uma grande quantidade de medições experimentais foram apresentados em [Visacro e Alipio \(2012\)](#) e [Alipio e Visacro \(2014\)](#). Sendo apresentado, neste último, um modelo causal que satisfaz o critério de Kramers-Kronig. Na [Figura 2.11](#) são apresentados exemplos de curvas de resistividade normalizada e permissividade relativa para solos de baixa, média e alta resistividade, todas obtidas através do modelo proposto por [Alipio e Visacro \(2014\)](#).

Figura 2.11 – Resistividade normalizada (ρ_n) e Permissividade relativa (ϵ_r) do Solo, considerando o modelo de [Alipio e Visacro \(2014\)](#), para solos de 300 $\Omega\cdot\text{m}$, 1000 $\Omega\cdot\text{m}$, 2000 $\Omega\cdot\text{m}$ e 4000 $\Omega\cdot\text{m}$. Frequências entre 60 Hz e 4 MHz.



Fonte: produzida pelo autor.

Um dos pontos mais importantes sobre a dependência da frequência dos parâmetros do solo é que as simulações de GPR utilizando parâmetros constantes para o solo produzem erros consideráveis quando os fenômenos estudados apresentam frequências que ultrapassam a ordem dos quilohertz; caso das descargas atmosféricas. Simulações que utilizam parâmetros constantes para o solo indicam amplitudes de tensão com erros que podem ir de 30% até mais de 100%, dependendo da situação ([VISACRO et al., 2011](#)). Por esse motivo, o presente trabalho considera o solo com permissividade e resistividade dependentes da frequência utilizando as equações apresentadas em [Alipio e Visacro \(2014\)](#). O modelo proposto por [Alipio e Visacro \(2014\)](#) define a condutividade e permissividade

do solo como sendo dependentes da frequência, conforme as equações:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_0 \cdot h(\sigma_0) \left(\frac{f}{1MHz} \right)^\gamma e \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon'_\infty}{\varepsilon_0} + \frac{\tan(\pi\gamma/2) \cdot 10^{-3}}{2\pi\varepsilon_0(1MHz)^\gamma} \sigma_0 \cdot h(\sigma_0) f^{\gamma-1}. \quad (2.7)$$

Em que, representam:

σ : condutividade do solo (mS/m);

σ_0 : condutividade (mS/m) em baixa frequência (100 Hz);

ε_r : permissividade relativa do solo;

ε'_∞ : permissividade relativa em frequências mais altas;

ε_0 : permissividade do vácuo ($\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m);

f : frequência (Hz).

A função da permissividade apresentada na [Equação 2.7](#) é definida para frequências maiores que 1 kHz. Os parâmetros $h(\sigma_0)$, γ e $\varepsilon'_\infty/\varepsilon_0$ são escolhidos de acordo com os objetivos do estudo, isto é, obter resultados médios, relativamente conservadores ou conservadores. Na [Tabela 2.1](#) se indicam os valores que os autores sugerem para esses parâmetros considerando casa situação.

Tabela 2.1 – Parâmetros $h(\sigma_0)$, γ e $\frac{\varepsilon'_\infty}{\varepsilon_0}$ do modelo de [Alipio e Visacro \(2014\)](#).

Objetivo	Função $h(\sigma_0)$	γ	$\varepsilon'_\infty/\varepsilon_0$
Resultados Médios	$h_1 = 1,26 \cdot \sigma_0^{-0,73}$	0,54	12
Resultados Relativamente Conservadores	$h_2 = 0,95 \cdot \sigma_0^{-0,73}$	0,58	8
Resultados Conservadores	$h_3 = 0,70 \cdot \sigma_0^{-0,73}$	0,62	4

Conforme a [Tabela 2.1](#), objetivando-se estudar um solo dependente da frequência com resultados médios, os parâmetros $\varepsilon'_\infty/\varepsilon_0 = 12$, $\gamma = 0,54$ e $h(\sigma_0) = 1,26 \cdot \sigma_0^{-0,73}$, são recomendados ([ALIPIO; VISACRO, 2014](#)).

Na [Figura 2.11](#) são apresentadas as curvas de resistividade normalizada, e permissividade relativa para solos de 300 $\Omega.m$, 1000 $\Omega.m$, 2000 $\Omega.m$ e 4000 $\Omega.m$, todos produzidos pelas [Equação 2.6](#) e [Equação 2.7](#). Observa-se que, embora todos os tipos de solos apresentem um decaimento da resistividade com o aumento da frequência, esse decaimento é mais pronunciado para solos de altas resistividades. Por exemplo, em 4 MHz o decaimento da resistividade para um solo de 300 $\Omega.m$ é de aproximadamente 50%, enquanto para um solo

de 4000 $\Omega\cdot\text{m}$, o decaimento é de aproximadamente 85%. Quanto à permissividade relativa (ϵ_r), nota-se que solos com menores resistividades possuem maiores permissividades e vice-versa. Além disso, de forma geral, pode-se observar que até 10 kHz há um decaimento pronunciado da permissividade, de forma que a permissividade passa a assumir um valor aproximadamente dez vezes menor que a permissividade em 60 Hz. Por outro lado, à medida que a frequência aumenta, a permissividade relativa de todos os solos converge para um valor fixo de 25 (o que não ocorre para a resistividade).

2.5 Descargas Atmosféricas

Os principais tipos de descargas atmosféricas (DAs) às quais o sistema elétrico está sujeito são as primeiras descargas (PRI) e as descargas subsequentes (SUB). Neste trabalho, foram considerados os valores médios de corrente de descargas da Estação Morro do Cachimbo (MCS), no Brasil. O MCS possui o maior banco de dados de DA obtido a partir de medições em regiões tropicais, e o único com significância estatística conforme [Silveira e Visacro \(2019\)](#). Além disso, as correntes do MCS apresentam picos mais elevados que as do Monte San Salvatore (MSS) ([ANDERSON; ERIKSSON, 1980](#)), também conhecidas na literatura.

Uma vez que as descargas do MCS foram medidas no Brasil, além de apresentarem condições de corrente mais severa, entendeu-se como oportuno que os estudos de aterramentos concretados sejam realizados considerando as condições das descargas medidas no MCS. Assim, para as simulações de GPR no presente estudo foram consideradas as formas de onda da corrente média do MCS.

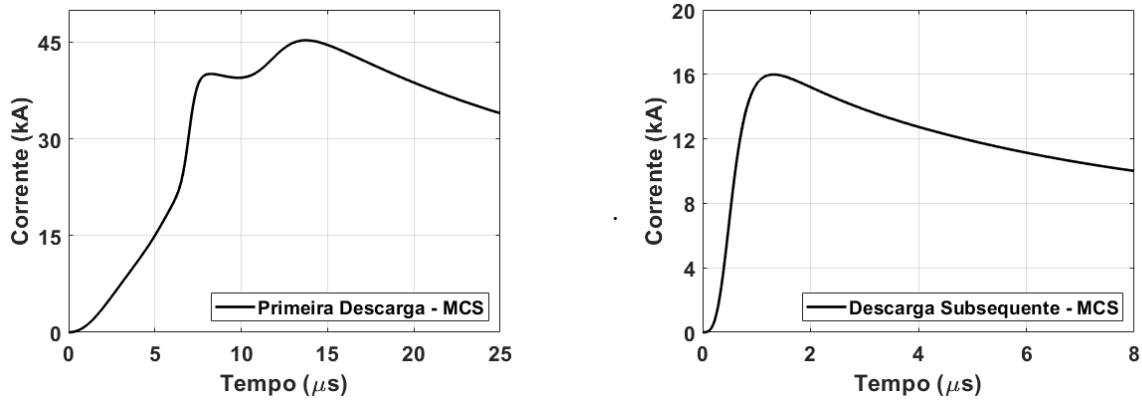
Para realizar o cálculo do GPR, as funções analíticas de DAs propostas por [Conti e Visacro \(2007\)](#) foram utilizadas. Tais funções sintetizam a forma de onda média das DAs do tipo PRI e SUB medidas no MCS. As formas de onda sintéticas apresentadas nas [Figura 2.12a](#) e [Figura 2.12b](#), são produzidas pela [Equação 2.8](#) e [2.9](#), a qual foi desenvolvida por [Conti e Visacro \(2007\)](#). Tal equação é basicamente um somatório de funções [Heidler \(1985\)](#), a qual é capaz de representar formas de onda de descargas, apresentando pontos fortes como derivada contínua e inclinação máxima próxima ao pico (sendo preferível às funções duplas exponenciais).

Os respectivos parâmetros a serem aplicados na [Equação 2.8](#) e [2.9](#) para se produzir a forma de onda PRI são descritos na [Tabela 2.2](#) e os parâmetros para se produzir SUB são apresentados na [Tabela 2.3](#).

$$i(t) = \sum_{k=1}^m \frac{I_{0k}}{\eta_k} \exp[-t/\tau_{2k}] \cdot \left(\frac{(t/\tau_{1k})^{n_k}}{1 + (\tau_{1k})^{n_k}} \right) \quad (2.8)$$

$$\eta_k = \exp \left[-(\tau_{1k}/\tau_{2k})(n_k \tau_{2k}/\tau_{1k})^{1/n_k} \right] \quad (2.9)$$

Figura 2.12 – Formas de onda da corrente média de (a) primeira descarga (PRI) e (b) descarga subsequente (SUB) da Estação Morro do Cachimbo (MCS), representadas através da expressão proposta por Conti e Visacro (2007).



(a) Primeira descarga (PRI).

(b) Descarga subsequente (SUB).

Fonte: adaptada de Conti e Visacro (2007).

Tabela 2.2 – Parâmetros para geração de PRI (CONTI; VISACRO, 2007).

Primeira Descarga (PRI) - MCS				
k	I_{0k} (kA)	n_k	τ_{1k} (μ s)	τ_{2k} (μ s)
1	6	2	3	76
2	5	3	3,5	10
3	5	5	4,8	30
4	8	9	6	26
5	16,5	30	7	23,2
6	17	2	70	200
7	12	14	12	26

Tabela 2.3 – Parâmetros para geração de SUB (CONTI; VISACRO, 2007).

Descarga Subsequente (SUB) - MCS				
k	I_{0k} (kA)	n_k	τ_{1k} (μ s)	τ_{2k} (μ s)
1	15,4	3,4	0,6	4
2	7,2	2	4	120

2.6 Flashover e Backflashover

Quando DAs incidem diretamente nos condutores fase da linha, ocorre uma elevação do potencial do condutor onde a descarga foi injetada e, conseqüentemente, é promovida uma elevação da tensão sobre as cadeias de isoladores. Se a tensão sobre a cadeia de isoladores ultrapassar sua máxima tensão suportável surge um arco elétrico que se origina do condutor fase em direção à base da cadeia de isoladores (que fica conectada à estrutura da torre) (VISACRO; SILVEIRA, 2016; VISACRO, 2005b), conforme apresentado na Figura 2.13. Tal fenômeno é denominado de *flashover* e como consequência estabelece

uma falta fase-terra na LT, com conseqüente desligamento da LT por parte do sistema de proteção. Note-se que a ocorrência de *flashover* não tem relação com o aterramento da torre. Uma vez que a DA incide no cabo fase, irá surgir uma sobretensão sobre o isolador independentemente da impedância do aterramento.

Para se reduzir a probabilidade da ocorrência de *flashover*, utilizam-se cabos-guarda² em conjunto com um sistema de aterramento. Os cabos-guarda são posicionados no topo das torres da LT (acima dos condutores fase) enquanto o sistema de aterramento é conectado no pé da torre, conforme apresentado na [Figura 2.7](#). Os cabos-guarda são eletricamente conectados à estrutura metálica da torre, a qual também está eletricamente conectada ao sistema de aterramento. Dessa forma, após a incidência de uma DA nos cabos-guarda, a corrente de descarga irá se estabelecer por toda a estrutura metálica da torre em direção ao aterramento e, após isso, será dissipada no solo.

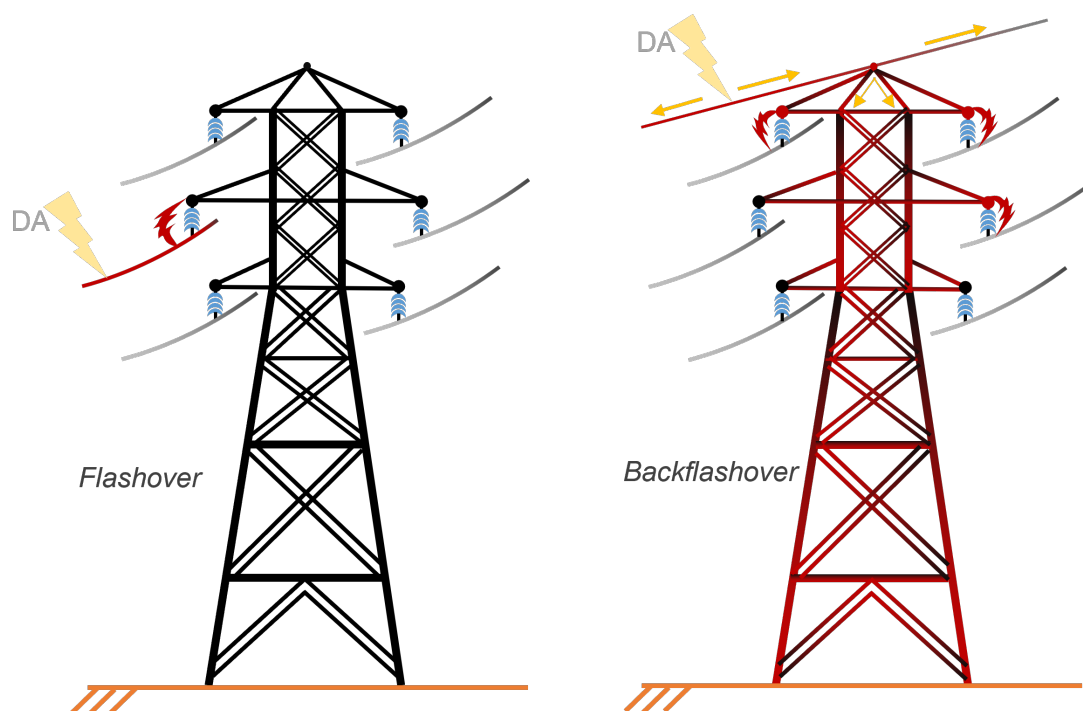
Um outro fenômeno importante é o *backflashover*. Tal fenômeno ocorre quando uma DA incide nos cabos-guarda ou diretamente nas ferragens da torre, elevando o potencial de toda a estrutura da torre e ocasionando uma elevação na tensão sobre as cadeias de isoladores ([VISACRO, 2007](#)). Caso essa tensão sobre os isoladores ultrapasse o valor máximo suportável, ocorrerá um arco elétrico contornando a cadeia de isoladores, partindo da torre em direção ao cabo fase, estabelecendo, assim, uma falta na LT, com conseqüente desligamento da mesma ([Figura 2.7](#)).

Diferentemente do *flashover*, o fenômeno do *backflashover* está intimamente relacionado com elevados valores de impedância de aterramento ([CHISHOLM; CHOW; SRIVASTAVA, 1983](#); [VISACRO, 2005b](#); [VISACRO et al., 2015](#)). Vale notar que, embora a presença dos cabos-guarda na LT seja essencial para prevenir a ocorrência de *flashover* devido à descargas diretas nos cabos de fase, sua instalação expõe a LT a uma possível maior ocorrência de *backflashover*, visto que não somente a torre estará exposta às descargas, mas também os cabos-guarda. Ainda assim, instalação dos cabos-guarda continua fornecendo benefícios à proteção da LT, visto que a ocorrência de *flashover* é mais estressante para o sistema que a situação de *backflashover*.

Dado que grande maioria das LTs são providas de cabos-guarda, a ocorrência de *backflashover* acaba sendo um dos maiores motivos para desligamentos não programados. Neste sentido, a busca por técnicas que proporcionem baixas impedâncias de aterramentos em torres de LT é uma das melhores formas de se reduzir as taxas de desligamento das LTs. Na [Figura 2.14](#) é apresentada a ocorrência de *backflashover* em uma LT após o cabo-guarda da torre ser atingido por uma DA; com visível surgimento de arco elétrico em três cadeias de isoladores.

² Os cabos-guarda também são chamados na literatura de cabos-terra, cabos para-raios, *shield wires* ou *overhead ground wire (OHGW)*.

Figura 2.13 – Situações de *flashover* (esquerda) e *backflashover* (direita) em linhas de transmissão.



Fonte: produzida pelo autor.

Figura 2.14 – Ocorrência de *backflashover* em uma linha de transmissão.



Fonte: extraído de [Shindo \(2004\)](#).

Estado da Arte

Neste capítulo, são apresentados os principais trabalhos da pesquisa bibliográfica realizada, os quais tangem o tema do presente estudo, a saber aterramentos encapsulados por concreto (seção 3.1). Em seguida, na subseção 3.1.1, são tecidas considerações acerca do estado da arte e suas lacunas. Ao término do capítulo, na seção 3.2, é apresentada uma comparação entre os trabalhos pesquisados e o presente trabalho, através da Tabela 3.1, evidenciando-se as contribuições para evolução do estado da arte.

3.1 Aterramentos Encapsulados por Concreto (AEC)

O emprego do concreto como elemento aprimorador de aterramento foi inicialmente estudado por Ufer (1964). Por este motivo, os aterramentos encapsulados por concreto são também conhecidos como aterramento tipo Ufer¹. Em seu trabalho, Ufer (1964) avaliou os aterramentos de duas instalações militares no Arizona - EUA, construídas em meados de 1942, na época da Segunda Guerra Mundial, as quais possuíam conjuntamente mais de 800 abrigos de bombas. Nesses abrigos, as próprias fundações de concreto armado foram utilizadas como sistema de aterramento. A escolha da localidade do estudo foi proposital, pois desejava-se uma região com clima quente e seco, nas quais notadamente a resistividade do solo é maior. Além disso, por se tratarem de instalações que abrigavam bombas e equipamentos explosivos sensíveis, requeria-se que o aterramento apresentasse uma baixa resistência, com no máximo 5Ω , de forma a escoar com facilidade cargas estáticas oriundas do vento, tempestades de areia, bem como correntes oriundas de DAs.

As medições efetuadas por Ufer (1964) foram realizadas em 1960, aproximadamente 20 anos após a construção das bases militares. O autor salienta que durante todo esse tempo a situação dos aterramentos na base de Tucson (que possui 800 depósitos) foi monitorada pelo oficial de vigilância e sempre apresentou-se em conformidade com as

¹ Em inglês: *Ufer grounding*, *concrete-encased grounding*, *cement-encased grounding* e ainda *concrete encapsulated grounding*

requisições. Tendo em vista as excelentes evidências obtidas nas bases militares, Ufer (1964) apresenta em seu trabalho vários outros testes de aterramentos encapsulados por concreto do tipo fundação, apresentando vários estudos de caso de construções nas quais foi realizado esse tipo de aterramento bem como as leituras de resistência de baixa frequência do aterramento, normalmente abaixo de 5Ω . Por fim, Ufer (1964) evidenciou que eletrodos metálicos envolvidos por concreto consistem em um tipo de aterramento eficiente, em baixas frequências. Mais que isso, o concreto não somente reduz a resistência de aterramento, mas também é estável e capaz de manter a resistência de aterramento em baixos valores mesmo diante de longos períodos de tempo, clima seco e solo de alta resistividade.

Posteriormente, Wiener (1970) apresentou um estudo experimental comparando a eficácia de aterramentos concretados horizontais em relação à hastes de aterramento convencionais. O autor avaliou aterramentos concretados do tipo fundação horizontal com 6 m de comprimento e eletrodos do tipo haste vertical com 2,3 m. O estudo durou mais que 14 meses, incluindo um inverno úmido e um verão seco. A resistência de baixa frequência dos aterramentos foi monitorada pelos primeiros 5 meses. Após, isso, foram aplicadas aos aterramentos correntes de um sistema isolado 120/240 V, durante 6 meses subsequentes. Ao término do período de 14 meses, aplicou-se a ambos aterramentos correntes de falta de sistemas de 2,4 a 20 kV. Em todas essas situações a resistência de baixa frequência foi avaliada. O autor concluiu que as resistências dos eletrodos concretados apresentaram característica relativamente constante com o tempo e foram, em geral, menores que as das hastes nuas e que, além disso, o aterramento concretado foi mais eficiente em conduzir correntes do sistema 120/240V.

Quanto à corrente de falta dos sistemas de 2,4 a 20 kV, Wiener (1970) observou que a capacidade de condução de corrente de ambos os aterramentos foram similares. Além disso, o autor aponta que, após todos os testes, os eletrodos encapsulados por concreto estavam em melhores condições que as hastes nuas, as quais apresentavam sinais de corrosão. Vale salientar que, apesar do estudo indicar as boas capacidades do aterramento concretado, o autor compara dois aterramentos com topologias diferentes, o que limita a capacidade comparativa. Ou seja, ao invés de comparar uma haste vertical concretada com uma haste vertical nua (ou um eletrodo horizontal concretado com um eletrodo horizontal nu) o autor compara um aterramento concretado com três ou dois eletrodos horizontais (similar a uma estrutura de fundação residencial) em relação a um aterramento com haste vertical nua. Dessa forma, o trabalho se concentra mais em uma proposição do uso de aterramento concretado do tipo fundação residencial como alternativa às hastes verticais convencionais.

Em seguida, Fagan e Lee (1970), apresentaram um estudo avaliando a resistência de baixa (R_{BF}) frequência de aterramentos concretados do tipo haste vertical e, de forma mais extensa, fundações do tipo pilar. Os autores averiguaram que, quanto à R_{BF} , eletrodos

de aterramentos reforçados com concreto apresentaram eficiência superior a de eletrodos convencionais, em solos com resistividades maiores que $100 \Omega \cdot \text{m}$. Já para solos com resistividades maiores que $50 \Omega \cdot \text{m}$ e menores que $100 \Omega \cdot \text{m}$, não haveriam grandes ganhos em se concretar um aterramento, pois os valores das resistividades do concreto e do solo estariam muito próximo entre si. Por outro lado, para solos com resistividade abaixo de $50 \Omega \cdot \text{m}$ a eficiência de um aterramento concretado seria inferior à de um aterramento convencional. Além disso, no trabalho são apresentados ensaios realizados conjuntamente com a *Westinghouse Electric Company*, utilizando impulsos de corrente em aterramento concretado vertical (provavelmente o primeiro trabalho a fazê-lo). Nesses casos, foram aplicados impulsos de correntes com 1,9 a 9,3 kA (e tempo de pico entre 2 e 5 μs) em aterramentos compostos por cilindro de concreto vertical com 1 m de comprimento e 40 cm de diâmetro, com 1 ou 4 eletrodos verticais no interior do concreto. Após os testes de impulso, os eletrodos foram retirados do solo e enviados à uma análise petrográfica. O exame microscópico não revelou qualquer evidência de estresse ou alteração do concreto advindas dos teste de impulso. No trabalho, também são apresentados cálculos quanto à resistividade do concreto, o qual apresentaria resistividade de $30 \Omega \cdot \text{m}$ à 20°C , $10 \Omega \cdot \text{m}$ à 100°C e um valor médio de $20 \Omega \cdot \text{m}$ (considerando um concreto com conteúdo de água de 5% em todos os casos). Além disso, os autores desenvolvem uma expressão analítica (a ser vista no [Capítulo 6](#)) para o cálculo da resistência de baixa frequência de hastes concretadas, cujo racional pode ser utilizado para o desenvolvimento de uma expressão para aterramento com eletrodo horizontal (contrapeso).

[Preminger \(1975\)](#) realizou um estudo comparativo entre dois tipos de aterramento: haste concretada vertical (sistema americano) e anel concretado, 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 $\rho_{\text{concreto}}/\rho_{\text{solo}} = 0,1$ 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 à mesma haste sem concreto) é de 29%. Já para o caso em que $\rho_{\text{concreto}}/\rho_{\text{solo}} = 0,5$ a redução na resistência de aterramento, utilizando o concreto, é de 16%.

Após isso, [Rowland \(1995\)](#) 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 $30 \Omega \cdot \text{m}$, 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 $50 \Omega \cdot \text{m}$ 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 $100 \Omega \cdot \text{m}$, 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 5Ω . 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-se que a utilização de cabos de aço trançado é economicamente mais viável que a utilização de cobre.

Posteriormente, [Meng et al. \(1999\)](#) 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 para criação de valas, preenchendo-as em seguida com concreto. Tal método consiste na utilização de explosivos, os quais são inseridos no interior do solo através de buracos, 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 $5 \Omega \cdot \text{m}$), 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 $100 \Omega \cdot \text{m}$. Foram apresentados resultados da aplicação da técnica em três diferentes subestações. Os resultados foram a 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 orifícios 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.

Mais adiante, [Kurtovic e Vujevic \(2000\)](#) 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.

[Clausen et al. \(2004\)](#), em parceria com a Companhia de Eletricidade do Estado de Santa Catarina (CELESC), motivados pela dificuldade em se obter valores de resistência de aterramento adequados, devido a presença de um solo com resistividade considerável em todo o estado de Santa Catarina, realizaram uma análise do efeito que um encapsulamento de concreto com 40 cm de diâmetro promove na resistência de baixa frequência de aterramentos do tipo: haste vertical (com 2,4 m de comprimento) e 3 hastes verticais em linha. Os resultados obtidos indicaram que o uso do concreto reduziu a resistência do aterramento de haste vertical em 38% e do aterramento com 3 hastes em linha, em

33,9%. Além disso, comparou-se o concreto com um composto químico para melhoramento de aterramento chamado “GEL” (o qual era comumente utilizado pela CELESC para melhoramento de aterramentos) e, quanto a isso, averiguou-se que o concreto foi superior a tal composto químico. Por fim, os autores avaliaram a viabilidade de se utilizar a estrutura da base de postes de redes de distribuição (ie. concreto armado com aço enterrado no solo) como aterramento para o neutro de transformadores de distribuição, e chegaram à conclusão de que a base de concreto armado dos postes fornecem resistências de aterramento inferiores a de um aterramento com 3 hastes nuas em linha. Dessa forma, se os postes de distribuição passarem a dispor de um ponto de acesso à sua estrutura interna de aço (localizado estrategicamente na altura do condutor neutro da rede de baixa tensão), seria possível a realização de um aterramento de forma rápida e com economia de cabos e hastes de aterramento, fornecendo um razoável ganho econômico.

Um trabalho conciso foi apresentado por [Baldwin, Rifaat e Malik \(2009\)](#), os quais apresentaram resumidamente a história dos aterramentos encapsulados por concreto, bem como as sugestões e contribuições de [Harding e Harris \(1970\)](#) e [Rowland \(1995\)](#). Basicamente, pontua-se a importância de utilização de cabos ou eletrodos de aço ao invés de cobre, na construção de aterramentos concretados. Dessa forma, evita-se um par galvânico entre o cobre do eletrodo de aterramento e o aço presente na fundação da torre. Esse par galvânico promove a corrosão do aço da fundação e pode comprometer a estrutura civil da fundação. Além disso, sugere-se que o encapsulamento de concreto possua conteúdo de cimento otimizado, diâmetro adequado e que se evitem aditivos químicos corrosivos para que, através dessas medidas, seja prevenida a corrosão do aço (mesmo quando os eletrodos não sejam de cobre).

Em seguida, no trabalho de [Bezerra e Kanashiro \(2010\)](#) 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 Ω .m, 1000 Ω .m e 3000 Ω .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 simulações e medições foram realizadas para frequência industrial, não sendo analisado o comportamento transitório ou impulsivo da haste concretada.

Posteriormente, [Velev et al. \(2011a\)](#) fizeram uma avaliação de haste vertical e eletrodo horizontal encapsulados por concreto (com uma e duas camadas de concreto), através de simulações em baixa frequência. Foi utilizada como excitação a aplicação de

uma tensão contínua de 10 kV na extremidade dos eletrodos. A haste vertical de 0,8 m de comprimento com apenas uma camada envolvente de concreto (com 14 cm de diâmetro e concreto com 25 Ω .m) apresentou uma redução de resistência de 26,7% em relação à haste convencional. Já no caso da haste com dois tipos de concreto envolvente, todas as dimensões geométricas da haste concretada foram as mesmas do primeiro caso, sendo uma camada interna de concreto com 7 cm de diâmetro e resistividade de 22 Ω .m e uma camada externa com 14 cm de diâmetro e 13 Ω .m de resistividade. Nesse último caso, houve uma redução de 47,5% na resistência do aterramento em relação à uma haste convencional. Os autores utilizaram o *software* ANSYS, o qual utiliza o MEF para resolução de problemas. A equação governante utilizada foi a equação de Laplace $-\nabla(\sigma \cdot \nabla\phi) = 0$, portanto apenas os efeitos resistivo e capacitivo foram contabilizados, sendo desconsiderados o efeito indutivo e a dependência da frequência que a resistividade e permissividade do solo possuem.

Em um segundo trabalho, no mesmo evento, [Velev et al. \(2011b\)](#) apresentaram expressões analíticas para o cálculo da resistência de baixa frequência de eletrodo vertical e horizontal encapsulados por concreto. Os autores apresentaram expressões desenvolvidas a partir de dois tipos de abordagem distintas: integral e método das imagens. Os resultados das expressões analíticas foram comparados com simulações computacionais e também com resultados experimentais ao longo de quase 2 anos. Para uma situação de eletrodo concretado vertical com 0,8 m de comprimento, 14 cm de diâmetro de concretagem, resistividade do concreto 25 Ω .m, enterrado em um solo com resistividade 52,6 Ω .m, a expressão analítica (com abordagem integral) forneceu uma resistência com erro de -0,93% em relação ao resultado da simulação. Além disso, os resultados de medições de resistência desse mesmo sistema de aterramento, ao longo de quase 2 anos, forneceram resultados sempre razoavelmente próximos aos fornecidos pela expressão analítica (com abordagem integral), considerando que a resistividade do solo foi repetidamente medida mensalmente. Os autores também pontuaram que a expressão analítica com abordagem integral apresentou melhores resultados que os da expressão deduzida a partir do método das imagens, a qual apresentou erro de -15,1%.

Subsequentemente, [Androvitsaneas, Gonos e Stathopulos \(2012\)](#) 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.

[Rodrigues et al. \(2012\)](#), apresentaram um estudo predominantemente experimental da resposta impulsiva de aterramentos com hastes concretadas. Foram analisadas hastes de aterramento nuas, concretadas e concretadas com dois tipos de concentração de bentonita. Utilizou-se um gerador de impulso de corrente para aplicar sob cada tipo de haste 44

impulsos de corrente com formato $8/20 \mu s$ e amplitudes de aproximadamente 0,5 kA a 6,5 kA, a depender do tipo da haste avaliada. Para isso, carregaram-se os capacitores do gerador de impulso com tensões entre 10 kV e 60 kV, incrementadas em 5 kV. Os autores observaram que à medida que a tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso aumentava (e conseqüentemente a corrente injetada) a impedância impulsiva das hastes concretadas diminuía. Observou-se que a haste concretada sem bentonita forneceu valores de impedância impulsiva menores que os das hastes concretadas com adição de bentonita. Além disso, para todos os tipos de hastes, a impedância impulsiva apresentou valores menores que a resistência de baixa frequência, o que é coerente com os efeitos de ionização e dependência da frequência dos parâmetros do solo (embora os autores tenham atribuído esse fenômeno apenas às correntes capacitivas no solo e efeito armadilha (*traps*) no revestimento de concreto). Também foi pontuado no trabalho que, para os experimentos adotados e as condições ambientais, o revestimento de concreto (com e sem a bentonita) é capaz de suportar o esforço elétrico de impulsos de corrente consecutivos sem apresentar fissuras ou quebras. Por fim, o trabalho apresenta contribuições relevantes quanto ao estudo da resposta impulsiva de hastes concretadas.

Posteriormente, no trabalho de [Lim, Gomes e Kadir \(2013\)](#) 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. Por outro lado, não foram feitas análises quanto à resposta transitória desse aterramento.

Em seguida, [Liu e Madsen \(2013\)](#) utilizaram um *software* baseado em MEF para realizar uma análise da resposta em frequência e desenvolvimento de um circuito equivalente para um aterramento com haste simples e de um aterramento com haste concretada. No entanto, considera-se um solo que não é dependente da frequência. 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, os amplamente difundidos *Eletromagnetic Transient Program* (EMTP) e *Alternative Transients Program* (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.

No trabalho de [Almaguer et al. \(2013\)](#) foi apresentado um estudo de simulação avaliando a resposta transitória da base/fundação de postes construídos em concreto, na

qualidade de aterramento para linhas de distribuição. Foram avaliados postes do tipo “duplo T”, os quais possuem um corte transversal com formato de “H”, apresentando 4 vergalhões verticais de aço no seu interior, sendo cada um disposto à cada uma das extremidades do “H”. Considerou-se que a base do poste estava enterrada à uma profundidade de 1,8 m, em solos com 100 e 1000 Ω .m. Os autores representaram o sistema de aterramento através de modelagem via linhas de transmissão (TLM) para criar uma malha 3D baseada em *Symmetrical Condensed Node*. Uma corrente impulsiva com 3,5 kA (1,6/4,8 μ s) foi aplicada em diferentes pontos da base do poste e a respectiva impedância transitória foi avaliada e comparada com a impedância transitória de uma haste vertical nua de 2,4 m. Como resultado, observou-se que a impedância transitória da base do poste foi inferior à da haste para o solo de 1000 Ω .m, enquanto que para o solo de 100 Ω .m o inverso ocorreu. Por fim, os autores sugerem que o uso de bases de poste de concreto como topologia de aterramento pode ser uma solução viável e uma alternativa econômica para ser aplicada como aterramento em alguns sistemas de distribuição, em substituição às hastes simples, especialmente no caso de solos de alta resistividade. Vale notar que nesse estudo a dependência da frequência dos parâmetros do solo não foi considerada.

Posteriormente, na pesquisa de [Androvitsaneas, Gonos e Stathopoulos \(2014\)](#), 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 tem uma considerável relevância, uma vez que apresenta dados experimentais de aterramentos concretados sob correntes impulsivas.

Em seguida, [Yunus et al. \(2015\)](#) 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_{BF}); ou seja, avaliou-se a expressão $100\% \cdot (R_{BF} - Z_p) / R_{BF}$, para cada estrutura de aterramento. O poste de concreto foi a estrutura que apresentou maior redução percentual calculada segundo a expressão anteriormente mencionada, a saber 49,8%. A estrutura de aterramento que obteve o segundo maior valor de redução percentual 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, ficaram evidentes as contribuições de um aterramento envolvido por concreto, quanto à sua resposta impulsiva.

Cabral et al. (2016) publicaram um estudo de várias configurações de aterramento concretado, em modelo de escala reduzida e utilizando impulso de tensão com 5 V (8/20 μ s). Os autores avaliaram cinco configurações de aterramento, para as quais foi avaliada a impedância impulsiva do aterramento com e sem concreto. Esses estudos foram realizados para dois tipos de solo: um de 55 Ω .m e outro de 5000 Ω .m. Observou-se que, tanto para eletrodo vertical quanto horizontal, em solo de 55 Ω .m, a utilização de concreto reduziu a impedância impulsiva do aterramento em 64%. Já para o solo de 5000 Ω .m, a adição de concreto reduziu a impedância impulsiva em aproximadamente 10%. No entanto, tais resultados demonstram um comportamento excêntrico, uma vez que espera-se que a eficiência do concreto seja superior à medida que se considera solos com maior resistividade (sendo que em tal trabalho é apresentado exatamente o contrário). Talvez o fato do trabalho usar modelos de escala reduzida e levar em conta excitações com baixa tensão (5 V) pode ter adicionado algumas incertezas no estudo. Dessa forma, embora o trabalho indique que o uso do concreto reduzirá a impedância impulsiva, o mesmo apresenta um comportamento adverso quanto à eficiência do concreto em relação à resistividade do solo.

No mesmo ano, o trabalho apresentado por Tronchoni et al. (2016) foi desenvolvido pelos mesmos autores do trabalho Cabral et al. (2016), sendo apresentado a mesma pesquisa de uma forma mais detalhada e com resultados novos. Utilizou-se um arranjo experimental similar, no entanto, aplicou-se uma tensão nos aterramentos de até 8 V, enquanto que em Cabral et al. (2016) a tensão foi de até 4 V. Além disso, o solo utilizado nos experimentos possuía resistividade de 280 Ω .m e 326 Ω .m, enquanto que em Cabral et al. (2016) foi de 55 Ω .m e 5.000 Ω .m. Os resultados obtidos em Tronchoni et al. (2016) indicaram uma redução de impedância impulsiva (devido ao concreto) de 31,8% para uma haste vertical concretada (com 10 cm de comprimento, 3 cm de diâmetro de concretagem, enterrada em um solo com 326 Ω .m). Nesse caso, o uso do concreto fez a impedância impulsiva sair de 2.623 Ω (convencional) para 1.789 Ω (concretada). Curiosamente, em Cabral et al. (2016) obteve-se uma impedância impulsiva de 2.324 Ω para uma haste convencional com 12 cm de comprimento em um solo de 5.000 Ω .m; ou seja, uma impedância próxima à de 2623 Ω , para um haste similar e em um solo de resistividade 326 Ω .m (quinze vezes menor). O trabalho também apresenta uma representação computacional dos sistemas de aterramentos concretados, sendo avaliados através do modelo de linhas de transmissão tipo π . Utilizou-se o *Alternative Transient Program - ATP* para realização das simulações, obtendo-se resultados razoavelmente próximos dos medidos experimentalmente.

Posteriormente, Androvitsaneas, Gonos e Stathopoulos (2016) 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, realizaram-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. Aplicaram-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 hastes foram dispostas apresentava resistividade entre 170 a 400 Ω .m em sua camada superior, a qual apresentava 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 autores afirmam que o concreto comum é mais eficiente e mais barato que a pasta de bentonita. Apesar de sua característica higroscópica, a bentonita necessita de um solo com teor de umidade elevado 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.

Posteriormente, [Pereira et al. \(2017\)](#) 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. O solo estudado foi estratificado em três camadas, sendo que no período mais seco apresentou resistividades para a 1ª, 2ª e 3ª camada nos valores de: 1.034 Ω .m, 10.063 Ω .m e 623 Ω .m. Como resultado, o aterramento concretado apresentou resistência de 275,7 Ω , enquanto o aterramento convencional, com hastes nuas, apresentou uma resistência de 537,0 Ω , 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.

Após isso, [Androvitsaneas, Gonos e Stathopulos \(2017\)](#) apresentaram um trabalho com extensa pesquisa bibliográfica e histórico do uso de materiais aprimoradores de aterramentos. O estudo apresenta análises da resposta em baixa frequência e da resposta impulsiva de vários materiais, incluindo o concreto de fundação. Os autores indicam que o concreto de fundação é capaz de reduzir de 30 a 40% a resistência de baixa frequência de aterramentos para solos com resistividade de 200 a 1500 $\Omega.m$; e de 32 a 47% para solos com mais de 2000 $\Omega.m$. Quanto à resposta impulsiva, frente à descargas com elevadas correntes, os autores indicam que o uso de materiais aprimoradores reduz em média 30% a impedância impulsiva do aterramento. Pontua-se que o concreto é um material inerte e apresenta uma excelente performance tanto em períodos úmidos quanto secos. Em suas conclusões o trabalho indica que os aterramentos químicos são os que apresentam maior variabilidade em suas características com o tempo. Esses produtos químicos causam uma grande redução da resistência de aterramento durante as primeiras semanas após serem aplicados ao redor dos eletrodos, mas, após isso, ocorre uma grande variação sazonal, produzindo altos valores de resistência de aterramento. Pontua-se que muitos dos materiais aprimoradores que fazem uso de compostos químicos não mantêm sua estabilidade como alegam os seus fabricantes. Por fim, observando-se os dados apresentados no trabalho, fica evidente que o concreto é um dos materiais que melhor reúne uma série de benefícios técnicos: boa capacidade de redução da impedância de aterramento, seguro ao meio ambiente, abundante no mercado, com propriedades inertes e estável frente a diferentes situações climáticas.

Posteriormente, [Tronchoni et al. \(2017\)](#) apresentaram um trabalho experimental que avaliou impedância impulsiva de aterramentos concretados com quatro diferentes topologias: (A) haste vertical com 2,4 m; (B) malha de 1,4 m x 1,4 m (com reticulado de 0,14 m x 0,14 m e enterrada 0,5 m de profundidade); (C) aterramento horizontal “tipo cruz”, realizado com dois eletrodos horizontais de 18 m e 13 hastes verticais espaçadas de forma equidistante; e aterramento horizontal “tipo T”, realizado com dois eletrodos horizontais (enterrados a 0,5 m da superfície), um de 12 m e outro de 23 m, e 13 hastes verticais espaçadas de forma equidistante. Observou-se que para essas quatro topologias o uso do concreto promoveu uma redução média de 54,64% na resistência de baixa frequência e 53,74% na impedância impulsiva (em um solo com resistividade de 293 $\Omega.m$). Para além dessas quatro topologias mencionadas, os autores também realizaram testes no aterramentos de cinco torres de uma linha de transmissão real de 69 kV. Foram feitas medições da resistência de baixa frequência do aterramento dessas torres, antes e após os cabos contrapesos serem concretados. Como resultado, foi obtida uma redução média de 85% na resistência do aterramento, considerando que as torres estavam sob solos com resistividade entre 1000 e 2000 $\Omega.m$. Apesar do trabalho apresentar contribuições importantes, não foram dados detalhes do diâmetro do encapsulamento do concreto nas

quatro primeiras topologias de aterramento, nem do comprimento do cabo contrapeso utilizado na LT de 69 kV, o que dificulta a reprodutibilidade do estudo.

Após isso, [Androvitsaneas et al. \(2018\)](#) indicaram a necessidade dos materiais aprimoradores de aterramento (como o concreto) serem avaliados e certificados não somente através de testes de laboratório, conforme a [IEC Std.62561 Parte 7 \(2011\)](#) sugere, mas também através de medições em campo ao longo de vários dias. O motivo apresentado é que a resistência do aterramento é afetada não só pelas propriedades químicas do material aprimorador, mas também pelas condições de umidade do solo, temperatura ambiente e precipitação pluviométrica, as quais interagem com o material, produzindo valores de resistividade que são significativamente diferentes dos declarados pelos fabricantes dos materiais. No estudo, os autores avaliaram três tipos de haste vertical: sem encapsulamento, encapsulada por concreto de fundação e encapsulada por material sintético à base de bentonita. Os experimentos foram realizados no meio do verão, quatro meses após a instalação das hastes e dos materiais aprimoradores de aterramento. Durante um período de 23 dias, diariamente, a resistividade do solo e resistência do aterramento foram medidas. Em todo o período de medições, houve apenas um dia de chuva, com 1.5 mm de precipitação. Com base na medição da resistividade do solo, resistência de aterramento e nas dimensões geométricas do aterramento, a resistividade do concreto e do material sintético foram estimadas, para cada dia de medição, utilizando simulações através do *software* SES CDEGS. Como resultado foi evidenciado que tanto o concreto quanto o material sintético tiveram suas resistividades variando durante o período das medições, com comportamento crescente. O concreto apresentou resistividade menor que o material sintético em todas as medições diárias e, além disso, se estabilizou em um valor de aproximadamente 150 $\Omega.m$, quando ocorreu o único dia de chuva após cerca de 45 dias do início das medições. Esse valor final da resistividade do concreto obtido pelos autores se contrapõe ao apresentado por [Fagan e Lee \(1970\)](#), o qual indica um valor de 30 $\Omega.m$. Uma possível explicação para isso seja o fato das medições realizadas por [Androvitsaneas et al. \(2018\)](#) terem ocorrido durante o verão, havendo apenas um único dia de chuva, assim, possivelmente a primeira exposição do concreto à água tenha influência no seu ponto de estabilização.

Em seguida, [Almaguer, Saquetti e Coelho \(2020\)](#) apresentaram um estudo no qual foram realizadas simulações da impedância transitória da base de postes de redes de distribuição com formato “duplo T”, fabricados com concreto reforçado por seis barras de aço, tendo uma base enterrada no solo com 1,8 m de comprimento. A impedância transitória da base (aterrada) do poste foi simulada para uma excitação com corrente de descarga de 3,5 kA de amplitude e formato 1,6/4,8 μs , do tipo dupla-exponencial. Foram desenvolvidas simulações eletromagnéticas 3D baseadas no método de modelagem através de linhas de transmissão (TLM), sendo avaliada uma situação de solo com baixa resistividade (100 $\Omega.m$) e outra de solo com alta resistividade (1000 $\Omega.m$). Em ambos os casos considerou-se um solo homogêneo com parâmetros constante (não dependentes da

frequência). Os resultados indicaram que utilizar a base do poste como aterramento fornece uma impedância transitória superior à de uma haste nua vertical quando considerado um solo de baixa resistividade ($100 \Omega.m$), mas inferior à de uma haste nua quando considerado um solo de alta resistividade ($1000 \Omega.m$). Portanto, os autores concluíram que utilizar as bases dos postes de rede de distribuição como aterramento é uma alternativa econômica, em substituição à um aterramento com haste nua simples, para solos com altas resistividades.

Em seu trabalho, [Hasni et al. \(2021\)](#) fizeram um estudo de simulação da concretagem parcial de uma haste com 2 m de comprimento e 7 mm de diâmetro, enterrada em um solo cuja resistividade não foi informada. Foi avaliada a diferença percentual do pico do GPR da haste concretada em relação à mesma haste sem concreto para correntes de descarga padronizadas com forma de onda $10/350 \mu s$ e $8/20 \mu s$, além de descargas não padronizadas de $0,7/6 \mu s$ e $2/70 \mu s$. O pico das correntes de descarga foi assumido como sendo 31 kA. Quanto às situações de concretagem, foram avaliados os seguintes casos: haste sem concreto, haste totalmente encapsulada por concreto (4/4) e haste encapsulada em 3/4, 2/4 e 1/4. Sendo que nessas três últimas situações de encapsulamento, foram avaliadas ainda 3 casos particulares de posicionamento do encapsulamento (sem alterar o volume de concreto): no topo da haste, no meio e na extremidade inferior da haste. Por fim, o trabalho conclui que o caso de concretagem total foi o que apresentou o menor pico de GPR independentemente do tipo de corrente de descarga, seguido do caso em que 3/4 de concretagem é posicionada no topo da haste. Observou-se que o trabalho foi um dos únicos da literatura que avaliou situações de concretagem parcial, contudo, os autores não informaram alguns dados importantes: a equação eletromagnética governante que foi adotada; a resistividade, permissividade e raio do concreto; a resistividade do solo avaliado e as dimensões do domínio de simulação. Além disso, o solo aparentemente foi modelado com resistividade e permissividade constantes, e não dependentes da frequência. Vale salientar que um ano antes, [Hasni et al. \(2020\)](#) publicaram um trabalho similar quanto ao estudo de encapsulamento parcial do eletrodo, contudo nesse caso foi avaliado apenas o campo elétrico ao redor da haste concretada, não sendo tecido nenhum comentário quanto à resistência, impedância impulsiva ou GPR do aterramento.

Em seguida, [Hizamul-Din et al. \(2021\)](#) avaliaram, de forma experimental, três eletrodos com encapsulamento cimentício: concreto poroso, argamassa e concreto espumado. O objetivo principal do trabalho era avaliar a influência que as lacunas de ar entre os grãos do solo têm sob o fenômeno da ionização do solo. Dessa forma, o cimento foi utilizado apenas como material para facilitar a criação de um corpo de prova com lacunas de ar com diâmetro médio controlado. No trabalho, são citados outros autores da literatura que indicam que solos com grãos maiores (e, portanto, lacunas de ar maiores) possuem valor de campo elétrico crítico (E_c) menores que solos com grãos mais finos. Contudo, embora o concreto tenha sido utilizado para facilitar o estudo da ionização, no trabalho, são apresentados alguns dados relevantes quanto ao próprio estudo do concreto como elemento

aprimorador de aterramento. Os autores aplicaram, nos três tipos de eletrodo, impulsos de corrente com amplitudes variando de 0,3 kA a 3 kA. Como resultado, observou-se que, para amplitudes de corrente menores que 2,5 kA, a haste com concreto poroso (que possuía as maiores lacunas de ar) apresentou os menores valores de impedância impulsiva. Por outro lado, para correntes acima de 2,5 kA, a haste com argamassa e a com cimento poroso apresentaram valores praticamente iguais de impedância impulsiva e, além disso, menores que os da haste convencional e com concreto espumado.

Posteriormente, [Bezerra, Moreira e Ferreira \(2023\)](#) apresentaram um estudo da resistência de aterramento de malhas de aterramento encapsuladas por concreto. No trabalho, são avaliadas duas malhas com tamanhos diferentes, uma medindo 5 m X 5 m e outra 15 m X 15 m. Foram estudadas várias configurações de encapsulamento, como por exemplo: concretagem apenas das hastes, apenas dos eletrodo horizontais e concretagem total de todos os eletrodos da malha. Os autores chegaram à conclusão de que a configuração que apresentou a melhor relação de volume de concreto utilizado versus redução percentual na resistência de aterramento foi a situação em que apenas as hastes verticais da malha são concretadas. Também foi observado que a redução percentual na resistência de aterramento foi consideravelmente maior para a malha de menores dimensões. Além disso, foi pontuado que, à medida que se considera solos com maior resistividade, a redução na resistência de aterramento aumenta, no entanto, o aumento incremental nessa redução da resistência é suave.

Mais recentemente, como resultado parcial da presente tese, [Bezerra et al. \(2024\)](#) apresentaram um trabalho avaliando a resposta transitória de aterramentos encapsulados por concreto, quando submetidos tanto a primeiras descargas quanto a descargas subsequentes. Foram estudados um eletrodo vertical (haste) com 2,5 m e um eletrodo horizontal (contrapeso) com 10 m. Nas simulações foram consideradas as dependências da resistividade e permeabilidade do solo com a frequência. Além disso, foram estudados encapsulamentos parciais do eletrodo. Os resultados indicaram que o uso do concreto promoveu uma redução na impedância impulsiva de até 44% para a haste e de até 30% para o contrapeso. Além disso, chegou-se à conclusão que o primeiro quarto de encapsulamento de concreto é o que produz a maior contribuição incremental na redução da impedância impulsiva. No entanto, apesar das contribuições, o trabalho não avaliou contrapesos mais longos, o que teria um especial valor para estudos de aterramentos de torres de LTs. Adicionalmente, a equação governante utilizada na modelagem eletromagnética não seria a mais adequada para se estudar eletrodos muito maiores que 10 m, quando o comprimento do eletrodo se aproxima do comprimento de onda da excitação, além de não ser contabilizado o efeito da propagação de ondas.

3.1.1 Considerações

Após a realização da revisão bibliográfica descrita neste capítulo, foi observado que muitos trabalhos analisam aterramentos encapsulados por concreto (AEC) apenas para baixas frequências. Quanto aos trabalhos experimentais que avaliam a resposta transitória de AECs, em sua maioria, avaliam apenas aterramentos do tipo haste concretada e em poucos tipos de solo. Sendo raros os estudos de eletrodo horizontal (contrapeso) encapsulado por concreto (TRONCHONI et al., 2017), o que teria notória importância para a compreensão e avaliação do emprego de AECs em aterramentos de linhas de transmissão.

Por outro lado, quanto aos trabalhos de simulação da resposta transitória de AECs, a maioria não considera a dependência da frequência que a resistividade e permissividade do solo possuem, nem utilizam uma modelagem eletromagnética mais rigorosa, que permita a contabilização do fenômeno de propagação de ondas no eletrodo juntamente com os efeitos resistivo, indutivo e capacitivo do aterramento.

Além disso, observa-se uma escassez de trabalhos que faça uma análise ampla, considerando solos com diferentes resistividades (geralmente consideram-se solos ou de baixa ou média ou alta resistividade, dificilmente os três tipos são avaliados conjuntamente). Adicionalmente, foi encontrado apenas um trabalho que avalia o encapsulamento parcial do eletrodo de aterramento, embora os autores não tenham fornecido vários dados importantes da simulação (HASNI et al., 2021).

Excetuando-se o trabalho de Bezerra et al. (2024) (o qual apresenta resultados parciais da presente tese), constatou-se que apenas o trabalho de Liu e Madsen (2013) analisa a impedância harmônica de aterramentos concretados, estimando-a através de funções racionais. Contudo, nesse trabalho, o efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo foi negligenciado. Nesse sentido, a obtenção de funções racionais que estimem o comportamento da impedância harmônica dos AECs possui grande importância, uma vez que é um passo intermediário para o desenvolvimento de modelos circuitais que possibilitem simulações de AECs sob fenômenos transitórios através de *softwares* de simulação do tipo EMT. Devido ao fato das simulações de campos eletromagnéticos exigirem grande esforço computacional e tempo, a obtenção de funções racionais que representem a impedância harmônica fornecida pela modelagem eletromagnética é uma solução de interesse prático, que permite que eletrodos concretados sejam facilmente inseridos em simulações de aterramentos com as mais variadas topologias.

Por fim, fica evidente a lacuna de trabalhos que analisem de forma aprofundada a resposta transitória de AECs, tanto para PRI quanto para SUB, considerando diferentes tipos de eletrodo, contrapesos com mais de 30 m, dependência da frequência dos parâmetros do solo, situações de solos com baixa, média e alta resistividade e que analisem diferentes frações de concretagem. Além disso, observou-se a necessidade de informações quanto

ao valor da impedância impulsiva de AECs para essas diferentes situações, bem como da redução percentual na impedância impulsiva, conferida pela concretagem do eletrodo de aterramento. Tais dados forneceriam uma caracterização aprofundada da resposta transitória de AECs, permitindo compreender em quais situações seriam mais vantajosos.

3.2 Contribuições do Presente Trabalho

Diante das considerações quanto ao estado da arte, apresentada na seção anterior, o presente trabalho se presta a contribuir com as lacunas na literatura, trazendo avanços quanto ao estudo e modelagem da resposta transitória de AECs. Tais contribuições podem ser tipificadas como:

- Caracterização da resposta de AECs tanto em baixas quanto em altas frequências, através da obtenção da impedância harmônica $\mathbf{Z}(j\omega)$, entre 60 Hz e 4 MHz;
- Consideração do fenômeno da dependência da frequência que a resistividade e permissividade do solo possuem, durante a obtenção de $\mathbf{Z}(j\omega)$;
- Avaliação da resposta transitória do AEC, por meio da obtenção da elevação de potencial do solo (GPR²) e da impedância impulsiva Z_p , tanto para correntes de primeiras descargas quanto para subsequentes.
- Avaliação de AECs tanto do tipo eletrodo vertical (haste) quanto horizontal (contrapeso). Sendo que nesse último caso foram avaliados contrapesos com até 60 m de comprimento.
- Estudo de AECs em solos com diversas resistividades (300 a 4000 $\Omega.m$).
- Análise de AECs com eletrodos parcialmente encapsulados por concreto, observando-se diferentes frações de concretagem do eletrodos.
- Estimativa de $\mathbf{Z}(j\omega)$ através de uma função de transferência racional (para cada AEC avaliado), permitindo que, em trabalhos futuros: (a) possa ser calculado o GPR para formas de onda de correntes diferentes das analisadas neste trabalho; (b) sejam realizadas sínteses de circuitos que representem o $\mathbf{Z}(j\omega)$ do AEC.

