

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Geofísica

Pedro Henrique da Silva Chibane

Interferência de Estruturas Metálicas em Medidas de
Condutividade Elétrica sob Número de Indução Baixo: Estudo
Experimental e Numérico

São Paulo
2019

PEDRO HENRIQUE DA SILVA CHIBANE

Interferência de Estruturas Metálicas em Medidas de
Condutividade Elétrica sob Número de Indução Baixo: Estudo
Experimental e Numérico

Versão Corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade.

Dissertação apresentada ao Departamento de Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Geofísica.
Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Mendonça.

São Paulo
2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

*Dedico esta dissertação aos meus pais Dirceu e Maria Silvânia e à minha irmã Juliana,
essenciais na construção do homem que me tornei!*

”Pensar é o trabalho mais difícil que existe. Talvez por isso tão poucos se dediquem a ele.”

- Henry Ford

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Para começar, agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Mendonça por me mostrar que o principal crítico do nosso trabalho deve ser nós mesmos, por seus valiosos conselhos ao longo destes dois anos de mestrado e pelos anos de trabalho que começaram no final de 2012.

Agradeço a minha colega de trabalho, Caroline Urenha Silva, pelos conhecimentos compartilhados e pelo auxílio no entendimento dos procedimentos adotados durante a condução do seu trabalho experimental.

Agradeço a Jaqueline Roman e Luís Pereira, funcionários da empresa que desenvolveu o programa que utilizei ao longo da minha pesquisa de mestrado, pela paciência e disposição em esclarecer as minhas dúvidas.

Aos docentes do IAG/USP, sou intensamente grato por todos os ensinamentos que adquiri ao longo dos últimos sete anos de permanência no instituto.

Agradeço também aos funcionários do IAG/USP, desde a equipe de limpeza até as secretárias do Departamento de Geofísica, que sempre foram educados comigo e buscaram incessantemente manter a qualidade da infraestrutura do instituto.

Pessoalmente, tenho que agradecer a Deus por me guiar ao longo do mestrado, me amparando nos momentos em que duvidei das minhas capacidades e me mostrando o quanto preciso evoluir como ser humano e espírito.

Agradeço aos meus familiares, em especial aos meus pais, minha irmã e seu esposo, por todos os sacrifícios que fizeram e ainda fazem para que eu possa me dedicar por completo aos meus estudos. Sou grato ainda pelo suporte, carinho e por me ensinar que a principal riqueza de um homem não é o dinheiro, mas sim o seu caráter.

Finalmente, encerro agradecendo a todos os amigos que estiveram comigo nesta jornada do mestrado no IAG. Sejam com conversas sobre as disciplinas, sobre frivolidades ou boas risadas na Sala do Café, nos Churrascos e em outros lugares, vocês estarão sempre no meu coração. Muito Obrigado!!

Resumo

CHIBANE, P. H. S. **Interferência de Estruturas Metálicas em Medidas de Condutividade Elétrica sob Número de Indução Baixo: Estudo Experimental e Numérico.** 2019. N. f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

Uma das principais fontes de interferência em investigações geofísicas com métodos eletromagnéticos operando em número de indução baixo decorre da presença de estruturas metálicas (cercas, antenas, linhas de transmissão, entre outras). A recomendação geral é de que o equipamento esteja distante dessas estruturas, entre uma ou duas vezes a separação das bobinas que compõem o sistema de aquisição. Este trabalho apresenta um estudo experimental e numérico para caracterizar a interferência produzida por estruturas metálicas (cercas constituídas por fios de material galvanizado) em medidas de condutividade elétrica aparente com o equipamento EM34 (*Geonics Limited*®). As cercas foram dispostas com fios desconectados e conectados para se verificar as distorções causadas pelos campos elétrico e magnético de forma individualizada.

A abordagem numérica foi realizada pelo método dos elementos finitos do programa COMSOL *Multiphysics*®. A modelagem compreendeu a validação do programa utilizando resultados numéricos e experimentais disponíveis na literatura. Uma vez validado, os programas foram submetidos a testes de consistência no intuito de determinar a precisão e a acurácia das soluções obtidas, considerando os efeitos da parametrização da malha e as especificações dos dados experimentais (separação entre bobinas e frequência). Essa modelagem mostrou que, para números de indução maior que 1, os valores de condutividade aparente, tanto analíticos quanto numéricos, perdem a linearidade com valores verdadeiros e apresentam valores negativos no arranjo horizontal coplanar quando a condutividade do semi-espaco homogêneo é maior do que $610,9 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$. Os resultados experimentais e numéricos mostram que cercas com os fios desconectados (não formando espiras) não interferem significativamente nas medidas de condutividade elétrica obtidas com o EM34. Para os fios conectados, entretanto, a interferência é perceptível, aumentando em terrenos mais resistivos. Nos experimentos realizados, observou-se que a distorção causada por cercas com fios conectados ocorre em uma distância menor (cerca de $1/5$ da separação entre as bobinas) que aquela usualmente aceita (entre 1 e 2 vezes tal separação).

Palavras-chave: Modelagem Numérica, Método dos Elementos Finitos, Métodos Eletromagnéticos, EM34, Estruturas Metálicas.

Abstract

CHIBANE, P. H. S. **Interference of Metallic Structures in Electrical Conductivity Measurements under Low Induction Number: Experimental and Numerical Study.** 2019. N. f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

One of the main sources of interference in geophysical investigations with electromagnetic methods operating at low induction numbers is the presence of metallic structures (fences, antennas, transmission lines, among others). The general recommendation is that the equipment must be distant enough from these structures, about one or twice the separation of the coils that make up the acquisition system. This work presents an experimental and numerical study to characterize the interference produced by metal structures (fences made of galvanized wires) in apparent conductivity measurements with the EM34 (Geonics Limited[©]) equipment. The fences were arranged with disconnected and connected wires to verify the distortions caused by the electric and magnetic fields individually.