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

² O GPR também é chamado de tensão desenvolvida no aterramento, no ponto de injeção da corrente.

Tabela 3.1 – Comparativo ente os trabalhos da revisão bibliográfica e as contribuições do presente trabalho, em ordem cronológica.

ITEM AVALIADO	AUTOR / TRABALHO																				
	Ufer (1964)	Wiener (1970)	Fagan e Lee (1970)	Preminger (1975)	Rowland (1995)	Meng et al. (1999)	Kurtovic e Vujevic (2000)	Clausen et al. (2004)	Baldwin, Rifaat e Malik (2009)	Bezerra e Kanashiro (2010)	Velev et al. (2011a)	Velev et al. (2011b)	Androvitsaneas, Gonos e Stathopoulos (2012)	Rodrigues et al. (2012)	Lim, Gomes e Kadir (2013)	Liu e Madsen (2013)	Almaguer et al. (2013)	Androvitsaneas, Gonos e Stathopoulos (2014)	Yunus et al. (2015)	PRESENTE TRABALHO	
Aterramento Concretado	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Resposta em Baixa Freq.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X
Resposta Transitória			X											X		X*	X*	X	X	X	X
Eletrodo Vertical			X	X	X		X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Eletrodo Horizontal	X	X									X	X									X
Diferentes Solos	X																				X
Frações de Concretagem																					X
Estimação de $Z(j\omega)$																X					X

X*:Trabalhos de simulação que avaliam a resposta transitória sem considerar o efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo.

Tabela 3.2 – Continuação do comparativo ente a revisão bibliográfica e as contribuições do presente trabalho, em ordem cronológica.

ITEM AVALIADO	AUTOR / TRABALHO												
	Cabral et al. (2016)	Tronchoni et al. (2016)	Androvitsaneas, Gonos e Stathopoulos (2016)	Pereira et al. (2017)	Androvitsaneas, Gonos e Stathopoulos (2017)	Tronchoni et al. (2017)	Androvitsaneas et al. (2018)	Almaguer, Saquetti e Coelho (2020)	Hasni et al. (2021)	Hizamul-Din et al. (2021)	Bezerra, Moreira e Ferreira (2023)	Bezerra et al. (2024)	PRESENTE TRABALHO
Aterramento Concretado	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Resposta em Baixa Freq.			X	X		X	X	X				X	X
Resposta Transitória	X	X	X			X		X*	X*	X	X	X	X
Eletrodo Vertical		X	X	X		X	X	X	X			X	X
Eletrodo Horizontal		X				X						X	X
Diferentes Solos												X	X
Frações de Concretagem									X			X	X
Estimação de $Z(j\omega)$												X	X

X*:Trabalhos de simulação que avaliam a resposta transitória sem considerar o efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo.

Metodologia

Neste capítulo, é apresentada a metodologia para o desenvolvimento dos estudos e análises do presente trabalho. Na [seção 4.1](#) é exibida uma visão geral dos procedimentos adotados para a obtenção dos resultados. Em seguida, na [seção 4.2](#), são apresentados os arranjos de simulação utilizados para estudo dos casos avaliados. Por fim, na [seção 4.3](#), são apresentadas de forma resumida as diferentes situações estudadas quanto à geometria do aterramento e o tipo de solo.

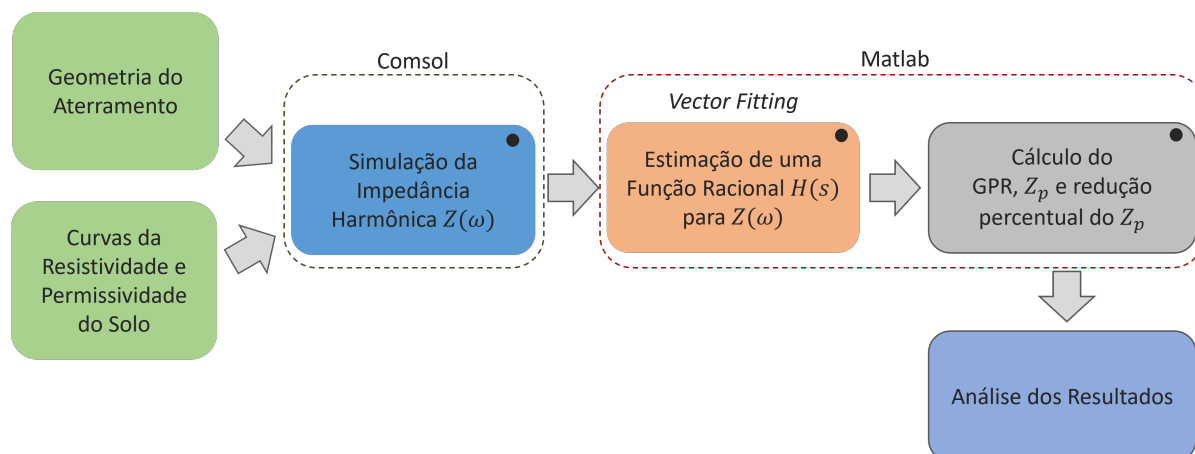
4.1 Visão Geral

O presente trabalho se presta a oferecer uma contribuição original para que as lacunas do estado da arte possam ser sanadas. Dessa forma, apresenta-se tanto uma análise de aterramentos concretados quanto uma modelagem dos mesmos, através de funções racionais. São avaliados eletrodos encapsulados por concreto com geometria horizontal e vertical, considerando diferentes comprimentos de eletrodos e diferentes parcelas de concretagem dos eletrodos. Além disso, essas análises são realizadas para solos com baixa, média e alta resistividade, cobrindo, assim, uma gama de possibilidades.

Devido à complexidade que este estudo teria se fosse realizado de forma experimental, adotou-se uma abordagem de simulação computacional, buscando-se utilizar as melhores ferramentas e modelos que a literatura atualmente oferece, sendo também realizado um estudo de validação dessa modelagem, utilizando dados experimentais disponibilizados por outros autores, conforme apresentado na [seção 5.1](#) do [Capítulo 5](#). Nesse sentido, utilizou-se um dos modelos mais recentes que a bibliografia disponibiliza para representar o fenômeno da dependência da frequência dos parâmetros do solo ([ALIPIO; VISACRO, 2014](#)). Além disso, todas as simulações foram realizadas utilizando uma ferramenta de simulação computacional que lança mão do método dos elementos finitos e que possui notória liderança de mercado e larga adoção para solução de problemas de simulação de campos eletromagnéticos: *Comsol Multiphysics* ([COMSOL, 2022](#)).

Na [Figura 4.1](#) é apresentado um fluxograma das etapas realizadas no presente trabalho para que fosse possível a obtenção dos resultados. Nesse fluxograma as etapas que fornecem algum tipo de resultado estão marcadas com um ponto preto.

Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia para realização dos estudos do presente trabalho. O ponto preto indica as etapas onde existe obtenção de resultados.



Primeiramente, o Cmsol foi alimentado com a geometria de aterramento que se desejava simular e com os dados da resistividade e permissividade do solo em estudo. Tais dados, são as curvas de resistividade e de permissividade provenientes do equacionamento da dependência da frequência do solo de [Alipio e Visacro \(2014\)](#), detalhado na [seção 2.4](#). Como resultado da simulação no Cmsol, foi obtida a impedância harmônica $Z(j\omega)$ (amplitude e fase) para o aterramento simulado. Em posse da impedância harmônica, utilizou-se o *Vector Fitting* ([GUSTAVSEN; SEMLYEN, 1999](#); [GUSTAVSEN, 2006](#); [DESCHRIJVER et al., 2008](#)) para estimar uma Função de Transferência Racional $H(s)$ de ordem 7¹, que representasse de forma matemática o vetor de dados da impedância harmônica. Com essa função de transferência $H(s)$ torna-se possível avaliar o GPR do aterramento em questão para qualquer tipo de forma de onda de corrente que seja injetada no aterramento, incluindo as correntes apresentadas na [Figura 2.12](#), mas não somente. Neste sentido, o Matlab foi utilizado para calcular a resposta temporal (GPR) que $H(s)$ fornece quando aplica-se um sinal de corrente de primeiras descargas e descargas subsequentes. Por fim, o processo apresentado na [Figura 4.1](#) foi realizado para diversas situações de encapsulamento de concreto, resistividade do solo, geometria e comprimento de eletrodo.

A impedância harmônica $Z(j\omega)$, calculada através do Cmsol, é um resultado fundamental que permite a compreensão do funcionamento dos aterramentos concretados em baixa, média e alta frequência. Uma vez obtida $Z(j\omega)$, pode-se calcular uma função

¹ Utilizou-se ordem 7 visto ser um valor que forneceu pequeno erro quadrático para diferentes tipos de eletrodos e solos, evitando-se, por hora, o trabalho de verificar a ordem mínima adequada para cada caso.

de transferência $H(s)$ e por fim calcular o GPR para sinais de excitação desejados (no caso, correntes de descarga).

A função racional $H(s)$, estimada para o aterramento, consiste em um resultado intermediário de grande utilidade, uma vez que trata-se de um modelo que pode ser utilizado em *softwares* simuladores de circuitos como o ATP. Mais que isso, a função de transferência no formato racional, facilita o processo de desenvolvimento de um modelo circuital, através de uma síntese de circuito; o que também é de grande valia para utilização em simulações de aterramento que utilizem eletrodos concretados. Assim, embora o presente trabalho não se preste a realizar tal síntese de circuitos, são abertos caminhos para possibilitar que isso seja feito de forma menos laboriosa em trabalhos futuros (em posse das funções racionais estimadas).

Vale salientar que, embora no Comsol seja possível simular aterramentos no domínio do tempo de forma direta, isso só é possível quando todos os materiais apresentam características não dependentes da frequência. Como o efeito da dependência da frequência dos parâmetros solo possui relevância significativa na resposta do aterramento, foi necessário utilizar os passos apresentados na [Figura 4.1](#) para que se obtivesse uma análise adequada.

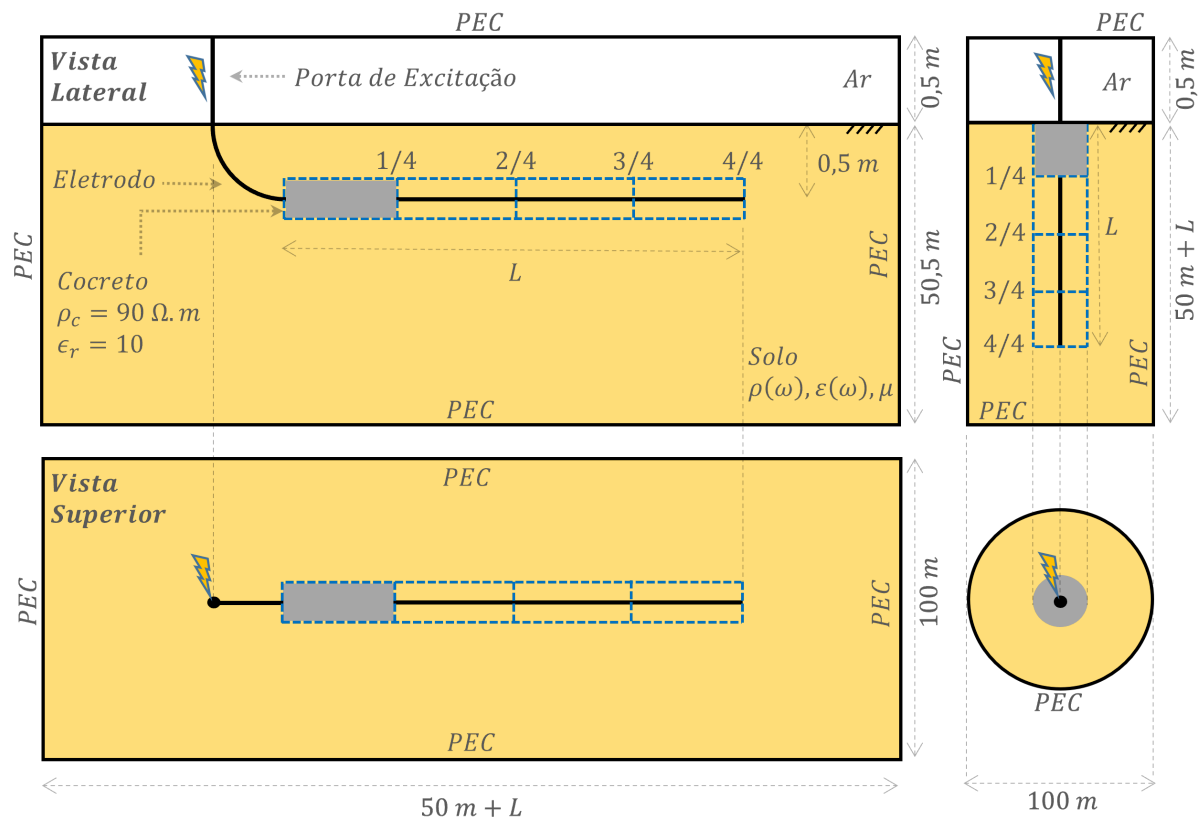
4.2 Arranjo de Simulação no Comsol

Todas as simulações eletromagnéticas do presente trabalho foram realizadas utilizando o *Comsol Multiphysics - Radio Frequency (RF) Module*, sendo escolhida como equação governante a equação de onda vetorial de segunda ordem ([COMSOL, 2022](#); [ZHU; JIAO, 2010](#); [AKBARI; SHESHYEKANI; ALEMI, 2013](#)), a qual modela ondas eletromagnéticas no domínio da frequência (no espaço 3D), fornecendo uma modelagem adequada para altas frequências, além de considerar o efeito de propagação de ondas. Por questões de concisão do texto, no [Apêndice A](#) é apresentado um detalhamento minucioso quanto às escolhas do módulo do *Comsol*, da equação governante, condições de contorno e dimensões do domínio de simulação.

A estrutura básica do arranjo de simulação implementado no Comsol é apresentada na [Figura 4.2](#). Tratam-se de simulações para um aterramento do tipo eletrodo horizontal (EH), também chamado de aterramento com cabo contrapeso, e do tipo eletrodo vertical (EV), também conhecido por haste de aterramento. Como pode-se observar na [Figura 4.2](#), os eletrodos metálicos são envolvidos por um encapsulamento de concreto (que pode assumir diferentes comprimentos). No presente trabalho, considerou-se que, para EH, tal encapsulamento de concreto consiste em um prisma retangular, uma vez que, comumente, no processo de instalação de EHs, é cavada no solo uma vala com esse formato, a qual poderia funcionar como a própria fôrma que receberia o concreto. Por outro lado, para EV, considerou-se que o encapsulamento de concreto possui um formato cilíndrico, dado

que cavar uma vala cilíndrica vertical é usualmente mais simples que outras geometrias.

Figura 4.2 – Arranjo de simulação para os estudos de aterramentos encapsulados por concreto. Eletrodo Horizontal - EH (contrapeso) à esquerda. Eletrodo Vertical - EV (haste) à direita. Imagem fora de escala para propósitos ilustrativos.



Quanto aos eletrodos de aterramentos, tanto para EV quanto para EH, foram considerados eletrodos cilíndricos de comprimento L (os valores utilizados para L são melhor detalhados na próxima seção). Para EV, assumiu-se que o raio do eletrodo é de 8 mm, o que corresponde a um diâmetro aproximado de $5/8$ " em polegadas, comercialmente disponível para hastes de aterramento. Já para EH, considerou-se um eletrodo com raio de 7 mm, por ser adotado em outros trabalhos pertinentes da literatura (ALÍPIO; VISACRO, 2013; VISACRO et al., 2011; VISACRO; SILVEIRA, 2015). Além disso, por simplicidade, definiu-se o eletrodo como tendo uma condição de contorno *Perfect Electric Conductor* (PEC) (SILVA et al., 2007; SALARIEH; SILVA; KORDI, 2019; AKBARI; SHESHYEKANI; ALEMI, 2013). Assim sendo, considerou-se o eletrodo de aterramento como sendo um cilindro oco (sem volume interno), pois a profundidade pelicular para um condutor cilíndrico com superfície PEC é zero, fazendo com que toda corrente elétrica conduzida pelo condutor se concentre apenas na superfície PEC. Logo, não há nenhum ganho em considerar o volume interno de um eletrodo revestido por PEC, pois além da corrente nesse volume interno ser zero, ainda há o ônus da criação de uma malha de elementos finitos para o volume interno, com conseqüente aumento do custo computacional da simulação.

As dimensões do domínio de simulação foram escolhidas de forma tal a sempre assegurar um afastamento de 50 m do aterramento para as superfícies externas do domínio de simulação (em todas as direções, com exceção da superfície do solo). Quanto às condições de contorno, admitiu-se as superfícies externas do domínio de simulação como sendo PECs (SALARIEH; SILVA; KORDI, 2019; AKBARI; SHESHYEKANI; ALEMI, 2013).

A excitação do aterramento foi realizada através de uma porta de tensão (com frequência variável) posicionada no condutor vertical que traspassa o domínio do ar. Como nas simulações do Comsol o interesse é apenas obter o valor da impedância harmônica vista do ponto de aplicação da tensão, é indiferente o valor de tensão escolhida a ser aplicada na porta, pois a razão tensão-corrente será sempre a mesma para uma dada frequência.

Para facilitar o estudo do efeito do encapsulamento do eletrodo na resposta transitória, avaliou-se diferentes frações de concretagem do eletrodo de aterramento (h_c), conforme apresentado na Figura 4.2. Assim, as seguintes situações foram estudadas: eletrodo sem encapsulamento de concreto ($h_c = 0$), eletrodo com um quarto de encapsulamento ($h_c = 1/4$), dois quartos de encapsulamento ($h_c = 2/4$), três quartos ($h_c = 3/4$) e totalmente encapsulado ($h_c = 4/4 = 1$). Assim, nas situações onde $h_c = 1/4$, $2/4$, e $3/4$ o eletrodo fica apenas parcialmente encapsulado pelo concreto. O estudo destas diferentes situações permite avaliar o ganho incremental que o encapsulamento de concreto produz na redução da impedância impulsiva do aterramento (Z_p) e no GPR.

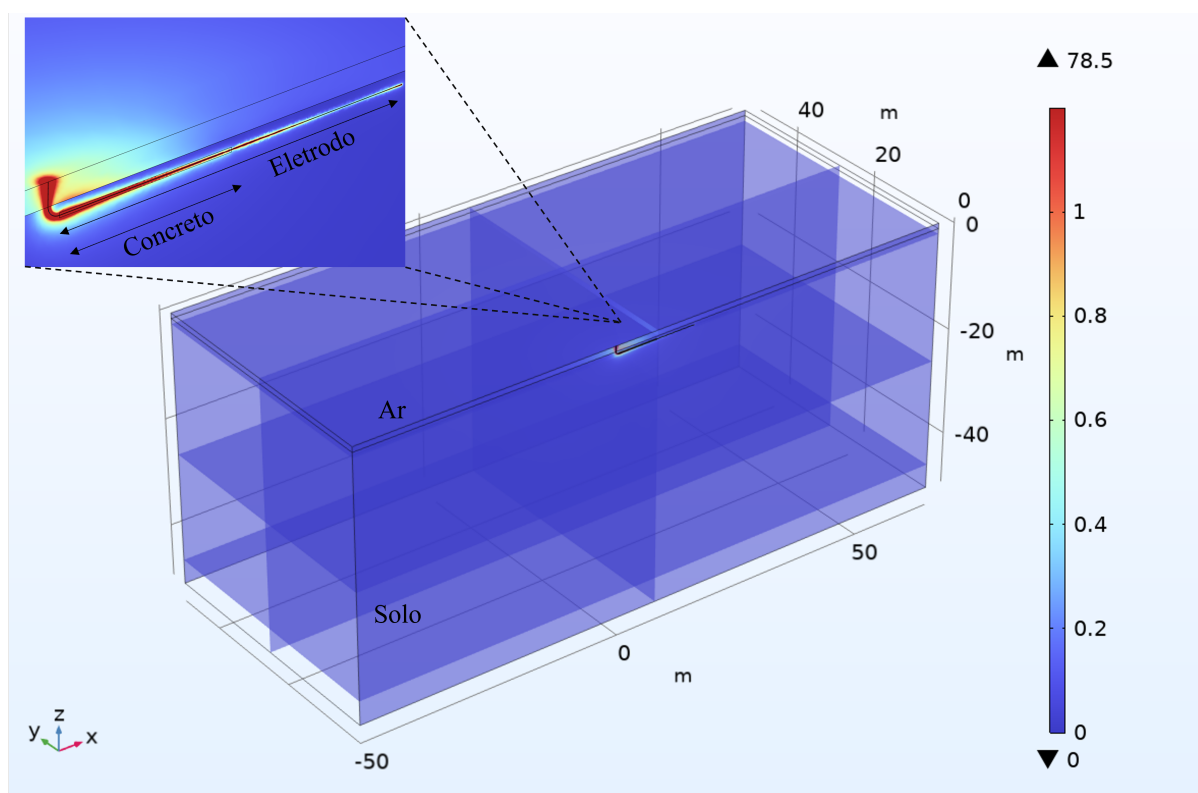
Dada a simetria da geometria do problema, tanto no estudo de EH quanto de EV foi lançado mão de técnicas simplificadoras da modelagem eletromagnética. Dessa forma, é possível simplificar o domínio de simulação e, conseqüentemente, a malha de elementos finitos; o que reduz consideravelmente o tempo de simulação. No caso do EH, existe uma simetria axial vertical, enquanto que no EV existe uma simetria radial cilíndrica.

Quanto às propriedades do concreto quando este é enterrado no solo, a literatura indica valores de resistividade do concreto (ρ_c) variando entre 30 e 200 $\Omega.m$ (IEEE Std.80, 2013). Dada essa variância reportada para ρ_c , optou-se por realizar um estudo para analisar o quão sensível os resultados são em relação a este parâmetro, bem como qual seria um valor adequado para ρ_c . Dessa forma, na seção 6.2 é apresentado esse estudo, o qual indicou que assumir m valor de $\rho_c = 90 \Omega.m$ seria apropriado para as simulações realizadas no presente trabalho. Além disso, quanto à permissividade elétrica relativa do concreto (enterrado no solo) adotou-se $\epsilon_r = 10$ (RHIM; BUYUKOZTURK, 1998) e para a permeabilidade magnética relativa $\mu_r = 1$. Foi considerado que, para EV, o encapsulamento de concreto possui formato cilíndrico com diâmetro D_c e, para EH, um formato de prisma quadrado com espessura de D_c . Em ambos os casos o eletrodo metálico foi posicionado exatamente no eixo central do encapsulamento.

Para fins de ilustração das configurações do arranjo de simulação, na Figura 4.3 é apresentada uma simulação do campo elétrico para um AEC-EH com $L = 15$ m, $h_c = 2/4$

e $D_c = 20$ cm, em solo de $1000 \Omega \text{ m}$, quando submetido a uma tensão de teste de 1 kV e frequência 4 MHz. Devido à simetria (por corte vertical) do AEC-EH, simulou-se apenas a metade do domínio de simulação. Já na [Figura 4.4](#), é apresentada a simulação do campo elétrico para um AEC-EV com $L = 3$ m, $h_c = 1/4$ e $D_c = 20$ cm, para o mesmo solo e tensão de teste que o caso anterior.

Figura 4.3 – Campo elétrico (em kV/m) para AEC-EH, com $L = 15$ m, $h_c = 2/4$ e $D_c = 20$ cm, em solo de $1000 \Omega \text{ m}$, quando submetido a uma tensão de teste de 1 kV e 4 MHz. Escala de cor alterada para evidenciar comportamento do campo. Simulação considerando simetria por corte vertical.



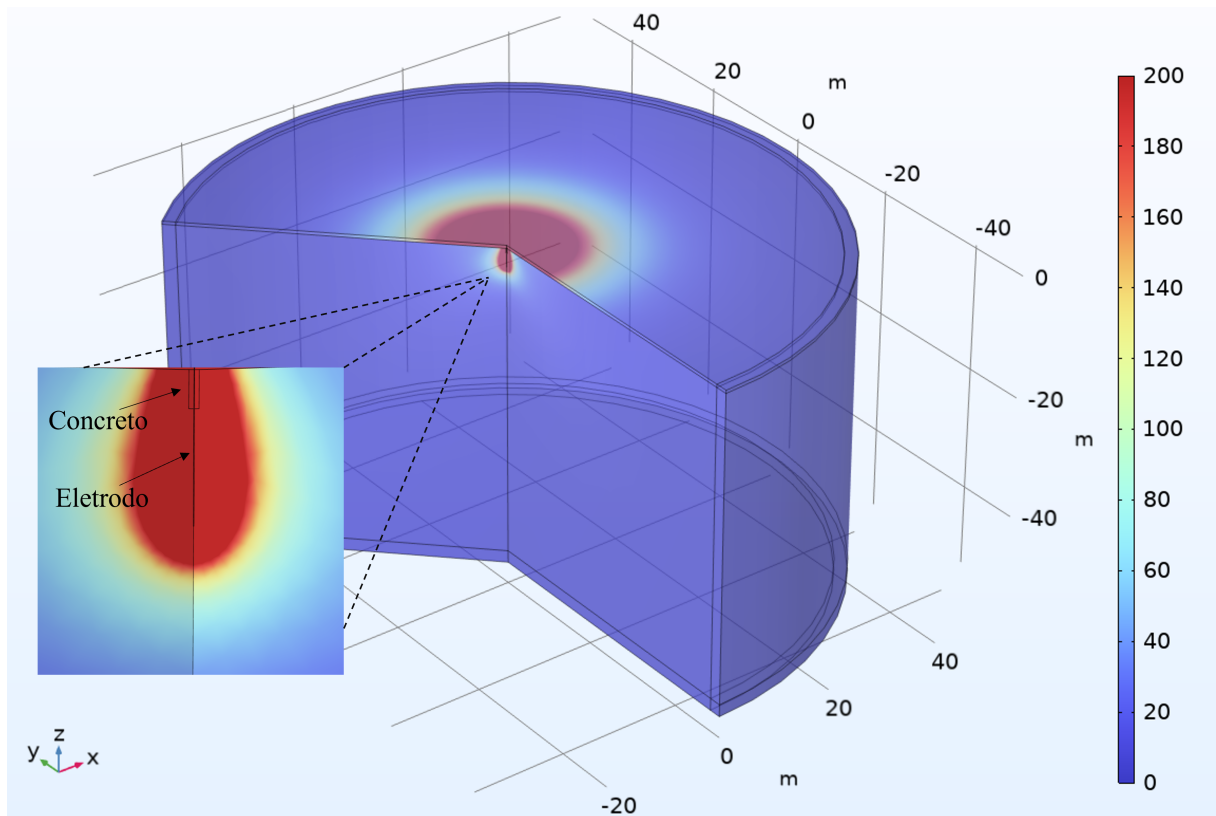
Fonte: produzida pelo autor.

Sabe-se que o concreto possui comportamento anisotrópico quanto às suas características mecânicas de tensão e compressão ([HUGHES; ASH, 1970](#); [HANSEN; LAURIDSEN; HOANG, 2018](#)), no entanto, não se encontrou nenhum trabalho que mencione uma possível anisotropia das características elétricas do concreto submerso no solo. Como se verá no [Capítulo 3](#), a maioria dos trabalhos que caracterizam as propriedades elétricas do concreto (para aplicações de aterramentos) geralmente fornecem apenas a resistividade elétrica e raramente, a permissividade, não sendo avaliadas possíveis anisotropias.

Optou-se por se utilizar uma espessura para o encapsulamento de concreto de $D_c = 20$ cm, tanto para EV quanto para EH. O primeiro motivo dessa escolha foi que assumido-se um mesmo valor de D_c tanto para EV quanto para EH é possível manter uma base aproximada de comparação entre a performance de ambos os tipos de AECs

(EV e EH). O segundo motivo, foi que um $D_c = 20$ cm aparentou ser empiricamente um valor que não torna demasiadamente difícil cavar um fosso (ou poço) cilíndrico para uma haste concretada, nem uma vala quadrada para comportar um cabo contrapeso concretado, sendo factível para ambos os casos. Além disso, entendeu-se que um $D_c = 20$ cm poderia fornecer melhorias ao aterramento sem requerer um volume excessivo de concreto.

Figura 4.4 – Campo elétrico (em kV/m) para AEC-EV, com $L = 3$ m, $h_c = 1/4$ e $D_c = 20$ cm, em solo de 1000Ω m, quando submetido a uma tensão de teste de 1 kV e 4 MHz. Escala de cor alterada para evidenciar comportamento do campo. Simulação considerando simetria radial.



Fonte: produzida pelo autor.

4.3 Casos Estudados

No presente trabalho diferentes eletrodos e parâmetros do aterramento foram estudados. Assim, para facilitar o entendimento, a [Tabela 4.1](#) apresenta os diferentes casos estudados. Os parâmetros avaliados foram:

- Tipo de eletrodo: vertical (EV) ou horizontal (EH).
- Comprimento do eletrodo L .
- Resistividade do solo ρ ;
- Fração de Concretagem do eletrodo h_c ;

e) Tipo de descarga: PRI ou SUB.

Ao todo foram estudados 30 casos (do A1 a F5), conforme [Tabela 4.1](#). Sendo que, para cada caso, foram avaliados encapsulamentos de $h_c = 0, 1/4, 2/4, 3/4$ e $4/4$. Por fim, foram estudadas as respostas para descargas PRI e SUB. Logo, ao todo foram realizadas $30 \cdot 5 \cdot 2 = 300$ análises de resposta transitória. Em cada simulação, considerou-se uma varredura de 70 frequências (logaritmicamente espaçadas) no intervalo de 60 Hz a 4 MHz.

Tabela 4.1 – Casos avaliados no presente trabalho. Onde L é o comprimento do eletrodo, ρ_{solo} a resistividade de baixa frequência do solo, D_c o diâmetro do concreto, h_c a fração de concretagem do eletrodo e PRI e SUB os tipos de descargas.

Caso	Eletrodo	L (m)	ρ_{solo} ($\Omega \cdot m$)	D_c (cm)	h_c	Descarga										
A1	Vertical	3	300	20	0; 1/4; 2/4; 3/4; 4/4	PRI e SUB										
A2	Vertical	3	600													
A3	Vertical	3	1000													
A4	Vertical	3	2000													
A5	Vertical	3	4000													
B1	Vertical	30	300	20			0; 1/4; 2/4; 3/4; 4/4	PRI e SUB								
B2	Vertical	30	600													
B3	Vertical	30	1000													
B4	Vertical	30	2000													
B5	Vertical	30	4000													
C1	Horizontal	15	300	20					0; 1/4; 2/4; 3/4; 4/4	PRI e SUB						
C2	Horizontal	15	600													
C3	Horizontal	15	1000													
C4	Horizontal	15	2000													
C5	Horizontal	15	4000													
D1	Horizontal	30	300	20							0; 1/4; 2/4; 3/4; 4/4	PRI e SUB				
D2	Horizontal	30	600													
D3	Horizontal	30	1000													
D4	Horizontal	30	2000													
D5	Horizontal	30	4000													
E1	Horizontal	45	300	20									0; 1/4; 2/4; 3/4; 4/4	PRI e SUB		
E2	Horizontal	45	600													
E3	Horizontal	45	1000													
E4	Horizontal	45	2000													
E5	Horizontal	45	4000													
F1	Horizontal	60	300	20											0; 1/4; 2/4; 3/4; 4/4	PRI e SUB
F2	Horizontal	60	600													
F3	Horizontal	60	1000													
F4	Horizontal	60	2000													
F5	Horizontal	60	4000													

Vale salientar que, embora não seja usual EVs com 30 m de comprimento, escolheu-se realizar essa avaliação para possibilitar uma comparação comportamental em relação ao EH de mesmo comprimento. Além disso, optou-se por avaliar EHs com comprimentos de 15, 30, 45 e 60 m tanto por serem valores próximos aos utilizados em aterramentos de linhas de transmissão de 230kV e 138kV, quanto por apresentarem um passo incremental bem definido de 15 m, facilitando a análise (VISACRO; SILVEIRA, 2015).

4.4 O Métodos dos Elementos Finitos em Simulações de Aterramentos

As simulações de aterramentos comumente são feitas ou através de modelos circuitais (SALARIEH; SILVA; KORDI, 2019; GERI, 1999; RAMAMOORTY et al., 1989) ou de modelos eletromagnéticos (SILVEIRA; VISACRO, 2019; BEZERRA et al., 2024). Geralmente, os estudos que utilizam modelos circuitais são mais rápidos e são muito utilizados em estudos de aterramentos com estruturas simples, composto por eletrodos nus e em casos onde os acoplamentos magnético e elétrico entre os eletrodos é desprezível. Por outro lado, quando deseja-se simular estruturas de aterramentos não convencionais (como nessa tese), solos com estrutura não homogênea e situações onde os acoplamentos magnético e elétrico entre os eletrodos são importantes, os modelos eletromagnéticos são mais adequados, uma vez que representarão os fenômenos de forma mais detalhada e potencialmente mais próxima à realidade.

As modelagens eletromagnéticas de aterramentos geralmente lançam mão de métodos como por exemplo o Método dos Elementos Finitos (MEF) (VELEV et al., 2011a; LIU; MADSEN, 2013; BEZERRA; MOREIRA; FERREIRA, 2023; BEZERRA et al., 2024) e o Método dos Momentos (MoM) (VISACRO; SOARES, 2005; VISACRO, 2007; ALIPIO; VISACRO, 2014; LIMA et al., 2020). O MoM é amplamente utilizado na literatura para estudos de aterramentos com eletrodo nus e por usar métodos integrais de cálculo seria uma boa escolha para estudo de problemas com domínios abertos ² como é o caso dos aterramentos (LIMA et al., 2022).

Durante o desenvolvimento da presente pesquisa o *software* FEKO, que faz uso do MoM, foi utilizado para realização de várias simulações tanto de aterramentos com eletrodo nu quanto aterramento encapsulados por concreto. O que se observou foi que para simulações com eletrodos nus o tempo de simulação do FEKO é consideravelmente menor que o tempo de simulação do mesmo aterramento no Comsol. Por outro lado, quando se estuda aterramentos encapsulados o tempo de simulação do FEKO é muito similar ao do

² Problemas em que o domínio/meio que envolve o objeto de estudo é muito maior que o mesmo. Por exemplo, no caso dos aterramentos, o solo é um meio com dimensões muito maiores que os próprios eletrodos de aterramento.

Comsol. Além disso, observou-se que em baixas frequências a precisão do Comsol é maior, fornecendo uma resistência de aterramento mais próxima às expressões analíticas. Por fim, no estudo de validação apresentado no [Capítulo 5](#) observou-se que os resultados do Comsol quando comparado com dados experimentais de GPR apresenta boa conformidade. Por esses motivos, no presente estudo optou-se por utilizar o Comsol, o qual faz uso do Método dos Elementos Finitos.

Validação

Neste Capítulo são apresentados estudos que indicam a validade das metodologias, ferramentas, modelos e arranjos de simulação apresentados no [Capítulo 4](#) para serem obtidos os resultados apresentados no [Capítulo 6](#). Na [seção 5.1](#) é apresentada uma validação do arranjo de simulação indicado na [seção 4.2](#) bem como da implementação da dependência da frequência do solo apresentada na [seção 2.4](#). Posteriormente, na [seção 5.2](#) é indicada uma validação quanto aos resultados obtidos para aterramentos concretados.

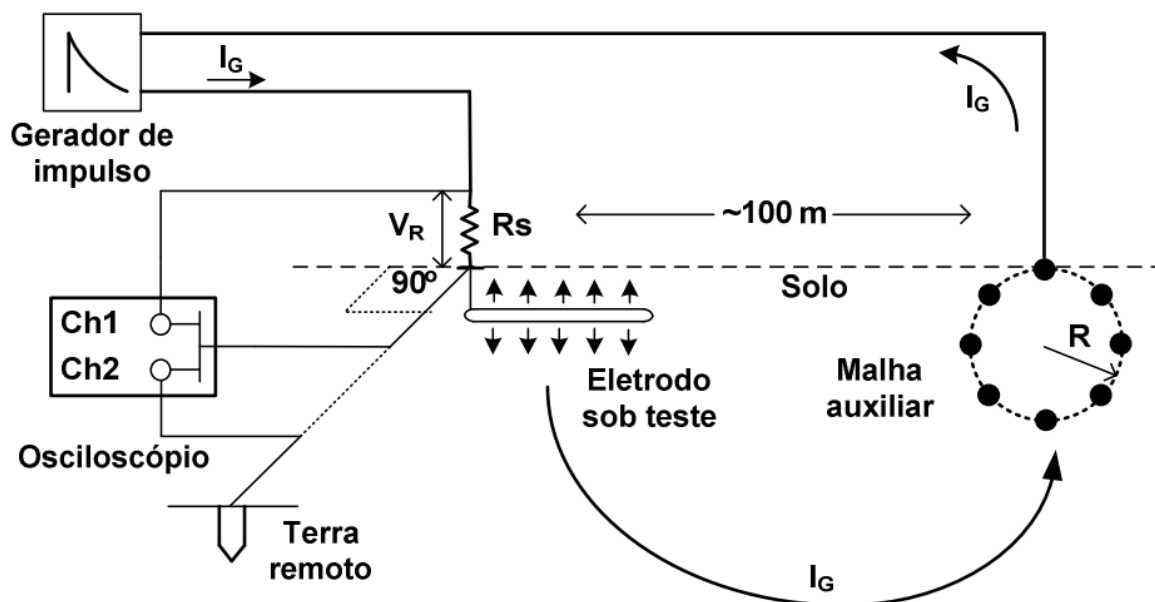
5.1 Validação do Arranjo de Simulação e Efeito da Dependência da Frequência do Solo no Comsol

Uma das melhores formas de se validar a modelagem em um trabalho de simulação consiste em reproduzir um trabalho experimental, da forma mais fiel possível, e comparar os resultados obtidos em ambas as situações. Contudo, como no presente trabalho considera-se o efeito da dependência da frequência do solo, é conveniente que seja reproduzido um experimento da literatura que forneça dados detalhados quanto à essa dependência da frequência. Nesse aspecto, poucos trabalhos fornecem dados minuciosos. Um dos trabalhos no qual encontrou-se esse nível de detalhe foi o de [Alipio \(2013\)](#).

Dessa forma, para validar as simulações realizadas no Comsol tanto do ponto de vista do arranjo de simulação quanto da dependência da frequência dos parâmetros do solo, foram reproduzidos os experimentos apresentados por [Alipio \(2013\)](#), mais especificamente aqueles apresentados pelo autor na Seção 3.3 do seu trabalho. Tal experimento se trata da aplicação de impulsos de corrente não ionizantes e respectiva medição do GPR em um aterramento do tipo eletrodo horizontal, conforme apresentado na [Figura 5.1](#). O eletrodo horizontal em questão possui comprimento de 9,6 m, estando enterrado a uma profundidade de 0,5 m em um solo com 1400 Ω .m de resistividade de baixa frequência. A dependência da frequência da resistividade e permissividade do solo em questão foram medidas pelo autor e as respectivas curvas são apresentadas na [Figura 5.2](#). Quanto aos impulsos de

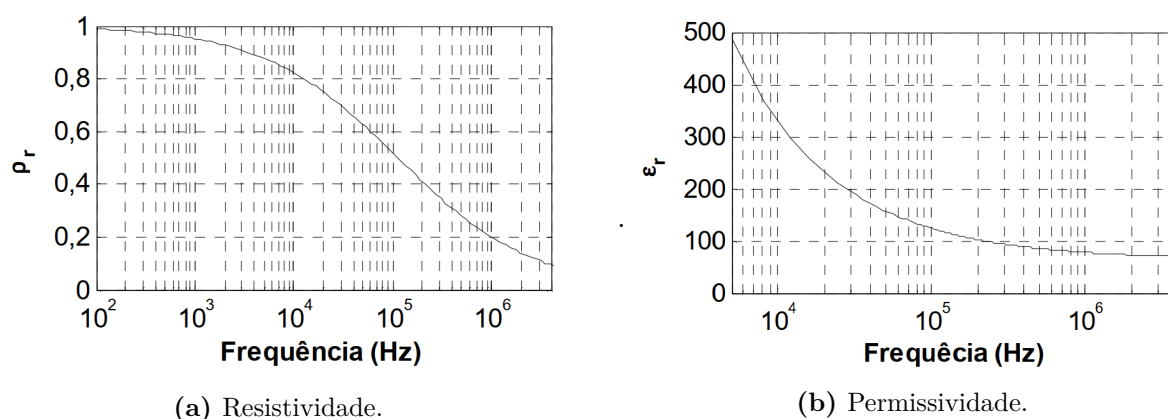
corrente aplicados no aterramento, utilizaram-se as mesmas formas de onda utilizadas por Alipio (2013), as quais apresentam tempo de frente de $0,4 \mu\text{s}$ e $1,4 \mu\text{s}$, respectivamente.

Figura 5.1 – Montagem para medição da elevação de potencial (GPR) resultante da circulação de uma corrente impulsiva por um eletrodo horizontal de 9,6 m enterrado em um solo de $\rho_0 = 1400 \Omega\cdot\text{m}$.



Fonte: Extraída de Alipio (2013).

Figura 5.2 – Dependência da frequência da resistividade relativa ρ_r (a) e da permissividade relativa ϵ_r (b) para o solo analisado ($\rho_0 = 1400 \Omega\cdot\text{m}$). Dados de medições experimentais.

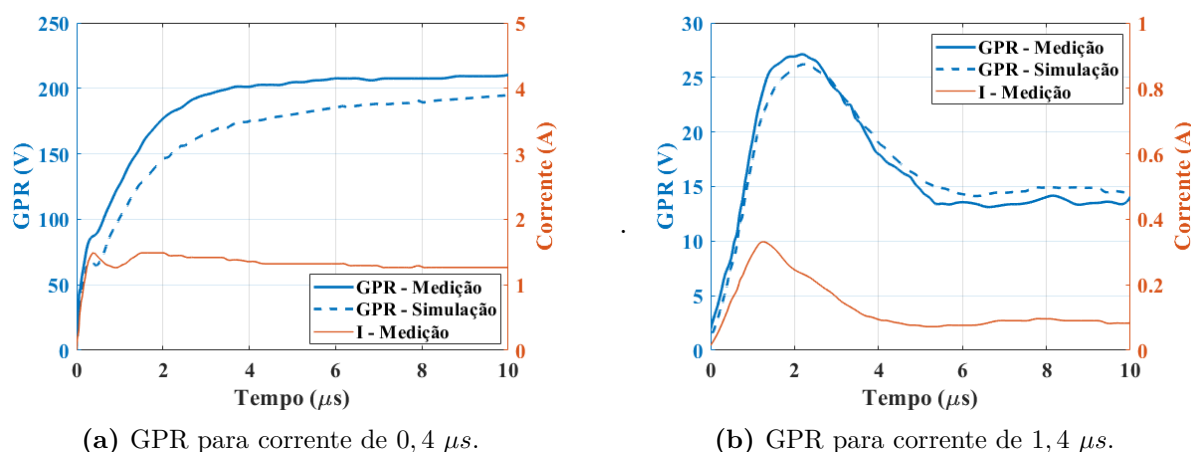


Fonte: extraída de Alipio (2013).

Toda a estrutura geométrica do aterramento, apresentada na Figura 5.1, bem como as curvas de resistividade e permissividade do solo, apresentadas na Figura 5.2, foram fielmente reproduzidas no Comsol. Como resultado da simulação do Comsol obteve-se uma curva de impedância harmônica, a partir da qual foi estimada uma função racional

e posteriormente foram realizados os cálculos do GPR para cada impulso de corrente. O resultado comparativo entre o GPR medido e o GPR simulado são apresentados na Figura 5.3.

Figura 5.3 – Comparação entre o GPR (azul) medido por Alipio (2013) e o simulado através da impedância harmônica fornecida pelo Comsol; para impulsos de corrente (vermelho) com (a) 0,4 μs e (b) com 1,4 μs de tempo de frente.



Fonte: produzida pelo autor.

Pode-se notar na Figura 5.3 que o GPR simulado acompanhou todo o comportamento do GPR experimental medido por Alipio (2013), tanto para corrente com tempo de frente de 0,4 μs quanto para a de 1,4 μs . Para facilitar a análise, calculou-se erro percentual de pico (EP), o erro médio quadrático (EMQ) e o coeficiente de correlação (R^2)¹ entre o GPR experimental e simulado em ambas as situações, sendo os respectivos resultados apresentados de forma resumida na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Comparação do GPR simulado em relação ao GPR experimental para os casos da Figura 5.3a e Figura 5.3b.

Parâmetros do GPR Simulado	Corrente de Excitação	
	$T_{frente} = 0,4 \mu s$	$T_{frente} = 1,4 \mu s$
Erro de Pico (EP)	-7,4%	-3,4%
Erro Médio Quadrático (EMQ)	23,5	1,2
Coefficiente de Correlação (R^2)	0,61	0,96

Os resultados apresentados na Tabela 5.1 indicam que para os dois tipos de correntes de excitação o pico do GPR simulado apresentou boa conformidade com as medições, o que pode ser notado pelos pequenos erros de pico EP . Em ambos os casos os EP , estão abaixo de 10% o que para estudos de aterramentos é um bom valor. Considerando que na prática os solos reais não são homogêneos e apresentam granulometrias diversas, erros

¹ O R^2 também é chamado de coeficiente de determinação e R -squared. $R^2 = 0$ indica curvas totalmente descorrelacionadas e $R^2 = 1$ curvas totalmente correlacionadas.

da ordem de 10% geralmente são admissíveis em estudos com simulação de aterramentos (GRCEV, 2009a; GRCEV, 2009c; VISACRO et al., 2011).

Pode-se notar que o GPR da Figura 5.3b tem maior aderência aos dados experimentais que o da Figura 5.3a. Isso pode ser notado tanto visualmente, quanto pelo EMQ de 1,2 (próximo a zero) e o R^2 de 0,96 (próximo a 1); o que são excelentes indicadores de correlação e conformidade.

Um dos possíveis motivos para a diferença observada entre os indicadores de correlação, EMQ e R^2 , da Figura 5.3a e Figura 5.3b é haverem imprecisões nas regiões de altas frequências das curvas medidas de resistividade e permissividade do solo (apresentadas na Figura 5.2). Ou seja, uma vez que na Figura 5.3a se tem uma corrente com tempo de frente menor e, portanto, com componentes de mais altas frequências em seu espectro, é natural que imprecisões na região de altas frequências nas curvas de resistividade e permissividade promovam maiores discrepâncias entre o GPR simulado e o medido. Essa observação é corroborada pelo fato do método de medição das curvas de resistividade e permissividade apresentadas na Figura 5.2 se tratar de um método indireto de medição, o qual necessita da obtenção da impedância harmônica de uma cuba semi-esférica enterrada no solo. Finalmente, é reportado na literatura a ocorrência de imprecisões na impedância harmônica medida (em altas frequências), como por exemplo o trabalho de Visacro e Rosado (2009). Assim, tais imprecisões na impedância harmônica da curva impactariam diretamente os valores da curva de resistividade e permissividade com a frequência e, conseqüentemente, o GPR.

5.2 Validação da Modelagem de Aterramentos Concretados

A validação da modelagem de aterramentos concretados foi uma das difíceis tarefas encontradas no prosseguimento deste trabalho. Isto se dá pelo fato de que poucos trabalhos da literatura estudam de forma abrangente a impedância harmônica de aterramentos encapsulados por concreto. Alguns trabalhos apresentam estudo experimentais com hastes concretadas, contudo utilizam correntes de excitação da ordem de quiloampère, o que já seria suficiente para provocar ionização do solo, dificultado a análise da impedância harmônica em separado do fenômeno de ionização (FAGAN; LEE, 1970).

Pelos motivos supracitados, optou-se por realizar uma validação de aterramentos encapsulados por concreto (AEC) em baixa frequência, pois a literatura fornece equações analíticas tanto para aterramentos com eletrodos convencionais (nu) quanto concretados. Além disso, observou-se que erros na modelagem do sistema geralmente repercutem de forma direta na resistência de baixa frequência, sendo esta grandeza um bom indicador da validade da modelagem.

Dessa forma, para averiguar o comportamento da impedância harmônica em baixa

frequência, avaliou-se um eletrodo vertical com 2,5 m e um eletrodo horizontal com 10 m de comprimento enterrado em solos com 300 Ω .m, 600 Ω .m, 1000 Ω .m, 2000 Ω .m e 4000 Ω .m.

Para referência comparativa dessa análise, utilizou-se as equações analíticas de Dwight (1936) para cálculo da resistência de baixa frequência para EV e EH nus:

$$R_{EV-nu} = \frac{\rho_s}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right) \quad (5.1)$$

e

$$R_{EH(nu)} = \frac{\rho_s}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{r} + \ln \frac{L}{d} - 2 + \frac{2d}{L} - \frac{d^2}{L^2} + \frac{d^4}{2L^4} \right). \quad (5.2)$$

Sendo:

$R_{EV(nu)}$: Resistência de eletrodo vertical nu (em baixa frequência) em Ω ;

$R_{EH(nu)}$: Resistência de eletrodo horizontal nu (em baixa frequência) em Ω ;

ρ_s : Resistividade do solo em Ω .cm;

L : Comprimento do eletrodo vertical em cm;

r : Raio do eletrodo em cm;

d : Profundidade em que o eletrodo horizontal está enterrado no solo em cm.

Já para cálculo da resistência analítica de eletrodos concretados, utilizou-se a expressão de Fagan e Lee (1970), os quais enunciaram que a resistência de eletrodos encapsulados pode ser calculada com base na expressão analítica de eletrodos nus (Equação 5.1 ou Equação 5.2), usando a seguinte composição:

$$R_{concretado} = R_{nu}(L, r_0, \rho_c) - R_{nu}(L, r_c, \rho_c) + R_{nu}(L, r_c, \rho_s). \quad (5.3)$$

Sendo:

ρ_c : resistividade do concreto;

ρ_s : resistividade do solo;

r_0 : raio do eletrodo metálico;

r_c : raio do encapsulamento de concreto;

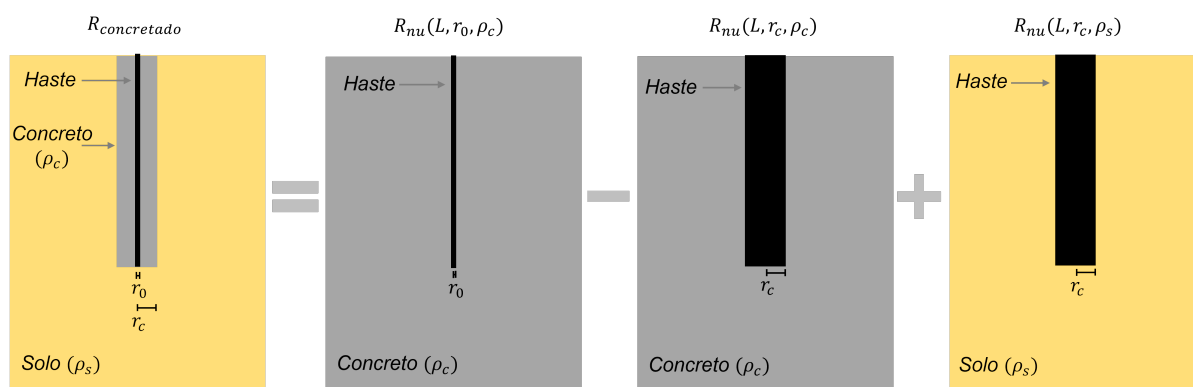
$R_{nu}(L, r_0, \rho_c)$: resistência de um eletrodo metálico nu, de comprimento L , com raio r_0 enterrado em um solo com resistividade igual a ρ_c ;

$R_{nu}(L, r_c, \rho_c)$: resistência de um eletrodo metálico nu, de comprimento L , com raio igual ao raio r_c , enterrado em um solo com resistividade igual a ρ_c ;

$R_{nu}(L, r_c, \rho_s)$: resistência de um eletrodo metálico nu, de comprimento L , com raio igual a r_c , enterrado em um solo com resistividade ρ_s ;

Na Figura 5.4 é apresentado um esboço do racional da Equação 5.3 proposta por Fagan e Lee (1970) para o caso de uma haste encapsulada por concreto. O mesmo raciocínio se aplica para eletrodos horizontais.

Figura 5.4 – Esboço gráfico da Equação 5.3 para cálculo da resistência de baixa frequência para eletrodos encapsulados por concreto (ou outro material).



Fonte: produzida pelo autor.

Por fim, após serem calculadas as resistências analíticas de baixa frequência (R_{LF}) tanto para eletrodo nu quanto para eletrodo concretado (utilizando as Equações 5.1, 5.2 e 5.3) avaliou-se o erro percentual da impedância harmônica à 60 Hz estimada pelo *Vector Fitting* (Z_{60Hz}) em relação à R_{LF} . Os resultados são apresentados de forma organizada nas Tabelas 5.2 e 5.3. Além disso, para facilitar o entendimento, nas Figuras 5.5 e 5.6 é apresentada de forma gráfica a comparação entre $Z(\omega)$ e R_{LF} para os casos extremos de solo com baixa (300 $\Omega.m$) e alta resistividade (4000 $\Omega.m$) apresentados nas Tabelas 5.2 e 5.3, respectivamente.

Pode-se notar que, para o caso do EV com 3 m, os resultados Z_{60Hz} estão razoavelmente próximos aos valores de R_{LF} (Tabela 5.2). Isso permanece verdade tanto quando se avalia eletrodos nus quanto concretados. Quando avaliou-se EH com 30 m de comprimento (Tabela 5.3), observou-se um comportamento similar. De forma geral, os erros ficaram abaixo de 15% em praticamente todos os tipos de solos, o que, ao entendimento do autor, estão dentro das margens de erro geralmente aceitáveis para estudos de aterramentos (VISACRO, 2007; VISACRO; ROSADO, 2009).

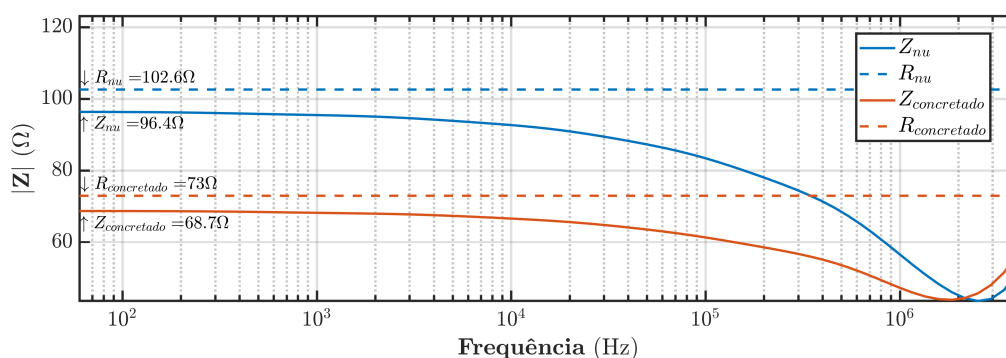
Tabela 5.2 – Comparação entre a resistência de baixa frequência analítica (R_{LF}) e a impedância à 60 Hz (Z_{60Hz}) estimada pelo *Vector Fitting*; para **EV com 3 m** considerando as situações de eletrodo nu e concretado (com diâmetro de concretagem igual a 20 cm).