The numerical modeling was performed by the finite element method of the COMSOL Multiphysics[©] software. The modeling procedures comprised program validation using numerical and experimental results available in the literature. Once validated, the programs were subjected to consistency tests in order to determine the accuracy of the obtained solutions, considering the effects of the mesh parameterization and the experimental data specifications (separation between coils and frequency). Modeling results show that, for induction numbers greater than 1, the apparent conductivity values, both from analytical and numerical evaluations, lack linearity with true values and show negative values in the coplanar horizontal model when the homogeneous half-space conductivity is greater than $610,9 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$. Experimental and numerical results show that fences with disconnected wires (not forming coils) do not significantly interfere with the electrical conductivity measurements obtained with EM34. For connected wires, however, the interference is observed, being higher in more resistive terrains. In the experiments performed, it was observed that the distortion caused by fences with connected wires occurs at a smaller distance (about 1/5 of the coil separation) than that usually assumed (between 1 and 2 times such separation).

Keywords: Numerical Modeling, Finite Element Method, Electromagnetic Methods, EM34, Metallic Structures.

Sumário

Lista de Figuras	ii
Lista de Tabelas	v
Introdução	1
1. Fundamentos Teóricos	3
1.1. Teoria dos Métodos Eletromagnéticos	3
1.2. Condutividade Elétrica Aparente para o Semi-Espaço Homogêneo	6
1.3. Método dos Elementos Finitos (MEF)	8
1.3.1 Conceção da Geometria	9
1.3.2 Descrição Física do Problema	9
1.3.3 Discretização da Malha	10
1.3.4 Solução do Sistema de Equações	10
2. Validação do Programa	12
2.1. Dipolo Magnético Vertical em um Modelo de Terra Homogênea	12
2.2. Resposta Numérica de um Modelo Reduzido em Escala	14
2.3. Teste de Consistência para Incorporação das Dimensões do EM34	18
2.3.1 Distorções no Cálculo da Condutividade Elétrica Aparente com Número de Indução “Não — Baixo”	21
3. Distorções Causadas por Estruturas Metálicas em Medidas com o EM34	24
3.1. Descrição da Base de Dados Experimentais	24
3.2. Geração da Base de Dados Sintéticos	27
3.3. Resultados e Discussões	28
Conclusões	31
Referências Bibliográficas	33

Lista de Figuras

Figura 1.1:	(a) Representação esquemática do modelo de semi-espaço homogêneo, sendo σ_1 a condutividade do ar e σ_2 a condutividade do semi-espaço homogêneo. No interior do semi-espaço, é possível adicionar feições simples ou feições complexas que representem uma estrutura geológica de interesse; (b) Disposição das posições das bobinas transmissora (Tx) e receptora (Rx) na interface entre os meios 1 e 2.	10
Figura 1.2:	Distribuição dos elementos tetraédricos e seus respectivos nós para a discretização em elementos finitos do problema ao longo (a) do domínio e (b) da interface entre o ar e o meio. Os quadrados em branco representam as bobinas Tx e Rx, respectivamente.	11
Figura 2.1:	Esquematização das linhas de intensidade de campo magnético (\mathbf{H}) produzido por um dipolo magnético vertical (DMV) e seu momento de dipolo (\vec{m}).	13
Figura 2.2:	Distribuição da malha ao longo da interface entre o ar e o meio e do DMV (porção delimitada pelo círculo branco tracejado).	14
Figura 2.3:	Resposta da componente real de H_z para o modelo de semi-espaço homogêneo em um perfil na direção y e a 20 m do transmissor (DMV). (a) Resultados obtidos por Butler e Zhang (2016) e (b) Resultados obtidos neste trabalho. Resultados analíticos (círculo, quadrado, triângulo e estrela) e numéricos (linhas) para cada frequência.	15
Figura 2.4:	Resposta da componente imaginária de H_z para o modelo de semi-espaço homogêneo em um perfil na direção y e a 20 m do transmissor (DMV). (a) Resultados obtidos por Butler e Zhang (2016) e (b) Resultados obtidos neste trabalho. Resultados analíticos (círculo, quadrado, triângulo e estrela) e numéricos (linhas) para cada frequência.	16
Figura 2.5:	Esquematização do experimento realizado por Farquharson et al. (2006) para avaliar as respostas experimental e numérica de um modelo de alto contraste de condutividade elétrica. Modificado de Ansari e Farquharson (2014).	17
Figura 2.6:	Distribuição dos elementos e dos nós que constituem a malha por elementos finitos no contexto da segunda validação. (a) Interface entre o ar e a salmoura, sendo a região dos pontos de medida delimitada pela elipse (linha tracejada branca); (b) Cubo de grafita.	17

Figura 2.7:	Comparação entre resultados numéricos obtidos por Ansari e Farquharson (2014) -- AF das componentes IP e Q (linhas tracejadas e pontilhadas) com resultados numéricos (símbolos) obtidos por (a) Butler e Zhang (2016) -- BZ e (b) no presente trabalho -- CM.	18
Figura 2.8:	Esquemática dos parâmetros geométricos e físicos empregados no teste de consistência. Em todas as simulações do teste de consistência, o valor de condutividade elétrica do ar (σ_{ar}) foi a 10^{-6} S.m ⁻¹ . Já os valores da condutividade elétrica do meio (σ_m) escolhidos foram 40, 50, 100 e 1.000 mS.m ⁻¹	19
Figura 2.9:	Histograma com os valores de condutividade elétrica obtidas numericamente para quatro valores de condutividade elétrica (a) 40 mS.m ⁻¹ ; (b) 50 mS.m ⁻¹ ; (c) 100 mS.m ⁻¹ e (d) 1000 mS.m ⁻¹ ao longo de um perfil de 60 m de comprimento. O valor médio ao longo do perfil (linha azul) foi comparado com o resultado previsto pela fórmula analítica do EM34 para o arranjo horizontal coplanar (linha vermelha).	20
Figura 2.10:	(a) Valores de condutividade elétrica verdadeiro (σ_V) e analítico (σ^{AN}) para os arranjos VCP e HCP do EM34 para a frequência de 6400 Hz e separação entre as bobinas de 10 m; (b) Erro relativo em porcentagem entre o valor verdadeiro e o valor previsto para os arranjos VCP e HCP do EM34; (c) Valores típicos de resistividade/condutividade elétrica para materiais geológicos (modificado de GeoSci., 2019) e valor crítico de condutividade (círculo amarelo) igual a 610,9 mS.m ⁻¹ (1,6 Ω m). Para meios com condutividade maior do que este valor, a condutividade elétrica fornecida pelo arranjo HCP é negativa. Erros da ordem de 5 % são verificados para meios com condutividade de 1 mS.m ⁻¹ no arranjo HCP e meios com condutividade de 3,5 mS.m ⁻¹ no arranjo VCP.	23
Figura 3.1:	Localização das áreas (retângulos vermelhos) onde as aquisições dos dados experimentais foram executadas e mapa geológico da região do estudo (Adaptado de Marangoni et al., 2017). O sistema de referência do mapa é baseado em SIRGAS 2000/UTM Zona 23S. Fonte: Imagens Google.	25