ρ_{solo} ($\Omega.m$)	Eletrodo Nu			Eletrodo Concretado		
	R_{LF} (Ω)	Z_{60Hz} (Ω)	Erro (%)	R_{LF} (Ω)	Z_{60Hz} (Ω)	Erro (%)
300	102,6	96,4	-6,1	73,0	68,7	-5,8
600	205,2	191,3	-6,8	133,3	123,7	-7,2
1000	342,0	316,1	-7,6	213,6	195,3	-8,7
2000	684,0	622,3	-9,0	414,6	368,4	-11,1
4000	1368,0	1217,4	-11,0	816,4	696,9	-14,6

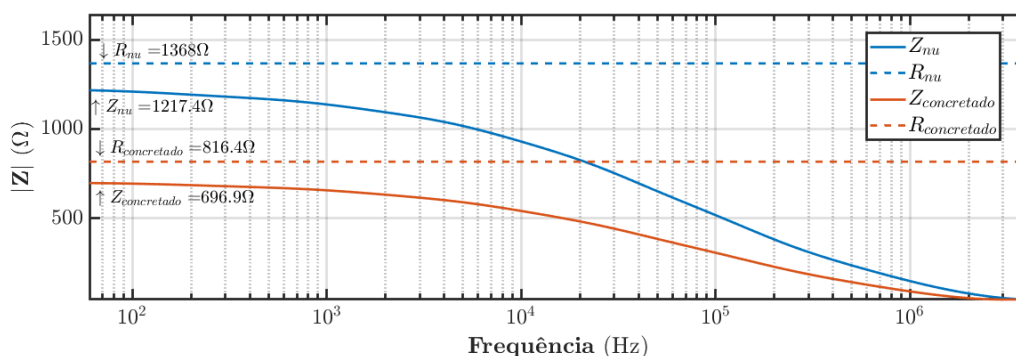
Tabela 5.3 – Comparação entre a resistência de baixa frequência analítica (R_{LF}) e a impedância à 60 Hz (Z_{60Hz}) estimada pelo VF; para **EH com 30 m** considerando as situações de eletrodo nu e concretado (com diâmetro de concretagem igual a 20 cm).

ρ_{solo} ($\Omega.m$)	Eletrodo Nu			Eletrodo Concretado		
	R_{LF} (Ω)	Z_{60Hz} (Ω)	Erro (%)	R_{LF} (Ω)	Z_{60Hz} (Ω)	Erro (%)
300	17,8	15,9	-10,5	14,8	13,3	-10,5
600	35,6	31,8	-10,6	28,4	25,4	-10,7
1000	59,3	52,8	-11,0	46,5	41,3	-11,2
2000	118,7	104,8	-11,7	91,7	80,6	-12,1
4000	237,3	207,6	-12,5	182,2	158,4	-13,0

Figura 5.5 – Comparativo da impedância harmônica $Z(60Hz)$ e resistência de baixa frequência analítica (R_{LF}), considerando **EV com 3 m**, nu (azul) e concretado (vermelho); para as situações extremas de solo com 300 e 4000 $\Omega.m$.

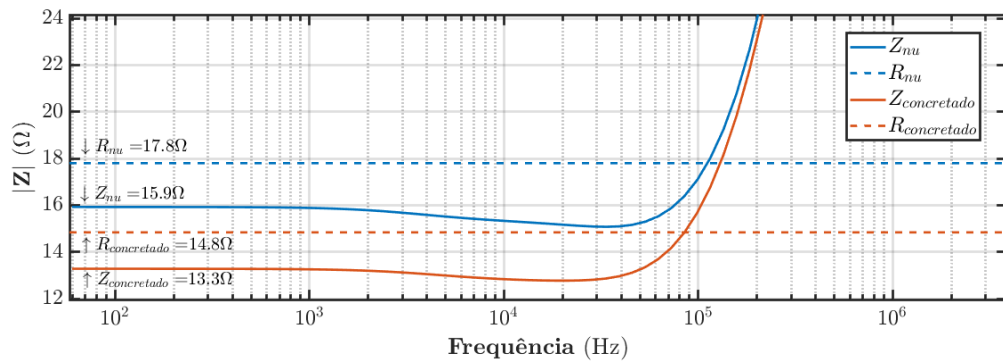


(a) EV com 3 m em solo de 300 $\Omega.m$

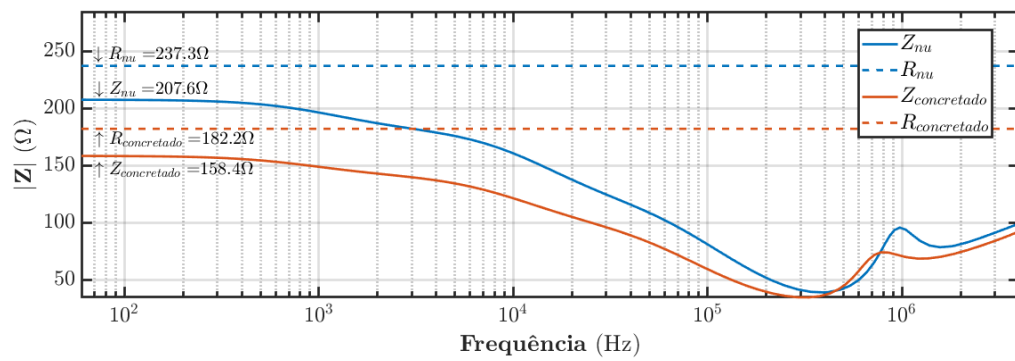


(b) EV com 3 m em solo de 4000 $\Omega.m$

Figura 5.6 – Comparativo da impedância harmônica $Z(60Hz)$ e resistência de baixa frequência analítica (R_{LF}), considerando **EH com 30 m**, nu (azul) e concretado (vermelho); para as situações extremas de solo com 300 e 4000 $\Omega.m$.



(a) EH com 30 m em solo de 300 $\Omega.m$



(b) EH com 30 m em solo de 4000 $\Omega.m$

Resultados e Análises

Neste capítulo são apresentados os resultados e contribuições relativas ao estudo da resposta de aterramentos encapsulados por concreto (AEC) frente à descargas atmosféricas. Inicialmente, é avaliada a importância da dependência da frequência da resistividade e permissividade do solo para AECs, na [seção 6.1](#). Em seguida, é apresentada uma análise da sensibilidade da resistividade do concreto, na [seção 6.2](#). Finalmente, os resultados dos estudos com AECs tipo eletrodo vertical e horizontal são apresentados nas seções [6.3](#) e [6.4](#).

6.1 O Efeito da Dependência da Frequência do Solo em AECs

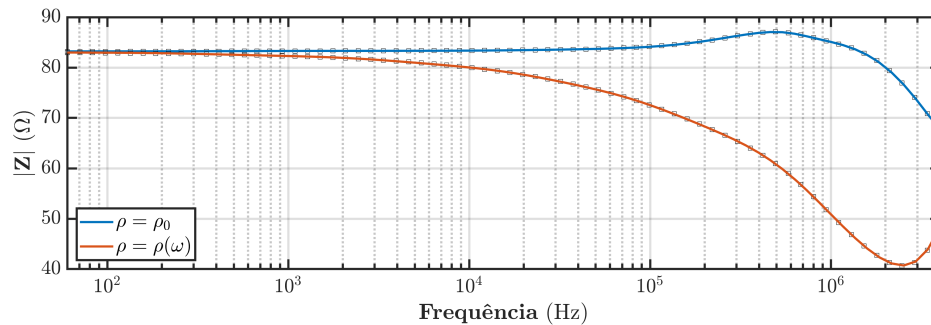
O efeito da dependência da frequência nos parâmetros resistividade e permissividade do solo possui elevada importância para o estudo de aterramentos convencionais, como mencionado na [seção 2.4](#). Contudo, na literatura, não está clara a repercussão desse fenômeno em simulações de AECs. Diante disso, nesta seção, são apresentados resultados comparativos da impedância harmônica e do GPR de AECs tanto para um solo com parâmetros constantes, com $\rho = \rho_0$ e $\varepsilon_r = 10$ ([GRCEV, 2009a](#); [VISACRO; SILVEIRA, 2015](#); [ALIPIO et al., 2019](#)), quanto um solo dependente da frequência, com $\rho = \rho(\omega)$ e $\varepsilon_r = \varepsilon_r(\omega)$ ([ALIPIO; VISACRO, 2014](#)).

Nas Figuras [6.1](#) e [6.2](#), são apresentados os resultados de simulações da impedância harmônica de AEC do tipo EV com 3 m e 30 m de comprimento, considerando uma fração de concretagem $h_c = 1/4$ e um diâmetro de concreto igual a $D_c = 20$ cm. Foram analisadas tanto a situação de um solo constante quanto a de um dependente da frequência, para os casos extremos em que $\rho_0 = 300$ e $4000 \Omega.m$ (por simplicidade).

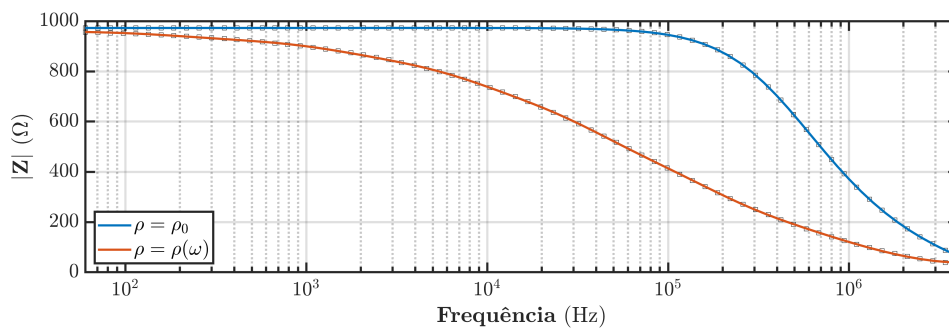
Conforme esperado, observou-se que, para baixas frequências, o efeito da dependência da frequência não é tão pronunciado quanto para altas frequências, portanto, as curvas de solo com $\rho = \rho_0$ e com $\rho = \rho(\omega)$ ficam próximas entre si (como se pode notar na [Figura 6.1](#) e na [Figura 6.2](#)). Contudo, à medida que a frequência aumenta, pode-se observar claramente que há um aumento na diferença entre a impedância do solo constante

e do solo dependente da frequência.

Figura 6.1 – Impedância harmônica $Z(j\omega)$ considerando solo com **parâmetros constantes** e com **parâmetros dependentes da frequência**, para AEC do tipo EV, com $L = 3 \text{ m}$, $h_c = 1/4$ e $D_c = 20 \text{ cm}$.



(a) Solo de $300 \Omega.m$.



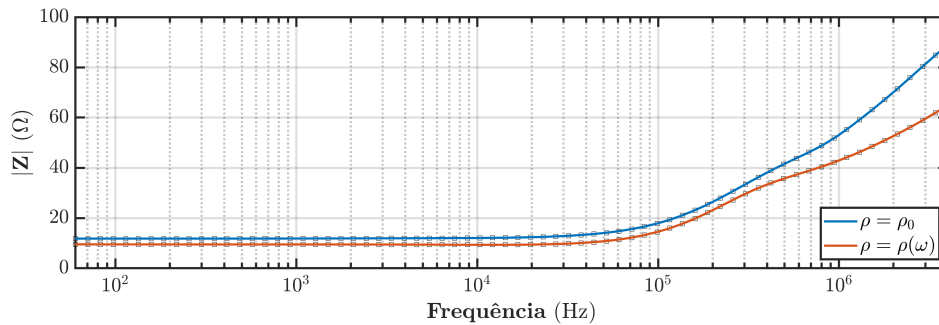
(b) Solo de $4000 \Omega.m$.

Observa-se, também, tanto na [Figura 6.1](#) quanto na [Figura 6.2](#), que o comportamento médio da discrepância entre a impedância harmônica para solo constante e para solo dependente da frequência é maior para o solo com maior resistividade ($4000 \Omega.m$). Tal fato também é observado para aterramentos convencionais com eletrodos nus, o que indica que o efeito da dependência da frequência para simulações de AECs é tão importante quanto para simulações de aterramentos convencionais em solos de alta resistividade. Além disso, uma vez que os AECs possuem aplicação principal em solos com alta resistividade, levar em conta o efeito da dependência da frequência é de suma importância para que os resultados de simulações sejam condizentes com a realidade.

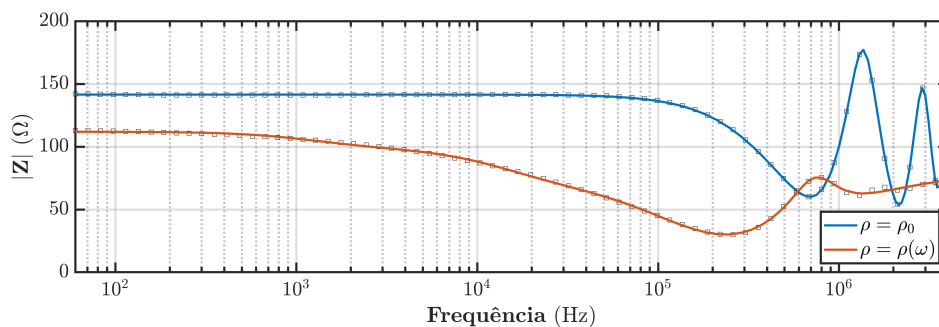
Nas [Figuras 6.3](#) e [6.4](#) são apresentados os respectivos GPRs, quando as impedâncias harmônicas da [Figura 6.1](#) e [6.2](#) são submetidas às descargas PRI e SUB. Pode-se notar que, tanto para o AEC com 3 m quanto com 30 m de comprimento, há diferenças nos valores de pico do GPR independentemente da resistividade do solo ou do tipo de descarga. Contudo, observa-se que para o solo de alta resistividade ($4000 \Omega.m$) a discrepância na forma de onda do GPR é mais pronunciada que no solo de baixa resistividade ($300 \Omega.m$).

A partir das formas de onda apresentadas nas [Figuras 6.3](#) e [6.4](#) foram calculados os respectivos valores de impedância impulsiva (Z_p) para cada caso, bem como a diferença

Figura 6.2 – Impedância harmônica $Z(\omega)$ considerando solo com **parâmetros constantes** e com **parâmetros dependentes da frequência**, para AEC do tipo EV com $L = 30$ m, $h_c = 1/4$ e $D_c = 20$ cm.



(a) Solo de $300 \Omega.m$.



(b) Solo de $4000 \Omega.m$.

entre a impedância impulsiva fornecida pelo modelo de solo constante e a fornecida pelo modelo dependente da frequência, sendo esses dados apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2.

Observando-se os resultados das Tabelas 6.1 e 6.2, nota-se primeiramente que, para ambos comprimentos de eletrodo ($L = 3$ m e 30 m), quando se considera um solo de alta resistividade ($4000 \Omega.m$), as diferenças entre os modelos de solo constante e dependente da frequência são consideravelmente elevadas, assumindo valores que vão de 28% a 57% de diferença. Esses resultados, são um forte indicativo de que desconsiderar o efeito da dependência do solo pode levar a erros importantes na modelagem do aterramento.

Um segundo resultado observado nas Tabelas 6.1 e 6.2 é que o aumento do comprimento do eletrodo, de 3 m para 30 m, produziu um aumento no valor da diferença entre os modelos, principalmente para o solo de $4000 \Omega.m$ (quer para PRI ou SUB). Isso é um indicativo de que o efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo se torna mais importante à medida que aumenta o comprimento do eletrodo de aterramento avaliado. Mais que isso, desconsiderar a variação dos parâmetros do solo com a frequência (apresentada nas Equações 2.6 e 2.7) pode produzir erros de simulação maiores para aterramentos com eletrodos mais longos dos que foram analisados nesta seção (o que é o caso de alguns AECs avaliados na seção 6.4).

Deve-se notar que, para AECs com frações de encapsulamento de concreto maiores

Figura 6.3 – GPR considerando solo com **parâmetros constantes** e com **parâmetros dependentes da frequência**, para AEC do tipo EV com $L = 3$ m, $h_c = 1/4$ e $D_c = 20$ cm; nas situações de PRI e SUB.

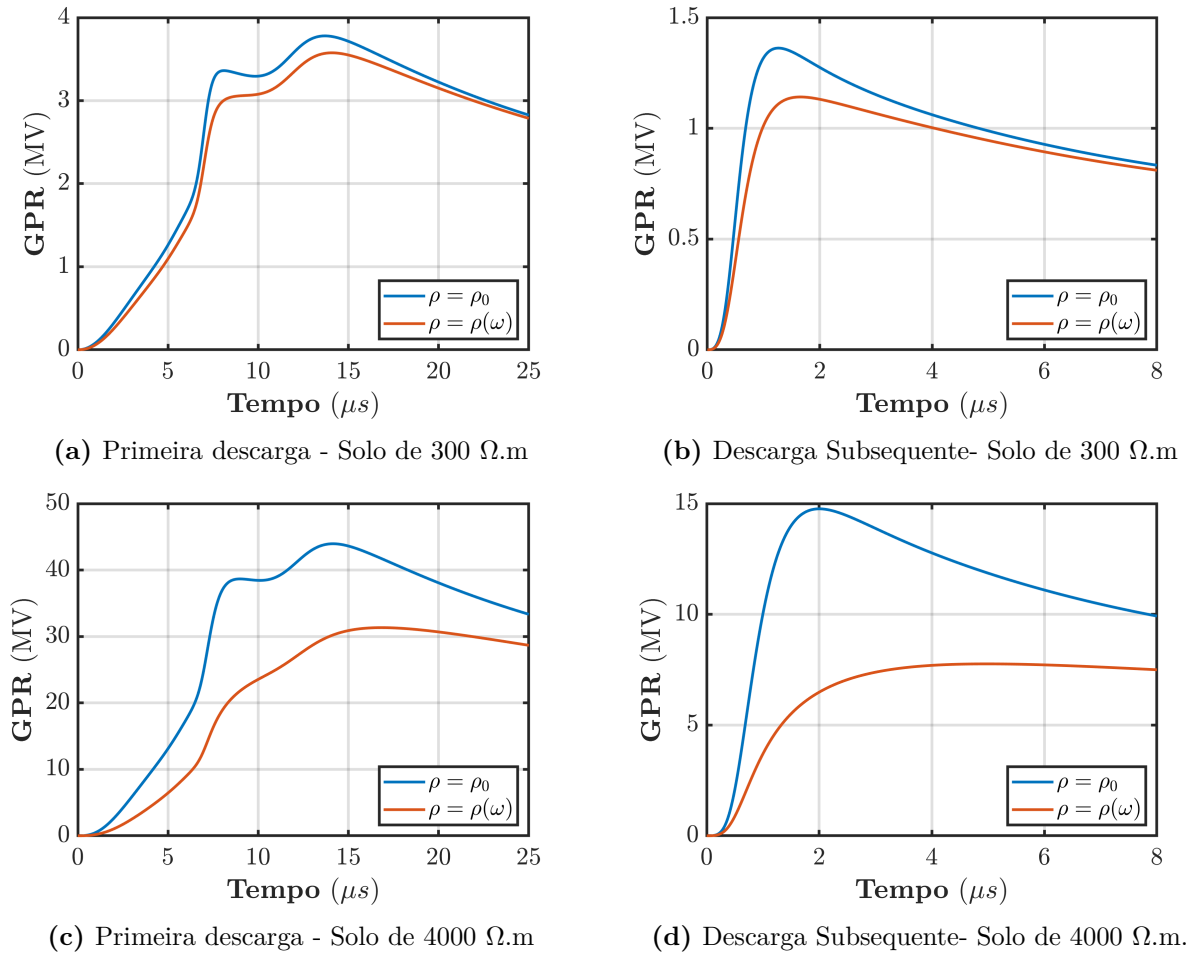
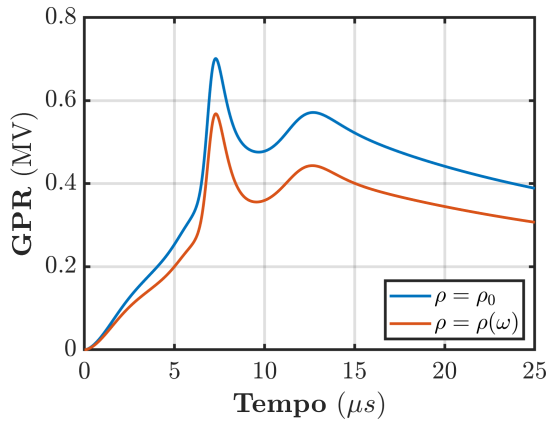


Tabela 6.1 – Impedância impulsiva Z_p (Ω) considerando modelos de solo com **parâmetros constantes** e com **parâmetros dependentes da frequência**, para AEC do tipo EV com $L = 3$ m, $h_c = 1/4$ e $D_c = 20$ cm.

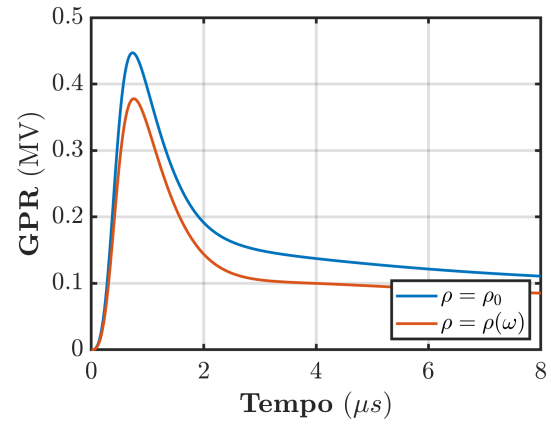
Descarga	ρ_{solo} (Ω.m)	Z_p (Ω)		Diferença
		Constante	Dependente da Freq.	
PRI	300	83,5	79,0	-5,4%
	4000	970,7	691,8	-28,7%
SUB	300	85,2	71,4	-16,2%
	4000	923,3	485,4	-47,4%

($h_c > 1/4$) e/ou com diâmetro de concretagem $D_c > 20$ cm, naturalmente as diferenças percentuais dos resultados de Z_p entre os modelos de solo constante e dependente da frequência serão menores que as apresentadas. Isso se dá pelo fato de que aumentar h_c e/ou D_c aumentará diretamente o volume total de concreto ao redor do eletrodo, o que fará com que a resistividade aparente do meio concreto-solo seja menor (pois em geral $\rho_{Concrt.} < \rho_{Solo}$) e, portanto, também seja menor a diferença entre os dois modelos.

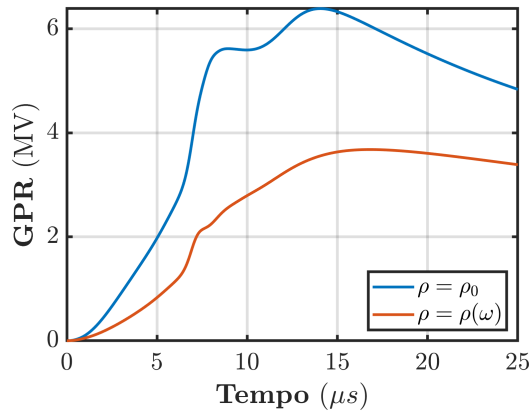
Figura 6.4 – GPR considerando solo com **parâmetros constantes** e com **parâmetros dependentes da frequência**, para AEC do tipo EV com $L = 30$ m, $h_c = 1/4$ e $D_c = 20$ cm; nas situações de PRI e SUB.



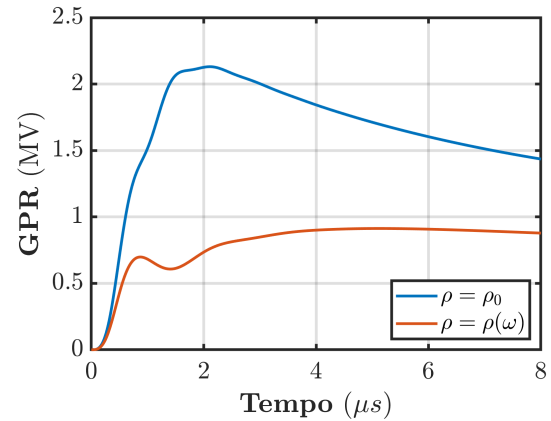
(a) Primeira descarga - Solo de 300 $\Omega.m$



(b) Descarga Subsequente- Solo de 300 $\Omega.m$



(c) Primeira descarga - Solo de 4000 $\Omega.m$



(d) Descarga Subsequente- Solo de 4000 $\Omega.m$.

Tabela 6.2 – Impedância impulsiva Z_p (Ω) considerando modelos de solo com **parâmetros constantes** e com **parâmetros dependentes da frequência**, para AEC do tipo EV com $L = 30$ m, $h_c = 1/4$ e $D_c = 20$ cm.

Descarga	ρ_{solo} ($\Omega.m$)	Z_p (Ω)		Diferença
		Modelo de Solo Constante	Modelo de Solo Dependente da Freq.	
PRI	300	15,5	12,6	-19,0%
	4000	141,1	81,2	-42,4%
SUB	300	28,0	23,6	-15,5%
	4000	133,2	57,1	-57,2%

Contudo, como o presente trabalho se presta a analisar AECs com diferentes frações de concretagem (h_c), assim como diferentes comprimentos de eletrodos (L), optou-se, nesta seção, por avaliar os piores casos entre aqueles propostos na Tabela 4.1, ie.: encapsulamento de concreto com $h_c = 1/4$ e comprimento de eletrodo curto ($L = 3$ m).

Finalmente, considerando que a técnica de encapsulamento do aterramento por concreto geralmente é empregada em solos com alta resistividade e que justamente nesses

solos há uma maior discrepância na impedância impulsiva (assim como na forma de onda do GPR), julgou-se necessário, levar em conta o efeito da dependência da frequência que os parâmetros do solo possuem. Portanto, nas próximas seções deste capítulo as simulações sempre levam em conta esse fenômeno, o qual foi modelado conforme as Equações 2.6 e 2.7, apresentadas na seção 2.4.

6.2 Análise de Sensibilidade da Resistividade do Concreto

A resistividade do concreto é um dos parâmetros que, à primeira vista, possui grande importância no estudo de AECs. Para aplicações fora do solo, o concreto convencional é um material cujas propriedades elétricas são relativamente bem caracterizadas, sendo objeto de estudo em aplicações de telecomunicações (RHIM; BUYUKOZTURK, 1998) e engenharia civil (WHITTINGTON; MCCARTER; FORDE, 1981). No entanto, quando se trata de estudos das propriedades do concreto submerso no solo, observou-se que poucos trabalhos estudam de forma aprofundada o tema. O que observou-se é que, devido às diversas possibilidades de combinações e proporções dos elementos que são usados na fabricação, o resultado da resistividade do concreto possui variabilidade. Ou seja, o traço do concreto (proporção água : areia : agregado grosso), tipo de cimento, granulometria do agregado grosso (ou brita) e a quantidade de água utilizadas no processo de fabricação são fatores que podem alterar a resistividade do concreto após sua cura.

Conforme apresentado no Capítulo 3, observa-se que diferentes autores reportam diferentes valores para resistividade do concreto quando submerso no solo, envolvendo um eletrodo de aterramento. Ufer (1964), que foi o precursor no estudo de aterramentos concretados, indica uma resistividade de 30 Ω .m para o concreto. Velev et al. (2011b) aponta uma medição de 25 Ω .m para o concreto. Já He, Zeng e Zhang (2013), apontam uma faixa para a resistividade do concreto entre 30 e 90 Ω .m. Por outro lado, a IEEE Std.80 (2013) indica uma resistividade entre 30 e 200 Ω .m, embora não seja citada nenhuma referência que embase essa afirmação. Após isso, Androvitsaneas et al. (2018) apresentaram um estudo que indicou uma resistividade de 150 Ω .m para o concreto. Assim, nota-se que a literatura menciona valores entre 25 a 200 Ω .m, o que indica uma variabilidade considerável.

Diante dessa possível variabilidade da resistividade do concreto, que depende do seu processo de fabricação e também das condições do solo onde será depositado, surge o questionamento do quanto essa variabilidade afeta a resposta impulsiva dos AECs. Buscando-se responder esse questionamento, nesta seção é apresentado um estudo da sensibilidade que o parâmetros resistividade do concreto tem na impedância impulsiva (Z_p) de AECs. Para isso, estudou-se o valor de Z_p quando aterramentos do tipo haste vertical (com diferentes comprimentos), fincados em diferentes solos, são submetidos a

descargas PRI e SUB.

Uma vez que o objetivo desta análise é realizar um estudo comportamental da variação da resistividade do concreto, simulou-se apenas aterramentos do tipo haste, pois a simetria cilíndrica do problema pode ser explorada, levando a tempos de simulação muito menores que para um eletrodo horizontal (contrapeso) de mesmo comprimento. Além disso, o comportamento geral de eletrodos horizontais e verticais de mesmo comprimento são razoavelmente parecidos, embora exista distinção nos valores absolutos de Z_p .

Portanto, a seguir são apresentados resultados de simulações para AECs do tipo haste vertical (EV), com comprimentos de 3 m e 30 m, totalmente encapsulado por concreto ($h_c = 4/4$), com $D_c = 20$ cm, considerando-se cinco diferentes valores de resistividade do concreto (ρ_c), a saber 30, 60, 90, 120 e 150 Ω .m. Para ambas hastes, considerando cada valor de ρ_c , foram admitido dois tipos de solos, um com 300 Ω .m e outro com 4000 Ω .m de resistividade (ou seja, situações extremas de baixa e alta resistividade de solo). Dessa forma, para todas essas situações mencionadas, o AEC foi submetido a descargas PRI e SUB.

Os resultados obtidos dessas simulações foram as curvas de impedância harmônica $\mathbf{Z}(j\omega)$ (Figura 6.5 e 6.6), o GPR (Figura 6.7 e 6.8) e a impedância impulsiva Z_p (Figura 6.9 e 6.10). Além disso, buscando-se realizar uma análise do quanto o aumento da resistividade do concreto interfere no valor de Z_p , são apresentados nas Figuras 6.11 e 6.12 os valores da elevação percentual do Z_p , em relação à situação na qual a resistividade do concreto é de 30 Ω .m. Dessa forma, é possível avaliar de forma qualitativa o resultado que o aumento no ρ_c produz no Z_p .

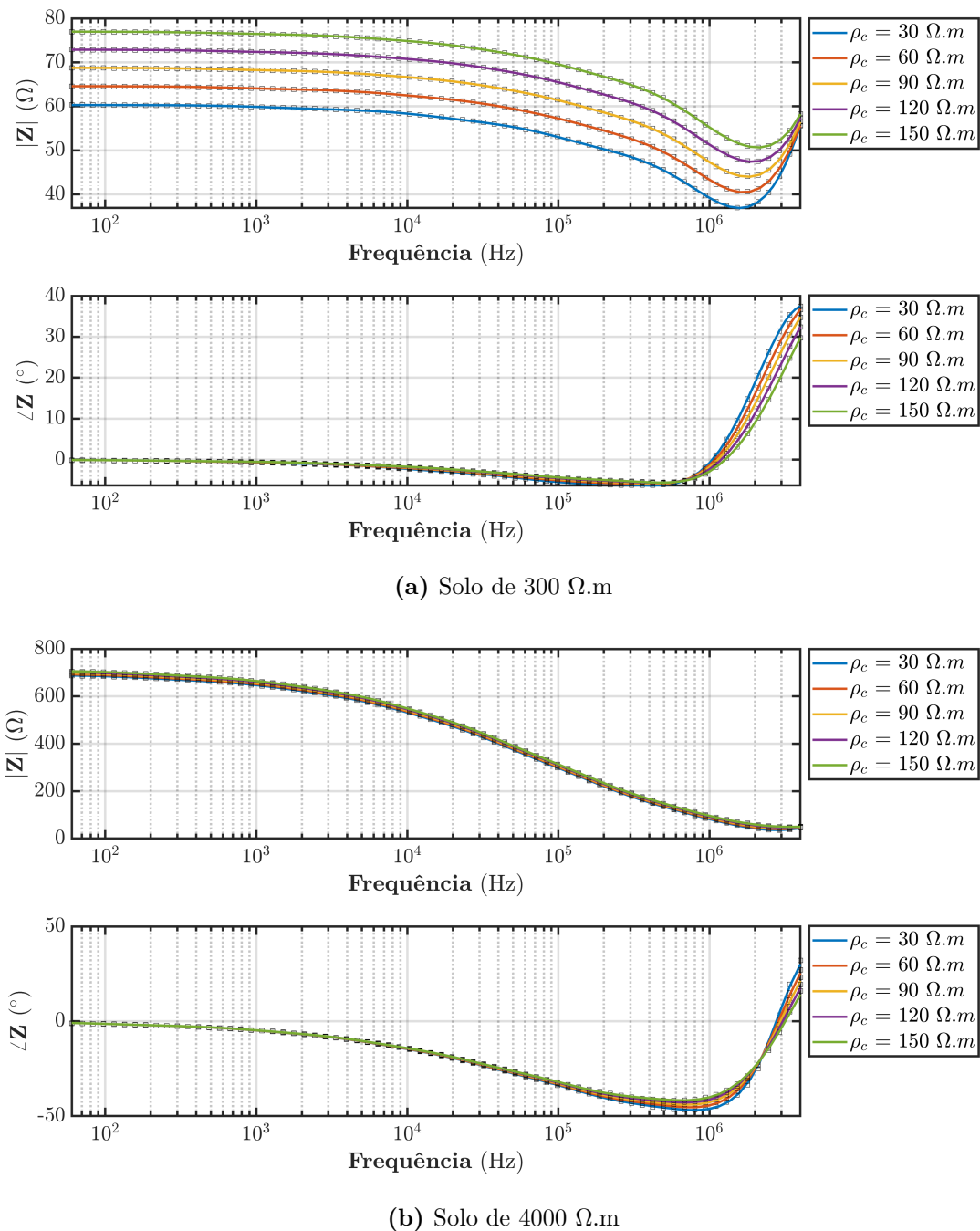
O resultado apresentado na Figura 6.5, para AEC com 3 m comprimento, indica um comportamento notável: para o solo de baixa resistividade (300 Ω .m) à medida que ρ_c aumenta, a curva de $|\mathbf{Z}(j\omega)|$ se altera consideravelmente, contudo, para o solo de alta resistividade (4000 Ω .m), o aumento de ρ_c praticamente não altera a curva $|\mathbf{Z}(j\omega)|$ nem a curva de $\angle\mathbf{Z}(j\omega)$ (ficando quase que inalteradas em praticamente toda faixa de frequências avaliada).

Por outro lado, conforme apresentado na Figura 6.6, para um AEC com comprimento de $L = 30$ m, o que é dez vezes o comprimento do caso mencionado anteriormente ($L = 3$ m), observou-se que, mesmo para o solo de baixa resistividade (300 Ω .m), não há alteração significativa para a curva de $|\mathbf{Z}(j\omega)|$ quando ρ_c aumenta. Assim, sendo tanto para solo com 300 Ω .m quanto para 4000 Ω .m, as variações na impedância harmônica foram muito pequenas.

Diante do exposto, os resultados das Figuras 6.5 e 6.5 indicam que: (i) a variabilidade na resistividade do concreto é mais importante para solos de baixa resistividade e menos importante para solos de alta resistividade, (ii) para eletrodos longos ($L > 30$ m), a

variabilidade da resistividade do concreto não impacta significativamente o resultado em solos de alta resistividade (4000 $\Omega.m$) e nem mesmo em solos de baixa resistividade (300 $\Omega.m$), ou seja, para um $\rho_{solo} > 300 \Omega.m$ e $L \geq 30$ m o valor da resistividade do concreto (dentro de sua faixa de variabilidade natural) é quase irrelevante.

Figura 6.5 – Impedância harmônica $Z(j\omega)$ para AEC-EV com $L = 3$ m, $h_c = 4/4$, $D_c = 20$ cm e diferentes resistividades de concreto ($\rho_c = 30$ a 150 $\Omega.m$).



As consequências do achado indicado no parágrafo anterior irão naturalmente se refletir no GPR e na impedância impulsiva Z_p . De fato, o que se observa na [Figura 6.7](#) e [6.8](#) é que o GPR para o solo de 4000 $\Omega.m$ é muito pouco alterado com a variação de

ρ_c , tanto para PRI quanto SUB, em ambos AECs avaliados (com comprimento de 3 m e de 30 m). Já para o solo de 300 $\Omega.m$ e AEC com $L = 3$ m a variação no valor de ρ_c altera consideravelmente a curva de GPR, tanto para PRI quanto SUB. Por outro lado, para AEC com $L = 30$ m (Figura 6.8), embora os GPRs para PRI e SUB no solo de 300 $\Omega.m$ apresentem maior variabilidade que para o solo de 400 $\Omega.m$, tal variabilidade é consideravelmente menor que no caso do AEC com $L = 3$ m (Figura 6.7). Assim, pode-se dizer que para o AEC com $L = 30$ m não há alterações significativas no pico do GPR quando se varia ρ_c , independentemente da resistividade do solo.

Figura 6.6 – Impedância harmônica $Z(j\omega)$ para AEC-EV com $L = 30$ m, $h_c = 4/4$, $D_c = 20$ cm e diferentes resistividades de concreto ($\rho_c = 30$ a 150 $\Omega.m$).

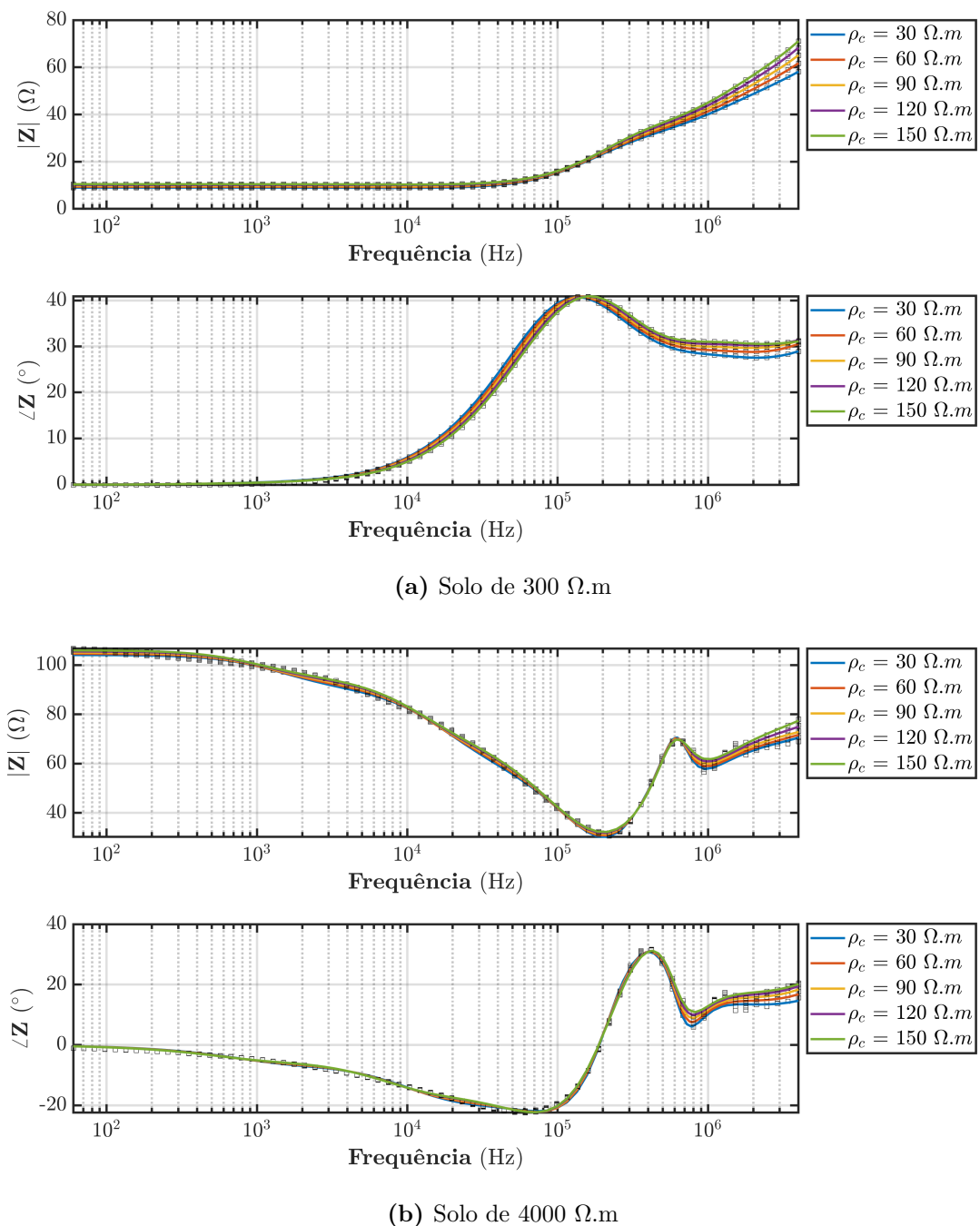
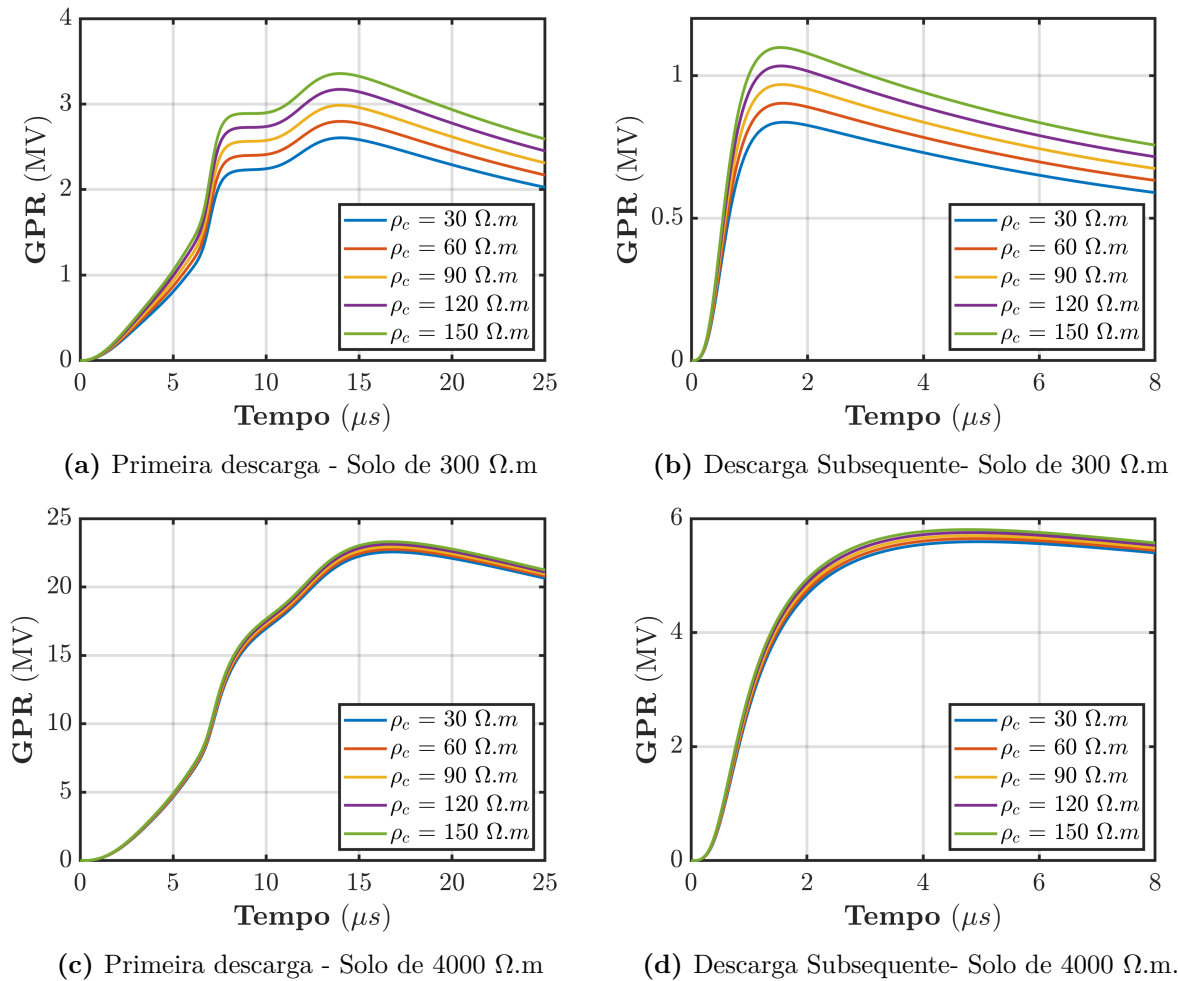


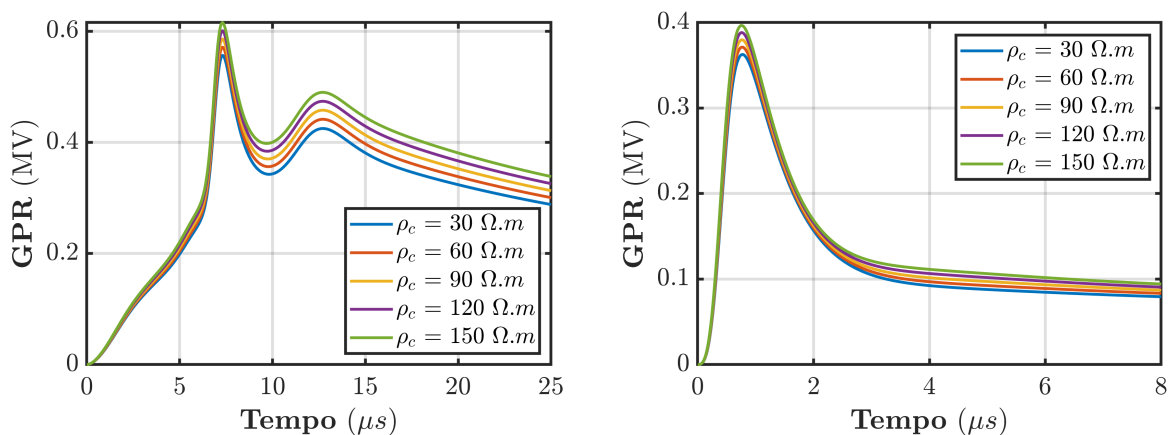
Figura 6.7 – GPR para AEC do tipo haste vertical com $L = 3$ m, $h_c = 4/4$, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes resistividades de concreto ($\rho_c = 30$ a $150 \Omega.m$). Descargas: PRI e SUB.



Embora as Figuras 6.9 e 6.10 apresentem o valor da impedância impulsiva Z_p (em Ω , para os AECs com $L = 3$ e 30 m), a quantização da elevação percentual no valor de Z_p devido ao aumento de ρ_c é melhor apresentada nas Figuras 6.11 e 6.12), pois é fornecido o aumento percentual de Z_p quando ρ_c varia de 60 a $150 \Omega.m$, em relação ao caso em que $\rho_c = 30$ m. Dessa forma, as Figuras 6.11 e 6.12 resumem de forma concisa os fatos anteriormente observados na impedância harmônica $Z(j\omega)$ e no GPR.

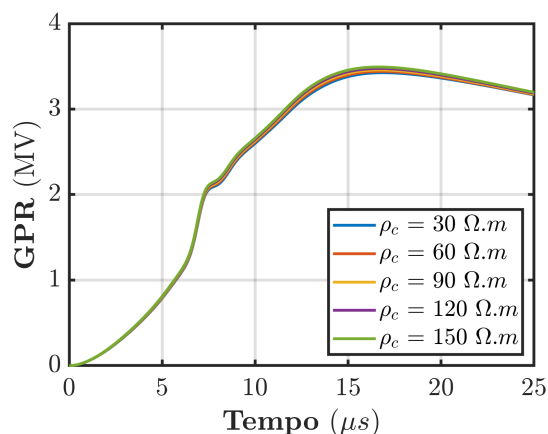
Como se pode notar nas Figuras 6.11 e 6.12, o solo de baixa resistividade ($300 \Omega.m$) sempre fornece as maiores elevações percentuais de Z_p , independentemente do tipo de descarga e do comprimento do eletrodo do AEC (enquanto que o com $4000 \Omega.m$, as menores). Contudo, enquanto no AEC com $L = 3$ m, $\rho_{solo} = 300 \Omega.m$ e $\rho_c = 150 \Omega.m$ (Figura 6.11) obtiveram-se elevações de Z_p na ordem de 30% , já para o AEC com $L = 30$ m obtiveram-se elevações de Z_p na ordem de 10% (para os mesmos valor de L e ρ_{solo} e ρ_c), o que é consideravelmente inferior.

Figura 6.8 – GPR para AEC do tipo haste vertical com $L = 30$ m, $h_c = 4/4$, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes resistividades de concreto ($\rho_c = 30$ a $150 \Omega.m$). Descargas: PRI e SUB.

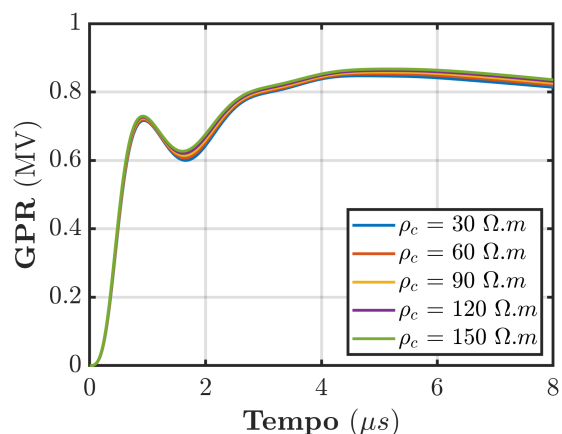


(a) Primeira descarga - Solo de $300 \Omega.m$

(b) Descarga Subsequente- Solo de $300 \Omega.m$



(c) Primeira descarga - Solo de $4000 \Omega.m$



(d) Descarga Subsequente- Solo de $4000 \Omega.m$

Ainda sobre as Figuras 6.11 e 6.12, observa-se claramente que para o solo de alta resistividade ($4000 \Omega.m$), um aumento de quatro vezes na resistividade do concreto (de 30 para $150 \Omega.m$) não é suficiente para produzir variações consideráveis na impedância impulsiva, dado que a elevação percentual de Z_p não chega nem a 5% em todos os casos avaliados (isto é, para todos os tipos de descarga, valores de L e ρ_c).

Considerando-se os resultados obtidos nesta seção, optou-se por utilizar em todas as demais simulações apresentadas neste trabalho um valor mediano para a resistividade do concreto, ou seja um $\rho_c = 90 \Omega.m$. Dessa forma, garante-se resultados médios para Z_p em solos com baixa resistividade, ao mesmo tempo que para solos com alta resistividade tem-se a certeza que os resultados serão pouco alterados por uma escolha de um ρ_c diferente.

Figura 6.9 – Impedância impulsiva Z_p para AEC tipo haste vertical com $L = 3$ m, $h_c = 4/4$, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes resistividades de concreto ($\rho_c = 30$ a $150 \Omega.m$). Descargas: PRI e SUB.

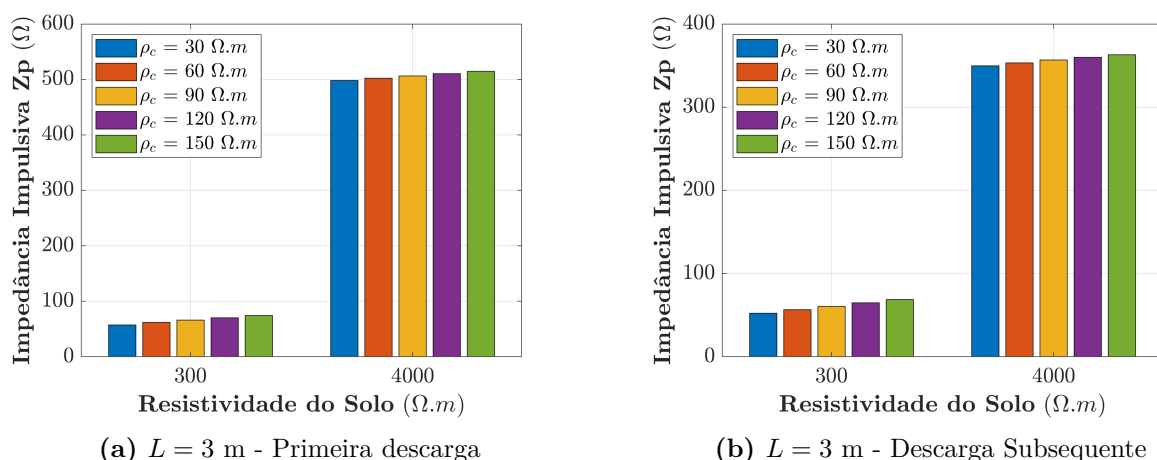
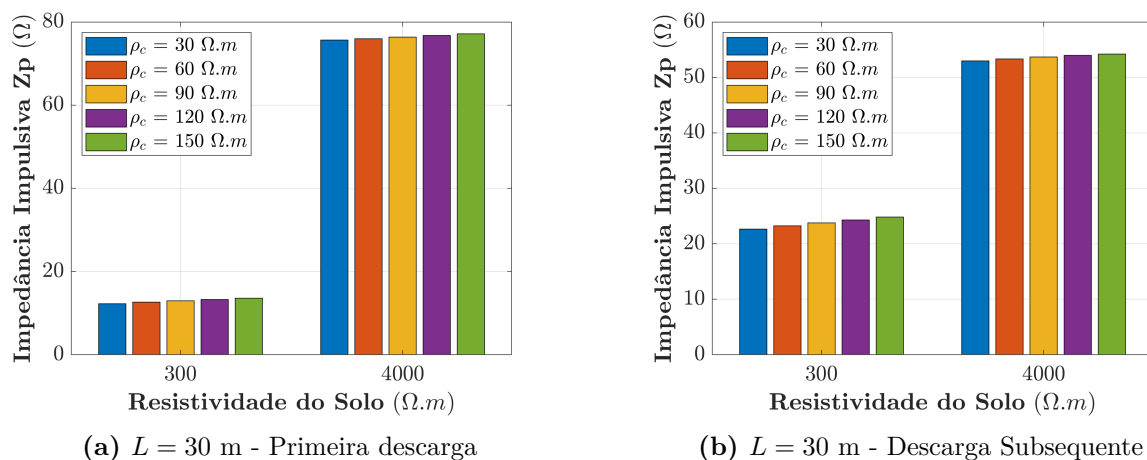


Figura 6.10 – Impedância impulsiva Z_p para AEC tipo haste vertical com $L = 30$ m, $h_c = 4/4$, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes resistividades de concreto ($\rho_c = 30$ a $150 \Omega.m$). Descargas: PRI e SUB.