- Figura 3.2: Arranjos de bobinas empregados no estudo experimental da influência de cercas em dados adquiridos com o EM34. (a) Horizontal Coplanar (HCP), onde o momento de dipolo está alinhado com o eixo das cotas e (b) Vertical Coplanar (VCP), onde o momento de dipolo pode ser alinhado com o eixo das abcissas ou com o eixo das ordenadas. 26
- Figura 3.3: Esquema da aquisição dos dados experimentais nas duas áreas de teste. Inicialmente, medidas de condutividade aparente foram tomadas sem a presença da composição de fios representando uma cerca e valores médios computados. Em seguida, a estrutura metálica (cerca AA') foi posicionada paralelamente às bobinas Tx e Rx (círculos laranjas) em distâncias crescentes de afastamento (seta para a direita, de 0,5 a 14 m) em relação ao par de bobinas e, em seguida, se aproximando da cerca (de 14 a 0,5 m, seta para a esquerda) com repetição de medidas nas mesmas posições. A simulação das cercas com fios não conectados (I) e conectados (II) e dimensões. 27
- Figura 3.4: Resultados experimentais (círculos pretos) e numéricos (estrelas azuis) para o cenário em os fios da cerca estão desconectados. (a) e (c) Área 1; (b) e (d) Área 2. Percebe-se que neste cenário, a cerca não influencia na aquisição dos dados. O fundo (linha tracejada vermelha) é baseado na média dos seis últimos pontos da base de dados experimentais com a cerca desconectada. O valor de σ_f representa a média dos valores encontrados. 29
- Figura 3.5: Resultados experimentais (círculos pretos) e numéricos (estrelas azuis) para o cenário em que os fios da cerca estão conectados. (a) e (c) Área 1; (b) e (d) Área 2. Percebe-se que, nesta situação, a cerca influencia significativamente a aquisição dos dados nos primeiros 2 m em ambas as áreas, sendo mais visível na Área 1 do que na Área 2. O fundo (linha tracejada vermelha) é baseado na média dos seis últimos pontos da base de dados experimentais com a cerca conectada. O valor de σ_f representa a média dos valores encontrados. 30

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Condutividade elétrica verdadeira (σ_V), prevista pela expressão analítica (σ^{AN}) e por meio da média simples de 26 pontos localizados ao longo do perfil construído para a simulação numérica de um modelo de semi-espaco homogêneo ($\sigma^{EF} \pm s^N$), além do número de indução (B) considerando a frequência de aquisição igual a 6400 Hz e separação entre Tx e Rx de 10 m. Os valores de condutividade elétrica verdadeiros foram selecionados de forma a representar situações encontradas em estudos ambientais (Cenários 1 a 3) e o valor máximo de leitura do EM34 (Cenário 4). As condutividades estão em $mS.m^{-1}$. O número de indução (B) calculado de acordo com a seção 1.1. 21

Introdução

A interpretação de dados geofísicos é baseada na adoção de modelos físicos, representativos dos contextos geológicos nos quais a investigação é conduzida. Dependendo da complexidade do modelo geofísico, os cálculos necessários para a interpretação quantitativa dos dados podem ser realizados de forma analítica ou numérica. Para métodos eletromagnéticos (EM), soluções analíticas são obtidas apenas para geometrias mais simples (cilindros, esferas, por exemplo) devido às relações de simetria conservarem as coordenadas constantes (Hohmann, 1988). Para modelos mais complexos, a obtenção de soluções para o campo eletromagnético depende da solução numérica de modelos que incorporam variações de propriedades físicas e campos no espaço tridimensional.

Com o desenvolvimento dos computadores, a utilização da modelagem eletromagnética 3D teve um considerável avanço nas últimas décadas. Dois métodos numéricos se destacam na solução das equações de Maxwell, necessárias para calcular os campos medidos nas investigações geofísicas: o Método das Diferenças Finitas (MDF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF). A primeira abordagem consiste em aproximar a condutividade elétrica, os campos EM e os elementos diferenciais das equações de Maxwell por diferenças de tais grandezas entre domínios homogêneos, constituintes de uma malha (normalmente retangular) na qual o modelo físico é representado. O MEF é baseado na representação dos campos por funções arbitrárias (polinômios, por exemplo) em termos de coeficientes desconhecidos para cada nó (ou elemento) que constitui a malha. As duas formulações requerem a solução de um sistema de equações em forma matricial, cuja ordem depende do número de elementos da malha (Avdeev, 2005). A principal vantagem de se resolver numericamente as equações de Maxwell pelo MDF é a sua maior simplicidade na implementação computacional. O MEF propicia maior versatilidade em incorporar geometrias complexas, sofisticando a acurácia da solução obtida. Critérios para geração de malhas nas modelagens com o MEF e solução do sistema linear envolvido são discutidos em Pridmore et al. (1981).

Avanços recentes na modelagem de anomalias eletromagnéticas com MEF permitiram a inclusão de feições batimétricas na modelagem de dados eletromagnéticos em investigações marinhas (Schwarzbach et al., 2011), a determinação de efeitos decorrentes da topografia (Ren et al., 2013) e o estudo de modelos com elevado contraste de condutividade elétrica (Ansari e Farquharson, 2014).