Por fim, um vez que o encapsulamento dos eletrodos de aterramento é uma técnica adotada principalmente em solos de alta resistividade, com vistas à redução da impedância impulsiva, o fato de se ter encontrado que o GPR e o Z_p são muito pouco sensíveis à variações na resistividade do concreto, quando o aterramento está fincado em um solo de alta resistividade, consiste um achado favorável à técnica de concretagem. Pois indica que não há necessidade de uma demasiada preocupação com o preparo ou composição do concreto.

À seguir, na [seção 6.3](#) e [6.4](#) é apresentado um estudo da concretagem de hastes e eletrodos horizontais, considerando diferentes frações de concretagem do eletrodo e diferentes tipos de solo. O objetivo é caracterizar o comportamento de AECs para diversas situações fornecendo análises e considerações adicionais.

Figura 6.11 – Elevação percentual na Impedância impulsiva para AEC tipo haste vertical com $L = 3$ m, $h_c = 4/4$, $D_c = 20$ cm, para resistividades de concreto (ρ_c) de 60 a 150 $\Omega.m$. Percentual calculado em relação ao resultado de $\rho_c = 30 \Omega.m$. Descargas: PRI e SUB.

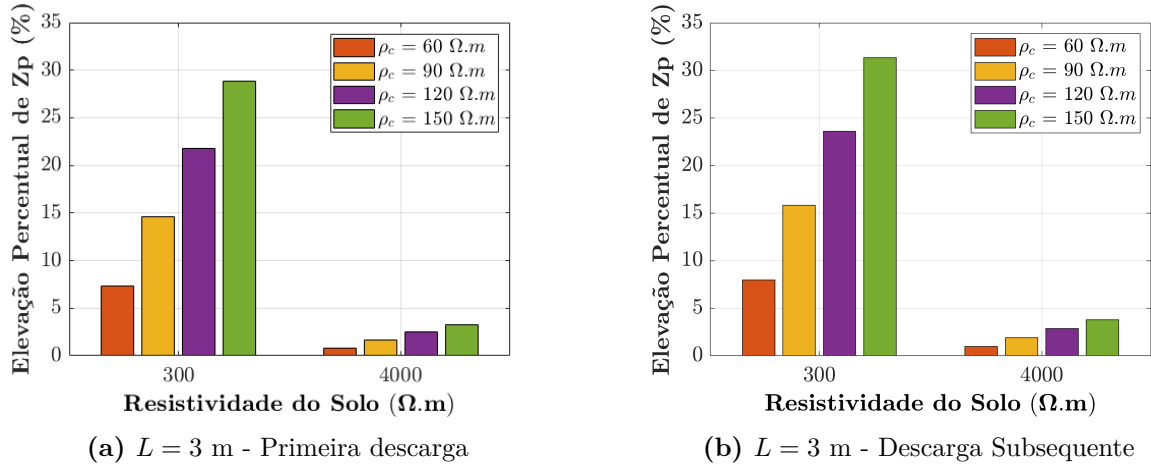
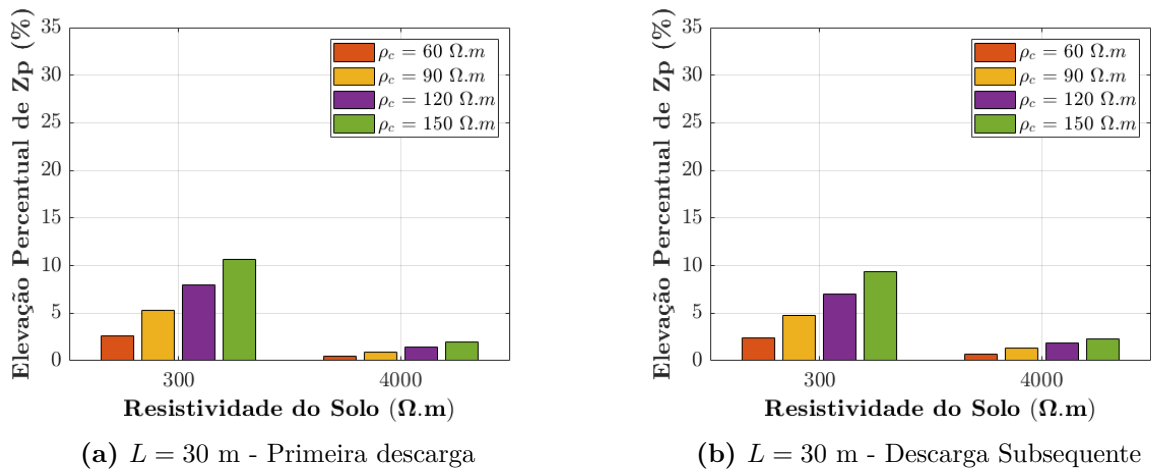


Figura 6.12 – Elevação percentual na Impedância impulsiva para AEC tipo haste vertical com $L = 30$ m, $h_c = 4/4$, $D_c = 20$ cm, para resistividades de concreto (ρ_c) de 60 a 150 $\Omega.m$. Percentual calculado em relação ao resultado de $\rho_c = 30 \Omega.m$. Descargas: PRI e SUB.



6.3 AEC tipo Eletrodo Vertical (EV)

Nesta seção são apresentados os resultados para AEC do tipo eletrodo vertical (AEC-EV) com comprimentos $L = 3$ e 30 m. Considerou-se que o encapsulamento de concreto tem diâmetro $D_c = 20$ cm. Em todas as situações, foram levadas em conta diferentes frações de concretagem ($h_c = 0, 1/4, 2/4, 3/4$ e $4/4$). Quanto aos solos, foram avaliadas as resistividades $\rho_{solo} = 300; 600; 1000; 2000$ e 4000 $\Omega.m$. Portanto, nesta seção serão avaliados os casos A1 a B5, apresentados na Tabela 4.1 do Capítulo 4.

A escolha de um comprimento de eletrodo com $L = 3$ m deu-se pelo fato de ser um comprimento de haste vertical cobreada que é comercialmente disponível e bastante

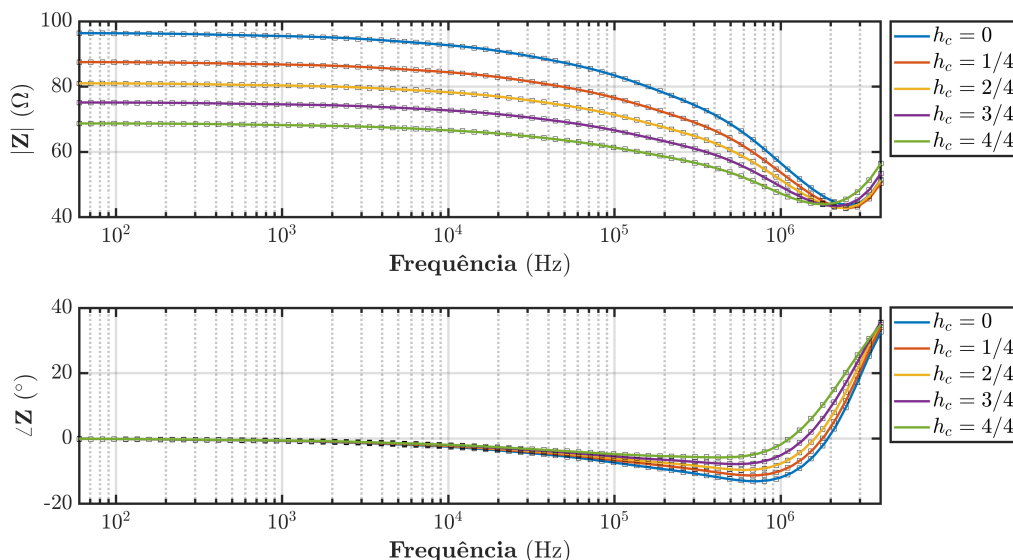
utilizada em aterramentos de linhas de transmissão e outras aplicações de sistemas de potência (ALIPIO; VISACRO, 2014). Por outro lado, embora uma haste vertical de aterramento com $L = 30$ m seja raramente aplicada em aterramentos, optou-se por avaliar um AEC (do tipo EV) com esse comprimento para que fosse possível realizar uma análise comportamental dos AECs à medida que se assumem comprimentos maiores. Adicionado a isso, para que fosse possível realizar uma comparação entre AEC tipo EV e EH (a ser estudado na próxima seção). Finalmente, espera-se que aterramentos tipo EV e EH com mesmo comprimento (e em um mesmo solo) apresentem comportamentos similares na curva de $Z(j\omega)$, embora seja natural uma diferença nos valores absolutos de $Z(j\omega)$ e Z_p .

Nas Figuras 6.13 e 6.14 são apresentadas as curvas de impedância harmônica $Z(j\omega)$ para AEC-EV com $L = 3$ m e 30 m, respectivamente, considerando diferentes valores de fração de concretagem (h_c).

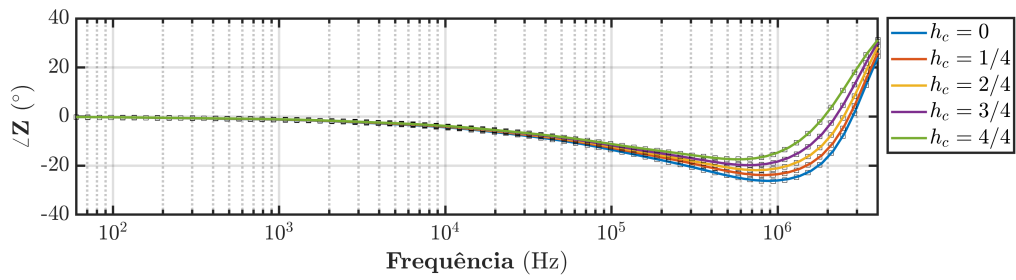
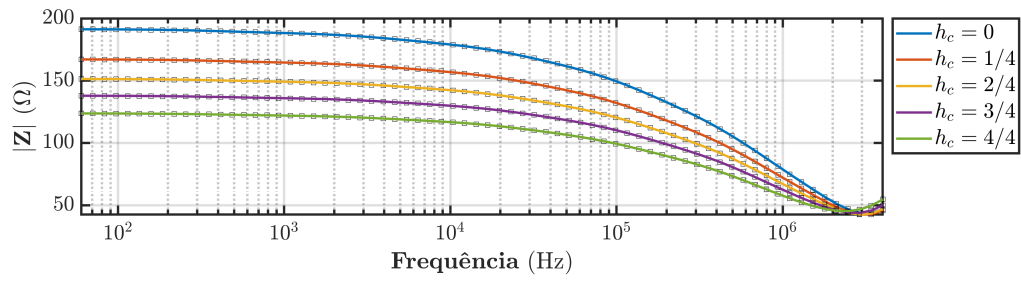
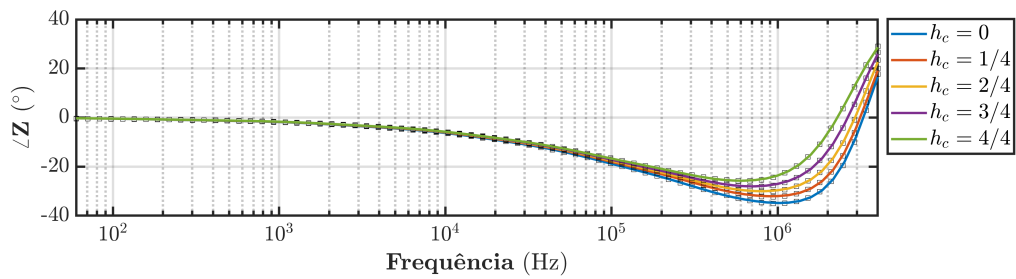
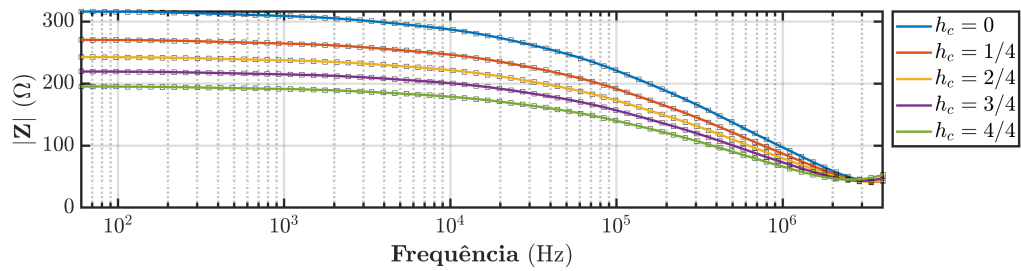
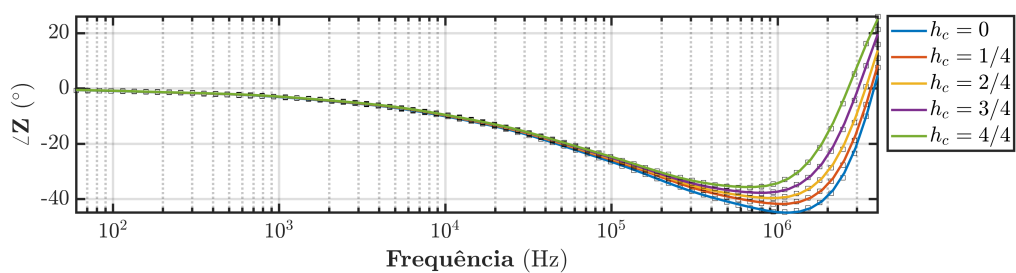
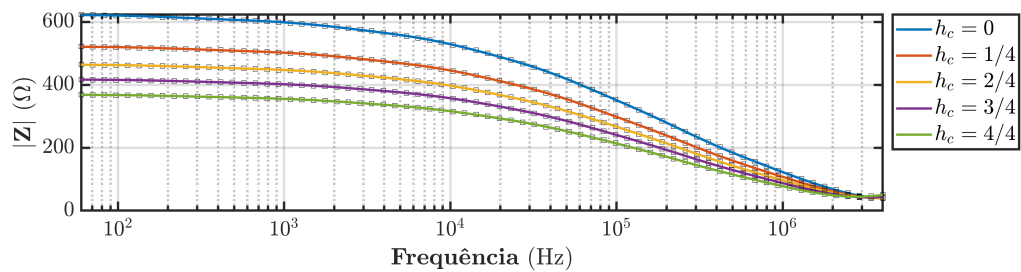
No Apêndice B, seção B.1, os respectivos resíduos e polos dessas funções racionais descritas na Figura 6.13 e na Figura 6.14, para $h_c = 0$ e $4/4$, são apresentados nas Tabelas B.1 e B.2. Por motivos de simplicidade, optou-se por apresentar nessas tabelas apenas as funções racionais do eletrodo com $h_c = 0$ (eletrodo nu) e $4/4$ (eletrodo totalmente concretado).

Avaliando-se os resultados da Figura 6.13 e da Figura 6.14, observa-se que as funções racionais estimadas (com o *Vector Fitting*) representam de forma satisfatória os dados da impedância harmônica simulada no Comsol. Esse é um resultado intermediário de grande valia, pois permite que seja estudada a resposta transitória do aterramento para correntes com diferentes formas de onda, além das aqui utilizadas.

Figura 6.13 – Impedância harmônica $Z(j\omega)$ para AEC-EV com $L = 3$ m, $D_c = 20$ cm e diferentes frações de concretagem (h_c), para ρ_{solo} de 300 a 4000 Ω .m.



(a) Solo de 300 Ω .m

(b) Solo de 600 Ω .m(c) Solo de 1000 Ω .m(d) Solo de 2000 Ω .m

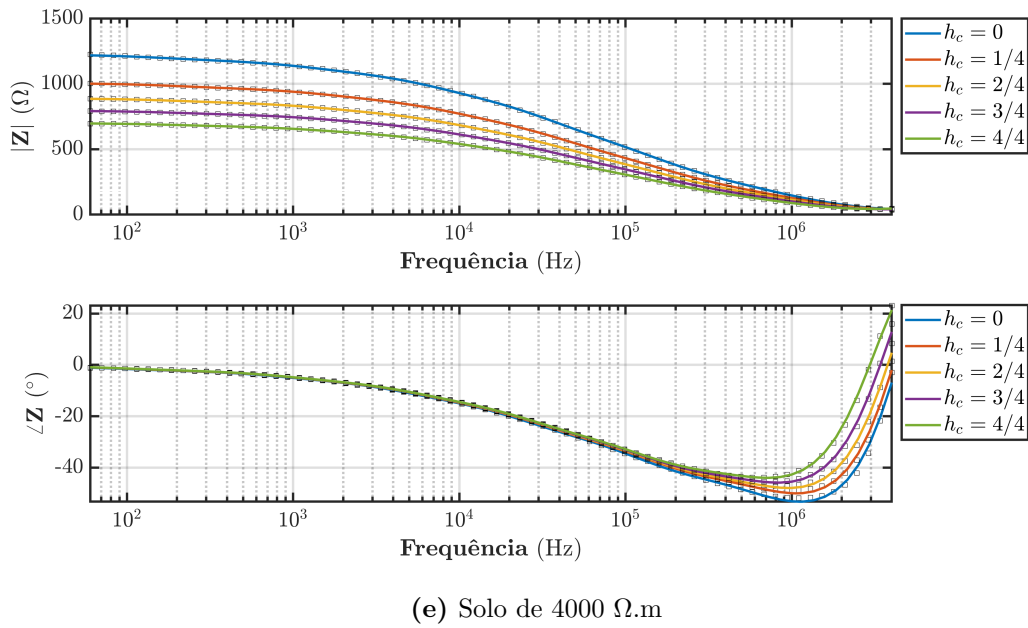
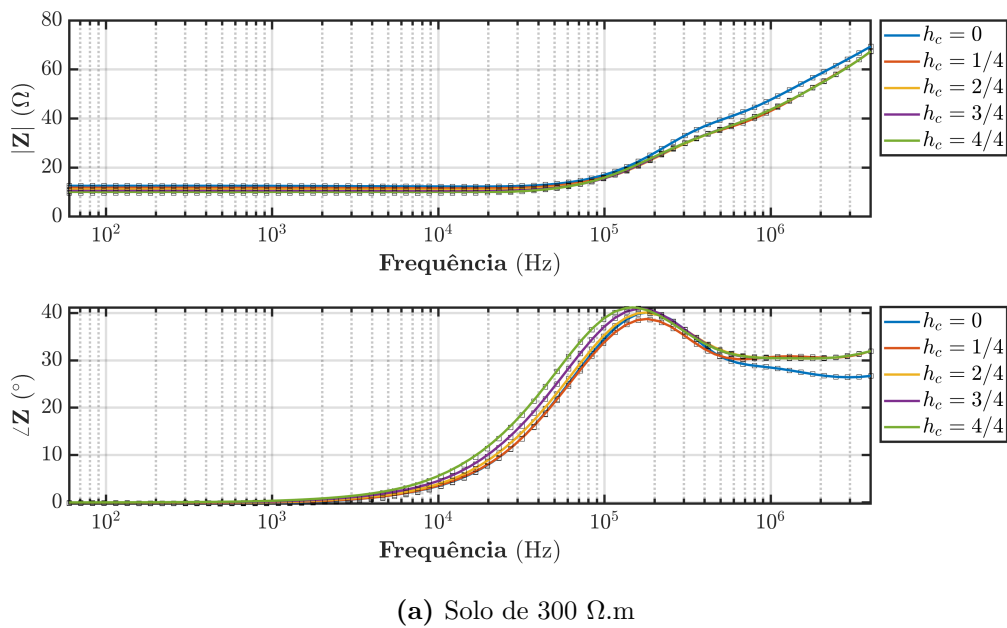
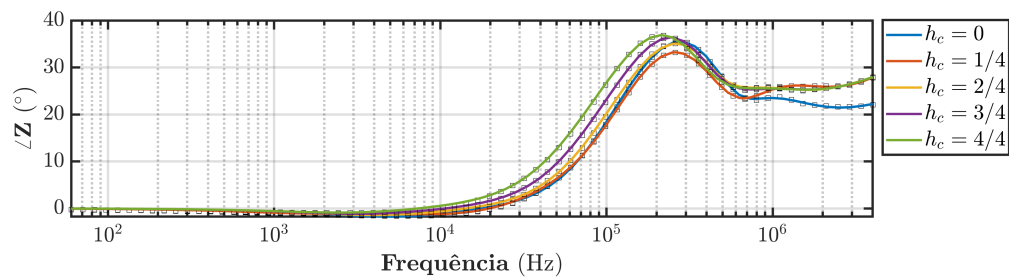
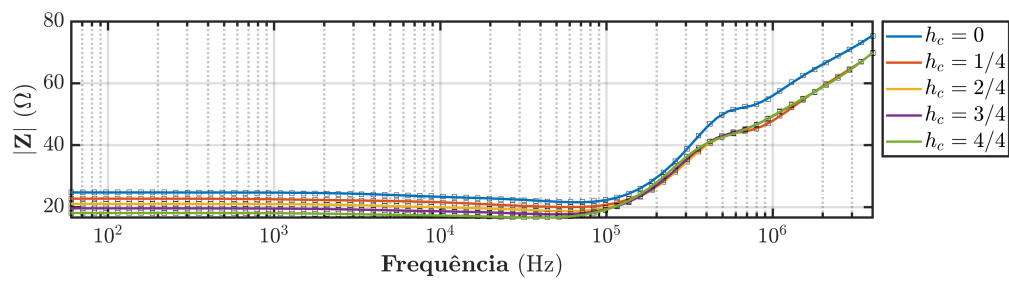
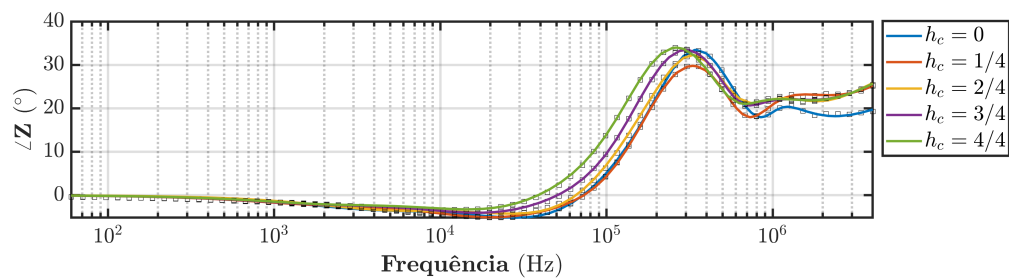
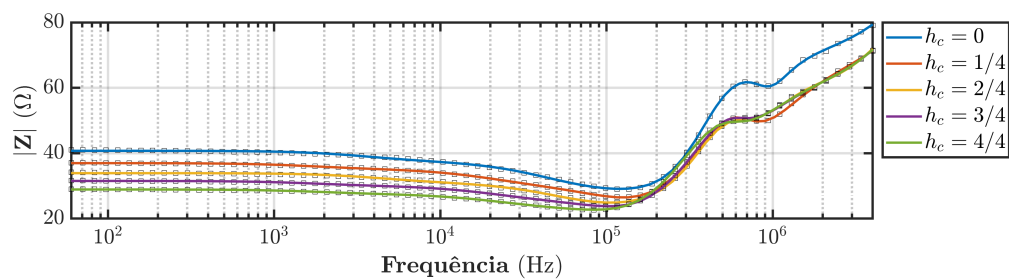
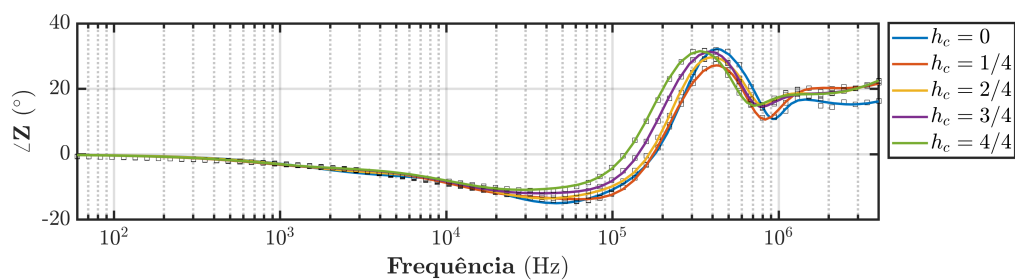
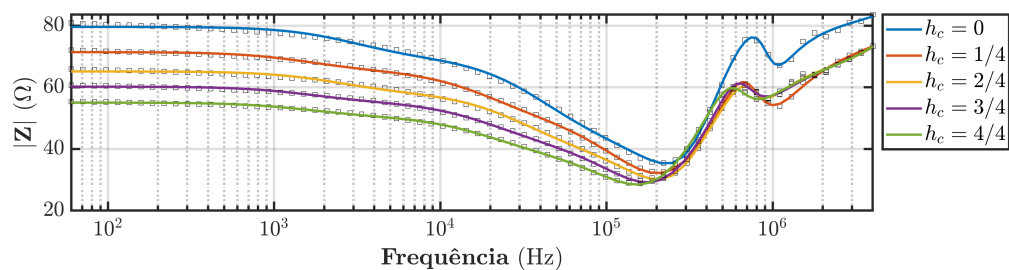
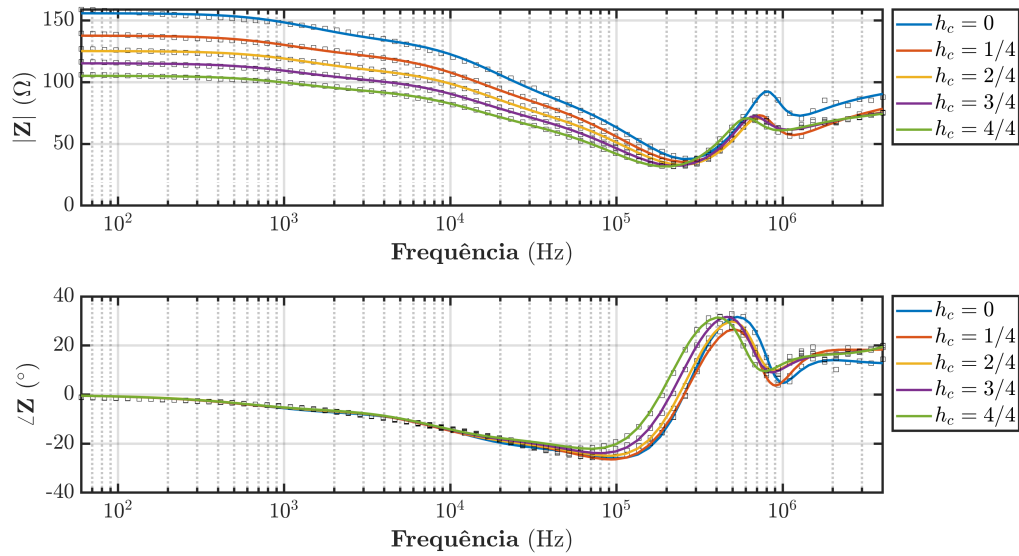


Figura 6.14 – Impedância harmônica $Z(j\omega)$ para AEC-EV com $L = 30$ m, $D_c = 20$ cm e diferentes frações de concretagem (h_c), para ρ_{solo} de 300 a 4000 $\Omega.m$.



(b) Solo de 600 Ω .m(c) Solo de 1000 Ω .m(d) Solo de 2000 Ω .m

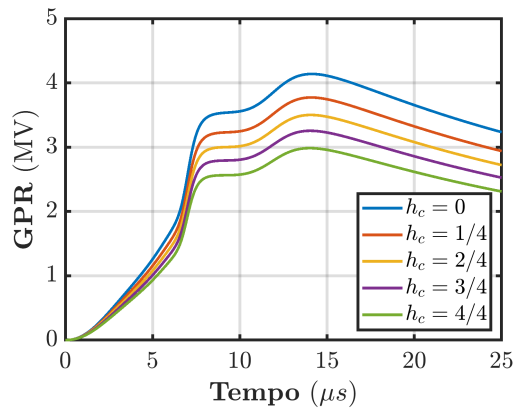
(e) Solo de 4000 Ω .m

Pode-se observar que à medida que a fração de concretagem (h_c) aumenta de 0 (situação com eletrodo nu, sem encapsulamento) para 4/4 (situação com eletrodo totalmente encapsulado) a curva do módulo da impedância harmônica ($|Z|$) é deslocada para baixo como um todo, apresentando valores de impedância cada vez mais inferiores (sendo esse comportamento mais pronunciado na região de 60 Hz a 1 MHz, para os eletrodos estudados). Esse deslocamento para baixo já era esperado, uma vez que o encapsulamento do concreto, via de regra, possui resistividade consideravelmente menor que a maioria dos solos comuns, o que promove redução da impedância.¹ Além disso, observa-se também que à medida que a fração de concretagem aumenta, a curva de fase da impedância harmônica ($\angle Z$) é ligeiramente deslocada para esquerda e conseqüentemente a frequência de ressonância (ω_0 | $\angle Z(\omega_0) = 0^\circ$) é reduzida.

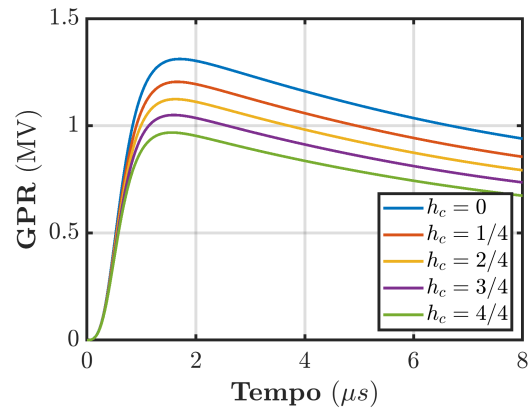
Em posse das impedâncias harmônicas fornecidas nas Figuras 6.13 e 6.14, calculou-se o GPR quando cada uma dessas impedâncias são submetidas às correntes PRI e SUB, anteriormente apresentadas na Figura 2.12. Dessa forma, os respectivos resultados da forma de onda do GPR são apresentados nas Figuras 6.15 e 6.16. Assim, pode-se notar claramente que para o AEC-EV com $L = 3$ m (Figura 6.13) o aumento na fração de concretagem reduziu significativamente toda a curva do GPR, para todas as resistividades de solo e correntes de descarga avaliadas. Algo similar ocorre para o AEC-EV com $L = 30$ m, contudo, nota-se que quanto menor a resistividade do solo e quanto mais rápida a descarga (ou seja, para SUB), a redução no GPR devido ao aumento de h_c é menos pronunciada. Isso pode ser facilmente visualizado comparando-se a Figura 6.16a com a Figura 6.16i, bem como a Figura 6.16b com a Figura 6.16j.

¹ Embora a redução da impedância harmônica seja um comportamento esperado advindo do encapsulamento de concreto, a literatura não fornece dados com detalhes dos níveis de redução da impedância bem como da redução do GPR; o que se torna uma contribuição do presente trabalho.

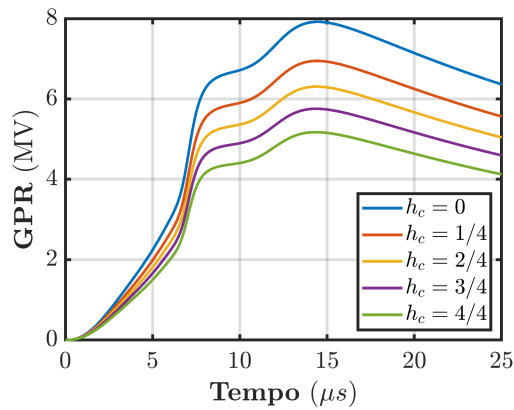
Figura 6.15 – GPR para AEC-EV com $L = 3 \text{ m}$, $D_c = 20 \text{ cm}$, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.



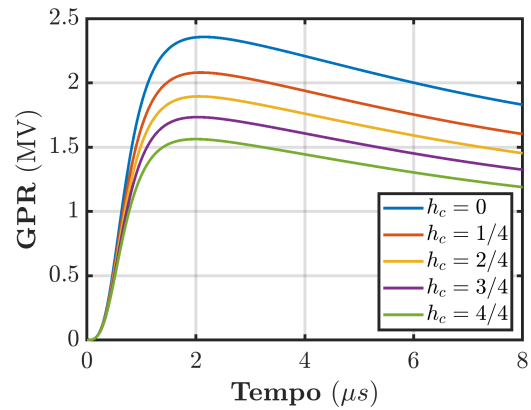
(a) Primeira descarga - Solo de $300 \Omega.m$



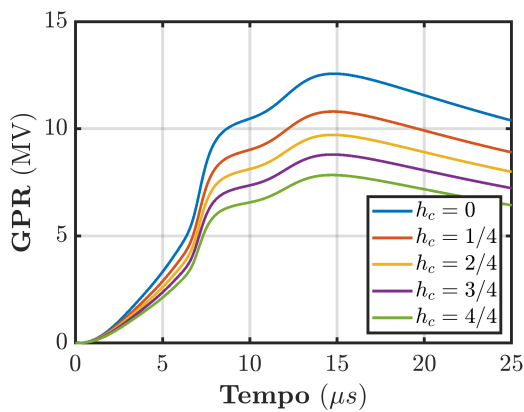
(b) Descarga Subsequente- Solo de $300 \Omega.m$



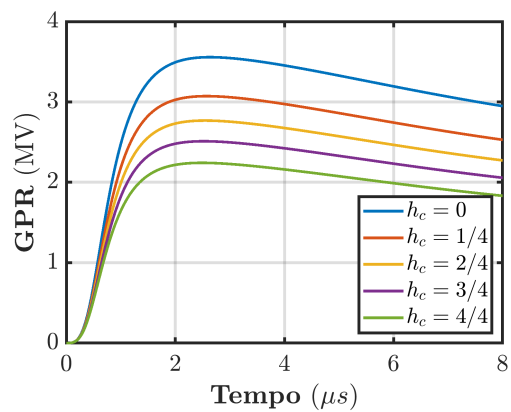
(c) Primeira descarga - Solo de $600 \Omega.m$



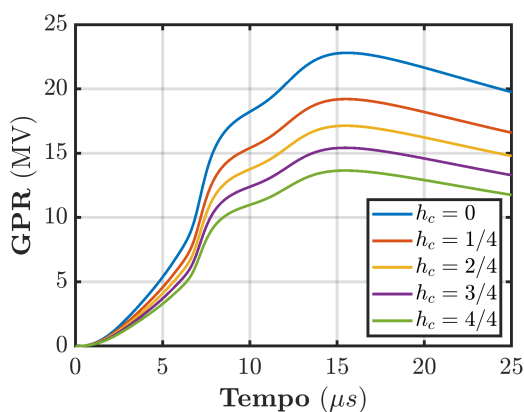
(d) Descarga Subsequente- Solo de $600 \Omega.m$.



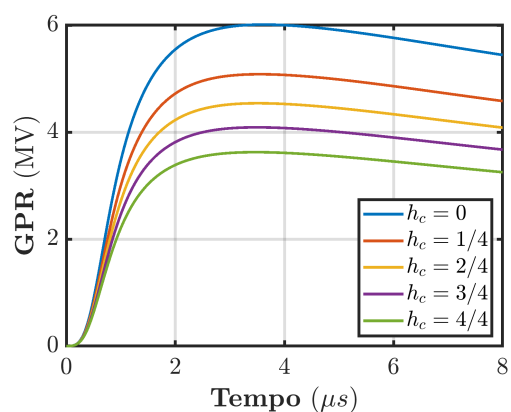
(e) Primeira descarga - Solo de $1000 \Omega.m$



(f) Descarga Subsequente- Solo de $1000 \Omega.m$.



(g) Primeira descarga - Solo de $2000 \Omega.m$



(h) Descarga Subsequente- Solo de $2000 \Omega.m$.

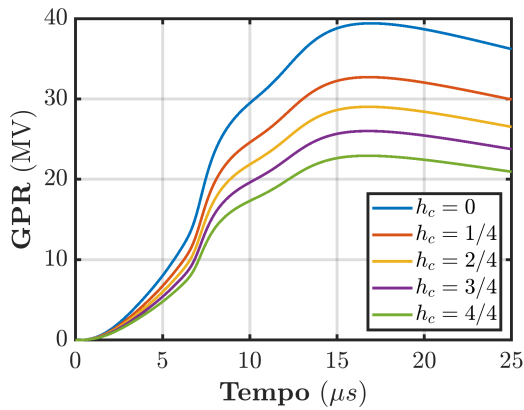
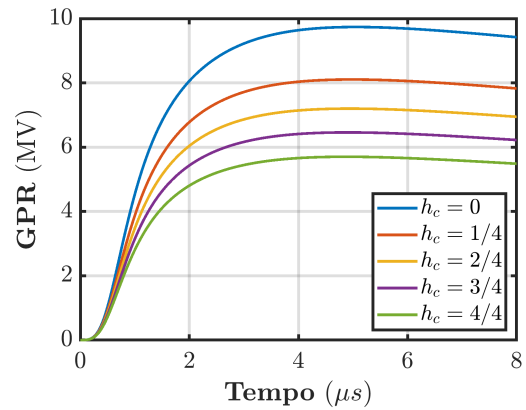
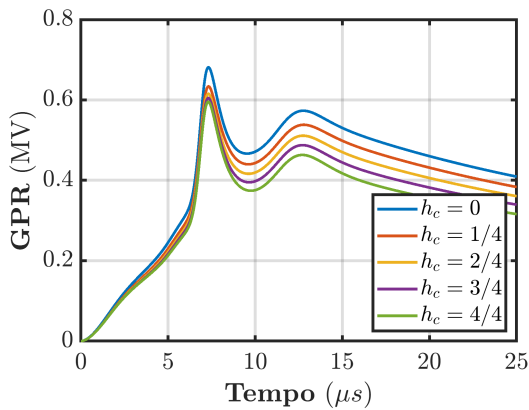
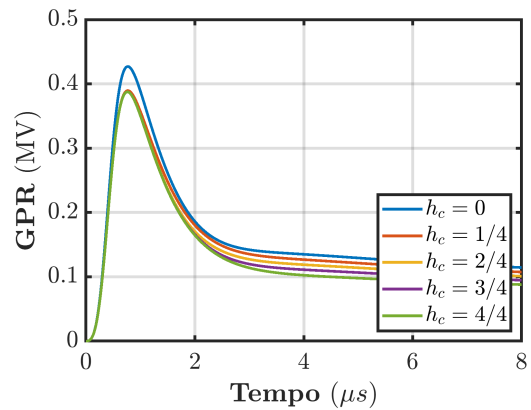
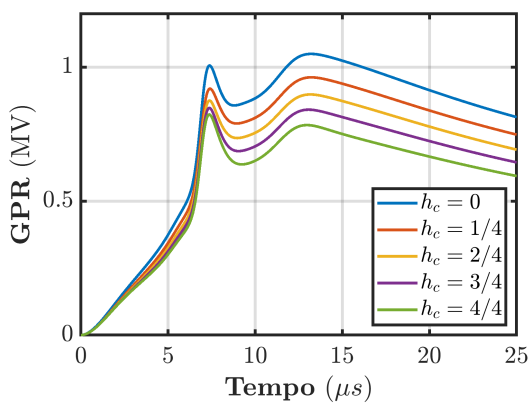
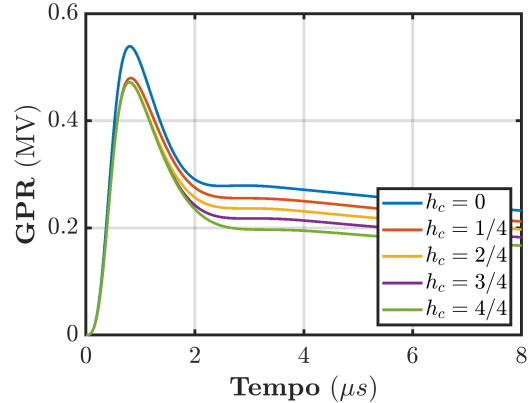
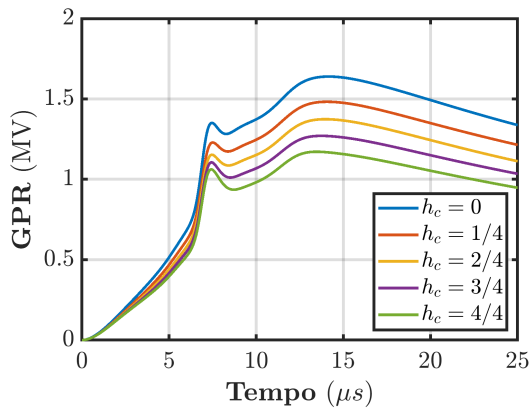
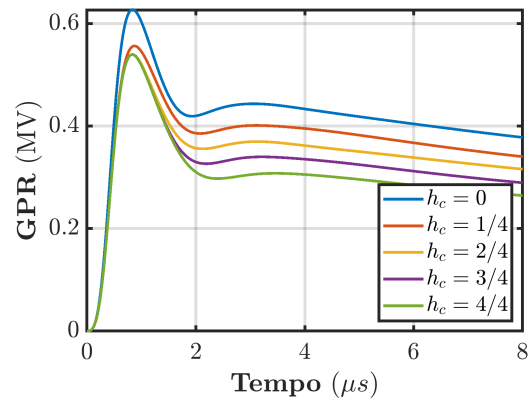
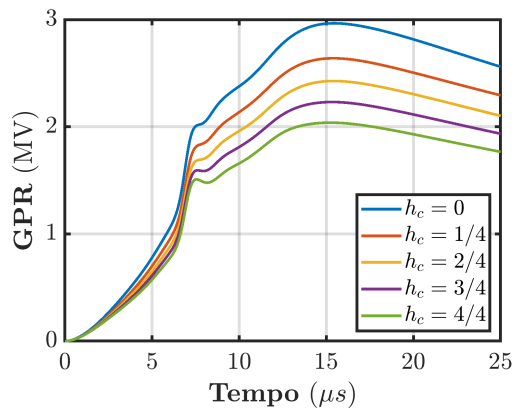
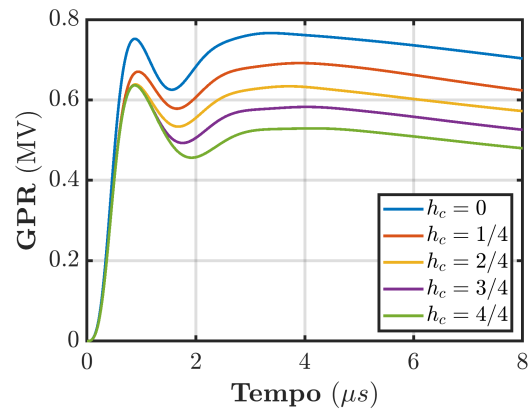
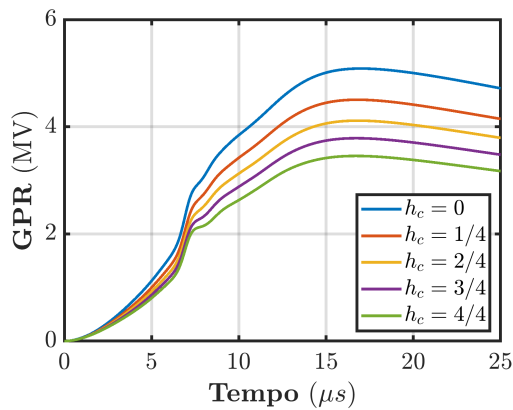
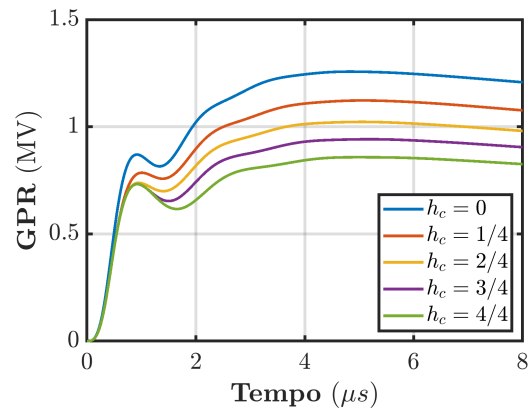
(i) Primeira descarga - Solo de 4000 Ω .m(j) Descarga Subsequente- Solo de 4000 Ω .m.

Figura 6.16 – GPR para AEC-EV com $L = 30$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.

(a) Primeira descarga - Solo de 300 Ω .m(b) Descarga Subsequente- Solo de 300 Ω .m(c) Primeira descarga - Solo de 600 Ω .m(d) Descarga Subsequente- Solo de 600 Ω .m.

(e) Primeira descarga - Solo de 1000 $\Omega.m$ (f) Descarga Subsequente- Solo de 1000 $\Omega.m$.(g) Primeira descarga - Solo de 2000 $\Omega.m$ (h) Descarga Subsequente- Solo de 2000 $\Omega.m$.(i) Primeira descarga - Solo de 4000 $\Omega.m$ (j) Descarga Subsequente- Solo de 4000 $\Omega.m$.

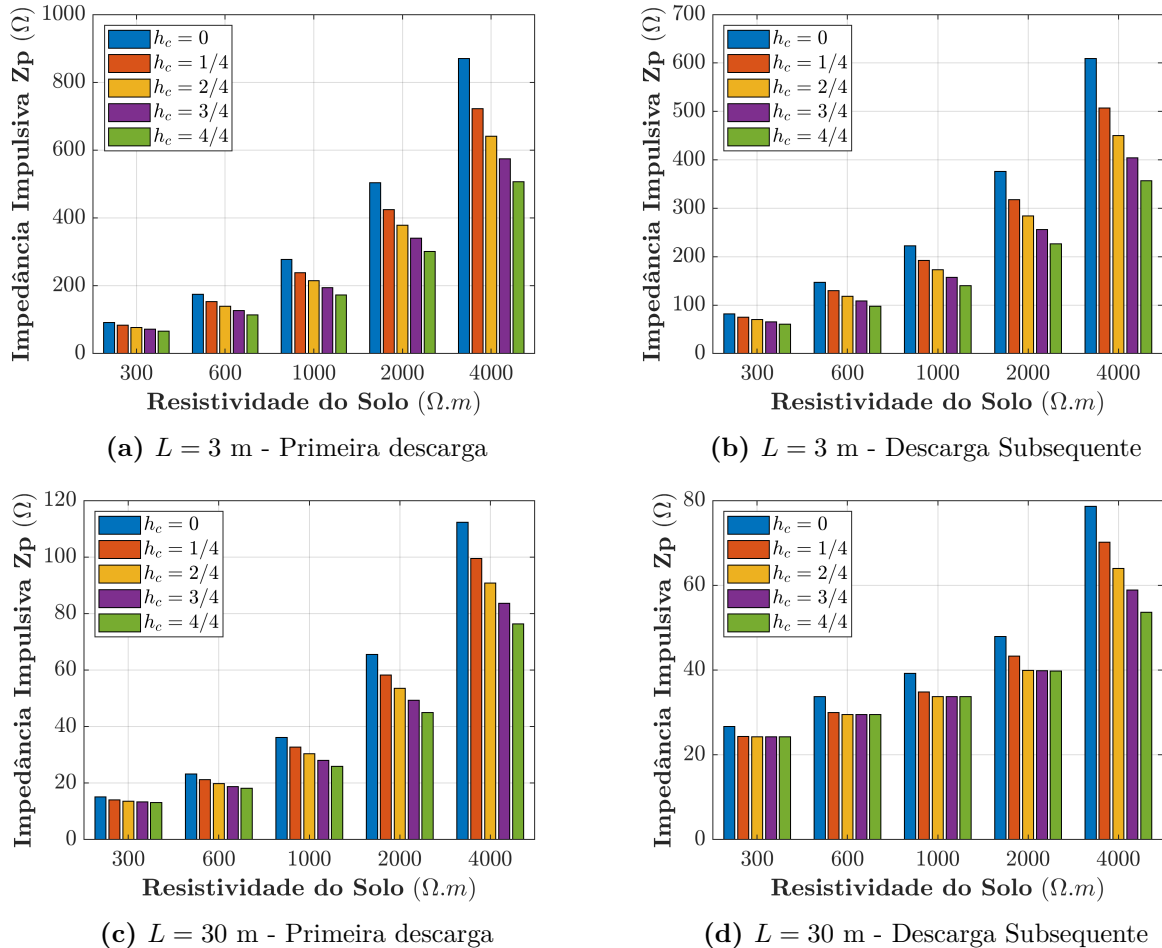
Uma outra grandeza importante que auxilia na avaliação dos resultados é a impedância impulsiva Z_p , a qual permite a realização de uma análise mais concisa dos resultados. Por esse motivo, na [Figura 6.17](#) são apresentados os resultados² de Z_p , em Ω , para AEC-EV com $L = 3$ m e 30 m.

Além disso, para facilitar a análise, na [Figura 6.18](#) é apresentada a redução percentual no valor de Z_p para cada valor de h_c (1/4 a 4/4), tomando-se como referência o

² Os valores de pico do GPR bem como da impedância impulsiva (Z_p) também são apresentados em forma de tabelas na [seção B.3](#) do [Apêndice B](#).

valor de Z_p para um eletrodo nu ($h_c = 0$), nas mesmas condições. Dessa forma, é possível observar o ganho de eficiência que cada fração de concretagem promove ao AEC.

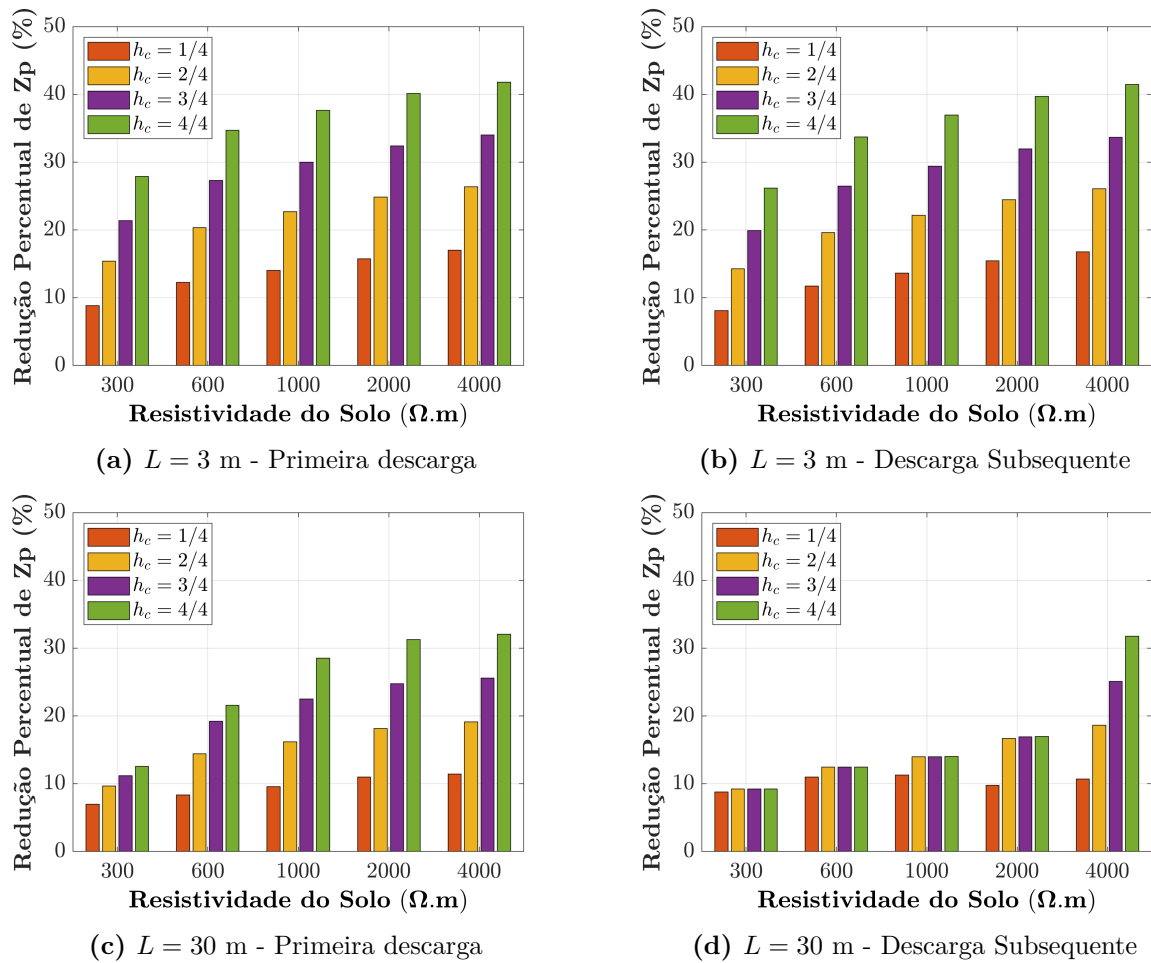
Figura 6.17 – Impedância impulsiva Z_p (Ω) para AEC-EV com $L = 3$ e 30 m, $D_c = 20$ cm e diferentes frações de concretagem h_c . Descargas: PRI e SUB.



Um fato importante observado na [Figura 6.18](#) é que para o AEC com $L = 3$ m, totalmente encapsulado por concreto ($h_c = 4/4$), são obtidas reduções no valor de Z_p que vão de 28% a 42%, para PRI, e de 26% a 41%, para SUB, quando a resistividade do solo é variada de 300 a 4000 $\Omega.m$. Já para o AEC com $L = 30$ m são obtidas reduções no valor de Z_p que vão de 13% a 32%, para PRI, e de 9% a 32%, para SUB. Esse resultado evidencia a eficiência que o uso do concreto tem na melhoria da resposta transitória de aterramentos do tipo EV, principalmente em solos de média a alta resistividade (1000 a 4000 $\Omega.m$).

Observa-se também na [Figura 6.18](#) que, de uma forma geral, o aumento progressivo da fração de concretagem h_c promove um aumento na redução percentual do Z_p . Além disso, observa-se claramente que, quanto maior a resistividade do solo, maior será a redução percentual de Z_p e que isso, de forma geral, independe do comprimento L , valor de h_c ou do tipo de descarga (PRI ou SUB). A única exceção à esse padrão é observada no AEC com $L = 30$ m, $h_c = 1/4$ em solo de 2000 $\Omega.m$, quando submetidos à descarga SUB

Figura 6.18 – Redução percentual de Z_p (%) para AEC-EV com $L = 3$ e 30 m, considerando PRI e SUB. Referência para o cálculo: Z_p do eletrodo nu.



(Figura 6.18d), o qual fornece uma redução percentual em Z_p menor que para o solo de 1000 $\Omega.m$ (fixado o h_c). Essa exceção pode ser explicada avaliando-se o comportamento das curvas de GPR para descarga SUB, das Figuras 6.16f, 6.16h e 6.16j. Nessas figuras, observa-se que à medida que a resistividade do solo aumenta há uma alteração no tempo de pico do GPR, por causa de uma considerável alteração na forma de onda do GPR. Mais que isso, essa alteração do tempo de pico do GPR ocorre exatamente para solo de 2000 $\Omega.m$. Ou seja, para solos com resistividades de 300 a 1000 $\Omega.m$ o tempo de pico do GPR é da ordem de 1 μs , enquanto que para o solo de 2000 $\Omega.m$ o tempo de pico do GPR passa a ser de aproximadamente 3 μs , e a forma de onda do GPR passa a ser totalmente diferente.

Nota-se também na Figura 6.18 que o primeiro quarto de concretagem ($h_c = 1/4$) é sempre o que fornece a maior contribuição incremental na redução percentual de Z_p . Isso pode ser notado avaliando-se o incremento que cada quarto de concretagem adiciona à redução de Z_p promovida pelo quarto anterior. Por exemplo, para AEC-EV com $L = 3$ m (Figuras 6.18a e 6.18b), nota-se que o primeiro quarto de encapsulamento de concreto ($h_c = 1/4$) fornece uma redução percentual em Z_p que vai de 9% a 17%, para PRI,

e de 8% a 17%, para SUB (variando-se ρ_{solo} de 300 a 4000 $\Omega.m$). Por outro lado, os demais quartos de concretagem fornecem um acréscimo de redução sempre menor que isso. Assim, embora a redução percentual do Z_p aumente à medida que h_c vai de 0 para 4/4, a contribuição que cada novo quarto de concreto adiciona à redução do Z_p é sempre decrescente. Esse comportamento já era esperado, uma vez que, em qualquer aterramento, a região com maior dissipação de corrente para o solo sempre é a região próxima ao ponto de injeção de corrente e, à medida que se distancia do mesmo, a dissipação de corrente sempre é inferior (VISACRO, 2007; BEZERRA et al., 2020). Por esse motivo, o primeiro quarto de concretagem (que é o que fica próximo ao ponto de injeção de corrente) fornece relativamente a maior redução percentual. Por outro lado, mesmo que o primeiro quarto de encapsulamento de concreto seja proporcionalmente o mais eficiente, a concretagem completa de todo o eletrodo ($h_c = 4/4$) resulta em reduções no Z_p da ordem de 35%, o que constitui uma redução importante.

Comparando-se os casos dos eletrodos com $L = 3$ m e $L = 30$ m (Figura 6.18), nota-se que o aumento do comprimento do eletrodo tende a diminuir as reduções percentuais do Z_p (em todos os solos, tanto para PRI quanto SUB), considerando um diâmetro de concretagem D_c fixo. Isso sugere que, à medida que se aumenta o comprimento do eletrodo (L), pode ser necessário que se aumente o diâmetro de concretagem (D_c) para que se mantenha uma mesma eficiência na redução do GPR. Contudo, apesar desse comportamento, o concreto ainda produziu reduções consideráveis no valor de Z_p para o eletrodo com $L = 30$ m (mesmo com um $D_c = 20$ cm).

Um outro comportamento observado nos resultados apresentados na Figura 6.18 é que, para a descarga SUB e solos de 300 a 2000 $\Omega.m$, o aumento do comprimento do eletrodo de 3 m para 30 m promoveu uma considerável supressão no ganho incremental da redução percentual de Z_p para valores de $h_c = 3/4$ e 4/4. Isso pode ser claramente observado comparando-se a Figura 6.18d com a Figura 6.18b. Por exemplo, na Figura 6.18d, tomando-se um solo de 1000 $\Omega.m$, a redução percentual de Z_p para $h_c = 1/4$ é de 11%, enquanto que para $h_c = 2/4$, 3/4 e 4/4 o valor da redução percentual é aproximadamente constante e igual a 14% (não havendo ganho incremental). Ou, seja encapsular 3/4 ou 4/4 não produz nenhum ganho adicional em relação à um encapsulamento de 2/4. Já para o solo de 4000 $\Omega.m$ não se observou tal comportamento.

Esse último efeito pode ser explicado pelo fato de que o aumento no comprimento do eletrodo irá conseqüentemente aumentar a indutância longitudinal distribuída do eletrodo, que é vista pela corrente (conforme apresentado na Figura 2.3). Dessa forma, uma vez que a descarga SUB tem tempo de frente menor que a PRI e, portanto, possui componentes de mais altas frequências, é natural que o comprimento efetivo do eletrodo seja menor para uma situação de SUB do que para uma de PRI. Assim sendo, a corrente longitudinal que chega até a extremidade oposta do eletrodo é bem menor para SUB

que para PRI. Portanto, os últimos dois quartos do eletrodo dissiparão para o solo uma corrente transversal muito menor que a dissipada nos dois primeiros quartos do eletrodo. Logo, o ganho em se encapsular os últimos dois quartos do eletrodo será menor para descargas SUB e eletrodos longos.

Finalmente, avaliando-se mais cuidadosamente os resultados do AEC-EV com $L = 3$ m, por ser este o comprimento de haste mais usual, nota-se que para solos com média e alta resistividade ($\rho_{solo} \geq 1000 \Omega.m$), a concretagem total do eletrodo ($h_c = 4/4$) promoveu uma redução média no valor de Z_p de aproximadamente 40%, tanto para PRI quanto para SUB. Essa é uma redução considerável e que corrobora com a aplicação do concreto em haste vertical, pois não somente reduzirá a resistência de baixa frequência (o que já é sabido) mas também aprimorará significativamente a resposta impulsiva.

6.4 AEC tipo Eletrodo Horizontal (EH)

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para AECs do tipo eletrodo horizontal (EH), também chamados de contrapeso, com comprimentos $L = 15, 30, 45$ e 60 m. Assumiu-se um encapsulamento de concreto no formato de prisma quadrado, com espessura $D_c = 20$ cm e frações de concretagem de $h_c = 0, 1/4, 2/4, 3/4$ e $4/4$. Novamente, considerou-se solos com $\rho_{solo} = 300, 600, 1000, 2000$ e $4000 \Omega.m$.

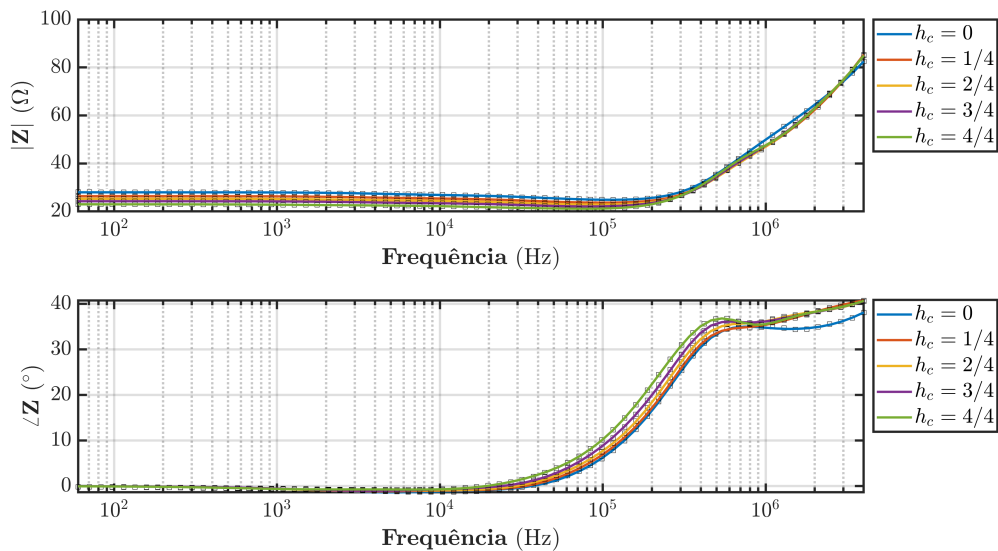
A lógica de obtenção dos resultados é igual à apresentada anteriormente na [seção 6.3](#), sendo inicialmente apresentadas as impedâncias harmônicas $Z(j\omega)$ (nas Figuras [6.19](#) e [6.20](#)), em seguida, os GPRs obtidos quando tais impedâncias são sujeitas às descargas PRI e SUB (Figuras [6.21](#) e [6.22](#)) e, por fim, os valores de impedância impulsiva Z_p ([Figura 6.23](#)), bem como as reduções percentuais de Z_p ([Figura 6.24](#)), obtidas para cada valor de ρ_{solo} , h_c e tipo de descarga (comparando-se com a situação de um eletrodo nu, sem concreto).

Por questão de simplicidade, apresentou-se neste capítulo apenas $Z(j\omega)$ e o GPR para AECs com $L = 15$ e 30 m, enquanto os resultados para os demais comprimentos de eletrodo, com 45 m e 60 m, são apresentados no [Apêndice B](#), nas Figuras [Figura B.1](#) a [B.4](#). Contudo, quanto aos resultados dos valores de Z_p bem como quanto aos cálculos das reduções percentuais do Z_p , todos eles são apresentados neste capítulo para todos os comprimentos de eletrodo, de 15 m a 60 m (nas Figuras [6.23](#) e [6.24](#)). Assim, a análise final do Z_p não é comprometida, por se tratar de uma importante grandeza que resume de forma concisa a resposta transitória dos aterramentos.

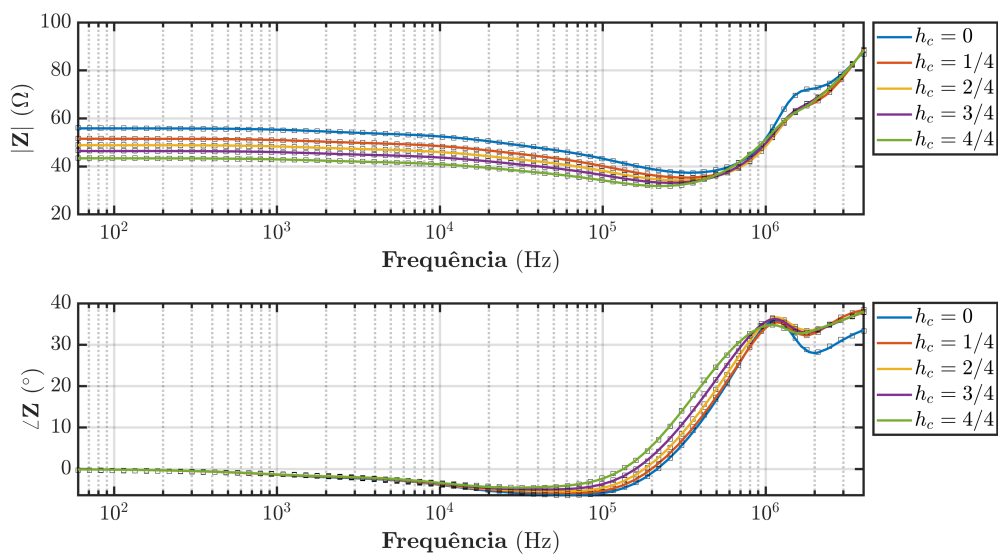
Primeiramente, nas Figuras [6.19](#) e [6.20](#) são apresentados os resultados da impedância harmônica para AEC-EH com $L = 15$ e 30 m, as quais foram simuladas no Comsol (pequenos quadrados) e a estimadas pelo *Vector Fitting* (curvas contínuas coloridas). Novamente, observa-se um excelente grau de conformidade entre a função racional estimada e os resultados do Comsol, tanto no módulo quanto no ângulo da impedância harmônica.

Observa-se nas curvas de impedância harmônica para AEC-EH (Figuras 6.19 e 6.20) um comportamento similar ao observado para AEC-EV, apresentado na seção 6.3 (embora os valores absolutos de $Z(j\omega)$ sejam diferentes). Isto é, à medida que o comprimento de encapsulamento (h_c) aumenta, há uma redução na curva da impedância harmônica (deslocando-se “para baixo”), principalmente na faixa de 60 Hz até aproximadamente 300 kHz. Além disso, essa redução no $|Z|$ se apresenta mais pronunciada quanto maior a resistividade do solo. Quanto ao ângulo da impedância $\angle Z$, nota-se que o aumento do comprimento de encapsulamento reduz o valor da frequência de ressonância, dado que a frequência para a qual ângulo da impedância é zero ($\angle Z = 0^\circ$) reduz com o aumento de h_c .

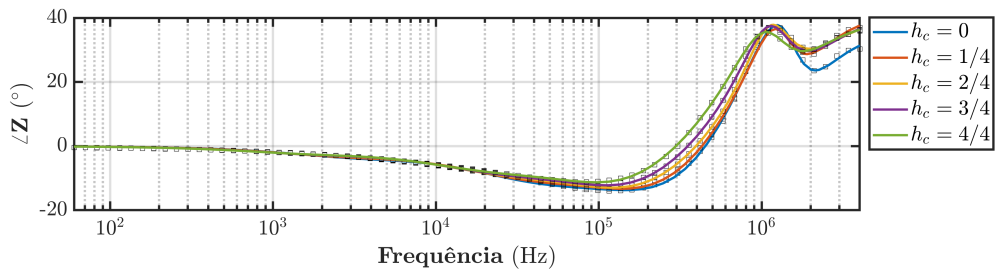
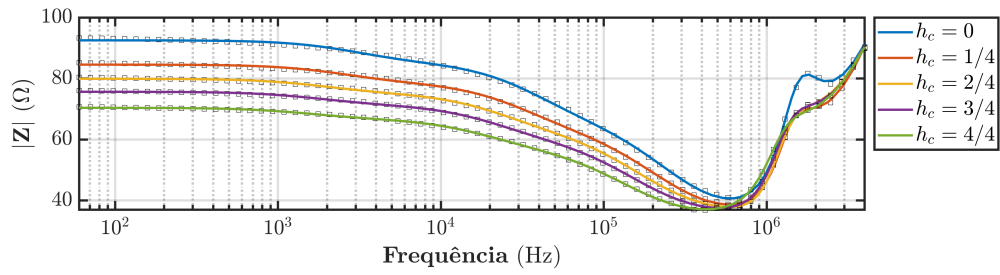
Figura 6.19 – Impedância harmônica $Z(j\omega)$ para AEC-EH com $L = 15$ m, $D_c = 20$ cm e diferentes frações de concretagem (h_c), para ρ_{solo} de 300 a 4000 Ω .m.



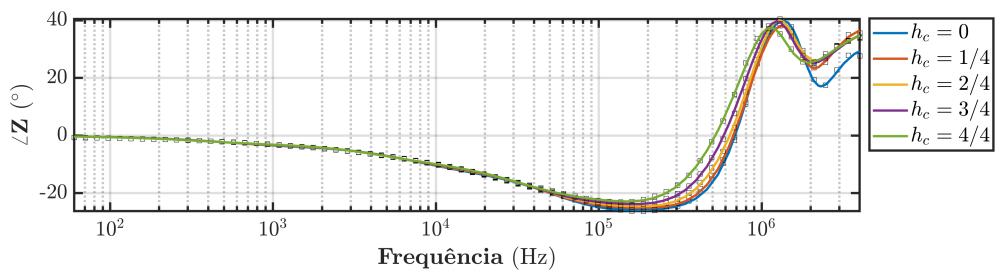
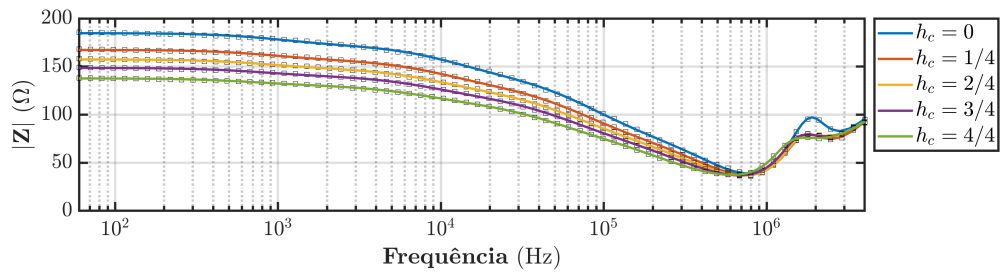
(a) Solo de 300 Ω .m



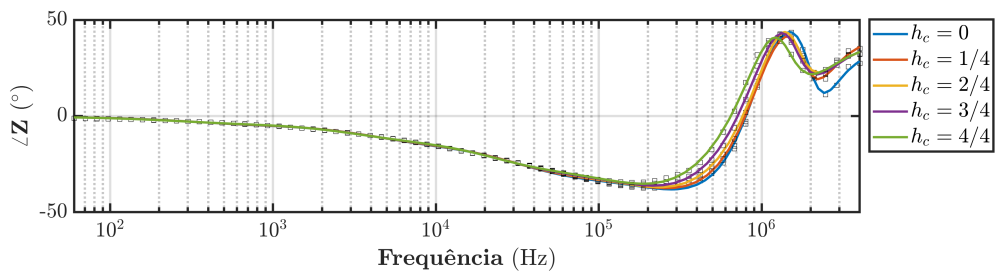
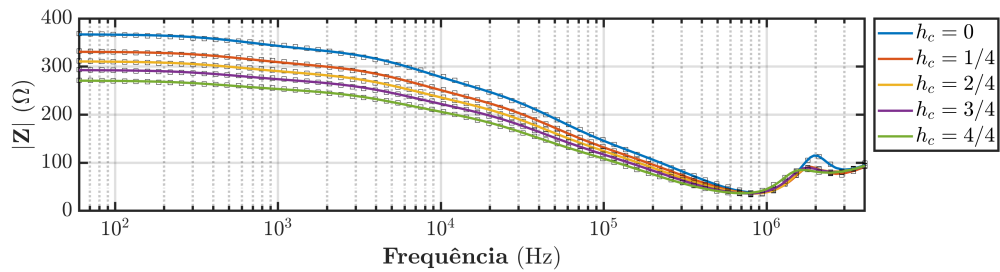
(b) Solo de 600 Ω .m



(c) Solo de 1000 Ω.m

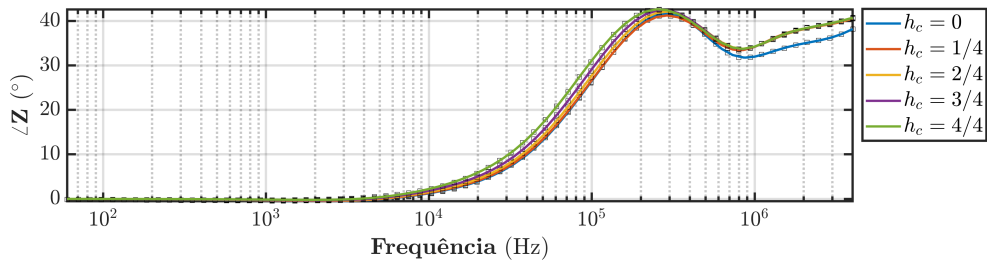
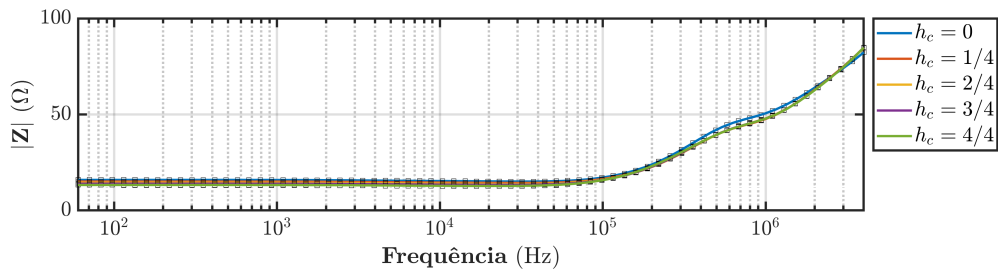


(d) Solo de 2000 Ω.m

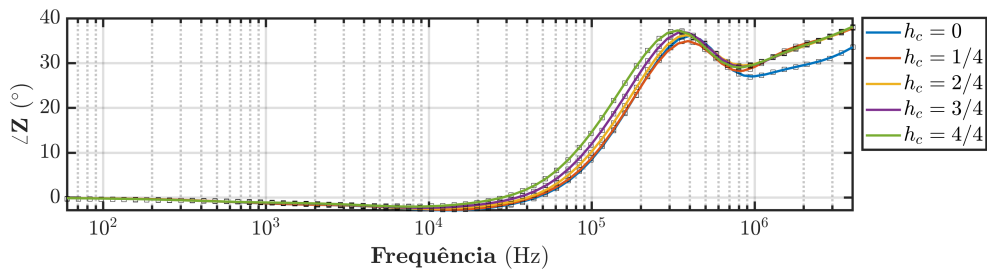
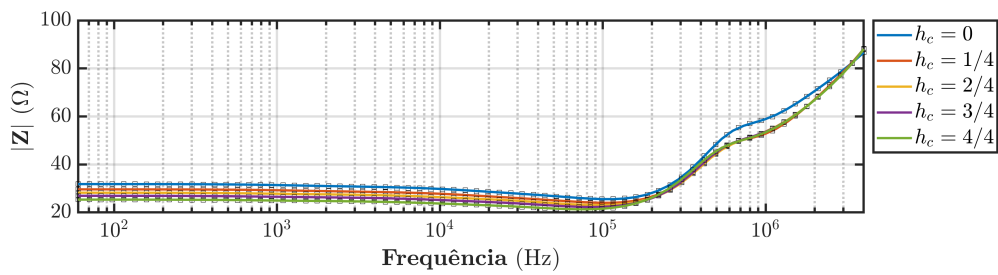


(e) Solo de 4000 Ω.m

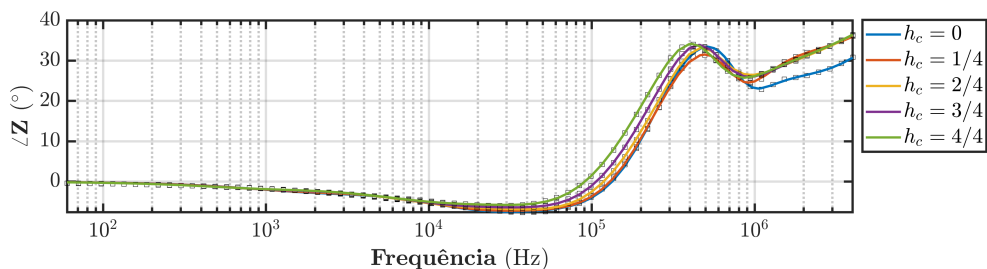
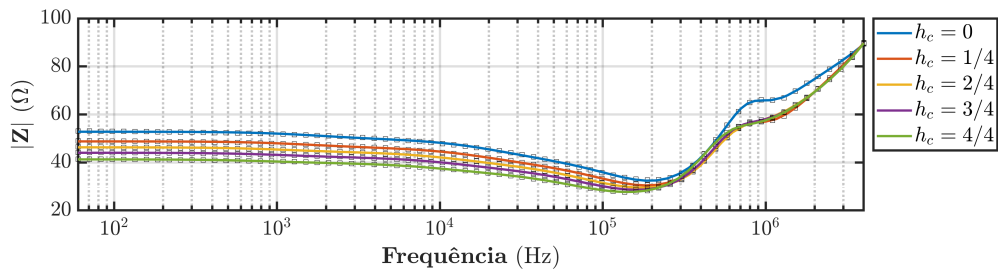
Figura 6.20 – Impedância harmônica $Z(j\omega)$ para AEC-EH com $L = 30$ m, $D_c = 20$ cm e diferentes frações de concretagem (h_c), para ρ_{solo} de 300 a 4000 Ω .m.



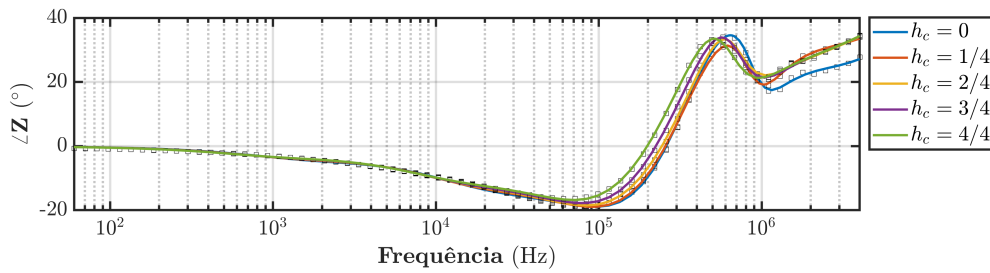
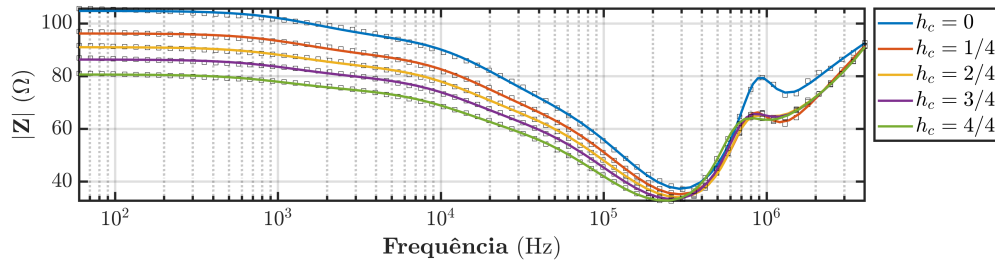
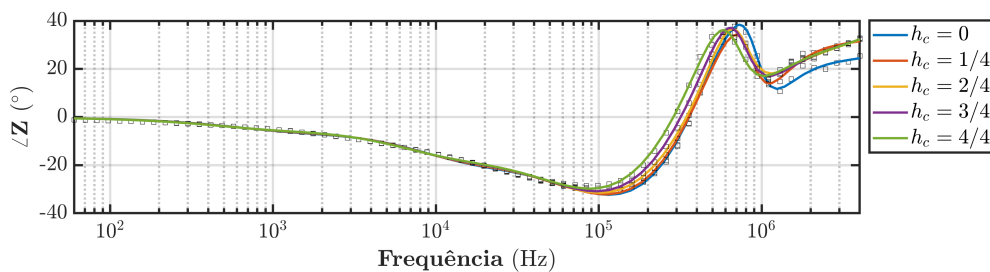
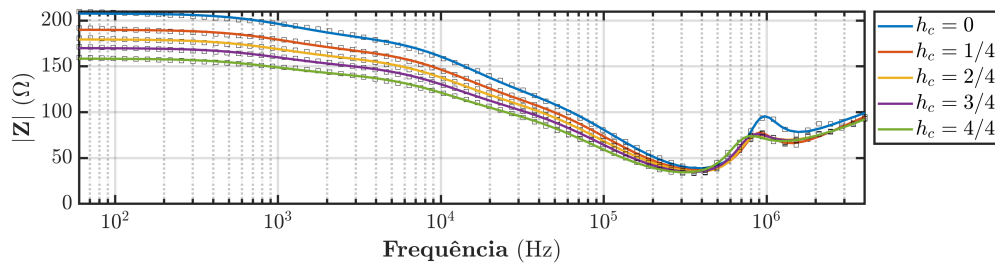
(a) Solo de 300 Ω .m



(b) Solo de 600 Ω .m



(c) Solo de 1000 Ω .m

(d) Solo de 2000 Ω .m(e) Solo de 4000 Ω .m

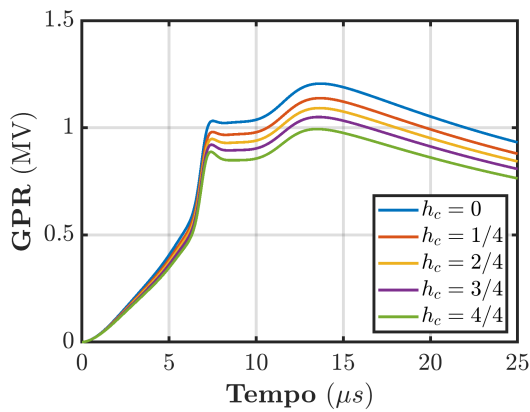
Em seguida, nas Figuras 6.21 e 6.22 são apresentados os GPRs³ obtidos quando descargas PRI e SUB são aplicadas nas impedâncias harmônicas das Figuras 6.19 e 6.20. Novamente, nesses resultados identifica-se uma redução no pico do GPR à medida que se assume resistividade de solo maiores, fato também observado para AEC-EV.

Na Figura 6.23 são apresentados os valores de impedância impulsiva Z_p obtidos, os quais são resultados valiosos para aplicações de aterramentos de torres de linhas de transmissão (LTs). Isso se dá pelo fato de que o Z_p fornece uma representação concisa e prática da resposta transitória do aterramento, permitindo a realização de estudos da taxa de ocorrência de *Backflashover* em linhas de transmissão (VISACRO et al.,

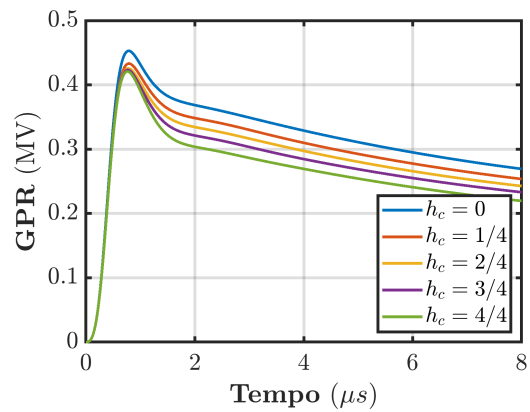
³ Os valores de pico do GPR bem como da impedância impulsiva (Z_p) são apresentados em forma de tabelas na seção B.3 do Apêndice B.

2015; VISACRO; SILVEIRA, 2016; VISACRO, 2018). Dessa forma, os resultados aqui apresentados, abrem caminhos para que se estude futuramente os possíveis ganhos (quanto à redução da taxa de *Backflashover*) em se concretar os cabos contrapeso do aterramentos de torres de LTs, principalmente aquelas que estão posicionadas em solos com média a alta resistividade ou que estão mais expostas à incidência de descargas atmosféricas por estarem em topos de montanhas ou locais de alta altitude.

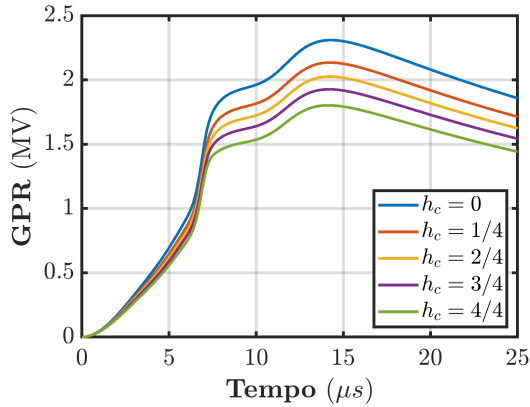
Figura 6.21 – GPR para AEC-EH com $L = 15$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.



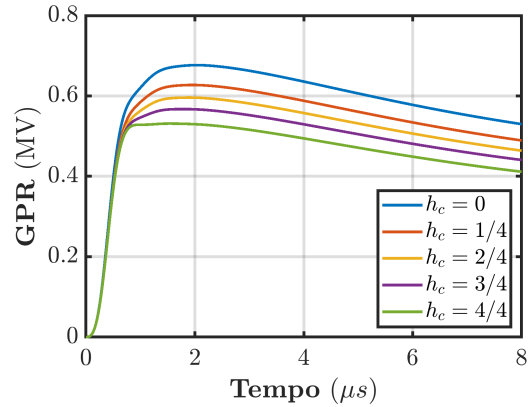
(a) Primeira descarga - Solo de 300 Ω .m



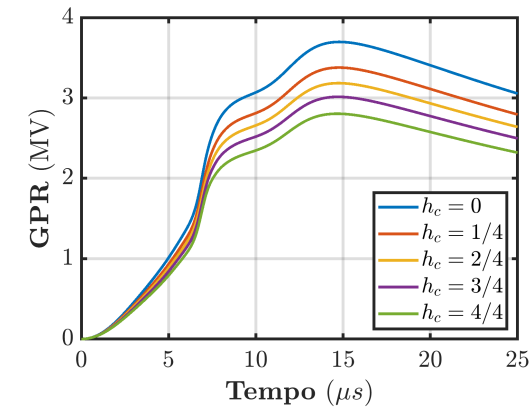
(b) Descarga Subsequente- Solo de 300 Ω .m



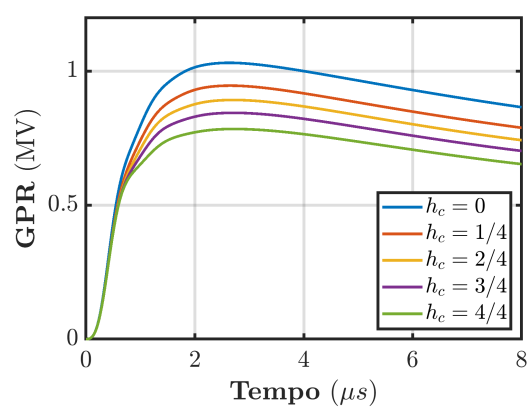
(c) Primeira descarga - Solo de 600 Ω .m



(d) Descarga Subsequente- Solo de 600 Ω .m.



(e) Primeira descarga - Solo de 1000 Ω .m



(f) Descarga Subsequente- Solo de 1000 Ω .m.

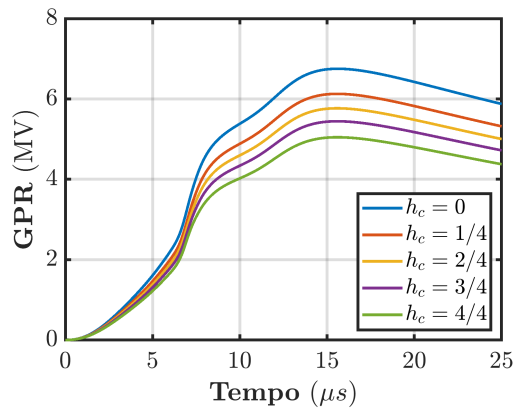
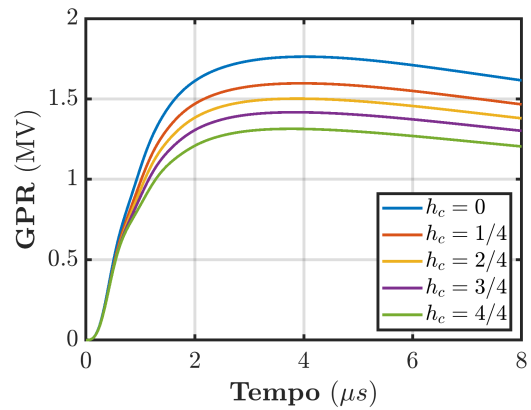
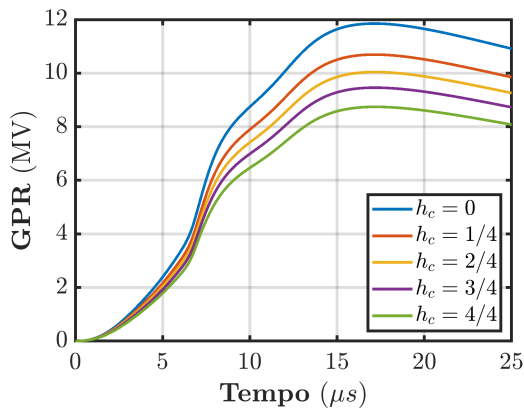
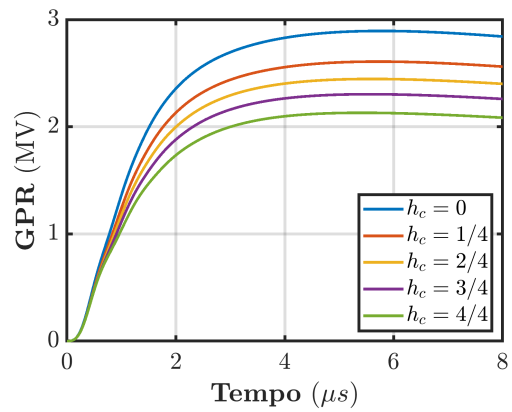
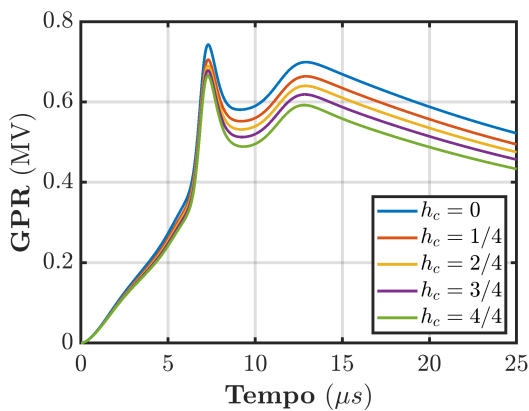
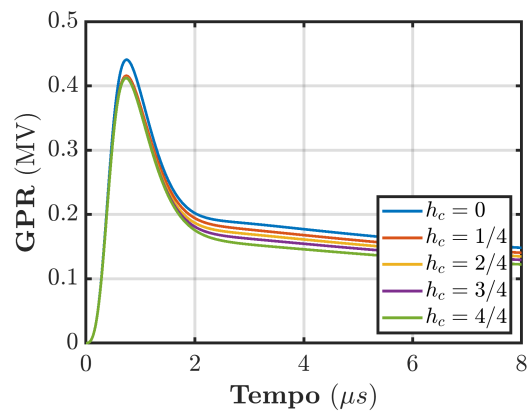
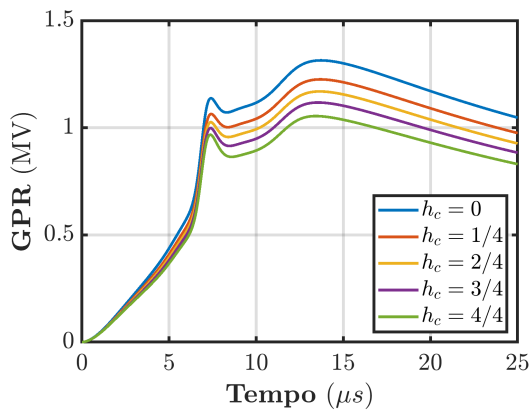
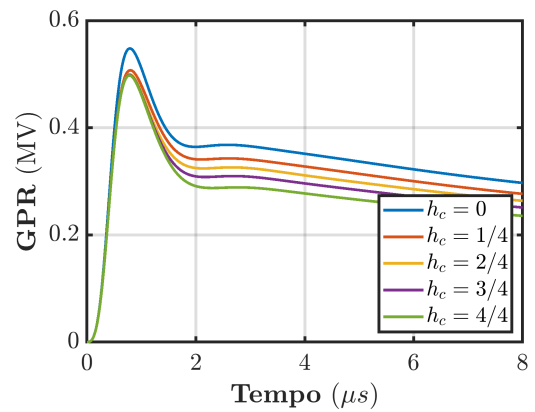
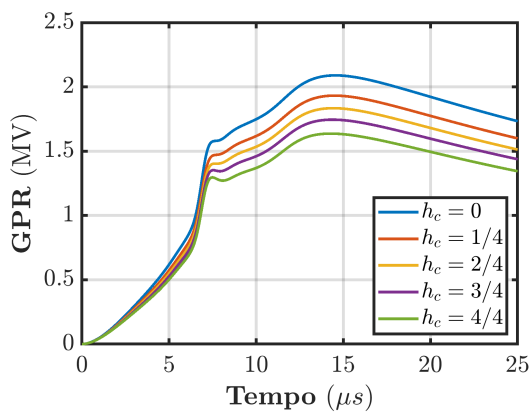
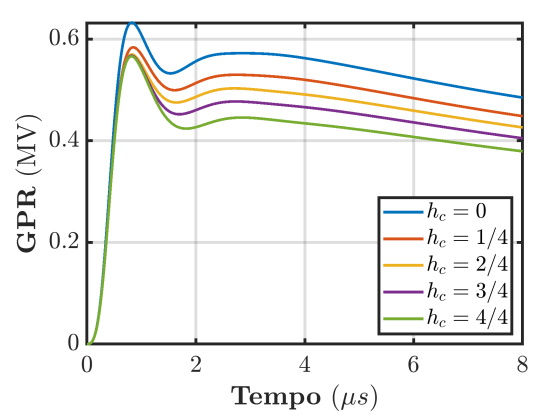
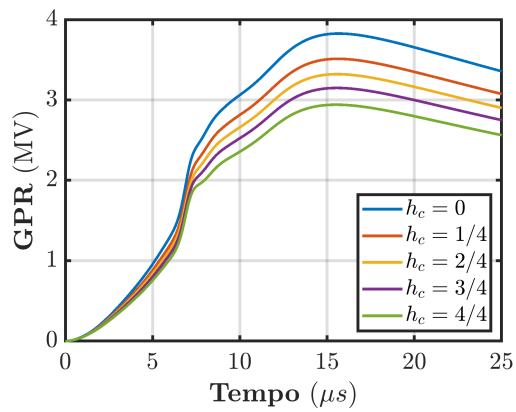
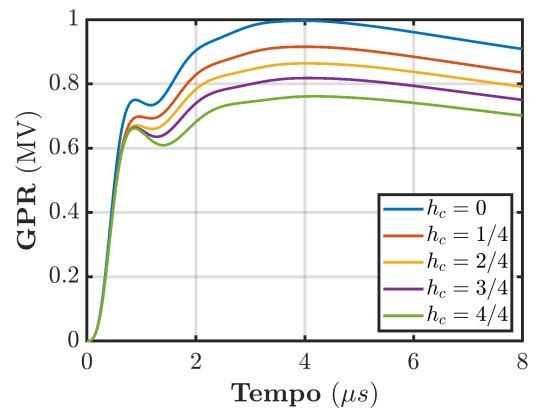
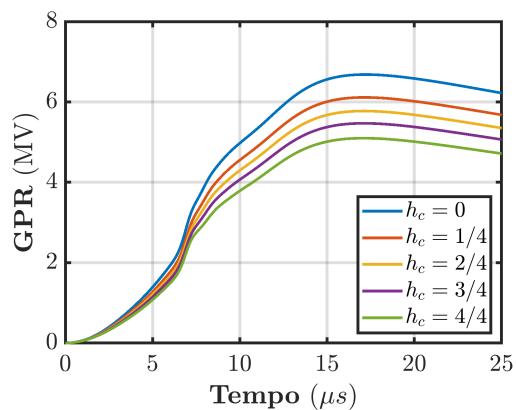
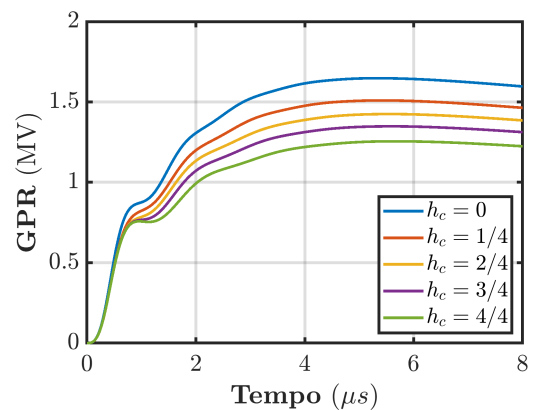
(g) Primeira descarga - Solo de 2000 Ω .m(h) Descarga Subsequente- Solo de 2000 Ω .m.(i) Primeira descarga - Solo de 4000 Ω .m(j) Descarga Subsequente- Solo de 4000 Ω .m.

Figura 6.22 – GPR para AEC-EH com $L = 30$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.

(a) Primeira descarga - Solo de 300 Ω .m(b) Descarga Subsequente- Solo de 300 Ω .m

(c) Primeira descarga - Solo de 600 Ω .m(d) Descarga Subsequente- Solo de 600 Ω .m.(e) Primeira descarga - Solo de 1000 Ω .m(f) Descarga Subsequente- Solo de 1000 Ω .m.(g) Primeira descarga - Solo de 2000 Ω .m(h) Descarga Subsequente- Solo de 2000 Ω .m.(i) Primeira descarga - Solo de 4000 Ω .m(j) Descarga Subsequente- Solo de 4000 Ω .m.

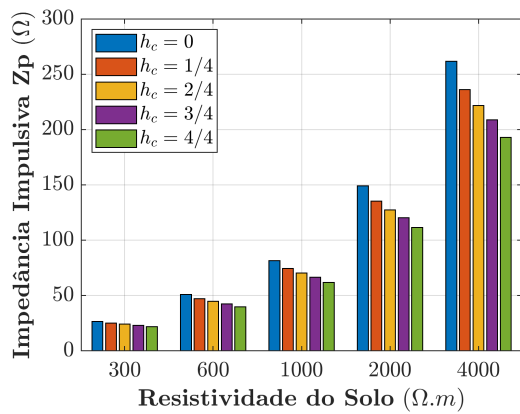
Embora os resultados de Z_p (em Ω) apresentados na [Figura 6.23](#) sejam importantes do ponto de vista de engenharia, os mesmos não indicam de forma clara o grau de eficiência que cada tipo de concretagem fornece para cada comprimento de eletrodo (L), tipo de solo (ρ_{solo}), comprimento de concretagem (h_c) e descarga (PRI ou SUB). Por esse motivo, na [Figura 6.24](#) é apresentada a redução percentual do Z_p para cada L , ρ_{solo} , h_c e tipo de descarga, permitindo uma análise minuciosa de AECs do tipo EH.

Analisando-se os resultados apresentados na [Figura 6.24](#), é perceptível que o progressivo aumento do comprimento do encapsulamento de concreto (h_c) promove sucessivos aumentos na redução percentual de Z_p , no entanto, investigando-se cada caso, fica notório que essa redução é sensível à resistividade do solo, comprimento do eletrodo e ao tipo de descarga. Mas, apesar disso, verificou-se que para todos os casos o primeiro quarto de encapsulamento ($h_c = 1/4$) é sempre o que promove a maior contribuição incremental na redução de Z_p quando comparado aos demais quartos de encapsulamento, fato também observado para AEC-EV e melhor explicado na [seção 6.3](#).

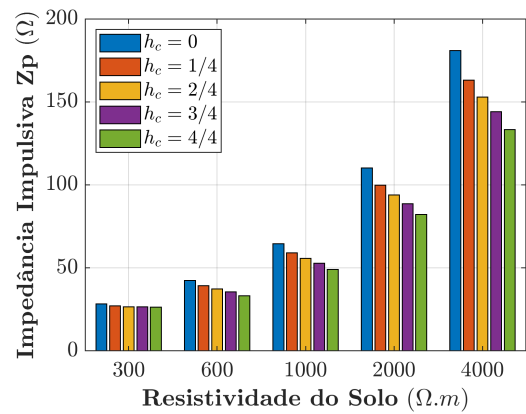
Observa-se na [Figura 6.24](#) que, de forma geral (e similarmente aos AEC-EV), para solos de maior resistividade a redução no Z_p (devido ao encapsulamento de concreto) é mais pronunciada (e, portanto, a eficiência devida ao concreto). Por exemplo, avaliando-se um AEC-EH com comprimento $L = 30$ m e fração de concretagem $h_c = 4/4$, sendo submetido à descarga PRI ([Figura 6.24c](#)), constata-se que para uma resistividade de solo de $300 \Omega.m$ a redução percentual no Z_p é de aproximadamente 10%, enquanto que para um solo de $4000 \Omega.m$ a redução é de 22%. Isso corrobora com a vocação natural dos AECs, que é justamente melhorar o aterramento em solos de alta resistividade. Adicionalmente, os resultados aqui apresentados evidenciam que o emprego de concreto em aterramentos contrapeso não somente reduz a resistência de baixa frequência R_{BF} (conforme indicado pela literatura) mas também reduz a impedância impulsiva Z_p (a qual resume a resposta transitória).

Por outro lado, a [Figura 6.24](#) indica que, para um mesmo tipo de descarga, quanto maior L menores serão as reduções de Z_p . Por exemplo, considerando-se um AEC-EH com $L = 15$ m, totalmente encapsulado ($h_c = 4/4$), em um solo com $1000 \Omega.m$, sujeito a descarga PRI ([Figura 6.24a](#)); o valor da redução percentual de Z_p (em relação a um eletrodo nu, $h_c = 0$) é de aproximadamente 24%. Já para um AEC, nas mesmas condições, mas com um $L = 60$ m ([Figura 6.24g](#)), tem-se uma redução de aproximadamente 16%. No entanto, nota-se que quanto menor a resistividade do solo, maior será essa variação devida ao comprimento do eletrodo. Por exemplo, novamente comparando-se a [Figura 6.24a](#) com a [Figura 6.24g](#), para um $\rho_{solo} = 600 \Omega.m$ e $h_c = 4/4$, nota-se que enquanto para um $L = 15$ m a redução no Z_p é de 22%, para um $L = 60$ m a redução é de 12%. Contudo, para as mesmas condições, avaliando-se um solo de $4000 \Omega.m$, os resultados para $L = 15$ e 60 m serão respectivamente de 26% e 22%, o que é uma variação muito menor.

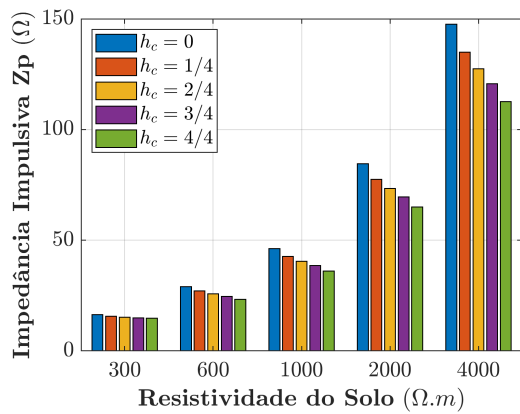
Figura 6.23 – Impedância impulsiva Z_p (Ω) para AEC-EH com $L = 15$ a 60 m, $D_c = 20$ cm e diferentes frações de concretagem h_c . Descargas: PRI e SUB.



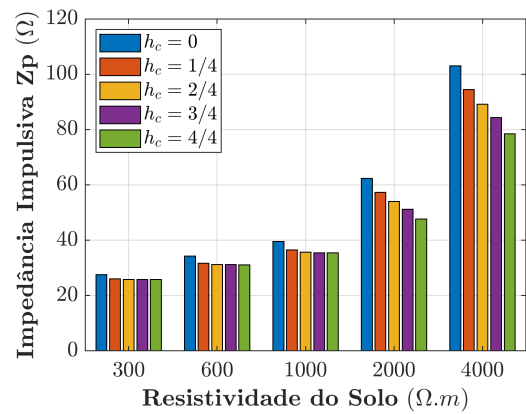
(a) $L = 15$ m - Primeira descarga



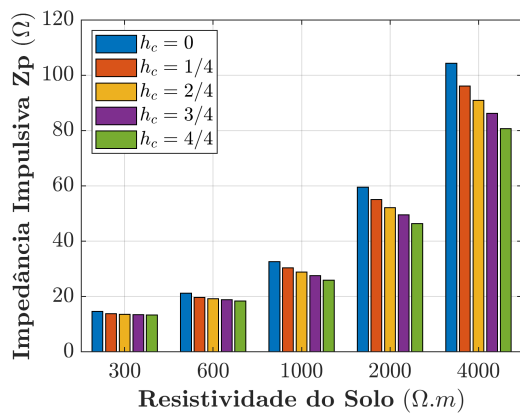
(b) $L = 15$ m - Descarga Subsequente



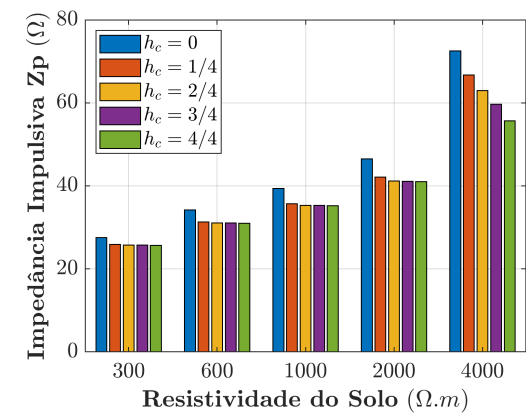
(c) $L = 30$ m - Primeira descarga



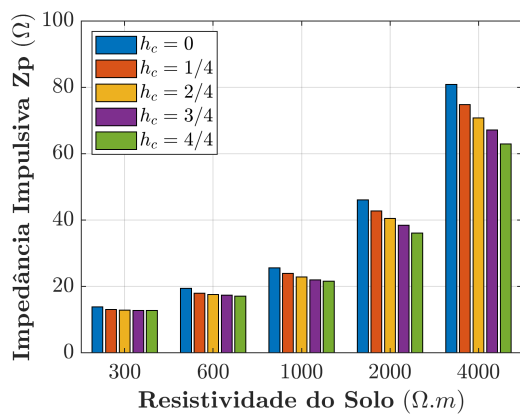
(d) $L = 30$ m - Descarga Subsequente



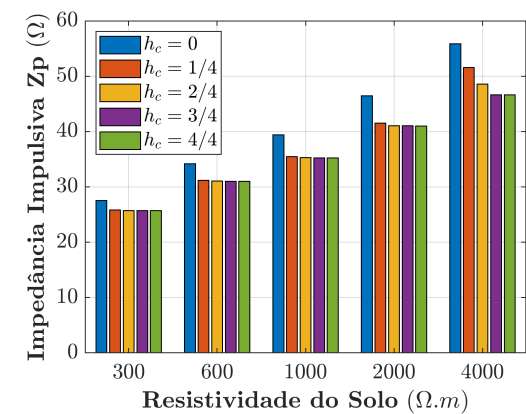
(e) $L = 45$ m - Primeira descarga



(f) $L = 45$ m - Descarga Subsequente

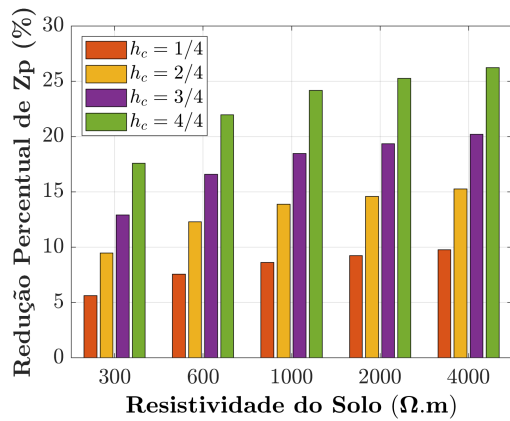
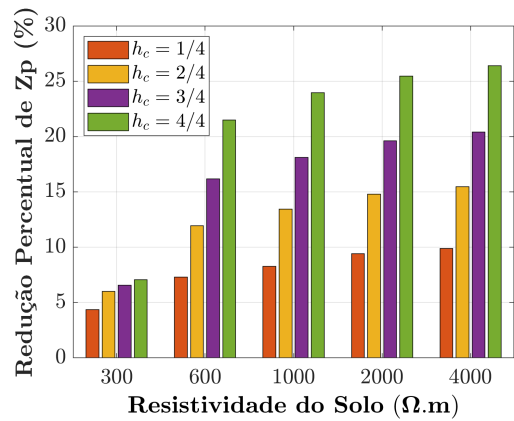
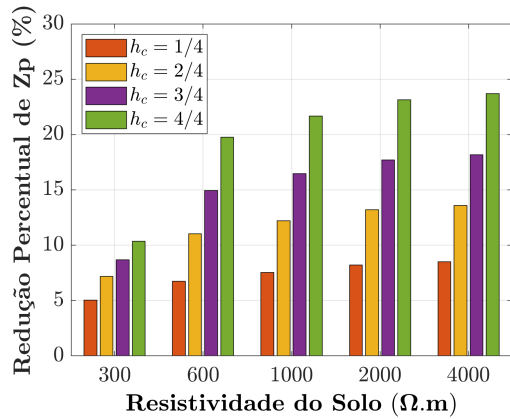
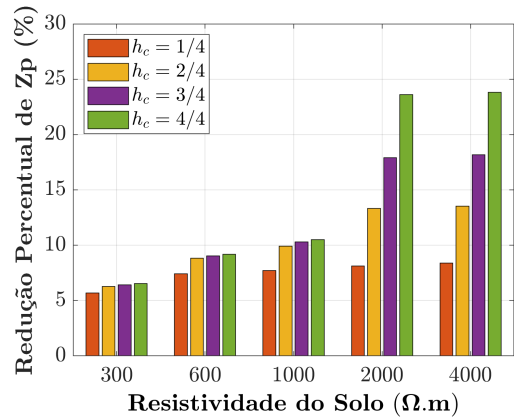
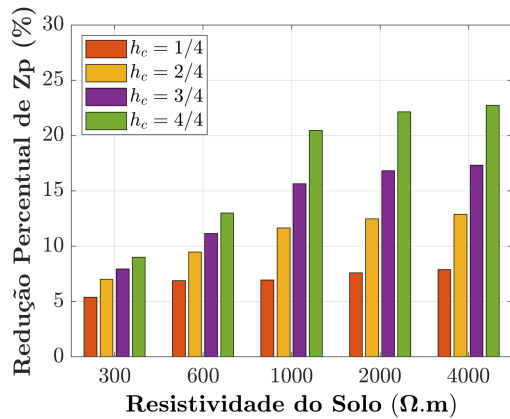
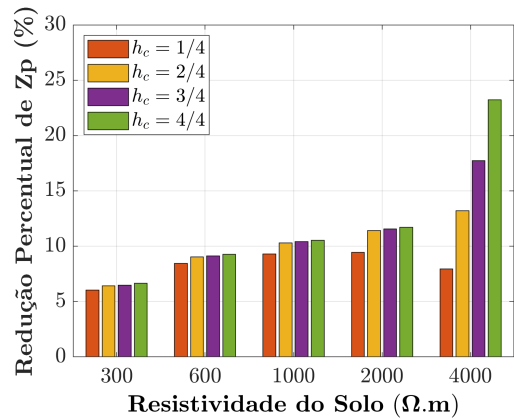
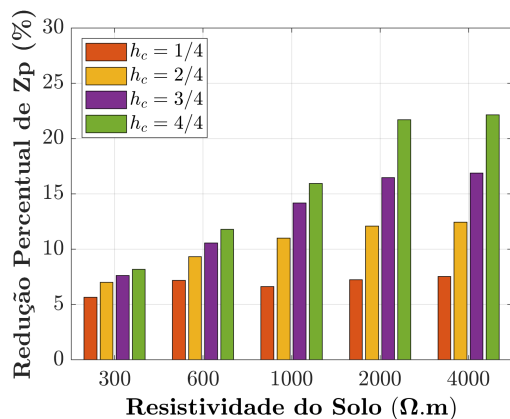
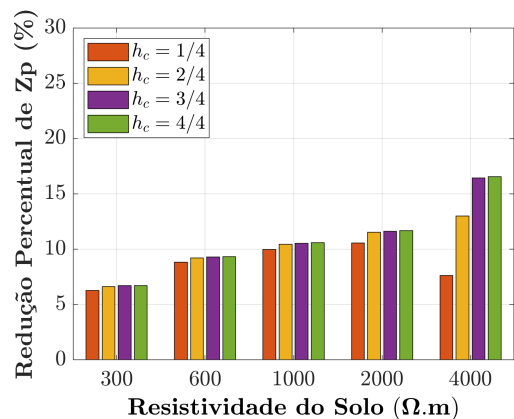


(g) $L = 60$ m - Primeira descarga



(h) $L = 60$ m - Descarga Subsequente

Figura 6.24 – Redução percentual de Z_p (%) para AEC-EH com $L = 15$ a 60 m, considerando PRI e SUB. Referência para o cálculo: Z_p do eletrodo nu.