Nos casos onde envolvem estruturas complexas, o problema de interferências em campos eletromagnéticos causadas por feições antrópicas (cercas, antenas, linhas de transmissão, objetos metálicos, dentre outros) pode ser explorado por meio da modelagem numérica, de preferência contando com uma base experimental proveniente de uma campanha ou de laboratório. Szarka (1988) discute os aspectos geofísicos associados à distorção do fluxo de corrente por cercas com fios metálicos quando elas estão conectadas ao solo. Qian e Boerner

(1994) representam o problema por meio de circuitos equivalentes e o resolvem por equação integral. Em condições de campo, a interferência por cercas metálicas foi abordada por Filho et al. (2014) e Urenha (2018). Este último apresenta um estudo controlado de campo utilizando o equipamento EM34 (*Geonics Limited*[©]) e sugere que o efeito de uma mesma feição interferente (cerca com fios metálicos) pode ser diferente dependendo da resistividade do meio. A interferência se mostra mais expressiva em meios (substrato geológico) mais resistivos. Apesar do experimento não apresentar falhas que possam invalidá-lo, não fica claro se tais resultados são previstos teoricamente ou consistentes com a modelagem numérica do problema. Por esta razão, a modelagem numérica de acordo com as especificações do experimento torna-se necessária para verificar se este tipo de resposta é de fato esperado.

A presente pesquisa de Mestrado tem como objetivo avaliar a interferência de estruturas antrópicas na aquisição de dados realizada com o EM34, seguindo uma abordagem numérico-experimental. A abordagem numérica consiste em validar o programa comercial baseado em elementos finitos COMSOL *Multiphysics*[©] 5.3a (COMSOL, 2017) no cálculo de duas situações disponíveis na literatura (Butler e Zhang, 2016), examinar os efeitos da parametrização da malha e de parâmetros típicos na aquisição de dados com o EM34 (frequência e separação entre as bobinas) e comparar os resultados numéricos com os resultados experimentais provenientes de um cenário onde os dados foram adquiridos próximos a uma cerca cujos fios eram de material galvanizado.

Esta Dissertação é composta por três capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma revisão da teoria dos métodos eletromagnéticos, os aspectos gerais do MEF e as etapas necessárias para descrever um problema baseado nesta formulação. O Capítulo 2 apresenta os resultados das situações disponíveis na literatura e que foram validadas no COMSOL[©] e do teste de consistência aplicado para o estudo com o EM34. O Capítulo 3 apresenta uma breve descrição da base de dados experimental (baseado em Urenha, 2018), dos procedimentos metodológicos empregados para a geração da base de dados numérica (discorrendo sobre a construção da estrutura metálica observada nos dados experimentais e as premissas consideradas), dos resultados e das discussões para este estudo sob os pontos de vista experimental e numérico. Por fim, discute-se nas conclusões o significado dos resultados obtidos nos capítulos anteriores e as recomendações deste trabalho.

1. Fundamentos Teóricos

O princípio dos métodos elétricos e eletromagnéticos é fundamentado nas equações de Maxwell, normalmente assumindo que os materiais geológicos são isotrópicos e homogêneos; que as propriedades elétricas de interesse não são dependentes do tempo, pressão e temperatura e que a permeabilidade magnética do meio é igual a permeabilidade do vácuo.

As equações de Maxwell descrevem a geração dos campos elétrico e magnético, além das relações temporal e espacial entre grandezas vetoriais que descrevem intensidades de campos e fluxos correspondentes nos meios materiais. Neste capítulo, serão abordados aspectos gerais da teoria eletromagnética e do método dos elementos finitos, tal como foi empregado nessa pesquisa, com destaque para as etapas necessárias para construir modelos geofísicos sob estas formulações.

1.1. Teoria dos Métodos Eletromagnéticos

Os fundamentos da teoria eletromagnética utilizada na prospecção eletromagnética são descritos em Ward e Hohmann (1988). A resposta dos modelos geoeletricos envolvem a solução das equações de Maxwell, que no domínio do tempo são dadas por

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (4)$$

sendo \mathbf{E} o campo elétrico (V.m^{-1}), \mathbf{B} a indução magnética (T), \mathbf{H} a intensidade do campo magnético (A.m^{-1}), \mathbf{J} a densidade de corrente elétrica (A.m^{-2}), \mathbf{D} o campo de deslocamento elétrico (C.m^{-2}) e ρ a densidade volumétrica de carga (C.m^{-3}).

Na prospecção eletromagnética, comumente são empregadas frequências de aquisição menores do que 100 kHz o que, em meios homogêneos com condutividade da ordem de 10^{-4} S.m^{-1} , as cargas elétricas são dissipadas em menos de 10^{-6} s (Ward e Hohmann, 1988). Considerando $\frac{\partial \rho_e}{\partial t} \sim 0$ e calculando o divergente de (2), obtém-se a equação de continuidade.

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (5)$$

As equações (1) a (4), da forma como estão escritas, não fornecem informação sobre as propriedades físicas de interesse dos materiais envolvidos. Essas grandezas físicas são incorporadas pelas relações constitutivas descritas pelas expressões (6), (7) e (8).

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (6)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (7)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (8)$$

sendo ε a permissividade dielétrica (F.m^{-1}), μ a permeabilidade magnética (H.m^{-1}) e σ a condutividade elétrica (S.m^{-1}). Aplicando a transformada de Fourier (variável t) e as relações constitutivas do meio nas equações (1) e (2), obtém-se as equações para os campos \mathbf{E} e \mathbf{H} no domínio da frequência.

$$\nabla \times \mathbf{E} + i\mu\omega \mathbf{H} = 0 \quad (9)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - (\sigma + i\varepsilon\omega) \mathbf{E} = 0 \quad (10)$$

sendo ω a frequência angular (rad.s^{-1}).

Calculando o rotacional das equações (9) e (10) e reorganizando os termos, são obtidas as equações de Helmholtz no domínio da frequência para os campos \mathbf{E} e \mathbf{H} .

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (11)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (12)$$

sendo $k = (\mu\varepsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega)^{\frac{1}{2}}$ o número de onda. Para frequências menores do que 10^5 Hz as correntes de deslocamento, representadas pelo termo $\mu\varepsilon\omega^2$ são desprezíveis em relação às correntes de condução, associadas ao termo $i\mu\sigma\omega$. Consequentemente, as equações (11) e (12) podem ser reescritas para representar os campos \mathbf{E} e \mathbf{H} por equações de difusão:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - i\mu\sigma\omega \mathbf{E} = 0 \quad (13)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - i\mu\sigma\omega \mathbf{H} = 0 \quad (14)$$

sendo o número de onda expresso por $k = (-i\mu\sigma\omega)^{\frac{1}{2}}$.

Para meios homogêneos e frente de onda planar (“ondas planas”), as equações (13) e (14) possuem soluções analíticas.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0^+ e^{-i\alpha z} e^{-\beta z} e^{-i\omega t} \quad (15)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0^+ e^{-i\alpha z} e^{-\beta z} e^{-i\omega t} \quad (16)$$

sendo $\alpha = \beta = \left(\frac{\omega\mu\sigma}{2}\right)^{\frac{1}{2}}$. A partir desta relação, define-se o *skin depth* da onda plana como sendo a profundidade em que a intensidade do campo \mathbf{E} (ou \mathbf{H}) é atenuada por um fator equivalente a 0,37. Essa profundidade característica é dada por

$$\delta = \frac{1}{\beta} = 503 \sqrt{\frac{1}{f\sigma}} \quad (17)$$

Para os métodos eletromagnéticos com “bobinas pequenas” (Frischknecht et al., 1991), genericamente denominados métodos *slingram*, o termo δ é utilizado para definir o número de indução $B = \frac{\delta}{s}$, sendo s a separação entre as bobinas transmissora (Tx) e receptora (Rx) (McNeill, 1980). Medições no modo de “número de indução baixo”, tais como obtidos com equipamentos EM31, EM34 e EM38 do fabricante Geonics[©], operam em frequências que garantem $B \ll 1$. Para tanto, considera-se valores de condutividade da ordem de até 1.000 mS.m⁻¹, de tal forma que separações de 10, 20 e 40 m para o EM34 possam ser operadas com frequências de 400, 1.600 e 6.400 Hz. Para a condição de número de indução baixo em meios homogêneos, as medidas de condutividade elétrica obtidas com tais equipamentos fornecem a condutividade elétrica do meio; caso contrário, os valores medidos são considerados “condutividade aparente do meio” (McNeill, 1980).

Soluções para as equações (13) e (14) devem considerar as seguintes condições de fronteira entre meios materiais (1 e 2) com propriedades físicas distintas:

1. A componente normal do fluxo magnético \mathbf{B} é contínua na interface entre dois meios:
 $(\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) \cdot \mathbf{n} = 0$;
2. A componente normal da densidade de fluxo elétrico \mathbf{D} é descontínua na interface entre dois meios devido ao acúmulo de densidade superficial de carga ρ_S (C.m⁻²):
 $(\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) \cdot \mathbf{n} = \rho_S$;
3. A componente tangencial do campo \mathbf{E} é contínua na interface: $\mathbf{n} \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) = 0$;
4. A componente tangencial do campo \mathbf{H} é contínua na interface: $\mathbf{n} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = 0$, para uma condutividade finita. No caso de existir uma densidade de corrente finita, esta expressão é igual a \mathbf{J}^S ;
5. A componente normal do fluxo de corrente \mathbf{J} é contínua através de uma interface entre dois meios: $(\mathbf{J}_1 - \mathbf{J}_2) \cdot \mathbf{n} = 0$, para fenômenos de corrente contínua e $\neq 0$ para fenômenos de corrente alternada.

As equações (13) e (14), incorporando os termos de fonte são expressas por

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = -i\mu_0 \omega \mathbf{M}^S = -\mathbf{J}_m^S \quad (18)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = -i\omega \mathbf{P}^S = \mathbf{J}_e^S \quad (19)$$

sendo \mathbf{M}^S a polarização da fonte magnética (A.m^{-1}), \mathbf{P}^S a polarização da fonte elétrica e \mathbf{J}^S um termo genérico que tanto representa uma fonte magnética (m) quanto elétrica (e). Experimentalmente, os termos \mathbf{M}^S e \mathbf{P}^S representam respectivamente bobinas transmissoras Tx, tais como usadas nos métodos *slingram*, e linhas de corrente, tais como usadas no método Turam, por exemplo.

Para resolver as equações (18) e (19), utiliza-se o conceito dos potenciais de Schelkunoff, o qual é definido como um conjunto de potenciais (denominados de \mathbf{F} e \mathbf{A}) empregados para obter a solução de equações de onda em domínios constituídos por regiões homogêneas. Reescrevendo as expressões (18) e (19) em termos destes potenciais, obtém-se

$$\nabla^2 \mathbf{F} + k^2 \mathbf{F} = -\mathbf{J}_m^S \quad (20)$$

$$\nabla^2 \mathbf{A} + k^2 \mathbf{A} = \mathbf{J}_e^S \quad (21)$$

A partir deste conjunto de potenciais, obtém-se as expressões para os campos \mathbf{E} e \mathbf{H} em regiões homogêneas.

$$\mathbf{E} = -i\mu\omega \mathbf{A} + \frac{1}{(\sigma + i\varepsilon\omega)} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla \times \mathbf{F} \quad (22)$$

$$\mathbf{H} = -(\sigma + i\varepsilon\omega) \mathbf{F} + \frac{1}{i\mu\omega} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{F}) + \nabla \times \mathbf{A} \quad (23)$$

A solução de campos eletromagnéticos utilizando os potenciais de Schelkunoff (22) e (23) simplificam a modelagem numérica pois uma mesma equação é utilizada variando apenas o termo de fonte.