(a) $L = 15$ m - Primeira descarga(b) $L = 15$ m - Descarga Subsequente(c) $L = 30$ m - Primeira descarga(d) $L = 30$ m - Descarga Subsequente(e) $L = 45$ m - Primeira descarga(f) $L = 45$ m - Descarga Subsequente(g) $L = 60$ m - Primeira descarga(h) $L = 60$ m - Descarga Subsequente

Quanto à influência do tipo de descarga na eficiência do AEC-EH, notou-se que, fixando-se os valores de L , ρ_{solo} e h_c , as reduções percentuais no valor de Z_p para descargas PRI são superiores às reduções de Z_p para descarga SUB. Por exemplo, tomando-se um AEC-EH com $L = 45$ m, comparando-se a [Figura 6.24e](#) com a [Figura 6.24f](#), percebe-se que para um $\rho_{solo} = 1000 \Omega.m$ e $h_c = 4/4$, a redução do Z_p para PRI é de aproximadamente 20%, enquanto que para SUB é de aproximadamente 11%. Esse comportamento já era esperado, conforme mencionado na [seção 6.3](#), contudo, não se identificou na literatura nenhum trabalho que quantificasse esse fenômeno, sendo essa uma contribuição para a análise do uso de AECs em aterramentos contrapeso de torres de linhas de transmissão.

Ainda sobre a influência do tipo de descarga, observou-se que, para descarga SUB, à medida que se toma comprimentos de eletrodo maiores ([Figuras 6.24b, 6.24d, 6.24f e 6.24h](#)), há uma considerável supressão nas reduções de Z_p . Embora esse comportamento também seja observado para PRI, é evidente que é muito menos pronunciado que para SUB. Nota-se que tal supressão começa a partir de solos com menor resistividade e, à medida que o L aumenta, vai afetando solos com maiores resistividades. Isso também foi observado para AEC-EV, no entanto, como aqui é avaliada uma maior quantidade bem como valores maiores de comprimento de eletrodos, o efeito fica melhor evidenciado. Notoriamente, esse fenômeno ocorre pelo aumento da indutância longitudinal do eletrodo à medida que se toma eletrodos de maior comprimento (conforme indicado na [Figura 2.3](#)), fazendo com que a corrente total injetada no aterramento se dissipe para o solo majoritariamente no primeiro quarto de encapsulamento, na forma de corrente transversal. Assim, os demais três quartos de encapsulamento dissiparão uma corrente muito menor que a do primeiro quarto, tornando muito pequena a contribuição dos três últimos quartos na redução de Z_p .

A mencionada supressão nas reduções de Z_p com o aumento de L irá ocorrer de forma mais “lenta” para solos de alta resistividade, uma vez que nesse caso a corrente transversal no primeiro quarto do eletrodo será menor que para um solo de baixa resistividade, fazendo com que a corrente que chegue nos demais três quartos do eletrodo ainda seja considerável, tornando maior a eficiência do concreto nessas últimas porções do eletrodo. Em outras palavras, para um solo de alta resistividade a corrente transversal (no sentido eletrodo-solo) é muito melhor distribuída ao longo do comprimento do eletrodo que para um solo de baixa resistividade, aumentando o aproveitamento do concreto ao longo de todo o eletrodo.

Comparando-se os resultados de um AEC-EH de 30 m ([Figuras 6.24c e 6.24d](#)) com um AEC-EV de mesmo comprimento ([Figuras 6.18c e 6.18d](#)), observa-se que em geral as reduções de Z_p são maiores para um EV que para um EH. Por exemplo, considerando-se um $\rho_{solo} = 2000 \Omega.m$, $h_c = 4/4$ e PRI, nota-se que a redução de Z_p para EV foi de 31% enquanto que para EH foi de 23%. Isso se deve ao fato de que em um EV a corrente transversal, para um dado ponto do eletrodo, é igual em todas as direções, fazendo com que o encapsulamento de concreto seja igualmente aproveitado em todas as direções (ou

seja, em 360° ao redor do eixo do eletrodo). Por outro lado, em um EH, pouca corrente transversal flui para cima, no sentido do eletrodo para a superfície do solo, dado ser um caminho de alta impedância devido ao ar. Assim, em EHs, a corrente transversal só é uniforme do plano horizontal que contém o eletrodo para baixo (ou seja, em 180° ao redor do eixo do eletrodo), fazendo com que a porção superior do encapsulamento de concreto (que fica entre o eletrodo e a superfície do solo) seja muito menos eficiente quanto à redução de Z_p que a porção inferior (que fica abaixo do eletrodo).

Finalmente, analisando-se a [Figura 6.24](#) pode-se dizer que, considerando solos de média e alta resistividade, com $\rho_{solo} \geq 1000 \Omega.m$, independentemente do comprimento do eletrodo, a concretagem total do eletrodo ($h_c = 4/4$) foi capaz de promover uma redução média no valor de Z_p de 22%, para PRI. Já para SUB, as reduções variam consideravelmente entre 10% e 26%. Esse é um resultado importante que além de aumentar a compreensão da resposta transitória de aterramentos concretados do tipo contrapeso (AEC-EH) permite que futuros estudos sejam feitos quanto ao seu uso em aterramentos de torres de linhas de transmissão e sua repercussão na redução na taxa de *backflashover*. Além disso, os percentuais de redução de Z_p podem ser potencialmente melhorados se a espessura do encapsulamento de concreto (D_c) for aumentada.

Conclusões e Trabalhos Futuros

7.1 Conclusões

Nesta tese, foi realizado um estudo aprofundado e original quanto à resposta transitória de aterramentos encapsulados por concreto (AEC), frente a descargas atmosféricas, voltado a uma perspectiva de utilização dos mesmos em aterramentos de linhas de transmissão. Da revisão do estado da arte, notou-se que muitos trabalhos se prestaram a estudar AECs apenas em baixas frequências, sendo que aqueles que analisaram a resposta transitória (altas frequências) geralmente o fizeram para situações limitadas de: tipos e comprimentos de eletrodos, resistividade de solo, tipos de descargas e comprimentos de encapsulamento de concreto. Dessa forma, visando sanar tal lacuna no estado da arte, o presente trabalho foi desenvolvido, de forma que a compreensão sobre os AECs fosse expandida e detalhada.

Dada a dificuldade e limitações de tempo quanto a se realizar de forma experimental um estudo tão extensivo da resposta transitória de AECs, envolvendo diferentes tipos de eletrodos, em diferentes tipos de solo, assumindo diferentes tipos de comprimento de concretagem e diferentes descargas, optou-se por realizar uma abordagem majoritariamente por simulação. Para tal, foi adotada uma ferramenta de simulação através do método dos elementos finitos (MEF) para a simulação dos AECs, na qual foi realizada uma rigorosa modelagem eletromagnética, permitindo contabilizar os efeitos resistivos, indutivos, capacitivos e propagação de ondas. Além disso, por se tratar de um estudo para descargas atmosféricas, envolvendo naturalmente componentes de altas frequências, modelou-se o solo considerando a dependência da frequência que os seus parâmetros resistividade e permissividade elétrica possuem.

Diante do exposto, nesta tese foi realizada uma análise de AECs dos tipos eletrodo vertical (haste) com 3 e 30 m de comprimento e eletrodo horizontal (contrapeso) com 15, 30, 45 e 60 m. Para todos esses tipos e comprimento de eletrodo foram consideradas resistividades de solo nos valores de 300, 600, 1000, 2000 e 4000 $\Omega.m$, contemplando baixas,

médias e altas resistividades. Mais que isso, para cada uma das situações mencionadas, foram estudados cinco tipos de encapsulamentos de concreto, incluindo encapsulamentos parciais e total, a saber: eletrodo nu (sem encapsulamento) e eletrodo encapsulado em 1/4, 2/4, 3/4 e 4/4. Para todas as combinações anteriores de tipo e comprimento de eletrodo, resistividade de solo e comprimento de encapsulamento, foram obtidos os resultados das respostas transitórias para primeiras descargas (PRI) e descargas subsequentes (SUB), através do estudo da impedância harmônica $Z(j\omega)$ (na faixa de 60 Hz a 4 MHz), GPR e impedância impulsiva Z_p . Finalmente, ao todo foram estudados 150 diferentes aterramentos, sendo os mesmos avaliados quanto a descargas PRI e SUB, totalizando 300 diferentes respostas transitórias, permitindo, assim, que as seguintes conclusões sejam tecidas:

1. A contabilização do efeito da dependência da frequência que a resistividade e permissividade do solo possuem são importantes na simulação e análise de AECs e não deve ser negligenciada. A importância desse fenômeno é maior para: AECs posicionados em solos de alta resistividade, eletrodos com comprimentos longos, menores comprimentos de encapsulamento de concreto, assim como excitações de primeira descarga (PRI).
2. A resistividade do concreto é uma grandeza que, conforme indicado pela literatura, pode ter resistividade aproximada entre 30 e 150 $\Omega.m$, a depender de sua composição, traço e hidratação no processo de fabricação. À primeira vista, essa variabilidade aparenta ser importante, indicando uma possível alteração na resposta transitória do AEC. Contudo, observou-se que tal variabilidade só promove uma alteração significativa da impedância impulsiva para AECs fincados em solos de baixa resistividade (ex: 300 $\Omega.m$) e/ou com pequeno comprimento (ex: haste com 3 m), de forma que para esses casos é possível chegar a uma variação de até 30% no valor de Z_p quer para PRI ou SUB. Por outro lado, para um solo de alta resistividade (4000 $\Omega.m$) e/ou comprimento de eletrodo longo (30 m) a variação no valor de Z_p é menor que 5%. Dessa forma, esse importante achado corrobora com a utilização dos AECs, pois, dado ser um tipo de aterramento primordialmente para aplicações em solos de alta resistividade, não há necessidade de uma grande preocupação com o preparo ou composição do concreto.
3. Para o AEC do tipo eletrodo vertical (haste) com 3 m, observou-se que em solos com média e alta resistividade ($\rho_{solo} \geq 1000 \Omega.m$), a concretagem total do eletrodo ($h_c = 4/4$) promoveu uma redução média no valor de Z_p de aproximadamente 40%, tanto para PRI quanto para SUB.
4. Quanto aos AECs do tipo eletrodo horizontal (contrapeso), observou-se que considerando solos de média e alta resistividade, com $\rho_{solo} \geq 1000 \Omega.m$, a concretagem total do eletrodo ($h_c = 4/4$) foi capaz de promover uma redução média no valor de

Z_p de 22%, para PRI, independentemente do comprimento de eletrodo. Por outro lado, para SUB, as reduções variam consideravelmente entre 10% e 26%, a depender do comprimento do eletrodo e da resistividade do solo.

5. O primeiro quarto de encapsulamento de concreto é o que produz o maior ganho incremental na redução da impedância impulsiva Z_p , quer para AEC do tipo EV ou EH. Isso ocorre pelo fato de que, em aterramentos, a região de maior dissipação de corrente para o solo é a mais próxima do ponto de injeção da corrente no aterramento. Assim, como o primeiro quarto de concretagem dissipará mais corrente que os demais, esse fornecerá uma maior eficiência que os outros. No entanto, concretar os demais quartos do eletrodo (ou completamente) fornece uma redução total no Z_p maior que a do primeiro quarto de encapsulamento.
6. O emprego de concreto em aterramentos de torres de linhas de transmissão é uma técnica que se mostra promissora principalmente para torres posicionadas em solos com altas resistividades e/ou em localizações mais expostas à incidência de descargas atmosféricas, como por exemplo em topos de montanhas ou serras. Assim sendo, pode-se melhorar a resposta transitória do aterramento de torres mais vulneráveis, contribuindo com uma redução da probabilidade de ocorrência de *backflashover*.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros, decorrentes dos resultados e análises da presente pesquisa:

- Estudo da redução da taxa de *backflashover* em linhas de transmissão, devido à implementação de AECs em aterramentos de torres de linhas de transmissão, principalmente aquelas que estão posicionadas em solos de média e alta resistividade.
- Avaliação dos ganhos e efeitos do uso do concreto em outras estruturas de aterramentos, tais como de: torres de telecomunicação (rádio ou telefonia móvel), torres de aerogeradores em parques eólicos e sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) de edificações.
- Desenvolvimento de síntese de circuitos que representem as impedâncias harmônicas de AECs, de forma a se obter modelos circuitais para uso em estudos especializados de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos que façam o uso de AECs.
- Mensurar o ganho na resposta transitória de AECs, promovido pelo aumento da espessura do encapsulamento de concreto.
- Avaliar a resposta transitória de fundações de torres de linhas de transmissão, bem como de postes de sistemas de distribuição.

- Avaliar a resposta transitória de aterramentos encapsulados com cimento condutivo, de resistividade menor que o concreto convencional.
- Desenvolver materiais aprimoradores de aterramentos, inspirados no concreto de fundação convencional, no entanto, com resistividade menor.

Referências Bibliográficas

AKBARI, M.; SHESHYEKANI, K.; ALEMI, M. R. The effect of frequency dependence of soil electrical parameters on the lightning performance of grounding systems. *IEEE*, v. 55, p. 739–746, 2013. ISSN 1558-187X. Citado 6 vezes nas páginas 49, 50, 51, 117, 118 e 119.

ALIPIO, R.; CONCEIÇÃO, D.; CONTI, A. D.; YAMAMOTO, K.; DIAS, R. N.; VISACRO, S. A comprehensive analysis of the effect of frequency-dependent soil electrical parameters on the lightning response of wind-turbine grounding systems. *Electric Power Systems Research*, Elsevier BV, v. 175, p. 105927, out. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.105927>>. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 65.

ALIPIO, R.; VISACRO, S. Frequency dependence of soil parameters: Effect on the lightning response of grounding electrodes. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 55, n. 1, p. 132–139, fev. 2013. ISSN 1558-187X. Citado na página 50.

ALIPIO, R.; VISACRO, S. Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, v. 56, n. 5, p. 1163–1171, out. 2014. ISSN 1558-187X. Citado 11 vezes nas páginas 10, 14, 4, 15, 23, 24, 47, 48, 55, 65 e 78.

ALIPIO, R. S. *Dependência da Frequência dos Parâmetros do Solo: Efeito no Comportamento Impulsivo de Aterramentos Elétricos*. Tese (phdthesis) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 10, 57, 58 e 59.

ALMAGUER, H. A. D.; COELHO, R. A.; COELHO, V. L.; PIANTINI, A. 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 35 e 45.

ALMAGUER, H. A. D.; SAQUETTI, D.; COELHO, V. L. Um estudo do uso da base engastada dos postes de concreto como aterramento para redes aéreas de distribuição. *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, v. 6, n. 1, p. 9–21, nov 2020. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 46.

ANDERSON, R. B.; ERIKSSON, A. J. Lightning parameters for engineering application. *Electra*, v. 69, p. 65–102, 1980. Citado na página 25.

ANDROVITSANEAS, V. P.; CHRISTODOULOU, C. A.; GONOS, I. F.; STATHOPULOS, I. A. Electric resistivity variation of ground enhancing compounds under field conditions. In: *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. [S.l.]: IEEE, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 21, 40, 46 e 70.

ANDROVITSANEAS, V. P.; GONOS, I. F.; STATHOPULOS, I. A. Performance of ground enhancing compounds during the year. In: *2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. [S.l.]: IEEE, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 11, 12, 34 e 45.

ANDROVITSANEAS, V. P.; GONOS, I. F.; STATHOPULOS, I. A. Transient impedance of grounding rods encased in ground enhancing compounds. In: *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. Shanghai, China: IEEE, 2014. Citado 7 vezes nas páginas 2, 11, 12, 13, 20, 36 e 45.

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*, Elsevier BV, v. 139, p. 109–115, oct 2016. Citado 3 vezes nas páginas 2, 37 e 46.

ANDROVITSANEAS, V. P.; GONOS, I. F.; STATHOPULOS, I. A. Research and applications of ground enhancing compounds in grounding systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Institution of Engineering and Technology (IET), v. 11, n. 13, p. 3195–3201, sep 2017. Citado 4 vezes nas páginas 2, 13, 39 e 46.

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 33 e 45.

BEZERRA, G. V. N.; MOREIRA, F. A.; FERREIRA, T. V. Malhas de aterramento encapsuladas por concreto. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE*. [S.l.: s.n.], 2023. Citado 4 vezes nas páginas 5, 42, 46 e 55.

BEZERRA, G. V. N.; MOREIRA, F. A.; FERREIRA, T. V.; VASCONCELLOS, F. M. Avaliação da resposta em frequência de aterramentos considerando solo com parâmetros dependentes da frequência utilizando o mef. In: *Congresso Brasileiro de Automática - CBA*. [S.l.: s.n.], 2020. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 88.

BEZERRA, G. V. N.; MOREIRA, F. A.; FERREIRA, T. V.; ALIPIO, R. S. Concrete encased grounding: Lightning response analysis considering the frequency dependence of soil. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 66, n. 3, p. 879–889, abr. 2024. Citado 6 vezes nas páginas 6, 20, 42, 43, 46 e 55.

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 4 vezes nas páginas 12, 13, 33 e 45.

CABRAL, R. J.; GAZZANA, D. S.; TRONCHONI, A. B.; DIAS, G. A. D.; LEBORGNE, R. C.; BRETAS, A. S.; TELLÓ, M. Comparative performance of impulsive grounding systems embedded in concrete: an experiment in reduced scale. In: *International Conference on Lightning Protection*. Estoril, Portugal: [s.n.], 2016. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 46.

CHISHOLM, W.; CHOW, Y.; SRIVASTAVA, K. Lightning surge response of transmission towers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), PAS-102, n. 9, p. 3232–3242, sep 1983. Citado na página 27.

CHISHOLM, W. A.; ANDERSON, J. G. *Guide for Transmission Line Grounding: A Roadmap for Design, Testing, and Remediation*. [S.l.], 2004. v. 1002021. Citado na página 19.

CLAUSEN, W.; FACCIÓNI, M.; RAIZER, A.; COELHO, V. L.; SOLIGO, V.; LIMA, M. R. de; SILVA, E. L. da. Nova técnica de aterramento para sistemas de distribuição de energia. In: *Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI)*. [S.l.: s.n.], 2004. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 45.

COMSOL. *COMSOL Multiphysics Reference Manual*. [S.l.], 2017. Disponível em: <https://doc.comsol.com/5.3/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf>. Citado na página 4.

COMSOL. *RF Module User's Guide*. [S.l.], 2022. Disponível em: <<https://doc.comsol.com/6.1/doc/com.comsol.help.rf/RFModuleUsersGuide.pdf>>. Citado 5 vezes nas páginas 47, 49, 116, 117 e 118.

CONTI, A. D.; VISACRO, S. Analytical representation of single and double-peaked lightning current waveforms. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, v. 49, n. 2, p. 448–451, maio 2007. ISSN 1558-187X. Citado 4 vezes nas páginas 10, 14, 25 e 26.

DESCHRIJVER, D.; MROZOWSKI, M.; DHAENE, T.; ZUTTER, D. D. Macromodeling of multiport systems using a fast implementation of the vector fitting method. *IEEE Microwave and wireless components letters*, IEEE, v. 18, n. 6, p. 383–385, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 48.

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 na página 12.

DWIGHT, H. Calculation of resistances to ground. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, IEEE, v. 55, n. 12, p. 1319–1328, 1936. Citado na página 61.

FAGAN, E. J.; LEE, R. H. The use of concrete-enclosed reinforcing rods as grounding electrodes. *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), IGA-6, n. 4, p. 337–348, jul. 1970. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/tiga.1970.4181193>>. Citado 8 vezes nas páginas 2, 13, 30, 40, 45, 60, 61 e 62.

FREI, W. *Meshing Your Geometry: When to Use the Various Element Types*. [S.l.], 2013. Disponível em: <<https://www.comsol.com/blogs/meshing-your-geometry-various-element-types/>>. Citado na página 121.

FREI, W. *Improving Your Meshing with Swept Meshes*. [S.l.], 2015. Disponível em: <<https://www.comsol.com/blogs/improving-your-meshing-with-swept-meshes/>>. Citado na página 121.

- FREI, W. *Computational Electromagnetics Modeling: Which Module to Use?* [S.l.], 2020. Disponível em: <<https://www.comsol.com/blogs/computational-electromagnetics-modeling-which-module-to-use/>>. Citado 2 vezes nas páginas 116 e 117.
- GERI, A. Behaviour of grounding systems excited by high impulse currents: the model and its validation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 14, n. 3, p. 1008–1017, 1999. Citado na página 55.
- 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 10.
- GRCEV, L. Impulse efficiency of simple grounding electrode arrangements. In: *2007 18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*. [S.l.]: IEEE, 2007. p. 325–328. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 16.
- GRCEV, L. Impulse efficiency of ground electrodes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 24, n. 1, p. 441–451, jan. 2009. ISSN 1937-4208. Citado 5 vezes nas páginas 14, 15, 16, 60 e 65.
- GRCEV, L. Time- and frequency-dependent lightning surge characteristics of grounding electrodes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 24, n. 4, p. 2186–2196, out. 2009. ISSN 1937-4208. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 16.
- GRCEV, L. Time-and frequency-dependent lightning surge characteristics of grounding electrodes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 24, n. 4, p. 2186–2196, 2009. Citado na página 60.
- 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 14.
- GUSTAVSEN, B. Improving the pole relocating properties of vector fitting. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 21, n. 3, p. 1587–1592, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 48.
- GUSTAVSEN, B.; SEMLYEN, A. Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 14, n. 3, p. 1052–1061, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 48.
- HALLMARK, C. L. The use of conductive cement to extend and protect made ground electrodes. In: . [S.l.: s.n.], 2000. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.
- HANSEN, S. G.; LAURIDSEN, J. T.; HOANG, L. C. Experimental and statistical investigation of the compressive strength anisotropy in structural concrete. *Cement and Concrete Research*, Elsevier BV, v. 107, p. 304–316, maio 2018. ISSN 0008-8846. Citado na página 52.
- HARDING, G.; HARRIS, C. *Some engineering objections to using reinforcing steel as grounding electrodes*. [S.l.], 1970. Citado na página 33.

- HASNI, N. A. S.; ARSHAD, S. N. M.; ARIFFEN, A. M.; HALIM, N. H.; LEONG, W. C.; ROMLI, M. I. F.; BAKAR, O. A. Effect of concrete orientation as an enhancement material in grounding system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, v. 864, n. 1, p. 012163, may 2020. Citado na página 41.
- HASNI, N. A. S.; HASHIM, S. N. M. A.; GHANI, S. A.; ARIFFEN, A. M.; LEONG, W. C.; ROMLI, M. I. F.; MOUSA, M. I. Effect of lightning impulse current on the grounding system model. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, v. 12, n. 8, p. 2003–2018, 2021. Citado 3 vezes nas páginas 41, 43 e 46.
- HE, J.; ZENG, R.; ZHANG, B. *Methodology and technology for power system grounding*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 2, 20, 21, 22 e 70.
- HEIDLER, H. Analytische blitzstromfunktion zur lemp-berechnung. *18th ICLP, Munich, Germany, 1985*, 1985. Citado na página 25.
- HIZAMUL-DIN, H. H.; NOR, N. M.; SAMAD, D. A.; SIDEK, M. N. M. Investigative study of vertical electrodes encased in concrete/mortar with various sizes of air voids. *Energies*, MDPI AG, v. 14, n. 9, p. 2659, may 2021. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 46.
- HUGHES, B. P.; ASH, J. E. Anisotropy and failure criteria for concrete. *Matériaux et Constructions*, Springer Science and Business Media LLC, v. 3, n. 6, p. 371–374, nov. 1970. ISSN 1871-6873. Citado na página 52.
- IEC Std.62561 Parte 7. Lightning protection system components (LPSC) - part 7 - Requirements for earthing enhancing compounds. Genebra, Suíça, nov. 2011. Citado na página 40.
- IEEE Std.1243. IEEE guide for improving the lightning performance of transmission lines. New York: IEEE Press, dez. 1997. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 8.
- IEEE Std.80. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York, USA, jan. 2013. Citado 6 vezes nas páginas 9, 12, 15, 21, 51 e 70.
- Jef Techno. What are earthing systems. 2022. Disponível em: <<https://www.jeftechno.com/grounding-systems.php>>. Acesso em: 24 mar. 2022. Citado na página 8.
- JOUNG, J. G. *Fundações Superficiais de Linhas de Transmissão Submetidas a Esforços de Tração - Comparação entre Métodos de Precisão de Capacidade de Carga*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. Citado na página 20.
- 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 32 e 45.
- LIEW, A.; DARVENIZA, M. Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths. In: IET. *Proceedings of the Institution of electrical Engineers*. [S.l.], 1974. v. 121, n. 2, p. 123–135. Citado na página 10.
- 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 2 vezes nas páginas 35 e 45.

- LIMA, A. C. S.; MOURA, R. A. R.; VIEIRA, P. H. N.; SCHROEDER, M. A. O.; BARROS, M. T. Correia de. A computational improvement in grounding systems transient analysis. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 62, n. 3, p. 765–773, jun. 2020. ISSN 1558-187X. Citado na página 55.
- LIMA, A. C. S.; VIEIRA, P. H.; SCHROEDER, M. A. O.; MOURA, R. A. R. Modeling grounding systems for electromagnetic compatibility analysis. In: _____. *Recent Topics in Electromagnetic Compatibility*. [S.l.]: IntechOpen, 2022. ISBN 9781839696695. Citado na página 55.
- 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 4 vezes nas páginas 35, 43, 45 e 55.
- MAZZETTI, C.; VECA, G. M. Impulse behavior of ground electrodes. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 9, p. 3148–3156, 1983. Citado na página 15.
- MENG, Q.; HE, J.; DAWALIBI, F. D.; MA, J. 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 3 vezes nas páginas 3, 32 e 45.
- MESSIER, M. The propagation of an electromagnetic impulse through soil: Influence of frequency dependent parameters. *Mission Res. Corp., Santa Barbara, CA, USA, Tech. Rep. MRC-N-415*, 1980. Citado na página 23.
- MESSIER, M. *Another soil conductivity model*. [S.l.], 1985. Citado na página 23.
- NBR 15751. Sistemas de aterramento de subestações — Requisitos. Rio de Janeiro, Brasil, ago. 2009. Citado na página 12.
- NOR, N. M. Effect of enhancement materials when mixed with sand under high impulse conditions. In: IEEE. *2006 IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials*. [S.l.], 2006. p. 916–919. Citado na página 11.
- PEREIRA, T. M.; LIMA, R. A.; GOMES, V. M.; CALIXTO, W. P.; ALVES, A. J. Analysis and monitoring of electrical grounding grid encapsulated with concrete: case study using simulation in finite element method. *Transactions on Environment and Electrical Engineering*, IEEEIC International Publishing, v. 2, n. 2, p. 31–36, jul. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 46.
- PREMINGER, J. Evaluation of concrete-encased electrodes. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 1A-11, n. 6, p. 664 – 668, Dezembro 1975. Citado 3 vezes nas páginas 12, 31 e 45.
- RAMAMOORTY, M.; NARAYANAN, M. B.; PARAMESWARAN, S.; MUKHEDKAR, D. Transient performance of grounding grids. *IEEE Power Engineering Review*, IEEE, v. 9, n. 10, p. 48–48, 1989. Citado na página 55.
- RHIM, H. C.; BUYUKOZTURK, O. Electromagnetic properties of concrete at microwave frequency range. *Materials Journal*, v. 95, n. 3, p. 262–271, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 70.

RODRIGUES, M.; COSTA, E. da; CASTRO, M. de; TROVÃO, L. Avaliação do desempenho de um novo sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 45.

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 3 vezes nas páginas 9, 12 e 13.

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 12, 13, 31, 33 e 45.

Saber Elétrica. Como fazer medição de aterramento. 2022. Disponível em: <<https://www.sabereletrica.com.br/como-medir-aterramento/>>. Acesso em: 24 mar. 2022. Citado na página 8.

SALARIEH, B.; SILVA, H. D.; KORDI, B. Wideband emt-compatible model for grounding electrodes buried in frequency dependent soil. In: *Int. conf. Power Systems Transients (IPST2019)-Proc*. [S.l.: s.n.], 2019. Citado 5 vezes nas páginas 50, 51, 55, 119 e 122.

SCOTT, J.; CARROLL, R.; CUNNINGHAM, D. Dielectric constant and electrical conductivity of moist rock from laboratory measurements. *US Dept. of interior geological survey technical letter, Special projects-12, August*, v. 17, 1964. Citado na página 23.

SCOTT, J. H. *Electrical and magnetic properties of rock and soil*. [S.l.], 1966. Citado na página 23.

SHINDO, T. How to protect yourself from lightning. *Journal of Plasma and Fusion Research*, v. 80, n. 8, 2004. Disponível em: <<http://www.jspf.or.jp/journal/kaminari/02.html>>. Acesso em: 3 abr. 2022. Citado na página 28.

SILVA, V. C.; CARDOSO, J. R.; NABETA, S. I.; PALIN, M. F.; PEREIRA, F. H. Determination of frequency-dependent characteristics of substation grounding systems by vector finite-element analysis. *IEEE Transactions on Magnetics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 43, n. 4, p. 1825–1828, apr 2007. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 119.

SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S. Lightning performance of transmission lines: Impact of current waveform and front-time on backflashover occurrence. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 34, n. 6, p. 2145–2151, dec 2019. Citado 3 vezes nas páginas 2, 25 e 55.

SMITH, K.; LONGMIRE, C. A universal impedance for soils. *Defense Nuclear Agency, Alexandria, VA, USA, Topical Report for Period*, v. 30, p. 1975, 1975. Citado na página 23.

SMITH-ROSE, R. Electrical measurements on soil with alternating currents. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, Institution of Engineering and Technology (IET), v. 75, n. 452, p. 221–237, ago. 1934. Disponível em: <<https://doi.org/10.1049/jiee-1.1934.0127>>. Citado na página 23.

- SPRAGG, R.; BU, Y.; SNYDER, K.; BENTZ, D.; WEISS, J. *Electrical Testing of Cement-Based Materials: Role of Testing Techniques, Sample Conditioning*. [S.l.], 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.5703/1288284315230>>. Citado na página 22.
- SWITZER, W. K.; STIDHAM, C. R. *Long duration grounding performance program*. [S.l.], 1997. Citado na página 13.
- TRONCHONI, A. B.; CABRAL, R. J.; GAZZANA, D. S.; DIAS, G. A. D.; LEBORGNE, R. C.; BRETAS, A. S.; TELLÓ, M. Impulsive grounding systems embedded in concrete: Theoretical and practical experiments. In: *International Universities Power Engineering Conference*. Coimbra, Portugal: [s.n.], 2016. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 46.
- TRONCHONI, A. B.; GAZZANA, D.; DIAS, G. A.; LEBORGNE, R. C.; BRETAS, A. S.; TELLÓ, M. Transient evaluation of grounding encased in concrete: a study based on real measurements in power systems configurations. In: *2017 International Conference on Power Systems Transients (IPST)*. Seoul, Republic of Korea: [s.n.], 2017. Citado 5 vezes nas páginas 2, 3, 39, 43 e 46.
- TU, Y.; HE, J.; ZENG, R. Lightning impulse performances of grounding devices covered with low-resistivity materials. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 3, p. 1706–1713, 2006. ISSN 0885-8977. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.
- UFER, H. G. *Investigation and testing of footing-type grounding electrodes for electrical installations*. [S.l.]: IEEE, 1964. 1042–1048 p. Citado 7 vezes nas páginas 2, 20, 21, 29, 30, 45 e 70.
- VELEV, G. T.; WEINLADER, A.; TENBOHLEN, S.; PETROV, P. K. A new approach for analysis of nonconventional grounding instalations by means of fem. In: *XVII International Symposium on High Voltage Engineering*. Hannover, Germany: [s.n.], 2011. Citado 3 vezes nas páginas 33, 45 e 55.
- VELEV, G. T.; WEINLADER, A.; TENBOHLEN, S.; PETROV, P. K. 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 3 vezes nas páginas 34, 45 e 70.
- VISACRO, S. *Aterramentos Elétricos*. São Paulo: Artliber, 2005. v. 1. Citado 4 vezes nas páginas 7, 8, 9 e 12.
- VISACRO, S. *Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia*. [S.l.]: Artliber, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- VISACRO, S. A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 22, n. 1, p. 381–386, jan. 2007. ISSN 1937-4208. Citado 10 vezes nas páginas 1, 10, 11, 14, 15, 16, 27, 55, 62 e 88.
- VISACRO, S. The use of the impulse impedance as a concise representation of grounding electrodes in lightning protection applications. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 60, n. 5, p. 1602–1605, oct 2018. Citado 4 vezes nas páginas 3, 11, 15 e 94.

VISACRO, S.; ALIPIO, R. Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 27, n. 2, p. 927–935, abr. 2012. Citado na página 23.

VISACRO, S.; ALIPIO, R.; VALE, M. H. M.; PEREIRA, C. The response of grounding electrodes to lightning currents: The effect of frequency-dependent soil resistivity and permittivity. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, v. 53, n. 2, p. 401–406, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 23, 50 e 60.

VISACRO, S.; PORTELA, C. Soil permittivity and conductivity behavior on frequency range of transient phenomena in electric power systems. In: *Symp. High Voltage Eng.* Braunschweig, Germany: [s.n.], 1987. Citado na página 23.

VISACRO, S.; ROSADO, G. Response of grounding electrodes to impulsive currents: An experimental evaluation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, v. 51, n. 1, p. 161–164, 2009. Citado 4 vezes nas páginas 1, 14, 60 e 62.

VISACRO, S.; SILVEIRA, F. H. The impact of the frequency dependence of soil parameters on the lightning performance of transmission lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 57, n. 3, p. 434–441, jun. 2015. ISSN 1558-187X. Citado 3 vezes nas páginas 50, 55 e 65.

VISACRO, S.; SILVEIRA, F. H. Lightning performance of transmission lines: Requirements of tower-footing electrodes consisting of long counterpoise wires. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 31, n. 4, p. 1524–1532, aug 2016. Citado 7 vezes nas páginas 3, 11, 15, 18, 19, 26 e 94.

VISACRO, S.; SILVEIRA, F. H.; OLIVEIRA, C. H. D. Measurements for qualifying the lightning response of tower-footing electrodes of transmission lines. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 61, n. 3, p. 719–726, jun. 2019. ISSN 1558-187X. Citado na página 15.

VISACRO, S.; SILVEIRA, F. H.; VALE, M. H. M.; DORIC, V.; POLJAK, D.; ROJE, V. Simplified representation of tower-footing electrodes for assessment of the lightning performance of transmission lines using emtp-based platforms. In: *International Conference on Power Systems Transients (IPST2015)*. Cavta, Croatia: [s.n.], 2015. Citado 6 vezes nas páginas 1, 2, 3, 15, 27 e 94.

VISACRO, S.; SOARES, A. Hem: A model for simulation of lightning-related engineering problems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 20, n. 2, p. 1206–1208, apr 2005. Citado na página 55.

WESTINGHOUSE-CORP. *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*. 4. ed. Pittsburgh, PA: Central Station of Engineers of the Westinghouse Electric Corp., 1964. Citado na página 2.

WHITTINGTON, H. W.; MCCARTER, J.; FORDE, M. C. The conduction of electricity through concrete. *Magazine of Concrete Research*, Thomas Telford Ltd., v. 33, n. 114, p. 48–60, mar. 1981. Disponível em: <<https://doi.org/10.1680/mac.1981.33.114.48>>. Citado na página 70.

- WIENER, P. A comparison of concrete encased grounding electrodes to driven ground rods. *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, IEEE, n. 3, p. 282–287, 1970. Citado 4 vezes nas páginas 13, 20, 30 e 45.
- YUNUS, M. S. M.; NOR, N. M.; ETOBI, N. A.; RAMAR, K. 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 36 e 45.
- ZHU, J.; JIAO, D. A theoretically rigorous full-wave finite-element-based solution of maxwell's equations from dc to high frequencies. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, IEEE, v. 33, n. 4, p. 1043–1050, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 117.
- ZIPSE, D. W. Grounding: The good, the bad and the stupid. In: . Chicago, USA: [s.n.], 2013. Citado na página 12.

Configurações Pertinentes ao Método dos Elementos Finitos

A.1 Equação Governante

O Comsol é uma ferramenta de simulação que utiliza o método dos elementos finitos (MEF) e que possui aplicabilidade aos mais diferentes problemas de engenharia (elétrica, mecânica, civil, química, acústica, óptica, etc.). Uma vez que o MEF é apenas um método para solução de equações diferenciais, a escolha do sistema de equações diferenciais que vão governar a fenomenologia física aplicada ao problema possui grande importância. Portanto, para um problema de engenharia mecânica as equações governantes serão diferentes das de um problema de engenharia elétrica. Além disso, dentro da própria área da elétrica existem diferentes equações governantes e, dependendo do estudo que se deseja fazer, uma será mais adequada que a outra.

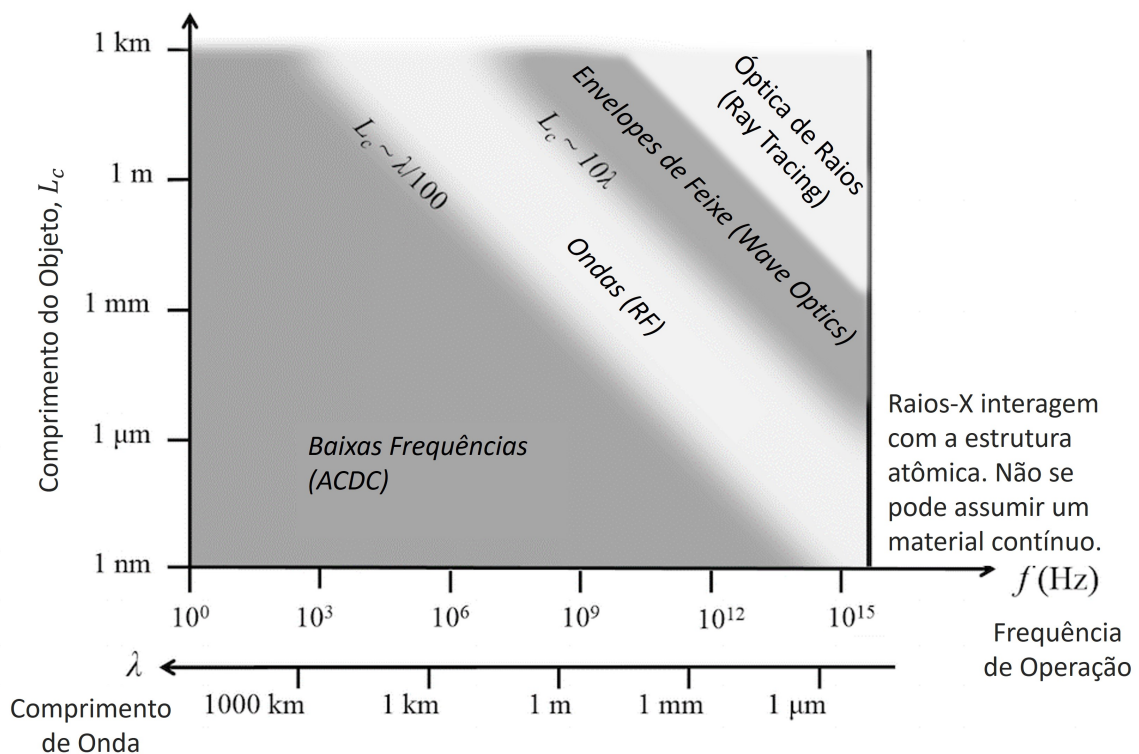
No Comsol, essas equações governantes são denominados de "física". Além disso, os diferentes tipos de físicas são agrupados em "módulos", os quais englobam várias físicas destinadas a resolver problemas em determinadas faixas de frequência. Por exemplo, o módulo *ACDC* possui físicas adequadas para soluções de problemas estáticos ou de baixas frequências. Já o módulo *RF* se propõe a resolver problemas de altas frequências e na faixa de rádio frequências (antenas, micro-ondas, linhas de transmissão, etc), enquanto que o módulo *Wave Optics* trabalha com frequências acima do módulo RF, no domínio da óptica (guias de onda, fibras ópticas, etc). Por fim, para problemas de ópticas de raios (*Ray Optics*), o módulo *Ray Tracing* é o mais adequado (ex: lentes, cavidades de laser, telescópio, câmeras, etc) (FREI, 2020; COMSOL, 2022).

Na [Figura A.1](#) é apresentado um esquemático de qual módulo do Comsol é mais adequado em função do comprimento do objeto a ser simulado (L_c) e da frequência de interesse (ou comprimento de onda). Conforme pode-se observar, para o regime de baixas frequências, ie. quando $L_c \lesssim \lambda/100$, o módulo ACDC é suficiente para modelar o problema.

Contudo, quando $L_c > \lambda/100$, o efeito da propagação de ondas eletromagnéticas através do objeto simulado passa a se tornar importante, sendo o módulo RF mais adequado (considerando que $L_c < 10\lambda$ e não se tenha chegado no regime ótico).

No presente trabalho, são avaliados eletrodos de aterramento com comprimentos que vão de 3 m até 60 m e uma frequência máxima de interesse de 4 MHz (o que equivale a um comprimento de onda $\lambda = c_0/f = 75$ m). Portanto, considerando um $L_c = 3$ m, teremos que $10 \cdot 75 > 3 \text{ m} > 75/100$, logo, como pode-se observar na [Figura A.1](#), o módulo RF seria o mais adequado (e não o ACDC ou o *Wave Optics*). Note-se que, para eletrodos mais longos, por exemplo com $L_c = 60$ m, as condições não somente se mantêm, mas além disso L_c se torna muito maior que $\lambda/100 = 75/100 = 0.75$ m, fazendo com que o efeito da propagação de ondas se torne cada vez mais importante.

Figura A.1 – Representação do módulo do Comsol mais adequado a depender da maior dimensão do objeto (L_c) e da maior frequência operacional de interesse (ou maior comprimento de onda λ de interesse).



Adaptado de [Frei \(2020\)](#).

No módulo RF, escolheu-se como equação governante a equação de onda vetorial de segunda ordem ([COMSOL, 2022](#); [ZHU; JIAO, 2010](#); [AKBARI; SHESHYEKANI; ALEMI, 2013](#)), a qual modela ondas eletromagnéticas no domínio da frequência (no espaço 3D):

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0, \quad (\text{A.1})$$

$$k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = \frac{\omega}{c_0}. \quad (\text{A.2})$$

Em que \mathbf{E} é o campo elétrico; μ_r é a permeabilidade magnética relativa; ϵ_r é permissividade elétrica relativa; σ a condutividade elétrica; ω a frequência angular; ϵ_0 a permissividade absoluta; μ_0 a permeabilidade absoluta; k_0 o número de onda e c_0 a velocidade da luz no vácuo.

Embora seja possível utilizar uma equação de onda no domínio do tempo, geralmente tal alternativa é escolhida quando os materiais modelados possuem parâmetros constantes (ou então dependentes do tempo). Como no presente trabalho o solo possui resistividade e permissividade dependentes da frequência, a modelagem mais prática é através da equação de onda no domínio da frequência (Equação A.1) (AKBARI; SHESHYEKANI; ALEMI, 2013), sendo a resposta temporal (para descargas PRI e SUB) obtidas por convolução após ser conhecida a impedância harmônica (fornecida como resultado da simulação no Comsol).

Nas simulações de eletrodos verticais (hastes) é possível tirar vantagem da simetria cilíndrica do problema, simulando apenas uma seção radial 2D, a qual, sendo "revolucionada" em 360°, irá produzir a geometria 3D desejada. Essa simplificação baseia-se no fato de que problemas com simetria cilíndrica o campo elétrico varia com número de modo azimutal m , de forma que:

$$\mathbf{E}(r, \varphi, z) = \tilde{\mathbf{E}}(r, z) \exp(-jm\varphi). \quad (\text{A.3})$$

Portanto, a equação de onda Equação A.1 pode passar a ser expressa como:

$$\left(\nabla - j \frac{m}{r} \phi \right) \times \left[\mu_r^{-1} \left(\nabla - j \frac{m}{r} \phi \right) \times \tilde{\mathbf{E}} \right] - k_0^2 \epsilon_r \tilde{\mathbf{E}} = 0, \quad (\text{A.4})$$

onde, ϕ é o vetor unitário na direção normal ao plano (na direção de φ) (COMSOL, 2022).

A.2 Condições de Contorno

Após a equação governante ter sido selecionada e ter sido desenhada a geometria do problema a ser estudado, segue-se a etapa de definição das condições de contorno, as quais completam a definição eletromagnética do problema a ser simulado. A seguir, estão as condições de contorno:

- Fronteiras externas do domínio de simulação ("bordas da caixa do solo"): condutor elétrico perfeito (PEC) (SALARIEH; SILVA; KORDI, 2019; AKBARI; SHESHYEKANI; ALEMI, 2013).
- Superfície do Eletrodo de aterramento: condutor elétrico perfeito (PEC). Além disso, foi representado um condutor cilíndrico oco, uma vez que toda corrente fluirá pela sua superfície PEC (mesmo que houvesse material no seu interior) (SILVA et al., 2007; SALARIEH; SILVA; KORDI, 2019; AKBARI; SHESHYEKANI; ALEMI, 2013).
- Porta de excitação: tensão de 1000 V com ω variável entre 60 Hz e 5 MHz. Tal tensão é aplicada entre a fronteira externa do domínio de simulação e a parte superior do eletrodo que fica na superfície do solo. Vale salientar que para o cálculo da impedância harmônica $Z(j\omega)$ a magnitude escolhida não tem interferência no resultado final, pois para cada frequência o que é computado é a razão $\mathbf{V}(\omega)/\mathbf{I}(\omega)$. Contudo, algum valor diferente de zero precisa ser escolhido.

A.3 Malha dos Elementos Finitos

Nesta seção, são apresentados os estudos realizados para a construção de uma malha dos elementos finitos que seja adequada ao presente estudo de sistemas de aterramento. Essa análise, possui grande importância, uma vez que o tipo, formato e disposição da malha pode alterar significativamente os resultados fornecidos. Nesse sentido, testar os principais parâmetros da malha para o estudo em questão é uma etapa trabalhosa, porém necessária a qualquer estudo que utilize o MEF.

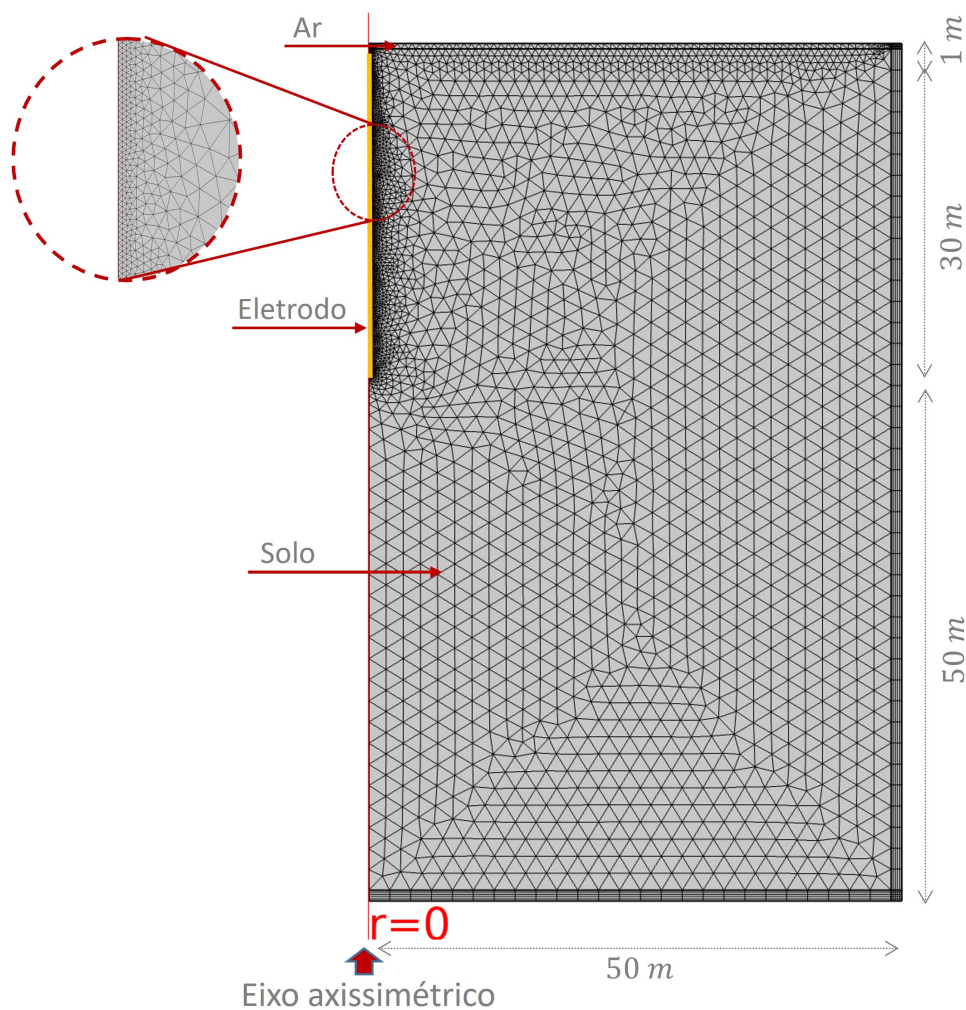
Vale salientar que cada tipo de problema a ser estudado irá requerer cuidados e atenção particulares em regiões distintas da malha. Por exemplo, um estudo de linhas de transmissão irá requerer cuidados na construção de uma malha que serão distintos de um estudo de aterramentos. Portanto, o entendimento da fenomenologia do problema é extremamente importante para a formulação da malha.

De uma forma geral, regiões onde os fenômenos estudados são mais intensos e possuem maior importância, via de regra, irão requerer uma malha mais fina. Contudo, refinar indiscriminadamente a malha irá aumentar o número de elementos finitos e forçosamente aumentará o tempo de simulação, o que, em alguns casos, pode representar um acréscimo de horas de simulação. Assim, encontrar um custo-benefício entre refinamento da malha e tempo de simulação é o objetivo principal nos estudos de construção da malha.

No caso de simulações de um eletrodo de aterramento a região que naturalmente necessita um maior refinamento da malha é a região próxima ao eletrodo (que inclui o encapsulamento de concreto, quando houver) e o próprio eletrodo em si. Isso se deve ao fato de ser a região onde haverá a maior densidade de corrente e densidade de campo

elétrico, fluindo do eletrodo para o solo. As demais regiões do solo que estão longe do eletrodo, vão apresentar valores bem menores de densidades de corrente e campo elétrico, portanto, uma malha mais grosseira (menos fina) pode ser aplicada. Um exemplo de malha para um eletrodo é apresentado na [Figura A.2](#) e, como mencionado, refinou-se a malha no eletrodo e suas proximidades.

Figura A.2 – Malha de elementos finitos para um eletrodo vertical (EV) de 30 m, posicionado no eixo de um domínio cilíndrico de solo com raio de 50 m e altura de $30(EV) + 50(solo) + 1(ar) = 81$ m. Representação axissimétrica em relação ao eixo vertical $r = 0$. Simulação 2D, mas com resultado 3D, por conta da simetria cilíndrica.