1.2. Condutividade Elétrica Aparente para o Semi-Espaço Homogêneo

Uma das vantagens de empregar métodos eletromagnéticos do tipo *slingram* em uma campanha geofísica é a possibilidade de obter medidas de condutividade elétrica do solo sem a obrigatoriedade de incluir eletrodos em sua aquisição para posterior injeção de corrente elétrica em subsuperfície. Geralmente representado como um sistema de duas bobinas conectadas por um cabo de referência, o método *slingram* tem o seu princípio físico fundamentado na geração de dois campos magnéticos distintos denominados de campo magnético primário (H_P) e de campo magnético secundário (H_S). O campo magnético primário é produzido no interior de uma bobina transmissora (Tx). Esse campo primário, ao se propagar

em subsuperfície e entrar em contato com um material condutor, gera um fluxo de corrente alternada (ou *eddy currents*) que flui neste material. Consequentemente, esse fluxo de corrente alternada resulta no campo magnético secundário. A resposta detectada pela bobina receptora (Rx), isto posto, é a resultante do campo primário que se propaga em superfície e do campo magnético secundário produzido em subsuperfície (Kearey et al., 2009). Para o caso do semi-espaço homogêneo, as componentes horizontais (x,y) e vertical (z) de H_S produzidas por um dipolo magnético vertical podem ser calculadas analiticamente (Ward e Hohmann, 1988) a partir das equações (24), (25) e (26).

$$H_x = -\frac{m}{4\pi s^3} \left[y^2 \Phi + x^2 s \frac{d\Phi}{ds} \right] \quad (24)$$

$$H_y = \frac{m}{4\pi s^3} \left[xy \Phi - xys \frac{d\Phi}{ds} \right] \quad (25)$$

$$H_z = \frac{m}{2\pi k^2 s^5} \left[9 - (9 + 9iks - 4k^2 s^2 - ik^3 s^3) e^{-iks} \right] \quad (26)$$

sendo m denominado de momento magnético de dipolo ($A.m^2$) e Φ expresso por (27).

$$\Phi = \frac{2}{k^2 s^4} \left[3 + k^2 s^2 - (3 + 3iks - k^2 s^2) e^{-iks} \right] \quad (27)$$

As equações de (24) a (26) mostram que a intensidade do campo magnético secundário é uma grandeza complexa, tendo uma parte real (ou em fase, IP) e outra imaginária (ou em quadratura, Q). Considerando o campo primário (28) de acoplamento direto entre as bobinas Tx e Rx,

$$H_P = -\frac{m}{4\pi s^3} \quad (28)$$

obtém-se as componentes em fase e em quadratura segundo

$$IP = \operatorname{Re}\left(\frac{H_S}{H_P}\right) - 1 \quad (29)$$

e

$$Q = \operatorname{Im}\left(\frac{H_S}{H_P}\right) \quad (30)$$

As expressões (31) e (32) descrevem a razão entre os campos secundário e primário para os arranjos horizontal (HCP) e vertical (VCP) coplanares entre as bobinas Tx e Rx do EM34.

$$\left(\frac{H_S}{H_P}\right)_{HCP} = \frac{2}{k^2 s^2} \left\{ 9 - [9 + 9ks + 4k^2 s^2 + k^3 s^3] e^{-ks} \right\} \quad (31)$$

$$\left(\frac{H_S}{H_P}\right)_{VCP} = 2 \left\{ 1 - \frac{3}{k^2 s^2} + [3 + 3ks + k^2 s^2] \frac{e^{-ks}}{k^2 s^2} \right\} \quad (32)$$

Reescrevendo as equações (31) e (32) em termos do número de indução e expandindo em séries de potências para considerar apenas os termos da componente em quadratura (Caminha-Maciel e Figueiredo, 2013), a condutividade elétrica aparente de um semi-espço homogêneo é dada por

$$\sigma = \frac{4}{\omega \mu_0 s^2} Q \quad (33)$$

A condutividade obtida com a expressão (33) leva em consideração a separação entre as bobinas e a frequência empregada pelo equipamento.

1.3. Método dos Elementos Finitos (MEF)

O MEF é uma técnica numérica que consiste em subdividir uma região de interesse (ou domínio Ω) em fragmentos menores e contínuos, denominados “elementos”. Nestes “elementos”, aplicam-se as equações para os problemas físicos envolvidos resultando em um sistema de equações cuja solução resolve de forma aproximada o problema inicialmente formulado. Matematicamente, o MEF é resolvido a partir da integral da equação diferencial que governa o fenômeno físico de interesse multiplicado por uma função arbitrária $w(x)$ integrável e com derivadas de primeira ordem (formulação “fracá” do problema) e pelo método dos resíduos ponderados, nos quais se destacam as técnicas de Ritz e Galerkin (Jin, 2002).

Em Geofísica, a técnica de Galerkin é a mais utilizada para descrever o problema por elementos finitos (Hohmann, 1988). De acordo com a formulação apresentada por Jin (2002), o MEF genericamente representa a formulação de um problema físico por meio de uma equação

$$\mathcal{L}\phi = f \quad (34)$$

na qual \mathcal{L} é um operador diferencial, ϕ a incógnita de interesse e f o termo de fonte para o fenômeno físico. Admitindo que $\phi = \tilde{\phi} = \sum_{i=1}^N c_i v_i$ seja uma solução aproximada para ϕ (sendo v_i quaisquer funções definidas em todo o domínio onde o problema será resolvido e c_i os coeficientes a se determinar), o residual r é dado por:

$$r = \mathcal{L}\tilde{\phi} - f \neq 0 \quad (35)$$

Para que $\tilde{\phi}$ seja considerado uma solução do problema, o residual r deve ser mínimo no domínio Ω . Para tanto, integra-se a equação (35) neste domínio e efetua-se o cálculo do resíduo ponderado R_i em função dos resíduos r e de pesos w_i nas quais a solução aproximada satisfaz

$$R_i = \int_{\Omega} w_i r d\Omega = 0 \quad (36)$$

No método de Galerkin, as funções peso são selecionadas tais que $w_i = v_i$. Dessa forma, a equação (36) pode ser reescrita em função de w_i e de $\tilde{\phi}$.

$$\sum_{j=1}^N c_j \int_{\Omega} w_i \mathcal{L}(w_j) d\Omega = \int_{\Omega} w_i f d\Omega \quad (37)$$

Para resolver o problema por elementos finitos, são necessários quatro procedimentos computacionais: conceber a geometria (domínio Ω) onde o problema será formulado, definir o conjunto de equações e condições de fronteira a ser resolvido, subdividir a geometria em elementos menores e resolver o sistema matricial resultante da equação (37). Estas etapas serão descritas e exemplificadas nas subseções 1.3.1 a 1.3.4.