Para problemas em 3D, em muitas situações, o tipo de elemento mais utilizado para a construção da malha de elementos finitos é o tetraedro. Já para problemas 2D, os triângulos são muito utilizados. Ambas situações se justificam pela versatilidade das geometrias triangulares para discretização de domínios com os mais variados formatos geométricos. Por outro lado, a utilização de apenas elementos triangulares pode produzir uma malha com muitos elementos e que fornece resultados precisos, mas que tenha um custo computacional maior (em termo de memória RAM e tempo de simulação). Portanto,

quando se deseja reduzir o custo computacional, inevitavelmente torna-se necessário fazer um estudo de refinamento de malha e, quando possível, lançar mão de simplificações relativas à simetria do problema. Dessa forma, quando deseja-se reduzir a quantidade de elementos, pode-se utilizar, de forma complementar, elementos alongados, como prismas (triangulares, retangulares ou trapezoidais) para casos 3D e trapézios ou retângulos, para casos 2D (FREI, 2013; FREI, 2015).

Na prática, o estudo de refinamento da malha são realizados da seguinte forma: (1) escolhe-se um parâmetro da malha a ser estudado, mantendo-se os demais constantes; (2) varia-se o parâmetro escolhido, de forma a se encontrar um valor, acima do qual, não há ganhos relevantes com sucessivos refinamentos; (3) utiliza-se o valor encontrado para o parâmetro estudado e realiza-se o mesmo processo para um outro parâmetro da malha. Dessa forma, após os principais parâmetros da malha ser estudado, chega-se a um resultado de malha que será utilizado nas simulações.

Os principais parâmetros de malha analisados no estudo de refinamento foram os seguintes:

- r_{solo} : comprimento (ou raio) do domínio de simulação em relação ao eletrodo (distância do eletrodo para a caixa do solo);
- $L_{seg.}$: comprimento dos segmentos do eletrodo;
- $c_{mín.}$: comprimento mínimo permitido para um elemento;
- $c_{max.}$: comprimento máximo permitido para um elemento;
- $\Delta_{max.}$: taxa de crescimento máxima permitida entre dois elementos adjacentes.

Dado que o MEF é um método diferencial, é necessário delimitar o domínio de simulação, "dentro do qual" serão realizados os cálculos. O domínio de simulação é a região de interesse para a simulação do fenômeno estudado. No caso dos sistemas de aterramento, o domínio de simulação é basicamente o tamanho do raio do cilindro de solo r_{solo} (para o caso de EV 2D axissimétrico) no qual estará inserido o eletrodo ou sistema de aterramento (ou a metade do comprimento da caixa de solo, no caso 3D). Idealmente, o domínio de simulação deveria ter dimensão "infinita", contudo, isso é impossível computacionalmente para o MEF. Portanto, é necessário escolher um domínio de simulação com comprimento suficientemente grande e que forneça resultados coerentes, mas que seja praticável quanto ao tempo de simulação.

Como mencionado anteriormente, a superfície do eletrodo de aterramento é um dos principais parâmetros da malha (possivelmente o mais importante). Por esse motivo, o eletrodo foi configurado para ser a primeira região a ser discretizada, após a qual seguem as

demais regiões. Dessa forma, os domínios do concreto e do solo são discretizados de forma secundária. Portanto, a malha é construída de forma sequencial, obedecendo uma ordem. Primeiro, o eletrodo é discretizado em segmentos de reta (para EV em 2D axissimétrico) ou em segmentos cilíndricos (para EH em 3D) com comprimento igual a $L_{seg.}$ e, em seguida o concreto e o solo são discretizados com triângulos (para EV em 2D axissimétrico) ou tetraedros (para EH em 3D) com tamanho radialmente crescente no sentido eletrodo-solo (conforme se observa na [Figura A.2](#)). Assim, para simulações com EV (2D axissimétrico), o tamanho das arestas dos triângulos nos domínios do concreto e do solo crescem de $L_{seg.}$ para $c_{max.}$ a uma taxa de crescimento $\Delta_{max.}$ (sendo que $c_{mín.}$ torna-se uma grandeza quase irrelevante, pois é sobreposta por $c_{seg.}$, na geometria 2D). Por outro lado, no caso de simulações com EH (3D), algo similar ocorre, contudo, nas proximidades do eletrodo, os tetraedros podem ter arestas com comprimento $L_{seg.}$ e $c_{mín.}$ (em um mesmo tetraedro), devido à geometria 3D.

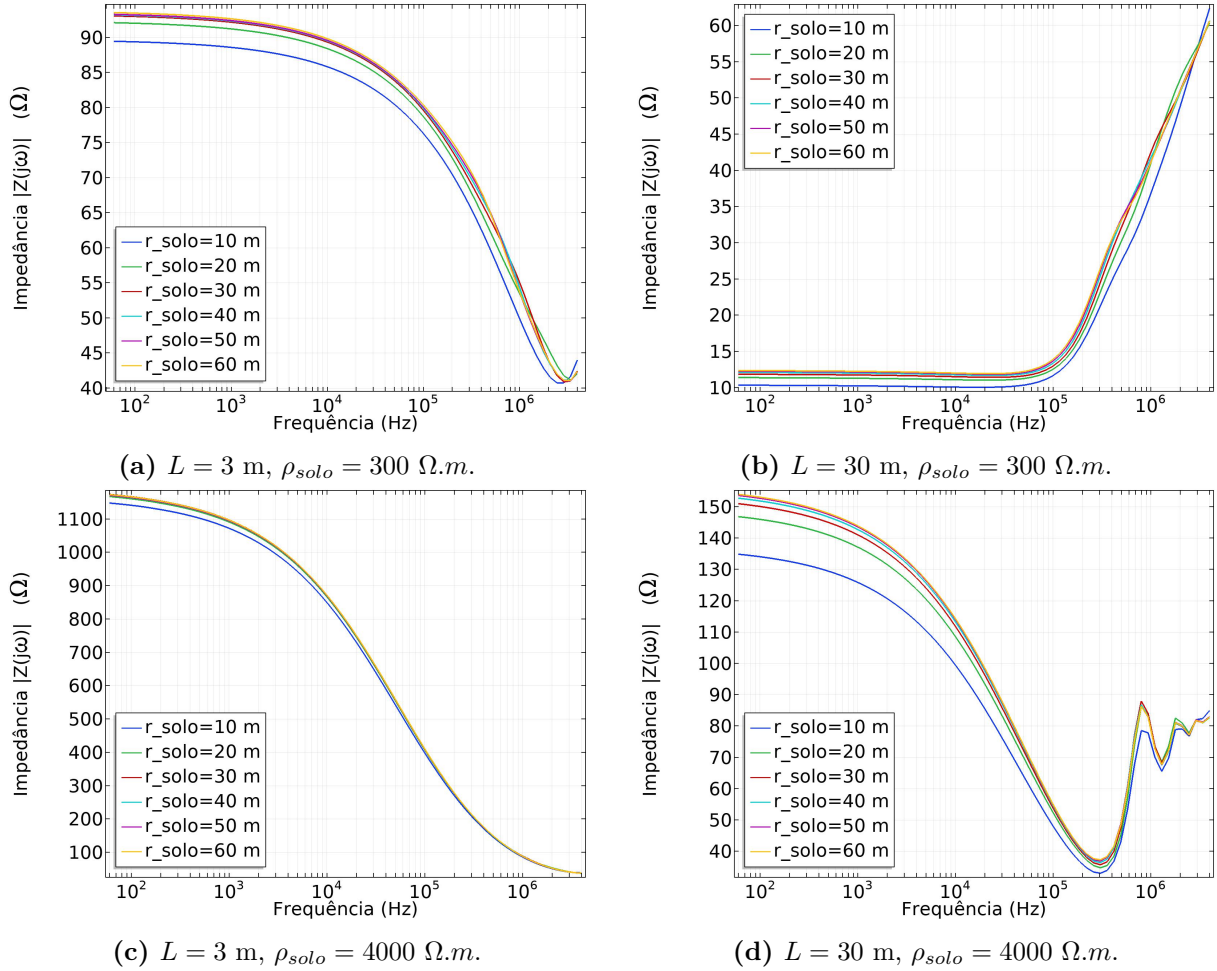
Tamanho do Domínio de Simulação (r_{solo})

Na literatura, simulações de sistemas de aterramento geralmente utilizam domínios de simulação com comprimentos da ordem de 50 m ([SALARIEH; SILVA; KORDI, 2019](#)). Isso é coerente com as práticas usualmente empregadas para experimentos e ensaios com aterramento, pois quando deseja-se estudar a impedância de um aterramento é necessário a aplicação de uma tensão (ou corrente) sobre o aterramento, o que inevitavelmente requer que o terminal de referência do gerador de tensão esteja fincado no solo, geralmente a uma distância de aproximadamente 50 m a 100 m do ponto aterramento (conforme observado no arranjo experimental apresentado na [Figura 5.1](#)).

A seguir, na [Figura A.3](#) é apresentado um estudo da influência que o comprimento do domínio de simulação r_{solo} tem na impedância harmônica $|Z(j\omega)|$ do eletrodo. Por simplicidade, foram realizados testes apenas com EVs, uma vez que os resultados obtidos se estendem por analogia ao EHs (dada a similaridade do problema). Para isso, observou-se a curva de $|Z(j\omega)|$ quando r_{solo} assume valores de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 m. Considerou-se EVs com $L = 3$ e 30 m e solos com $\rho_{solo} = 300$ e 4000 $\Omega.m$, de forma que situações extremas de comprimento de eletrodo e de resistividade de solo fossem avaliadas.

Conforme pode-se observar na [Figura A.3](#), para todos os casos, um valor de $r_{solo} = 30$ m fornece resultados razoavelmente próximos a $r_{solo} = 60$ m. Contudo, para assegurar a precisão optou-se por escolher um $r_{solo} = 50$ m. Assim, para simulações com EV adotou-se sempre $r_{solo} = 50$ m e, nas simulações de EH, adotou-se um caixa de solo com dimensões tais que, entre qualquer ponto do eletrodo e as bordas da caixa do solo, a distância é também 50 m.

Figura A.3 – Impedância Harmônica $|Z(j\omega)|$ para $r_{solo} = 10, 20, 30, 40, 50$ e 60 m. Considerando EVs com $L = 3$ e 30 m e solos com $\rho_{solo} = 300$ e $4000 \Omega.m$.



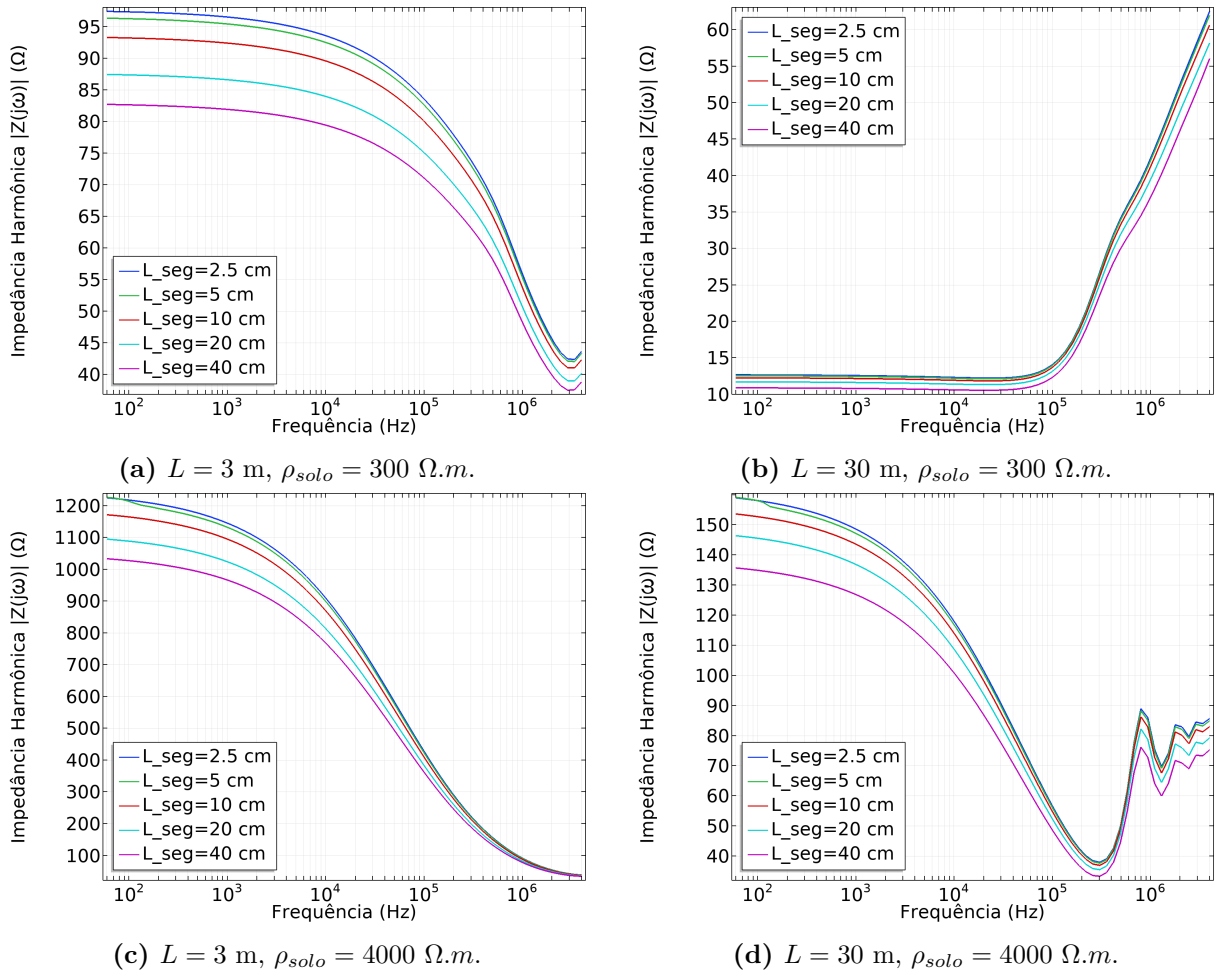
Comprimento dos segmentos do eletrodo (L_{seg})

Quanto menor o comprimento dos segmentos da malha do eletrodo, o resultado da simulação tende a ser mais preciso. Contudo, deseja-se encontrar um valor que possua um bom custo-benefício computacional de forma a se ter uma malha com menor quantidade possível de elementos sem sacrificar a precisão da simulação.

Nesse sentido, a seguir, na [Figura A.4](#), é apresentada a impedância harmônica considerando valores de $L_{seg} = 2,5; 5; 10; 20$ e 40 cm, assumindo EV com $L = 3$ e 30 m, em solos com resistividades de $\rho_{solo} = 300$ e $4000 \Omega.m$. Nessas simulações, considerou-se que $r_{solo} = 50$ m (o que será melhor explicado na [seção A.3](#)). Além disso, assumiu-se que $c_{min.} = 0,1$ m, $c_{max.} = 2$ m e $\Delta_{max.} = 1$). Como resultado, foi observado que L_{seg} é um parâmetro que pode influenciar consideravelmente a impedância harmônica tanto para um eletrodo curto (3 m) quanto para um longo (30 m) em ambos os tipos de solos. Além disso, conforme esperado, à medida que L_{seg} assume valores menores a curva de impedância harmônica vai se "acomodando" nas proximidades da curva de $L_{seg} = 2.5$ cm.

A [Figura A.4](#) indica que região de baixa frequência da impedância harmônica

Figura A.4 – Impedância Harmônica $|Z(j\omega)|$ para $L_{seg} = 2,5; 5; 10; 20$ e 40 cm. Considerando EVs com $L = 3$ e 30 m e solos com $\rho_{solo} = 300$ e $4000 \Omega.m$ (assumindo $r_{solo} = 50$ m, $c_{min.} = 0,1$ m, $c_{max.} = 2$ m, $\Delta_{max.} = 1,3$).



é a que possui maior sensibilidade ao parâmetro L_{seg} . O caso que apresentou a menor sensibilidade à L_{seg} foi aquele no qual $L = 30$ m, $\rho_{solo} = 300 \Omega.m$ (Figura A.4b). Contudo, como o uso de AECs é mais eficiente para solos com resistividade maiores que $300 \Omega.m$, deve-se observar principalmente os resultados para solo de $4000 \Omega.m$, os quais indicam uma maior sensibilidade com L_{seg} .

Por fim, notou-se que o valor de $L_{seg} = 5$ cm fornece uma impedância harmônica muito próxima do valor $L_{seg} = 2,5$ cm, indicando uma acomodação ou convergência para $|Z(j\omega)|$. Por esse motivo, adotou-se $L_{seg} = 5$ cm como valor padrão para a segmentação da malha do eletrodo em todas as simulações deste trabalho.

Comprimento mínimo permitido para um elemento ($c_{min.}$)

Embora os parâmetros $c_{min.}$ e L_{seg} sejam tecnicamente distintos, nas simulações de aterramentos eles geralmente têm valores próximos. Assim, por simplicidade, nas simulações realizadas no presente trabalho, optou-se por fazer $c_{min.} = L_{seg}$. Portanto, nas

demais simulações apresentadas essa foi a configuração adotada.

Comprimento máximo permitido para um elemento ($c_{max.}$)

Conforme mencionado anteriormente, a sequência de construção de malha que foi adotada consiste em primeiro discretizar o eletrodo e depois o concreto juntamente com o solo. Naturalmente, assumindo-se que $c_{max.} > c_{min.} \approx L_{seg}$ e que $\Delta_{max} > 1$, os elementos (triângulos ou tetraedros) irão ter um aumento de dimensão à medida que a distância em relação ao eletrodo aumenta. Contudo, esse aumento dos elementos ocorrerá até ser atingido o valor de $c_{max.}$, após o qual, mesmo distanciando-se do eletrodo, os elementos finitos manterão seu tamanho. Assim, $c_{max.}$ indica o quão grosseira a malha pode ser tornar. Além disso, um aumento no valor de $c_{max.}$ tende a produzir uma malha com menos elementos (por muitos deles serem bem maiores os demais).

Obviamente, deve-se escolher um valor de $c_{max.}$ que seja menor que as dimensões do domínio de simulação (por exemplo r_{solo}). Ou seja, no caso específico, menor que as dimensões da caixa ou do cilindro que representa o solo. Na verdade, usualmente escolhe-se um valor algumas vezes menor que o domínio de simulação. Por exemplo, considerando uma simulação de EV (com simetria cilíndrica), se $r_{solo} = 50$ m, então um valor de $c_{max.} \leq 10$ m seria razoável.

Dessa forma, para se avaliar o que seria um valor adequado para $c_{max.}$, realizou-se simulações da impedância harmônica para $c_{max.} = 1; 2; 4$ e 8 m, considerando EVs com $L = 3$ e 30 m e solos com $\rho_{solo} = 300$ e $4000 \Omega.m$ (assumindo $L_{seg} = 5$ cm, $r_{solo} = 50$ m, $c_{min.} = 5$ cm, $\Delta_{max.} = 1.3$). Esse resultados são apresentados na [Figura A.5](#).

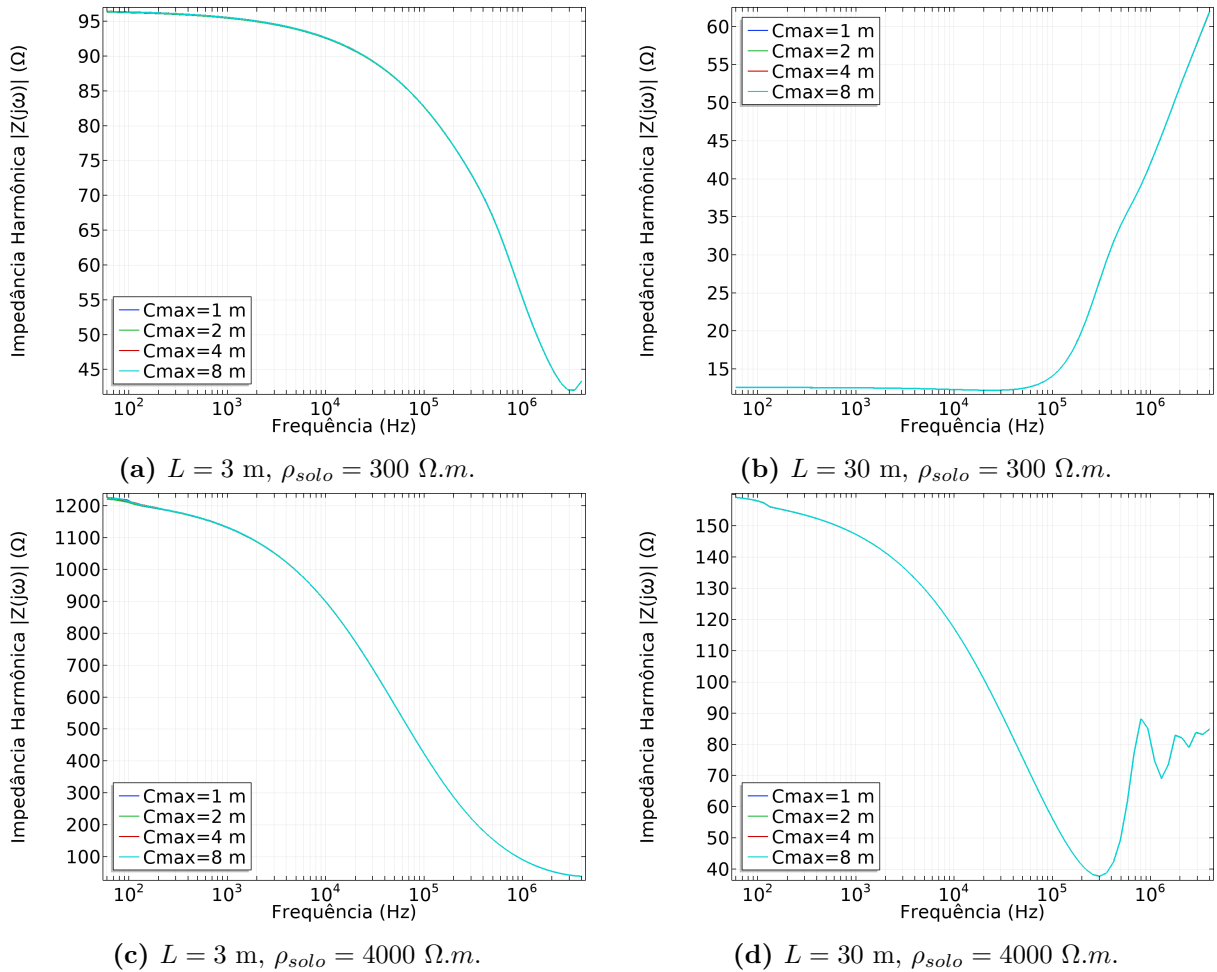
O que a [Figura A.5](#) indica é que a impedância harmônica apresentou pouca sensibilidade à $c_{max.}$ (obviamente, considerando-se os valores analisados, bem como os valores adotados para r_{solo} , $c_{min.}$ e $\Delta_{max.}$). Para todos os casos apresentados, as curvas de impedância harmônica estão praticamente sobrepostas, independentemente do comprimento do eletrodo ou resistividade do solo.

Portanto, diante do exposto, escolheu-se um valor de $c_{max.} = 4$ m, para todas as demais simulações apresentadas nos presente trabalho. Notadamente, essa é uma escolha que irá produzir uma malha com menos elementos do que para $c_{max.} = 1$ e 2 m. Por outro lado, não escolheu-se $c_{max.} = 8$ m visando assumir um posicionamento conservador.

Taxa de crescimento máxima permitida entre elementos ($\Delta_{max.}$)

A taxa de crescimento máxima permitida entre elementos $\Delta_{max.}$ é uma constante que limita a diferença de tamanho entre dois distintos elementos da malha. Quanto menor o valor de $\Delta_{max.}$ mais elementos terá a malha e, portanto, será mais refinada, requerendo mais esforço computacional (embora tenda a fornecer maior precisão nos cálculos). Por

Figura A.5 – Impedância Harmônica $|Z(j\omega)|$ para $c_{max.} = 1; 2; 4$ e 8 m. Considerando EVs com $L = 3$ e 30 m e solos com $\rho_{solo} = 300$ e $4000 \Omega.m$ (assumindo $L_{seg} = 5$ cm, $r_{solo} = 50$ m, $c_{min.} = 5$ cm, $\Delta_{max.} = 1.3$).



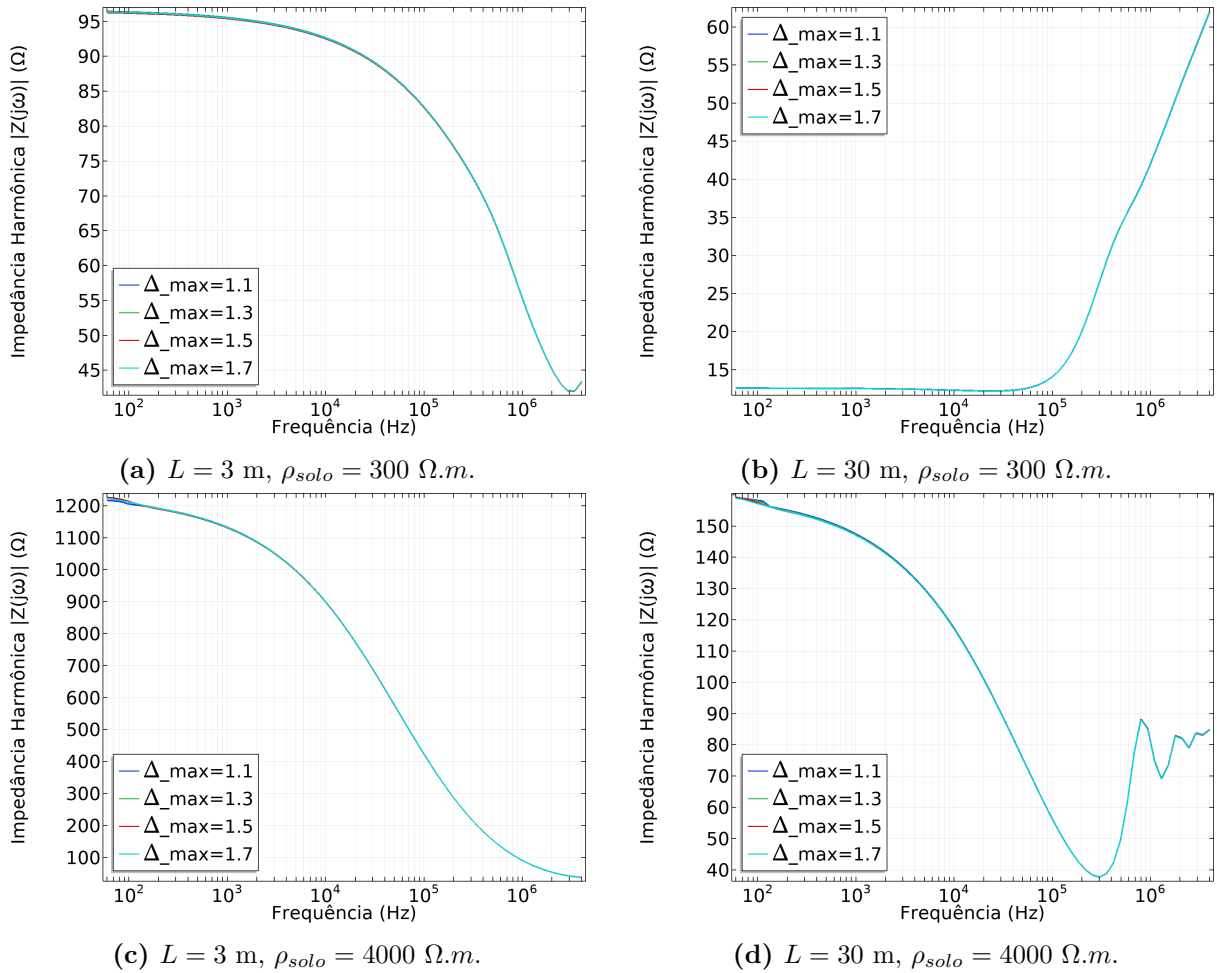
outro lado, quanto maior o valor de $\Delta_{max.}$ mais grosseira e menos elementos terá a malha, requerendo menos esforço computacional. Assim, novamente, o que se deseja é encontra a solução de compromisso entre baixo esforço computacional e precisão.

Para que fosse encontrado um valor para $\Delta_{max.}$ com bom custo benefício entre número de elementos e precisão, foi avaliado a impedância harmônica $|Z(j\omega)|$ para $\Delta_{max.} = 1,1; 1,3; 1,5$ e $1,7$. Considerando EVs com $L = 3$ e 30 m e solos com $\rho_{solo} = 300$ e $4000 \Omega.m$ (assumindo $r_{solo} = 50$ m, $L_{seg} = c_{min.} = 5$ cm e $C_{max.} = 8$ m). Vale salientar que uma valor de $\Delta_{max} = 1$ produz uma malha ultra refinada, forçando o Comsol a gastar um tempo considerável apenas na construção da malha (antes do início do cômputo da solução). Por esse motivo, avaliou-se valores maiores do que 1. Assim, para as situações mencionadas, na [Figura A.6](#) são apresentados os resultados da impedância harmônica.

Analisando-se a [Figura A.6](#) pode-se observar que a variação de Δ_{max} praticamente não altera significativamente a impedância harmônica (para os valores analisados e demais parâmetros adotados). Portanto, optou-se por adotar nas demais simulações do trabalho o maior valor avaliado: $\Delta_{max} = 1.7$. Assim, obtém-se uma malha com menos elementos

reduzindo o custo computacional das simulações.

Figura A.6 – Impedância Harmônica $|Z(j\omega)|$ para $\Delta_{max.} = 1,1; 1,3; 1,5$ e $1,7$ m. Considerando EVs com $L = 3$ e 30 m e solos com $\rho_{solo} = 300$ e $4000 \Omega.m$ (assumindo $r_{solo} = 50$ m, $L_{seg} = c_{min.} = 5$ cm e $C_{max.} = 8$ m).



Resultados Complementares

Neste apêndice são explicitados resultados complementares aos que foram apresentados no texto da tese. Na [seção B.1](#) são apresentados os resíduos e polos das funções racionais obtidas com o *Vector Fitting* e que modelam as curvas de impedância harmônica para os casos de eletrodo nu ($h_c = 0$) e eletrodo totalmente concretado ($h_c = 4/4$). Por questão de simplicidade, as demais situações de encapsulamento foram omitidas. Já na [seção B.2](#) são apresentados a impedância harmônica $Z(j\omega)$ e GPR para os AEC-EH com 45 e 60 m de comprimento. Finalmente, na [seção B.3](#), são apresentadas as tabelas com os valores de pico do GPR, assim como da impedância impulsiva, para os AECs avaliados.

B.1 Funções racionais obtidas com o *Vector Fitting*

Tabela B.1 – Funções racionais (resíduos e polos) para eletrodos verticais (EV), com $L = 3m$ e $D_c = 20cm$, para diferentes ρ_{solo} . Situações: sem concreto ($h_c = 0$) e totalmente concretado ($h_c = 4/4$).

Eletrodo Vertical (Haste), $L = 3m$, $D_c = 20cm$						
ρ_{solo}	Sem Encapsulamento ($h_c = 0$)			Totalmente Encapsulado ($h_c = 4/4$)		
	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
300 $\Omega.m$	1	2201,5+0i	-2478,3+0i	1	2220+0i	-3613,7+0i
	2	64642+0i	-26034+0i	2	58122+0i	-36185+0i
	3	(9,8352E+05)+0i	(-1,6843E+05)+0i	3	(6,0477E+05)+0i	(-1,9525E+05)+0i
	4	(1,0453E+07)+0i	(-8,4861E+05)+0i	4	(4,6351E+06)+0i	(-7,8249E+05)+0i
	5	(1,5607E+08)+0i	(-5,0759E+06)+0i	5	(1,0623E+08)+0i	(-5,5984E+06)+0i
	6	(-3,6339E+09) -(4,7504E+09)i	(-3,89E+07) +(1,1005E+07)i	6	(-4,5993E+09) -(3,9869E+09)i	(-5,2198E+07) +(1,3855E+07)i
	7	(-3,6339E+09) +(4,7504E+09)i	(-3,89E+07) -(1,1005E+07)i	7	(-4,5993E+09) +(3,9869E+09)i	(-5,2198E+07) -(1,3855E+07)i
600 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	-1,6240E+10	-8,8158E+07	1	-1,3171E+10	-8,4617E+07
	2	6,5815E+08	-1,4606E+07	2	2,7285E+08	-1,2789E+07
	3	2,1445E+08	-3,6107E+06	3	1,2254E+08	-3,5973E+06
	4	3,2446E+07	-8,2628E+05	4	1,7191E+07	-7,7565E+05
	5	3,3668E+06	-1,7182E+05	5	1,7283E+06	-1,5943E+05
	6	2,3108E+05	-2,7223E+04	6	1,1684E+05	-2,5209E+04
7	8,3412E+03	-2,6526E+03	7	4,1951E+03	-2,4656E+03	
1000 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	-3,8367E+10	-1,4973E+08	1	-1,7492E+10	-1,0078E+08
	2	5,3155E+08	-8,9419E+06	2	2,7339E+08	-7,8554E+06
	3	2,1701E+08	-2,3998E+06	3	1,1317E+08	-2,2649E+06
	4	4,5636E+07	-6,0948E+05	4	2,4675E+07	-5,8358E+05
	5	5,2202E+06	-1,3120E+05	5	2,7923E+06	-1,2585E+05
	6	3,8145E+05	-2,1554E+04	6	2,0364E+05	-2,0739E+04
7	1,5053E+04	-2,2206E+03	7	8,0656E+03	-2,1526E+03	
2000 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	-6,3626E+11	-6,5636E+08	1	-2,9244E+10	-1,3387E+08
	2	5,7235E+08	-5,8176E+06	2	3,1234E+08	-5,3990E+06
	3	2,3939E+08	-1,3697E+06	3	1,3002E+08	-1,3034E+06
	4	5,6531E+07	-3,4699E+05	4	3,0806E+07	-3,3867E+05
	5	7,1537E+06	-7,6261E+04	5	3,9387E+06	-7,5751E+04
	6	5,5834E+05	-1,2992E+04	6	3,1670E+05	-1,3221E+04
7	2,4811E+04	-1,4238E+03	7	1,4646E+04	-1,5275E+03	
4000 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	-6,5138E+10	-2,2037E+08	1	-7,1557E+10	-2,1514E+08
	2	6,3696E+08	-4,0997E+06	2	3,3913E+08	-4,0896E+06
	3	2,6894E+08	-8,3811E+05	3	1,5624E+08	-8,7833E+05
	4	6,9076E+07	-1,9921E+05	4	4,1854E+07	-2,1735E+05
	5	9,4786E+06	-4,3885E+04	5	6,1596E+06	-4,9555E+04
	6	8,0227E+05	-7,9471E+03	6	5,4613E+05	-9,1101E+03
7	4,8440E+04	-1,0106E+03	7	2,8966E+04	-1,1611E+03	

Tabela B.2 – Funções racionais (resíduos e polos) para eletrodos verticais (EV), com $L = 30m$ e $D_c = 20cm$, para diferentes ρ_{solo} . Situações: sem concreto ($h_c = 0$) e totalmente concretado ($h_c = 4/4$).

Eletrodo Vertical (Haste), $L = 30m$, $D_c = 20cm$						
ρ_{solo}	Sem Encapsulamento ($h_c = 0$)			Totalmente Encapsulado ($h_c = 4/4$)		
	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
300 $\Omega.m$	1	2450,1+0i	-12393+0i	1	-2,86E+13	-8,31E+09
	2	91065+0i	(-1,3872E+05)+0i	2	-3,11E+09	-6,41E+07
	3	(-1,8241E+08)+0i	(-7,0612E+06)+0i	3	-2,16E+08	-1,01E+07
	4	(-3,7273E+08)+0i	(-2,391E+07)+0i	4	-6,37E+07	-1,26E+06
	5	(-5,8988E+10)+0i	(-2,9979E+08)+0i	5	2,91E+07	-1,05E+06
	6	(-3,4621E+06) +(2,9568E+07)i	(-1,8844E+06) +(1,1585E+06)i	6	11826	-50353
	7	(-3,4621E+06) -(2,9568E+07)i	(-1,8844E+06) -(1,1585E+06)i	7	195,88	-5724,5
600 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	57970+0i	-34105+0i	1	14296+0i	-19465+0i
	2	(2,1222E+06)+0i	(-4,1961E+05)+0i	2	(5,3527E+05)+0i	(-2,2992E+05)+0i
	3	(-2,5587E+08)+0i	(-4,5438E+06)+0i	3	(-1,6202E+08)+0i	(-5,1013E+06)+0i
	4	(-9,8282E+08)+0i	(-4,3444E+07)+0i	4	(-3,8284E+08)+0i	(-2,6139E+07)+0i
	5	(-7,6494E+10)+0i	(-4,0784E+08)+0i	5	(-4,1506E+10)+0i	(-2,2605E+08)+0i
	6	(3,1731E+07) +(1,3746E+06)i	(-2,0013E+06) +(2,977E+06)i	6	(1,1534E+07) +(2,2163E+07)i	(-1,6666E+06) +(1,7539E+06)i
7	(3,1731E+07) -(1,3746E+06)i	(-2,0013E+06) -(2,977E+06)i	7	(1,1534E+07) -(2,2163E+07)i	(-1,6666E+06) -(1,7539E+06)i	
1000 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	74368+0i	-21973+0i	1	17730+0i	-12036+0i
	2	(2,5526E+06)+0i	(-2,688E+05)+0i	2	(5,7671E+05)+0i	(-1,367E+05)+0i
	3	(-6,5918E+09)+0i	(-8,5029E+07)+0i	3	(1,5828E+07)+0i	(-1,0186E+06)+0i
	4	(-5,342E+07) +(3,2988E+07)i	(-2,0173E+06) +(1,865E+06)i	4	(-2,2308E+08)+0i	(-3,2111E+06)+0i
	5	(-5,342E+07) -(3,2988E+07)i	(-2,0173E+06) -(1,865E+06)i	5	(-1,1783E+10)+0i	(-1,0448E+08)+0i
	6	(-1,9456E+07) -(1,9994E+07)i	(-2,3848E+06) +(5,5508E+06)i	6	(3,3326E+07) -(1,5367E+07)i	(-2,0415E+06) +(2,9293E+06)i
7	(-1,9456E+07) +(1,9994E+07)i	(-2,3848E+06) -(5,5508E+06)i	7	(3,3326E+07) +(1,5367E+07)i	(-2,0415E+06) -(2,9293E+06)i	
2000 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	(1,9571E+05)+0i	-18490+0i	1	46085+0i	-9870,1+0i
	2	(6,3414E+06)+0i	(-2,3258E+05)+0i	2	(1,4687E+06)+0i	(-1,1599E+05)+0i
	3	(-6,4241E+10)+0i	(-3,1675E+08)+0i	3	(2,2484E+07)+0i	(-8,3351E+05)+0i
	4	(-1,0449E+08) -(2,8508E+07)i	(-2,0886E+06) +(1,5924E+06)i	4	(-2,0987E+08)+0i	(-3,3746E+06)+0i
	5	(-1,0449E+08) +(2,8508E+07)i	(-2,0886E+06) -(1,5924E+06)i	5	(-2,1861E+10)+0i	(-1,5281E+08)+0i
	6	(9,372E+06) -(3,3514E+07)i	(-1,6872E+06) +(5,5216E+06)i	6	(2,6011E+07) -(5,925E+06)i	(-1,4391E+06) +(3,5166E+06)i
7	(9,372E+06) +(3,3514E+07)i	(-1,6872E+06) -(5,5216E+06)i	7	(2,6011E+07) +(5,925E+06)i	(-1,4391E+06) -(3,5166E+06)i	
4000 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	(1,9279E+05)+0i	-8546,1+0i	1	87522+0i	-6966,6+0i
	2	(5,4931E+06)+0i	(-1,0266E+05)+0i	2	(2,4258E+06)+0i	-78386+0i
	3	(4,3813E+07)+0i	(-7,3336E+05)+0i	3	(2,1939E+07)+0i	(-5,325E+05)+0i
	4	(-4,6411E+08)+0i	(-5,9968E+06)+0i	4	(-2,6264E+08)+0i	(-5,0226E+06)+0i
	5	(-5,7879E+09)+0i	(-1,1935E+08)+0i	5	(-4,8603E+12)+0i	(-2,5613E+09)+0i
	6	(6,3044E+07) -(1,7778E+06)i	(-1,4937E+06) +(5,07E+06)i	6	(3,5647E+07) +(1,0424E+07)i	(-1,2649E+06) +(3,6396E+06)i
7	(6,3044E+07) +(1,7778E+06)i	(-1,4937E+06) -(5,07E+06)i	7	(3,5647E+07) -(1,0424E+07)i	(-1,2649E+06) -(3,6396E+06)i	

Tabela B.3 – Funções racionais (resíduos e polos) para eletrodos horizontais (EH), com $L = 15m$ e $D_c = 20cm$, para diferentes ρ_{solo} . Situações: sem concreto ($h_c = 0$) e totalmente concretado ($h_c = 4/4$).

Eletrodo Horizontal (Contrapeso), $L = 15m, D_c = 20cm$						
ρ_{solo}	Sem Encapsulamento ($h_c = 0$)			Totalmente Encapsulado ($h_c = 4/4$)		
	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
300 $\Omega.m$	1	32214+0i	-27393+0i	1	3888+0i	-8778,2+0i
	2	(7.3641E+05)+0i	(-2.988E+05)+0i	2	(1,2119E+05)+0i	(-1,0155E+05)+0i
	3	(-2.8322E+08)+0i	(-1.3643E+07)+0i	3	(1,0278E+06)+0i	(-6,368E+05)+0i
	4	(-2.0353E+10)+0i	(-1.3418E+08)+0i	4	(-4,1994E+08)+0i	(-1,1831E+07)+0i
	5	(-2.4921E+12)+0i	(-2.3714E+09)+0i	5	(-3,3241E+10)+0i	(-1,388E+08)+0i
	6	(-4.6915E+07) -(3.8143E+07)i	(-3.0586E+06) +(1.0423E+06)i	6	(4,4076E+06) +(2,6224E+07)i	(-2,8524E+06) +(3,2192E+06)i
	7	(-4.6915E+07) +(3.8143E+07)i	(-3.0586E+06) -(1.0423E+06)i	7	(4,4076E+06) -(2,6224E+07)i	(-2,8524E+06) -(3,2192E+06)i
600 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	26193+0i	-11276+0i	1	16520+0i	-10243+0i
	2	(8,511E+05)+0i	(-1,3315E+05)+0i	2	(5,3164E+05)+0i	(-1,2078E+05)+0i
	3	(9,9956E+06)+0i	(-8,2648E+05)+0i	3	(6,5317E+06)+0i	(-7,5653E+05)+0i
	4	(-1,2415E+09)+0i	(-2,5957E+07)+0i	4	(-3,3406E+08)+0i	(-9,4846E+06)+0i
	5	(-1,0157E+11)+0i	(-3,0925E+08)+0i	5	(-2,6322E+10)+0i	(-1,1982E+08)+0i
	6	(2,2286E+07) +(6,3481E+07)i	(-3,635E+06) +8,3208E+06i	6	(1,2676E+07) +(6,2335E+06)i	(-2,9865E+06) +(8,4137E+06)i
7	(2,2286E+07) -(6,3481E+07)i	(-3,635E+06) -(8,3208E+06)i	7	(1,2676E+07) -(6,2335E+06)i	(-2,9865E+06) -(8,4137E+06)i	
1000 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	(1,4321E+05)+0i	-18611+0i	1	36842+0i	-9671,3+0i
	2	(4,8021E+06)+0i	(-2,2984E+05)+0i	2	(1,2748E+06)+0i	(-1,1831E+05)+0i
	3	(3,7827E+07)+0i	(-1,3774E+06)+0i	3	(1,5768E+07)+0i	(-7,6411E+05)+0i
	4	(-2,4316E+09)+0i	(-4,1365E+07)+0i	4	(-2,5402E+09)+0i	(-3,7669E+07)+0i
	5	(-9,8969E+09)+0i	(-9,6852E+07)+0i	5	(-3,8879E+11)+0i	(-6,6369E+08)+0i
	6	(2,8637E+07) +(9,1355E+07)i	(-3,2591E+06) +(9,005E+06)i	6	(-6,288E+06) +(6,0013E+07)i	(-3,3572E+06) +(6,9488E+06)i
7	(2,8637E+07) -(9,1355E+07)i	(-3,2591E+06) -(9,005E+06)i	7	(-6,288E+06) -(6,0013E+07)i	(-3,3572E+06) -(6,9488E+06)i	
2000 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	84579+0i	-6344,8+0i	1	34300+0i	-4438,8+0i
	2	(2,5896E+06)+0i	-72030+0i	2	(9,761E+05)+0i	-47428+0i
	3	(3,0656E+07)+0i	(-4,6362E+05)+0i	3	(1,1856E+07)+0i	(-2,924E+05)+0i
	4	(1,3453E+08)+0i	(-2,7675E+06)+0i	4	(4,5306E+07)+0i	(-1,2739E+06)+0i
	5	(-5,2311E+09)+0i	(-3,6842E+07)+0i	5	(-1,0841E+10)+0i	(-6,5364E+07)+0i
	6	(1,5088E+08) +(1,0994E+08)i	(-3,6656E+06) +(1,1034E+07)i	6	(1,0354E+07) +(9,0375E+07)i	(-3,1875E+06) +(7,8762E+06)i
7	(1,5088E+08) -(1,0994E+08)i	(-3,6656E+06) -(1,1034E+07)i	7	(1,0354E+07) -(9,0375E+07)i	(-3,1875E+06) -(7,8762E+06)i	
4000 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	(1,3302E+05)+0i	-4010+0i	1	64290+0i	-3127,3+0i
	2	(3,6655E+06)+0i	-42536+0i	2	(1,6905E+06)+0i	-31649+0i
	3	(3,7156E+07)+0i	(-2,7076E+05)+0i	3	(1,8079E+07)+0i	(-1,9413E+05)+0i
	4	(1,3122E+08)+0i	(-1,5813E+06)+0i	4	(6,8823E+07)+0i	(-9,7782E+05)+0i
	5	(-7,1584E+09)+0i	(-4,5634E+07)+0i	5	(-1,1167E+10)+0i	(-6,5689E+07)+0i
	6	(1,5808E+08) +(1,1115E+08)i	(-2,9753E+06) +(1,1999E+07)i	6	(2,8234E+07) +(1,0227E+08)i	(-2,7879E+06) +(8,7086E+06)i
7	(1,5808E+08) -(1,1115E+08)i	(-2,9753E+06) -(1,1999E+07)i	7	(2,8234E+07) -(1,0227E+08)i	(-2,7879E+06) -(8,7086E+06)i	

Tabela B.4 – Funções racionais (resíduos e polos) para eletrodos horizontais (EH), com $L = 30m$ e $D_c = 20cm$, para diferentes ρ_{solo} . Situações: sem concreto ($h_c = 0$) e totalmente concretado ($h_c = 4/4$).

Eletrodo Horizontal (Contrapeso), $L = 30m, D_c = 20cm$						
ρ_{solo}	Sem Encapsulamento ($h_c = 0$)			Totalmente Encapsulado ($h_c = 4/4$)		
	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
300 $\Omega.m$	1	14133+0i	-23184+0i	1	14797+0i	-28664+0i
	2	(3,199E+05)+0i	-2,531E+05+0i	2	(2,2634E+05)+0i	(-2,7264E+05)+0i
	3	(-4,7365E+08)+0i	-1,1722E+07+0i	3	(-6,9977E+08)+0i	(-8,5726E+06)+0i
	4	(2,7522E+10)+0i	-8,6653E+07+0i	4	(-9,041E+09)+0i	(-8,4809E+07)+0i
	5	(-6,3216E+10)+0i	-1,1162E+08+0i	5	(-1,109E+12)+0i	(-1,3969E+09)+0i
	6	(1,335E+07) +(5,9983E+07)i	-2,8788E+06 +2,1971E+06i	6	(1,7193E+08) +(2,6536E+08)i	(-4,3617E+06) +(1,4972E+06)i
	7	(1,335E+07) -(5,9983E+07)i	-2,8788E+06 -2,1971E+06i	7	(1,7193E+08) -(2,6536E+08)i	(-4,3617E+06) -(1,4972E+06)i
600 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	8605,7+0i	-7976,8+0i	1	2944,5+0i	-4897,9+0i
	2	(2,7489E+05)+0i	-93016+0i	2	86606+0i	-53542+0i
	3	(3,2112E+06)+0i	(-5,6399E+05)+0i	3	(1,2459E+06)+0i	(-3,355E+05)+0i
	4	(-3,5673E+08)+0i	(-9,6515E+06)+0i	4	(-3,2723E+08)+0i	(-1,112E+07)+0i
	5	(-7,1665E+10)+0i	(-2,2087E+08)+0i	5	(-2,9786E+10)+0i	(-1,2885E+08)+0i
	6	(1,0641E+07) +(3,9528E+07)i	(-2,2804E+06) +(2,9388E+06)i	6	(-1,1705E+06) +(3,258E+07)i	(-2,0177E+06) +(2,3042E+06)i
7	(1,0641E+07) -(3,9528E+07)i	(-2,2804E+06) -(2,9388E+06)i	7	(-1,1705E+06) -(3,258E+07)i	(-2,0177E+06) -(2,3042E+06)i	
1000 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	34779+0i	-10925+0i	1	9425,2+0i	-5790,5+0i
	2	(1,1617E+06)+0i	(-1,3186E+05)+0i	2	(2,9947E+05)+0i	-66260+0i
	3	(1,3878E+07)+0i	(-8,3713E+05)+0i	3	(4,5324E+06)+0i	(-4,3474E+05)+0i
	4	(-3,8113E+08)+0i	(-7,3165E+06)+0i	4	(-2,8942E+08)+0i	(-1,0477E+07)+0i
	5	(-8,4089E+10)+0i	(-2,4345E+08)+0i	5	(-3,022E+10)+0i	(-1,2938E+08)+0i
	6	(3,8481E+07) +(2,0648E+07)i	(-2,319E+06) +(4,4569E+06)i	6	(1,5793E+06) +(3,1672E+07)i	(-1,8695E+06) +(2,8228E+06)i
7	(3,8481E+07) -(2,0648E+07)i	(-2,319E+06) -(4,4569E+06)i	7	(1,5793E+06) -(3,1672E+07)i	(-1,8695E+06) -(2,8228E+06)i	
2000 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	(1,0022E+05)+0i	-9996,5+0i	1	39865+0i	-6710,6+0i
	2	(3,0939E+06)+0i	(-1,1706E+05)+0i	2	(1,2542E+06)+0i	-77282+0i
	3	(2,8932E+07)+0i	(-7,3234E+05)+0i	3	(1,5033E+07)+0i	(-5,0039E+05)+0i
	4	(-5,0276E+08)+0i	(-9,5855E+06)+0i	4	(-3,1522E+08)+0i	(-1,0395E+07)+0i
	5	(-9,3043E+12)+0i	(-2,8241E+09)+0i	5	(-4,0931E+10)+0i	(-1,541E+08)+0i
	6	(4,0574E+07) +(3,3316E+07)i	(-1,8018E+06) +(5,1897E+06)i	6	(1,1545E+07) +(3,5412E+07)i	(-1,6835E+06) +(3,6988E+06)i
7	(4,0574E+07) -(3,3316E+07)i	(-1,8018E+06) -(5,1897E+06)i	7	(1,1545E+07) -(3,5412E+07)i	(-1,6835E+06) -(3,6988E+06)i	
4000 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	(1,953E+05)+0i	-7169+0i	1	(1,0083E+05)+0i	-5659,6+0i
	2	(5,5546E+06)+0i	-81543+0i	2	(2,9541E+06)+0i	-63737+0i
	3	(4,3575E+07)+0i	-5,4861E+05+0i	3	(2,702E+07)+0i	(-4,2667E+05)+0i
	4	(-6,7474E+08)+0i	-1,347E+07+0i	4	(-4,277E+08)+0i	(-1,2748E+07)+0i
	5	(-2,6935E+10)+0i	-1,5984E+08+0i	5	(-9,401E+10)+0i	(-2,4719E+08)+0i
	6	(4,5775E+07) +(5,2053E+07)i	-1,5193E+06 +5,6332E+06i	6	(1,5638E+07) +(4,2471E+07)i	(-1,4449E+06) +(4,2239E+06)i
7	(4,5775E+07) -(5,2053E+07)i	-1,5193E+06 -5,6332E+06i	7	(1,5638E+07) -(4,2471E+07)i	(-1,4449E+06) -(4,2239E+06)i	

Tabela B.5 – Funções racionais (resíduos e polos) para eletrodos horizontais (EH), com $L = 45m$ e $D_c = 20cm$, para diferentes ρ_{solo} . Situações: sem concreto ($h_c = 0$) e totalmente concretado ($h_c = 4/4$).