1.3.1. Concepção da Geometria

Essa etapa compreende a criação do domínio Ω onde o fenômeno físico será calculado. Esse domínio deve representar as feições que representam as condições do experimento geofísico, tais como os condutores no substrato, os pontos de medida ao longo de um perfil (ou de linhas de levantamento) e os arranjos de Tx-Rx conforme as frequências empregadas. O domínio, os condutores de interesse e o sistema de aquisição podem ser representados com formas geométricas simples (esferas, cilindros, blocos, entre outros) ou mais complexas, importadas de programas CAD (*Computer Aided Design*), por exemplo. Na modelagem eletromagnética, é fundamental separar Ω em dois ou mais meios distintos para diferenciar o espaço livre (ar) do contexto geológico que se deseja modelar. A Figura 1.1 ilustra um domínio esférico e sua separação em meios representando o ar e o material do substrato (Figura 1.1a) e a disposição dos pontos como bobinas Tx e Rx (Figura 1.1b).

1.3.2. Descrição Física do Problema

Nesta etapa, as geometrias construídas anteriormente recebem o significado físico do que se deseja modelar. Este significado físico é composto pelas equações diferenciais a serem resolvidas e suas condições de fronteira, as grandezas físicas representando os modelos e o termo de fonte do problema. Nos modelos considerados nesta Dissertação, as grandezas físicas foram consideradas considerando ε e μ iguais às do vácuo ($8,85 \times 10^{-12}$ F.m⁻¹ e $1,26 \times 10^{-6}$ H.m⁻¹, respectivamente), a distribuição de condutividade elétrica variando em função do contexto geológico a ser simulado. As regiões dos domínios que representam a camada de ar, idealmente com valores nulos, normalmente foram representadas com valores de condutividade elétrica muito baixos, da ordem de 10^{-6} S.m⁻¹. A condição de fronteira utilizada para todas as simulações foi que a intensidade do campo magnético é nula nas

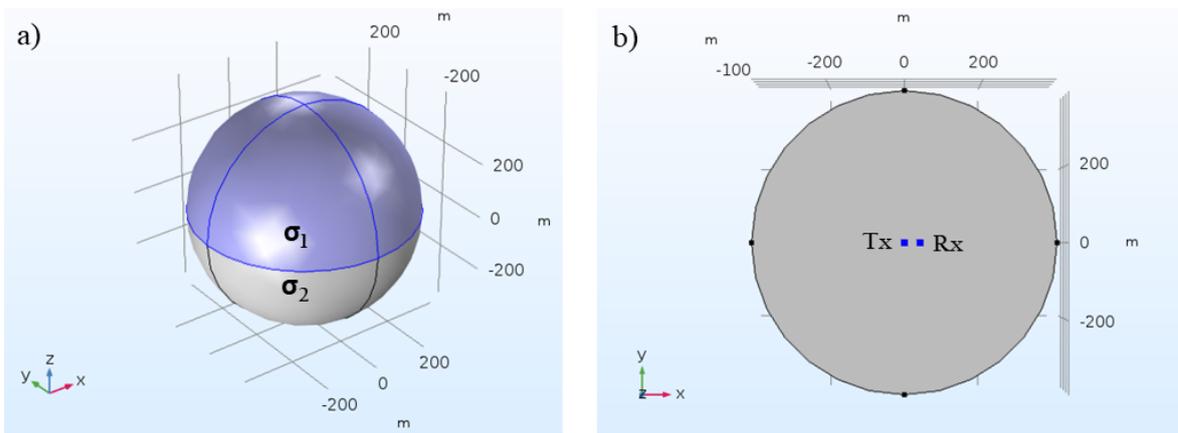


Figura 1.1: (a) Representação esquemática do modelo de semi-espaco homogêneo, sendo σ_1 a condutividade do ar e σ_2 a condutividade do semi-espaco homogêneo. No interior do semi-espaco, é possível adicionar feições simples ou feições complexas que representem uma estrutura geológica de interesse; (b) Disposição das posições das bobinas transmissora (Tx) e receptora (Rx) na interface entre os meios 1 e 2.

bordas do domínio, conforme postulado pela quarta condição descrita na seção 1.1. O ponto que corresponde à bobina Tx foi representado pelo valor de momento magnético de dipolo equivalente a 1 A.m^2 e orientado em relação aos eixos x (VCP) e z (HCP).

1.3.3. Discretização da Malha

O terceiro estágio na simulação numérica pelo MEF consiste em discretizar a geometria em uma malha por elementos mais simples. Esses elementos (quadrados, triângulos, hexaedros ou tetraedros, dependendo da dimensão escolhida) tem a finalidade de simplificar a formação do sistema matricial global resultante da equação (37) e prover uma acurácia na solução encontrada a partir do adensamento da malha em porções específicas dentro de um domínio. A discretização com tetraedros contribui com a estabilidade do sistema matricial resultante de modelos 3D (Jin, 2002). A Figura 1.2 mostra a distribuição destes elementos em um domínio esférico (Figura 1.2a) e na interface entre o ar e o semi-espaco homogêneo (Figura 1.2b).