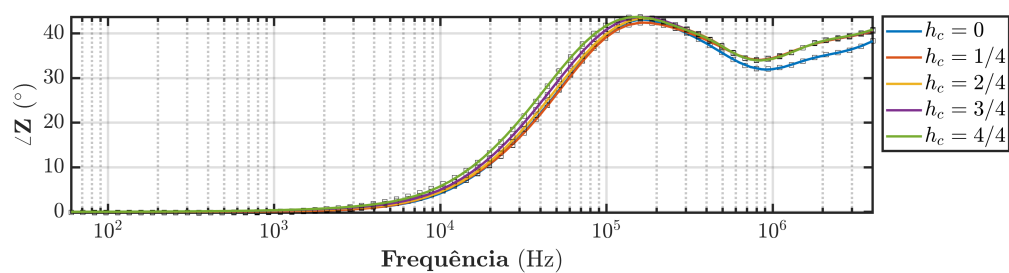
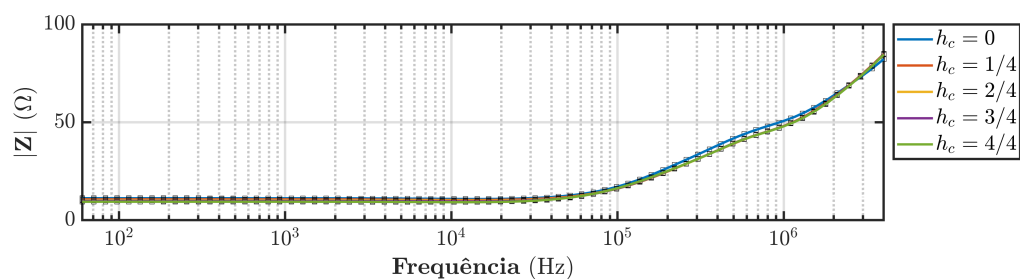
Eletrodo Horizontal (Contrapeso), $L = 45m$, $D_c = 20cm$						
ρ_{solo}	Sem Encapsulamento ($h_c = 0$)			Totalmente Encapsulado ($h_c = 4/4$)		
	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
300 $\Omega.m$	1	43230+0i	-57222+0i	1	37257+0i	-61015+0i
	2	(-1,2454E+08)+0i	(-2,8285E+06)+0i	2	(-4,0435E+07)+0i	(-1,5908E+06)+0i
	3	(-6,3763E+10)+0i	(-2,0187E+08)+0i	3	(-2,9578E+10)+0i	(-1,2561E+08)+0i
	4	(1,8919E+06) +(2,2573E+06)i	(-9,82E+05) +(1,073E+06)i	4	(-5,0505E+06) +(4,2401E+06)i	(-1,7009E+06) +(2,4514E+06)i
	5	(1,8919E+06) -(2,2573E+06)i	(-9,82E+05) -(1,073E+06)i	5	(-5,0505E+06) -(4,2401E+06)i	(-1,7009E+06) -(2,4514E+06)i
	6	(-1,1549E+08) -(1,1746E+08)i	(-8,2399E+06) +(4,5567E+06)i	6	(-8,2601E+07) +(1,2902E+08)i	(-1,2737E+07) +(9,2698E+06)i
	7	(-1,1549E+08) +(1,1746E+08)i	(-8,2399E+06) -(4,5567E+06)i	7	(-8,2601E+07) -(1,2902E+08)i	(-1,2737E+07) -(9,2698E+06)i
600 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	6810,4+0i	-8621,5+0i	1	2546,6+0i	-5511,8+0i
	2	(1,8254E+05)+0i	-93189+0i	2	71860+0i	-59320+0i
	3	(1,3104E+06)+0i	(-4,382E+05)+0i	3	(1,0776E+06)+0i	(-3,6335E+05)+0i
	4	(-3,0195E+08)+0i	(-1,0889E+07)+0i	4	(-3,6097E+08)+0i	(-1,3972E+07)+0i
	5	(-6,453E+10)+0i	(-2,0831E+08)+0i	5	(-3,4937E+10)+0i	(-1,4257E+08)+0i
	6	(-1,4215E+07) +3,3265E+07i	(-1,825E+06) +(1,449E+06)i	6	(-1,8052E+07) +(3,3582E+07)i	(-1,9699E+06) +(1,0347E+06)i
7	(-1,4215E+07) -(3,3265E+07)i	(-1,825E+06) -(1,449E+06)i	7	(-1,8052E+07) -(3,3582E+07)i	(-1,9699E+06) -(1,0347E+06)i	
1000 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	8320,5+0i	-5614,5+0i	1	7697,2+0i	-6339,8+0i
	2	(2,4181E+05)+0i	-61261+0i	2	(2,0408E+05)+0i	-66600+0i
	3	(3,5821E+06)+0i	(-3,8697E+05)+0i	3	(2,5575E+06)+0i	(-3,8075E+05)+0i
	4	(-2,5329E+08)+0i	(-7,4156E+06)+0i	4	(-2,163E+08)+0i	(-9,2881E+06)+0i
	5	(-4,681E+10)+0i	(-1,7566E+08)+0i	5	(-2,518E+10)+0i	(-1,1537E+08)+0i
	6	(6,5115E+06) +(3,2674E+07)i	(-1,5903E+06) +(2,2479E+06)i	6	(-6,0537E+06) +(3,0672E+07)i	(-1,608E+06) +(1,6277E+06)i
7	(6,5115E+06) -(3,2674E+07)i	(-1,5903E+06) -(2,2479E+06)i	7	(-6,0537E+06) -(3,0672E+07)i	(-1,608E+06) -(1,6277E+06)i	
2000 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	34050+0i	-6336+0i	1	19726+0i	-5330,7+0i
	2	(1,0628E+06)+0i	-72442+0i	2	(6,1764E+05)+0i	-60292+0i
	3	(1,3518E+07)+0i	(-4,7561E+05)+0i	3	(8,6902E+06)+0i	(-4,0286E+05)+0i
	4	(-2,6966E+08)+0i	(-5,9773E+06)+0i	4	(-1,798E+08)+0i	(-5,43E+06)+0i
	5	(-7,0374E+10)+0i	(-2,2286E+08)+0i	5	(-2,3179E+10)+0i	(-1,0906E+08)+0i
	6	(2,2271E+07) +(2,487E+07)i	(-1,2926E+06) +(3,1243E+06)i	6	(1,487E+07) +(2,3642E+07)i	(-1,3013E+06) +(2,4941E+06)i
7	(2,2271E+07) -(2,487E+07)i	(-1,2926E+06) -(3,1243E+06)i	7	(1,487E+07) -(2,3642E+07)i	(-1,3013E+06) -(2,4941E+06)i	
4000 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	98556+0i	-5816,3+0i	1	57413+0i	-4905,4+0i
	2	(2,8066E+06)+0i	-64742+0i	2	(1,6856E+06)+0i	-54442+0i
	3	(2,5293E+07)+0i	(-4,2823E+05)+0i	3	(1,7047E+07)+0i	(-3,6393E+05)+0i
	4	(-3,4715E+08)+0i	(-6,8994E+06)+0i	4	(-1,9506E+08)+0i	(-5,405E+06)+0i
	5	(-7,9218E+12)+0i	(-2,5638E+09)+0i	5	(-3,2364E+10)+0i	(-1,3267E+08)+0i
	6	(3,0415E+07) +(2,959E+07)i	(-1,1089E+06) +(3,6117E+06)i	6	(1,8902E+07) +(2,298E+07)i	(-1,0489E+06) +(2,9254E+06)i
7	(3,0415E+07) -(2,959E+07)i	(-1,1089E+06) -(3,6117E+06)i	7	(1,8902E+07) -(2,298E+07)i	(-1,0489E+06) -(2,9254E+06)i	

Tabela B.6 – Funções racionais (resíduos e polos) para eletrodos horizontais (EH), com $L = 60m$ e $D_c = 20cm$, para diferentes ρ_{solo} . Situações: sem concreto ($h_c = 0$) e totalmente concretado ($h_c = 4/4$).

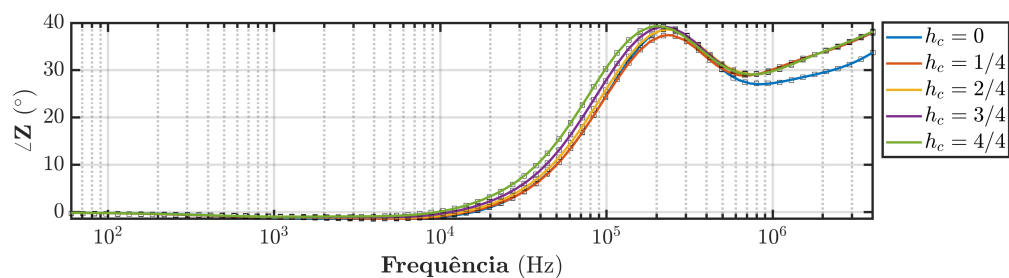
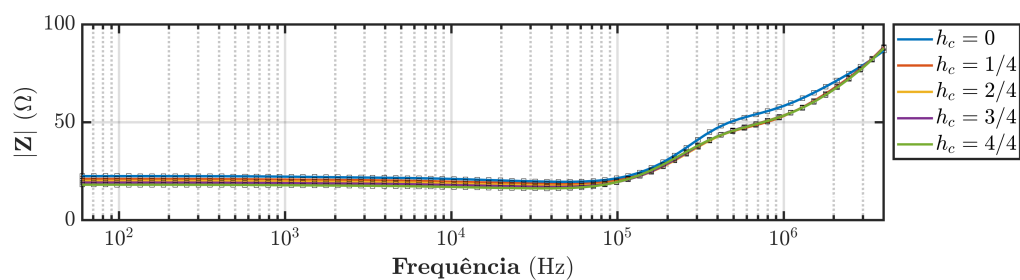
Eletrodo Horizontal (Contrapeso), $L = 60m$, $D_c = 20cm$						
ρ_{solo}	Sem Encapsulamento ($h_c = 0$)			Totalmente Encapsulado ($h_c = 4/4$)		
	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
300 $\Omega.m$	1	21274+0i	-42575+0i	1	22199+0i	-50789+0i
	2	(-1,0959E+08)+0i	(-2,8086E+06)+0i	2	(-1,9958E+07)+0i	(-9,552E+05)+0i
	3	(-5,4026E+10)+0i	(-1,8317E+08)+0i	3	(-3,3542E+10)+0i	(-1,3751E+08)+0i
	4	(1,2797E+06) +(5,7711E+06)i	(-8,6592E+05) +(5,7101E+05)i	4	(-3,3248E+07) -(2,6415E+07)i	(-2,096E+06) +(8,9229E+05)i
	5	(1,2797E+06) -(5,7711E+06)i	(-8,6592E+05) -(5,7101E+05)i	5	(-3,3248E+07) +(2,6415E+07)i	(-2,096E+06) -(8,9229E+05)i
	6	(-9,5647E+07) -(1,6458E+07)i	(-8,2128E+06) +(7,039E+06)i	6	(-1,2471E+08) -(3,0157E+07)i	(-9,085E+06) +(6,5554E+06)i
	7	(-9,5647E+07) +(1,6458E+07)i	(-8,2128E+06) -(7,039E+06)i	7	(-1,2471E+08) +(3,0157E+07)i	(-9,085E+06) -(6,5554E+06)i
600 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	9344,4+0i	-12362+0i	1	19284+0i	-22315+0i
	2	(2,141E+05)+0i	(-1,267E+05)+0i	2	(1,5049E+06)+0i	(-3,4109E+05)+0i
	3	(4,2621E+06)+0i	(-6,2303E+05)+0i	3	(-3,2642E+07)+0i	(-1,1929E+06)+0i
	4	(-6,4847E+07)+0i	(-1,5371E+06)+0i	4	(-3,543E+08)+0i	(-1,2431E+07)+0i
	5	(-4,3532E+10)+0i	(-1,5981E+08)+0i	5	(-3,3506E+10)+0i	(-1,3877E+08)+0i
	6	(7,2081E+07) +(6,2798E+08)i	(-1,9552E+07) +(5,8931E+06)i	6	(9,6502E+06) +(1,7698E+07)i	(-3,0875E+06) +(2,6806E+06)i
7	(7,2081E+07) -(6,2798E+08)i	(-1,9552E+07) -(5,8931E+06)i	7	(9,6502E+06) -(1,7698E+07)i	(-3,0875E+06) -(2,6806E+06)i	
1000 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	16578+0i	-10027+0i	1	9037,4+0i	-8060+0i
	2	(5,3207E+05)+0i	(-1,1757E+05)+0i	2	(2,9791E+05)+0i	-94441+0i
	3	(9,8505E+06)+0i	(-8,1283E+05)+0i	3	(-3,2245E+10)+0i	(-1,3515E+08)+0i
	4	(-2,5253E+08)+0i	(-1,0062E+07)+0i	4	(-2,2893E+07) -(1,3344E+07)i	(-9,5853E+05) +(4,1735E+05)i
	5	(-6,1276E+10)+0i	(-2,06E+08)+0i	5	(-2,2893E+07) +(1,3344E+07)i	(-9,5853E+05) -(4,1735E+05)i
	6	(-2,1845E+07) +(2,927E+07)i	(-1,4105E+06) +(9,9744E+05)i	6	-1,342E+08 -5,9438E+07i	(-1,2293E+07) +(2,0216E+06)i
7	(-2,1845E+07) -(2,927E+07)i	(-1,4105E+06) -(9,9744E+05)i	7	(-1,342E+08) +(5,9438E+07)i	(-1,2293E+07) -(2,0216E+06)i	
2000 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	22691+0i	-5789,4+0i	1	11719+0i	-4534,3+0i
	2	(6,6398E+05)+0i	-63601+0i	2	(3,2033E+05)+0i	-47401+0i
	3	(8,6278E+06)+0i	(-4,0505E+05)+0i	3	(4,0147E+06)+0i	(-2,8621E+05)+0i
	4	(-2,1315E+08)+0i	(-5,1055E+06)+0i	4	(-1,3527E+08)+0i	(-7,2574E+06)+0i
	5	(-3,3174E+10)+0i	(-1,4832E+08)+0i	5	(-2,2999E+10)+0i	(-1,0889E+08)+0i
	6	(1,5067E+07) +(2,751E+07)i	(-1,1964E+06) +(2,0882E+06)i	6	(-8,3508E+06) +(2,0051E+07)i	(-9,9831E+05) +(1,3439E+06)i
7	(1,5067E+07) -(2,751E+07)i	(-1,1964E+06) -(2,0882E+06)i	7	(-8,3508E+06) -(2,0051E+07)i	(-9,9831E+05) -(1,3439E+06)i	
4000 $\Omega.m$	Índice	Resíduo	Polo	Índice	Resíduo	Polo
	1	62563+0i	-5134,7+0i	1	35888+0i	-4278,6+0i
	2	(1,797E+06)+0i	-56646+0i	2	(1,0217E+06)+0i	-46107+0i
	3	(1,7934E+07)+0i	(-3,7772E+05)+0i	3	(1,0808E+07)+0i	(-2,9919E+05)+0i
	4	(-2,3462E+08)+0i	(-4,4529E+06)+0i	4	(-1,3147E+08)+0i	(-4,4476E+06)+0i
	5	(-5,4084E+10)+0i	(-1,9732E+08)+0i	5	(-2,3824E+10)+0i	(-1,1111E+08)+0i
	6	(2,429E+07) +(2,0059E+07)i	(-9,349E+05) +(2,6405E+06)i	6	(8,0388E+06) +(2,1846E+07)i	(-8,5249E+05) +(1,9332E+06)i
7	(2,429E+07) -(2,0059E+07)i	(-9,349E+05) -(2,6405E+06)i	7	(8,0388E+06) -(2,1846E+07)i	(-8,5249E+05) -(1,9332E+06)i	

B.2 Impedância Harmônica e GPR - Complementares

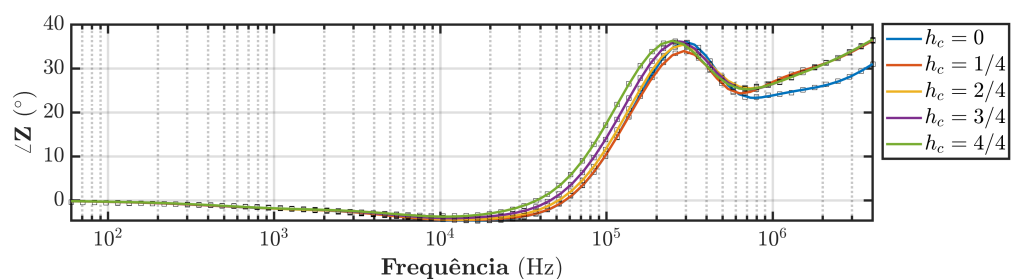
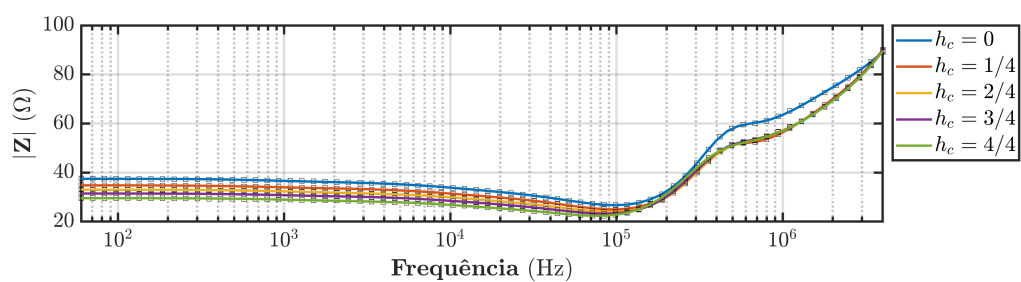
Figura B.1 – Impedância harmônica $Z(j\omega)$ para AEC-EH com $L = 45$ m, $D_c = 20$ cm e diferentes frações de concretagem (h_c), para ρ_{solo} de 300 a 4000 $\Omega\cdot\text{m}$.



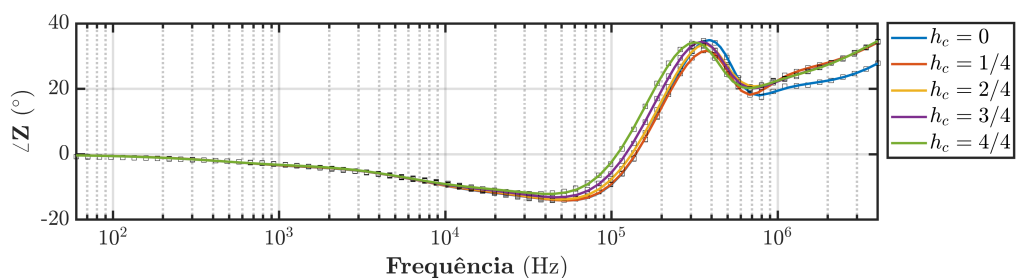
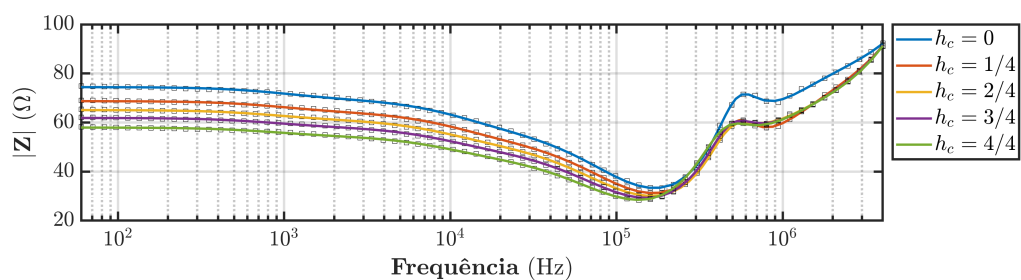
(a) Solo de 300 $\Omega\cdot\text{m}$



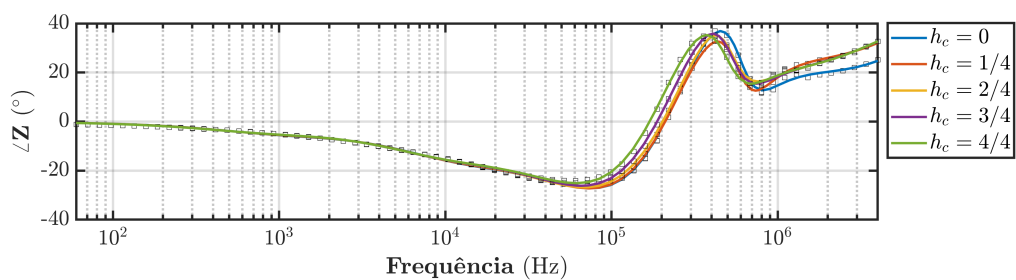
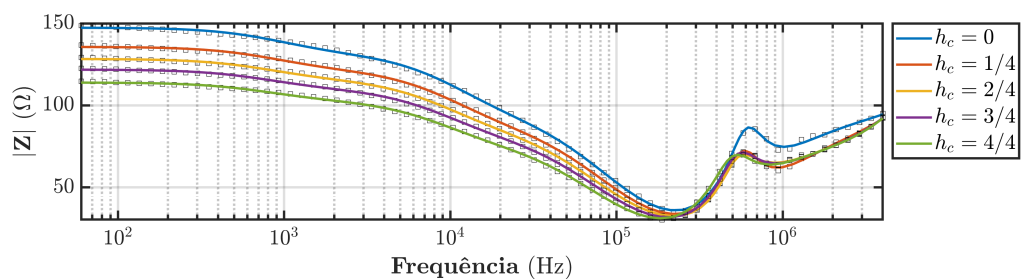
(b) Solo de 600 $\Omega\cdot\text{m}$



(c) Solo de 1000 Ω.m

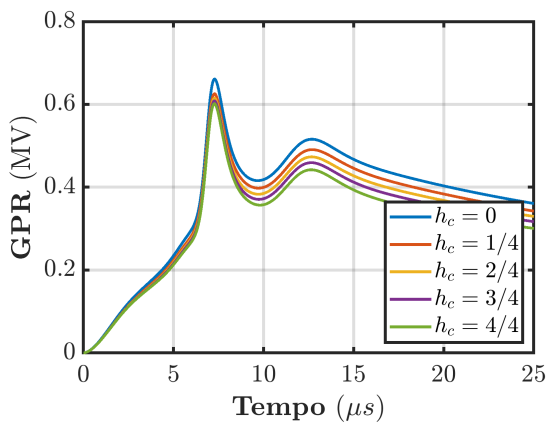


(d) Solo de 2000 Ω.m

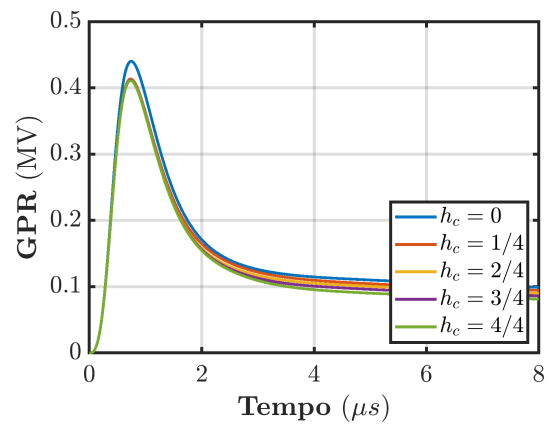


(e) Solo de 4000 Ω.m

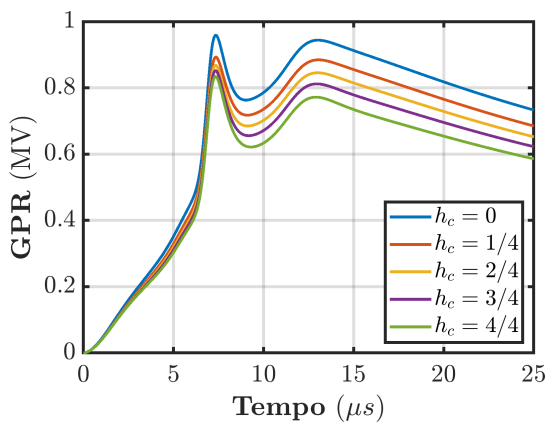
Figura B.2 – GPR para AEC-EH com $L = 45$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.



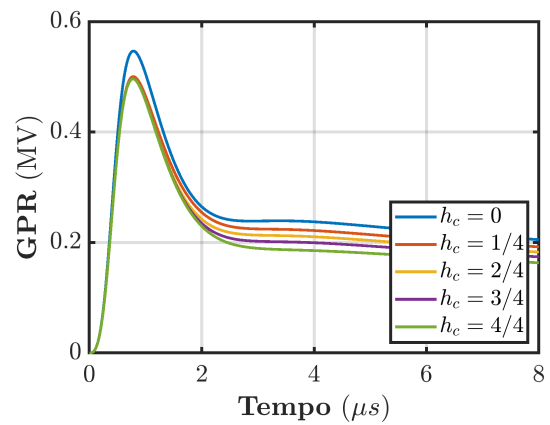
(a) Primeira descarga - Solo de 300 Ω .m



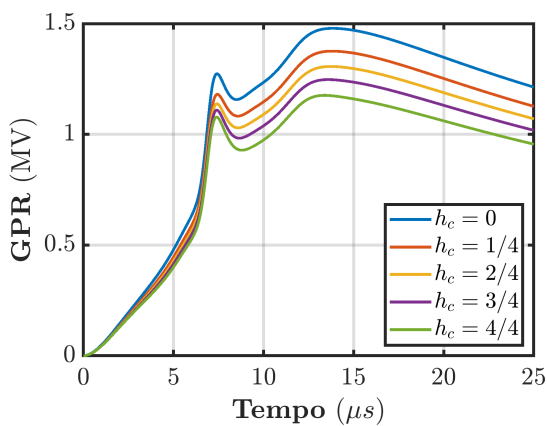
(b) Descarga Subsequente- Solo de 300 Ω .m



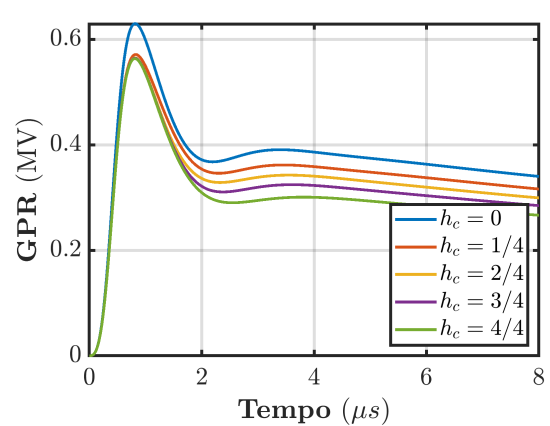
(c) Primeira descarga - Solo de 600 Ω .m



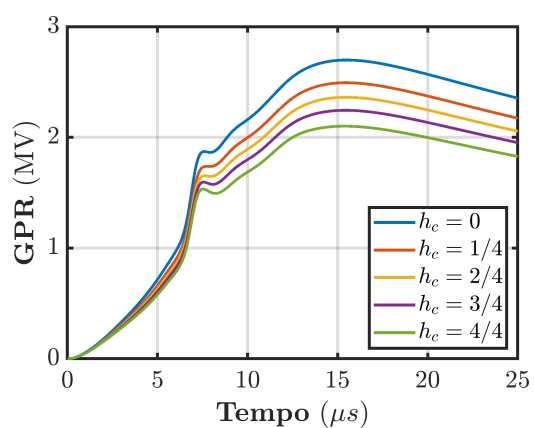
(d) Descarga Subsequente- Solo de 600 Ω .m.



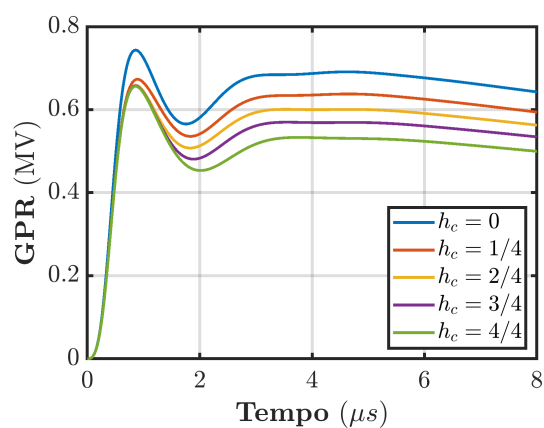
(e) Primeira descarga - Solo de 1000 Ω .m



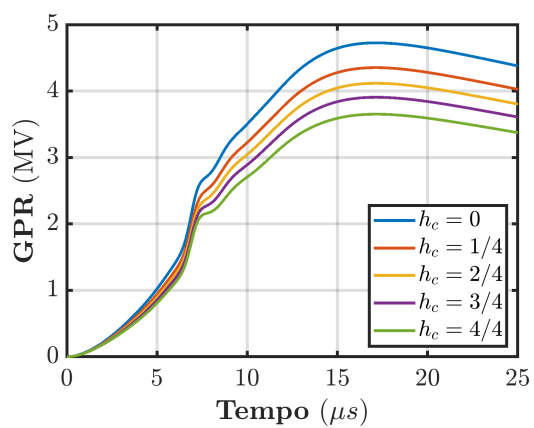
(f) Descarga Subsequente- Solo de 1000 Ω .m.



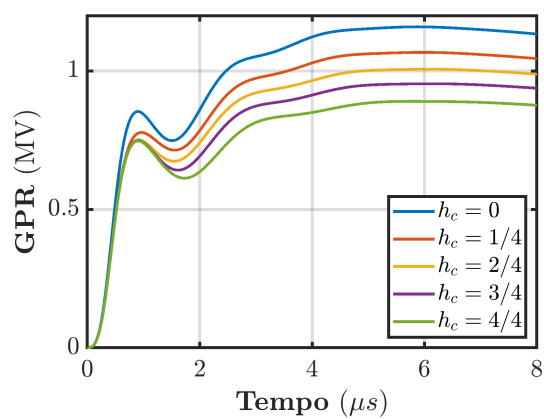
(g) Primeira descarga - Solo de 2000 Ω .m



(h) Descarga Subsequente- Solo de 2000 Ω .m.

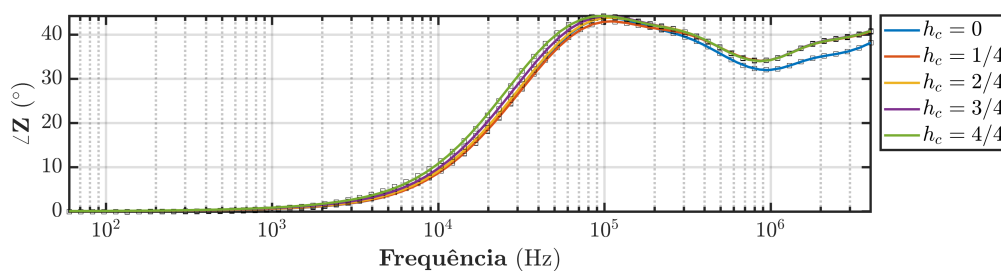
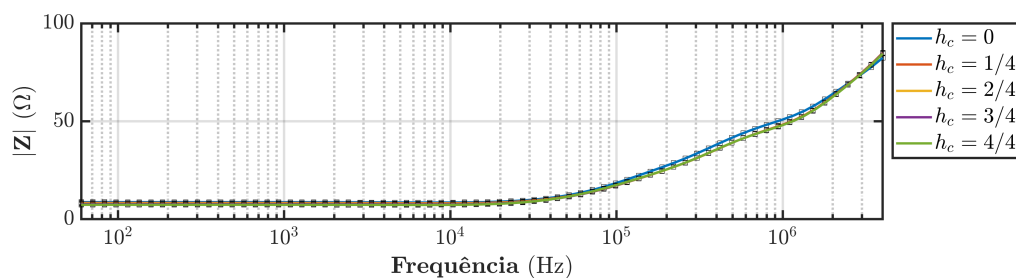


(i) Primeira descarga - Solo de 4000 Ω .m

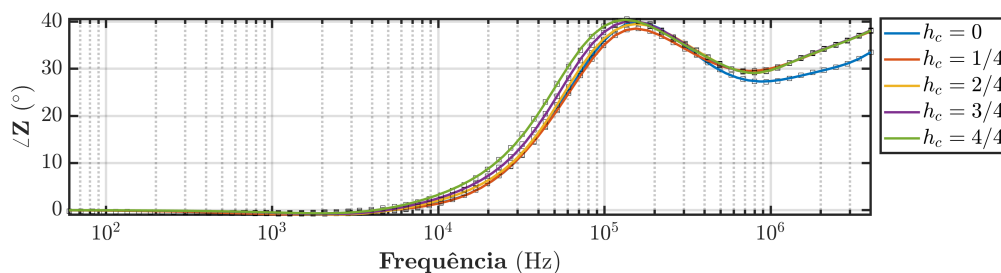
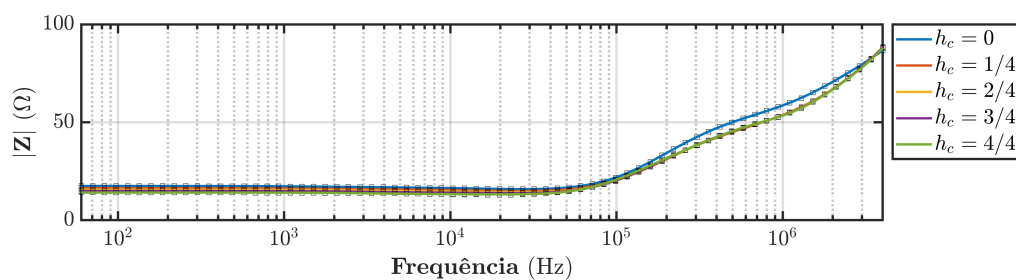


(j) Descarga Subsequente- Solo de 4000 Ω .m.

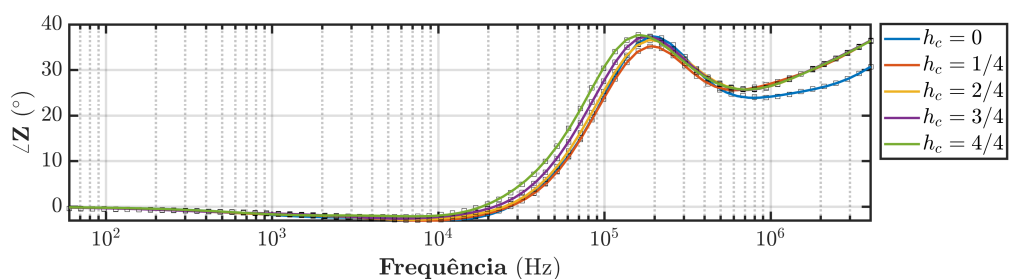
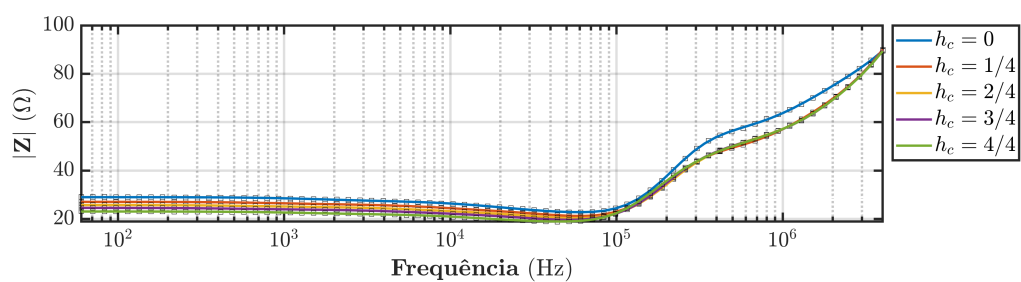
Figura B.3 – Impedância harmônica $Z(j\omega)$ para AEC-EH com $L = 60$ m, $D_c = 20$ cm e diferentes frações de concretagem (h_c), para ρ_{solo} de 300 a 4000 $\Omega\cdot\text{m}$.



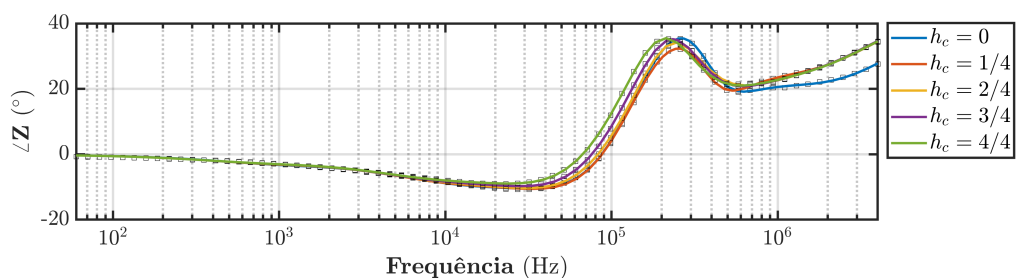
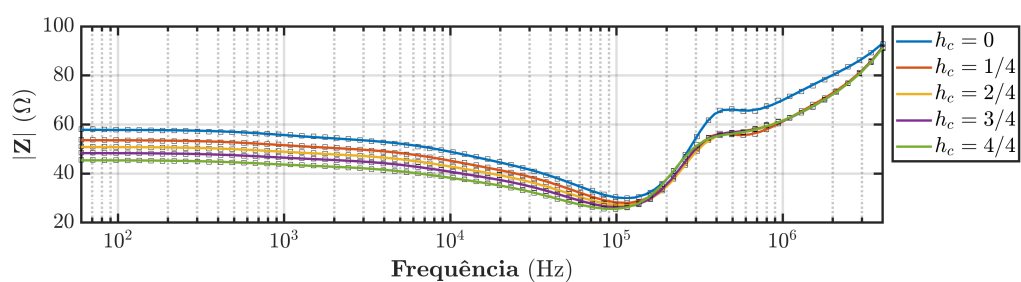
(a) Solo de 300 $\Omega\cdot\text{m}$



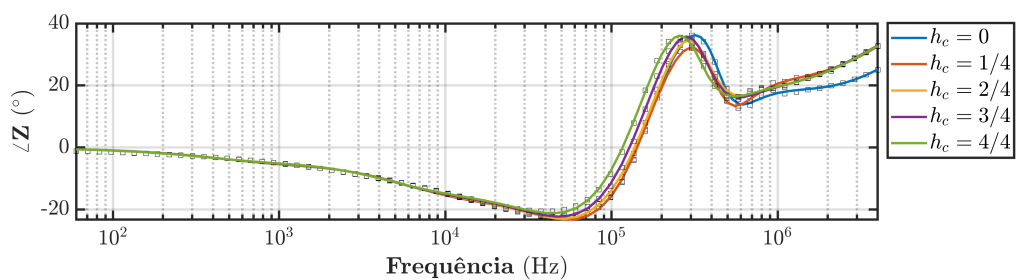
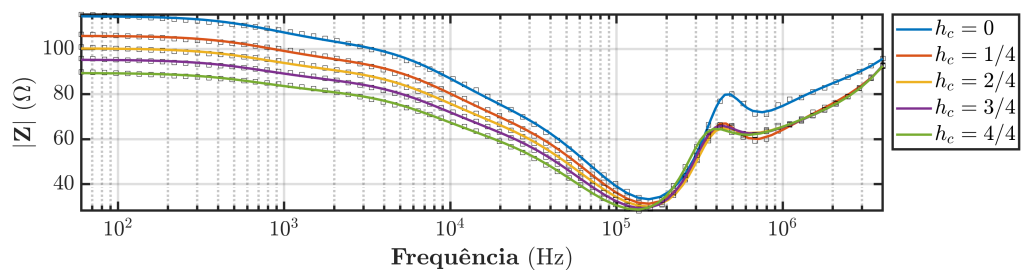
(b) Solo de 600 $\Omega\cdot\text{m}$



(c) Solo de 1000 Ω.m

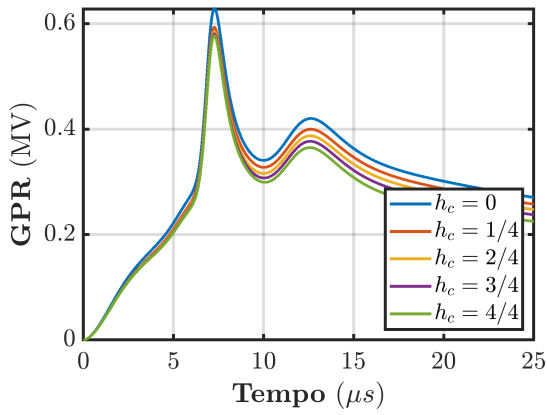


(d) Solo de 2000 Ω.m

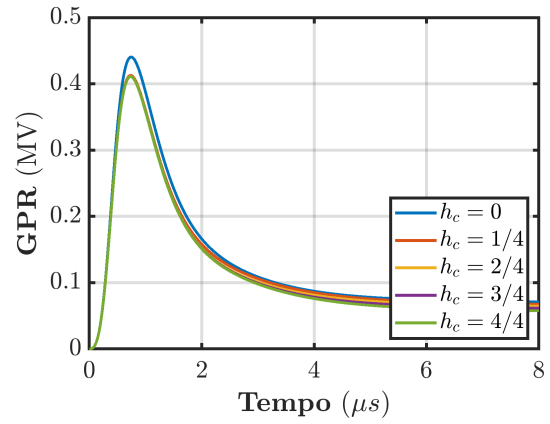


(e) Solo de 4000 Ω.m

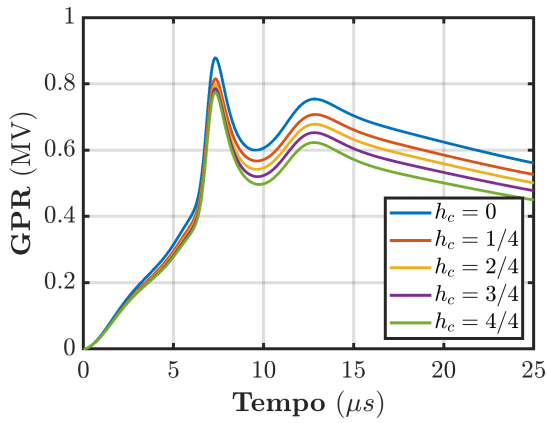
Figura B.4 – GPR para AEC-EH com $L = 60$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.



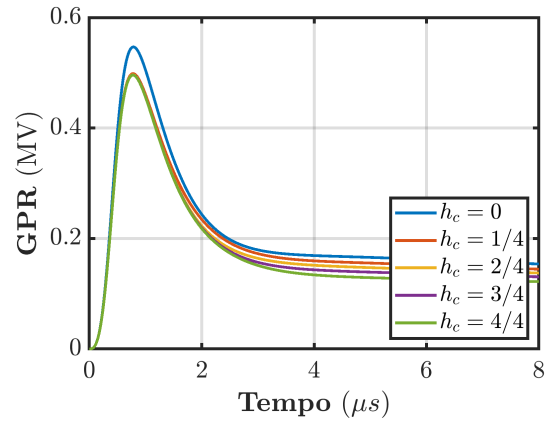
(a) Primeira descarga - Solo de 300 Ω .m



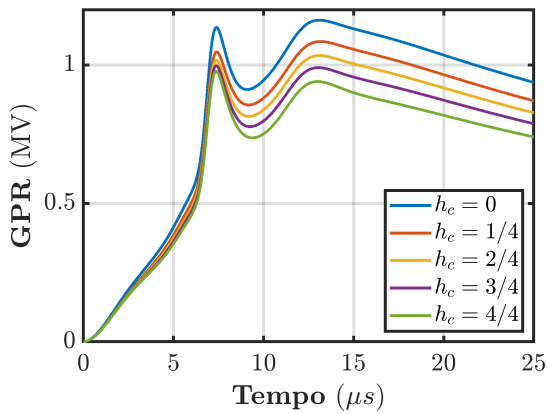
(b) Descarga Subsequente- Solo de 300 Ω .m



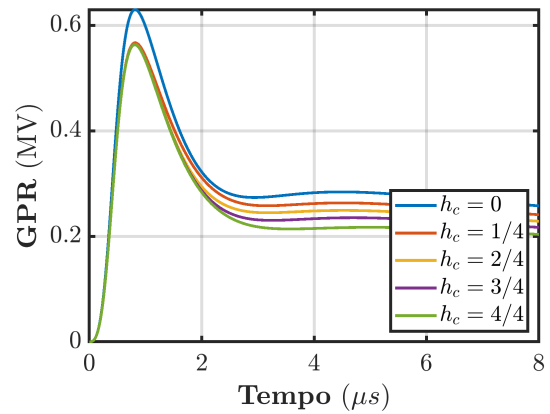
(c) Primeira descarga - Solo de 600 Ω .m



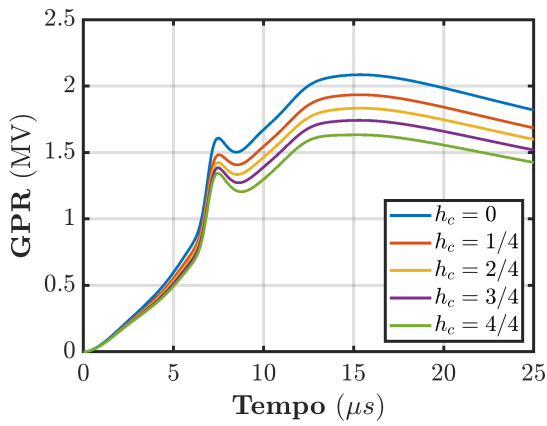
(d) Descarga Subsequente- Solo de 600 Ω .m.



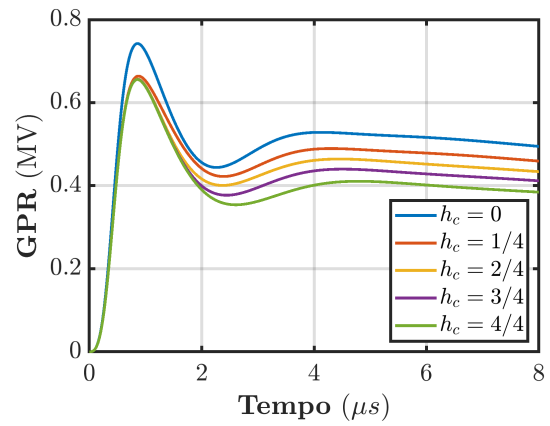
(e) Primeira descarga - Solo de 1000 Ω .m



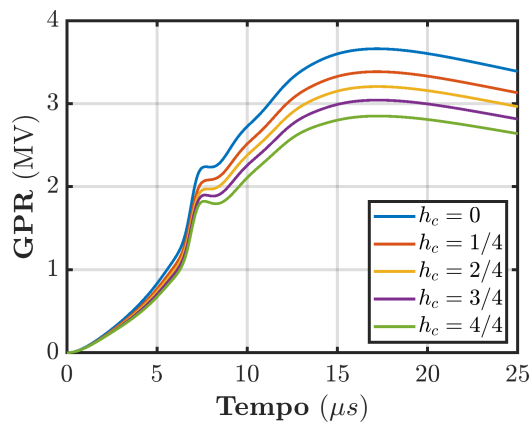
(f) Descarga Subsequente- Solo de 1000 Ω .m.



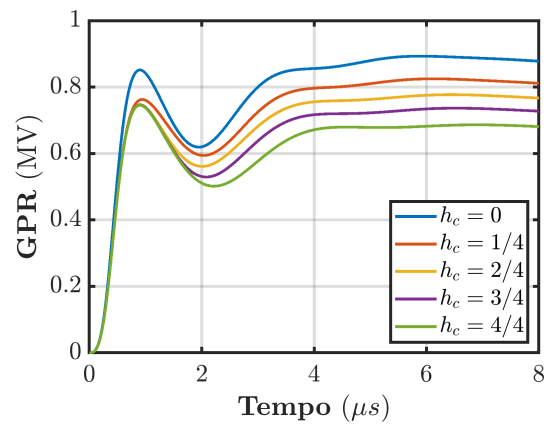
(g) Primeira descarga - Solo de 2000 Ω.m



(h) Descarga Subsequente- Solo de 2000 Ω.m.



(i) Primeira descarga - Solo de 4000 Ω.m



(j) Descarga Subsequente- Solo de 4000 Ω.m.

B.3 Tabelas com Valores de Pico do GPR e Impedância Impulsiva

Tabela B.7 – Valor de **pico do GPR** (Mega-Volts) para AEC-EV com $L = 3$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.

ρ_{solo} (Ω.m)	Comprimento de Concretagem (h_c)									
	0		1/4		2/4		3/4		4/4	
	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB
300	4,14	1,31	3,77	1,20	3,50	1,12	3,25	1,05	2,98	0,97
600	7,92	2,36	6,95	2,08	6,31	1,89	5,76	1,73	5,17	1,56
1000	12,57	3,56	10,80	3,07	9,71	2,77	8,80	2,51	7,84	2,24
2000	22,80	6,01	19,21	5,08	17,13	4,54	15,42	4,09	13,65	3,63
4000	39,41	9,74	32,71	8,10	29,02	7,20	26,01	6,46	22,94	5,70

Tabela B.8 – Valor de **pico do GPR** (Mega-Volts) para AEC-EV com $L = 30$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.

ρ_{solo} ($\Omega.m$)	Comprimento de Concretagem (h_c)									
	0		1/4		2/4		3/4		4/4	
	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB
300	0,68	0,43	0,63	0,39	0,62	0,39	0,60	0,39	0,60	0,39
600	1,05	0,54	0,96	0,48	0,90	0,47	0,85	0,47	0,82	0,47
1000	1,64	0,63	1,48	0,56	1,37	0,54	1,27	0,54	1,17	0,54
2000	2,97	0,77	2,64	0,69	2,43	0,64	2,23	0,64	2,04	0,64
4000	5,09	1,26	4,50	1,12	4,11	1,02	3,79	0,94	3,45	0,86

Tabela B.9 – Valor de **pico do GPR** (Mega-Volts) para AEC-EH com $L = 15$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.

ρ_{solo} ($\Omega.m$)	Comprimento de Concretagem (h_c)									
	0		1/4		2/4		3/4		4/4	
	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB
300	1,21	0,45	1,14	0,43	1,09	0,43	1,05	0,42	0,99	0,42
600	2,31	0,68	2,13	0,63	2,03	0,60	1,93	0,57	1,80	0,53
1000	3,70	1,03	3,38	0,95	3,18	0,89	3,01	0,84	2,80	0,78
2000	6,75	1,76	6,13	1,60	5,77	1,50	5,44	1,42	5,05	1,31
4000	11,85	2,89	10,69	2,61	10,04	2,45	9,46	2,30	8,74	2,13

Tabela B.10 – Valor de **pico do GPR** (Mega-Volts) para AEC-EH com $L = 30$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.

ρ_{solo} ($\Omega.m$)	Comprimento de Concretagem (h_c)									
	0		1/4		2/4		3/4		4/4	
	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB
300	0,74	0,44	0,71	0,42	0,69	0,41	0,68	0,41	0,67	0,41
600	1,31	0,55	1,23	0,51	1,17	0,50	1,12	0,50	1,05	0,50
1000	2,09	0,63	1,93	0,58	1,83	0,57	1,74	0,57	1,64	0,57
2000	3,83	1,00	3,51	0,92	3,32	0,86	3,15	0,82	2,94	0,76
4000	6,68	1,65	6,11	1,51	5,77	1,42	5,47	1,35	5,10	1,26

Tabela B.12 – Valor de **pico do GPR** (Mega-Volts) para AEC-EH com $L = 60$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.

ρ_{solo} ($\Omega.m$)	Comprimento de Concretagem (h_c)									
	0		1/4		2/4		3/4		4/4	
	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB
300	0,63	0,44	0,59	0,41	0,58	0,41	0,58	0,41	0,58	0,41
600	0,88	0,55	0,82	0,50	0,80	0,50	0,79	0,50	0,77	0,50
1000	1,16	0,63	1,08	0,57	1,03	0,56	1,00	0,56	0,98	0,56
2000	2,09	0,74	1,93	0,66	1,83	0,66	1,74	0,66	1,63	0,66
4000	3,66	0,89	3,38	0,82	3,21	0,78	3,04	0,75	2,85	0,75

Tabela B.11 – Valor de **pico do GPR** (Mega-Volts) para AEC-EH com $L = 45$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.

ρ_{solo} ($\Omega.m$)	Comprimento de Concretagem (h_c)									
	0		1/4		2/4		3/4		4/4	
	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB
300	0,66	0,44	0,63	0,41	0,61	0,41	0,61	0,41	0,60	0,41
600	0,96	0,55	0,89	0,50	0,87	0,50	0,85	0,50	0,83	0,50
1000	1,48	0,63	1,38	0,57	1,31	0,56	1,25	0,56	1,18	0,56
2000	2,70	0,74	2,49	0,67	2,36	0,66	2,24	0,66	2,10	0,66
4000	4,73	1,16	4,35	1,07	4,12	1,01	3,91	0,95	3,65	0,89

Tabela B.13 – Impedância impulsiva Z_p (Ω) para AEC-EV com $L = 3$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.

ρ_{solo} ($\Omega.m$)	Comprimento de Concretagem (h_c)									
	0		1/4		2/4		3/4		4/4	
	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB
300	91,4	82,0	83,3	75,3	77,3	70,3	71,9	65,7	65,9	60,6
600	174,9	147,4	153,4	130,1	139,3	118,5	127,1	108,4	114,2	97,7
1000	277,5	222,4	238,5	192,1	214,5	173,1	194,2	157,0	173,1	140,2
2000	503,5	376,0	424,1	317,9	378,3	284,0	340,4	255,8	301,4	226,8
4000	870,2	609,0	722,3	506,8	640,9	450,2	574,3	403,9	506,5	356,6

Tabela B.14 – Impedância impulsiva Z_p (Ω) para AEC-EV com $L = 30$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.

ρ_{solo} ($\Omega.m$)	Comprimento de Concretagem (h_c)									
	0		1/4		2/4		3/4		4/4	
	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB
300	15,0	26,7	14,0	24,4	13,6	24,2	13,4	24,2	13,2	24,2
600	23,2	33,7	21,2	30,0	19,8	29,5	18,7	29,5	18,2	29,5
1000	36,2	39,2	32,7	34,8	30,3	33,8	28,1	33,8	25,9	33,7
2000	65,5	47,9	58,3	43,3	53,6	39,9	49,3	39,8	45,0	39,8
4000	112,3	78,6	99,5	70,2	90,8	63,9	83,6	58,9	76,3	53,6

Tabela B.15 – Impedância impulsiva Z_p (Ω) para AEC-EH com $L = 15$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.

ρ_{solo} ($\Omega.m$)	Comprimento de Concretagem (h_c)									
	0		1/4		2/4		3/4		4/4	
	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB
300	26,6	28,3	25,1	27,1	24,1	26,6	23,2	26,5	21,9	26,3
600	51,0	42,3	47,1	39,2	44,7	37,3	42,5	35,5	39,8	33,2
1000	81,6	64,5	74,6	59,2	70,3	55,8	66,6	52,8	61,9	49,0
2000	149,1	110,2	135,3	99,9	127,3	93,9	120,2	88,6	111,4	82,2
4000	261,7	181,0	236,1	163,1	221,7	153,0	208,9	144,0	193,0	133,2

Tabela B.16 – Impedância impulsiva Z_p (Ω) para AEC-EH com $L = 30$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.

ρ_{solo} ($\Omega.m$)	Comprimento de Concretagem (h_c)									
	0		1/4		2/4		3/4		4/4	
	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB
300	16,4	27,6	15,6	26,0	15,2	25,8	15,0	25,8	14,7	25,8
600	29,0	34,3	27,1	31,7	25,8	31,2	24,7	31,2	23,3	31,1
1000	46,1	39,6	42,7	36,5	40,5	35,6	38,5	35,5	36,1	35,4
2000	84,5	62,3	77,5	57,3	73,3	54,0	69,5	51,2	64,9	47,6
4000	147,6	103,0	135,0	94,4	127,5	89,1	120,7	84,3	112,6	78,5

Tabela B.17 – Impedância impulsiva Z_p (Ω) para AEC-EH com $L = 45$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.

ρ_{solo} ($\Omega.m$)	Comprimento de Concretagem (h_c)									
	0		1/4		2/4		3/4		4/4	
	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB
300	14,6	27,5	13,8	25,9	13,6	25,8	13,4	25,7	13,3	25,7
600	21,2	34,2	19,7	31,3	19,2	31,1	18,8	31,1	18,4	31,0
1000	32,7	39,4	30,4	35,7	28,8	35,3	27,5	35,3	26,0	35,2
2000	59,6	46,5	55,1	42,1	52,2	41,2	49,6	41,1	46,4	41,0
4000	104,3	72,5	96,1	66,7	90,9	62,9	86,3	59,6	80,6	55,7

Tabela B.18 – Impedância impulsiva Z_p (Ω) para AEC-EH com $L = 60$ m, $D_c = 20$ cm, considerando diferentes frações de concretagem (h_c) e diferentes solos; para descargas PRI e SUB.

ρ_{solo} ($\Omega.m$)	Comprimento de Concretagem (h_c)									
	0		1/4		2/4		3/4		4/4	
	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB	PRI	SUB
300	13,9	27,5	13,1	25,8	12,9	25,7	12,8	25,7	12,8	25,7
600	19,4	34,2	18,0	31,2	17,6	31,0	17,3	31,0	17,1	31,0
1000	25,7	39,4	24,0	35,5	22,8	35,3	22,0	35,2	21,6	35,2
2000	46,0	46,4	42,7	41,5	40,5	41,1	38,5	41,0	36,1	41,0
4000	80,8	55,8	74,7	51,6	70,8	48,6	67,2	46,7	62,9	46,6