1.3.4. Solução do Sistema de Equações

A solução do sistema de equações por meio do MEF é a última etapa da implementação computacional. Aqui, escolhe-se o método algébrico para resolver o sistema de equações, que em sua forma matricial é dado por

$$\mathbf{Kc} = \mathbf{b} \quad (38)$$

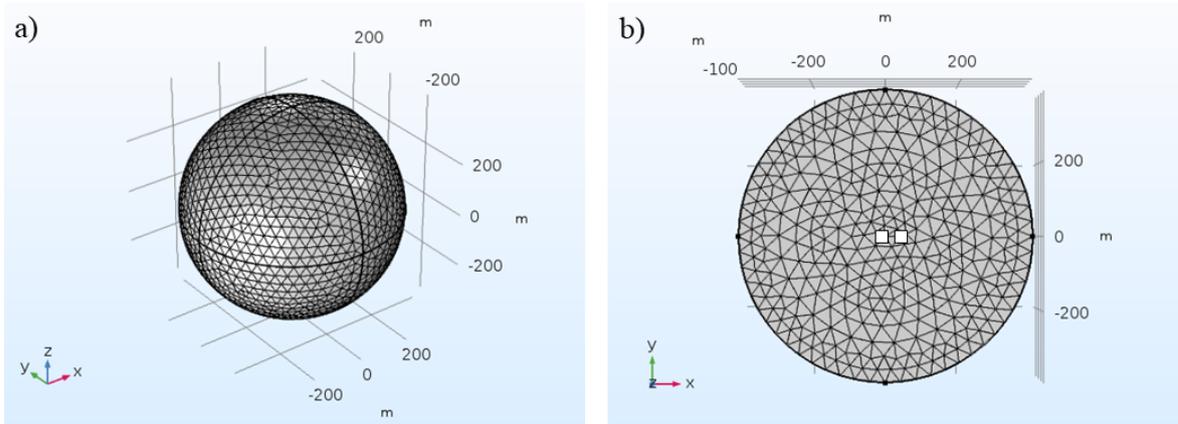


Figura 1.2: Distribuição dos elementos tetraédricos e seus respectivos nós para a discretização em elementos finitos do problema ao longo (a) do domínio e (b) da interface entre o ar e o meio. Os quadrados em branco representam as bobinas Tx e Rx, respectivamente.

sendo \mathbf{K} uma matriz denominada de matriz de rigidez, seja ela local (para cada elemento) ou global (para todo o domínio), c os coeficientes a se determinar e \mathbf{b} designado de vetor de carga, sendo definido tanto localmente quanto globalmente.

A equação (38) pode ser resolvida de duas formas: por meio de métodos diretos (baseados em decomposição LU, tais como: MUMPS – *Multifrontal Massively Parallel Sparse direct Solver*, PARDISO — *Parallel Direct Sparse Solver* e SPOOLES — *Sparse Object Oriented Linear Equations Solver*, entre outros) ou métodos iterativos (baseados em gradientes conjugados, tais como: GMRES — *Generalized Minimal Residual Method*, FGMRES — *Flexible Generalized Minimal Residual Method*, BiCGStab — *Biconjugate Gradient Stabilized Method*, entre outros).

Ao longo desta Dissertação, todas as simulações numéricas foram realizadas em um computador pessoal com um processador de dois núcleos rodando a uma velocidade de 3,91 GHz e memória RAM de 4GB. Por essa razão, optou-se por utilizar o método iterativo BiCGStab para resolver as matrizes resultantes dos casos avaliados porque este método mostrou-se mais rápido do que o GMRES. O critério de convergência, baseado no erro relativo das soluções encontradas durante cada iteração, foi configurado para ser igual a 0,005.

2. Validação do Programa

Códigos ou programas de simulação numérica, tanto livres quanto comerciais, devem ser testados antes de serem aplicados na investigação dos problemas de interesse. A validação dos programas pode ser realizada por comparação com soluções analíticas descritas na literatura, utilizando dados experimentais obtidos sob condições controladas ou utilizando programas já validados anteriormente. Se os resultados da modelagem numérica reproduzirem as condições de controle, considera-se que o programa foi validado e, conseqüentemente, pode ser utilizado na modelagem de problemas reais diferentes daquelas nas quais os testes de validação podem ser aplicados.

A escolha do COMSOL[®] (versão 5.3a) nesta Dissertação foi fundamentada na sua crescente utilização em diversos estudos geofísicos, por exemplo o estudo de potencial espontâneo associado com fluxo de água subterrânea (Bolève et al., 2007), a modelagem direta da técnica de caminhamento elétrico (Wang et al., 2011), a modelagem de diversos métodos eletromagnéticos (MMR — *Magnetometric Resistivity*, VLF — *Very Low Frequency*, MT — *Magnetotelluric*, FDEM — *Frequency Domain* e TDEM — *Time-Domain Electromagnetics*) aplicando uma mesma interface (*Magnetic Fields*) na modelagem por MEF (Butler e Zhang, 2016) e a modelagem tridimensional dos métodos FDEM e TDEM assumindo efeitos de polarização induzida (Qi et al., 2019).

Neste capítulo, serão descritos os dois exemplos disponíveis na literatura que foram aplicados nesta Dissertação para validar o programa COMSOL[®], adotando procedimentos semelhantes ao que foi descrito em Butler e Zhang (2016) para o estudo dos métodos EM no domínio da frequência. Serão apresentados os resultados do teste de consistência realizado para avaliar os efeitos da parametrização da malha e dos parâmetros de aquisição dos dados com o EM34 nas simulações numéricas para o estudo das distorções causadas por estruturas metálicas.

2.1. Dipolo Magnético Vertical em um Modelo de Terra Homogênea

O primeiro cenário utilizado para validar o programa consistiu em comparar a resposta numérica com a solução analítica fornecida pela equação (26), que descreve a intensidade do campo magnético produzido por um dipolo magnético vertical (DMV) na superfície de um semi-espaco homogêneo. Para esta simulação, foram adotadas frequências de aquisição de 100, 1.000, 10.000 e 100.000 Hz, repetindo o mesmo conjunto de Butler e Zhang (2016). A Figura 2.1 esquematiza a representação de um DMV.

A escolha do raio do domínio esférico foi de 1.000 m, equivalente ao dobro do *skin depth* considerando a menor frequência do teste (100 Hz) e um meio homogêneo de condutividade elétrica de $0,01 \text{ S.m}^{-1}$. Esta esfera foi segmentada em duas partes; uma representando a camada de ar (condutividade de 10^{-6} S.m^{-1}), e outra o semi-espaco homogêneo ($0,01 \text{ S.m}^{-1}$). A fonte Tx (DMV de intensidade igual a 1 A.m^2) foi colocada na origem do sistema de

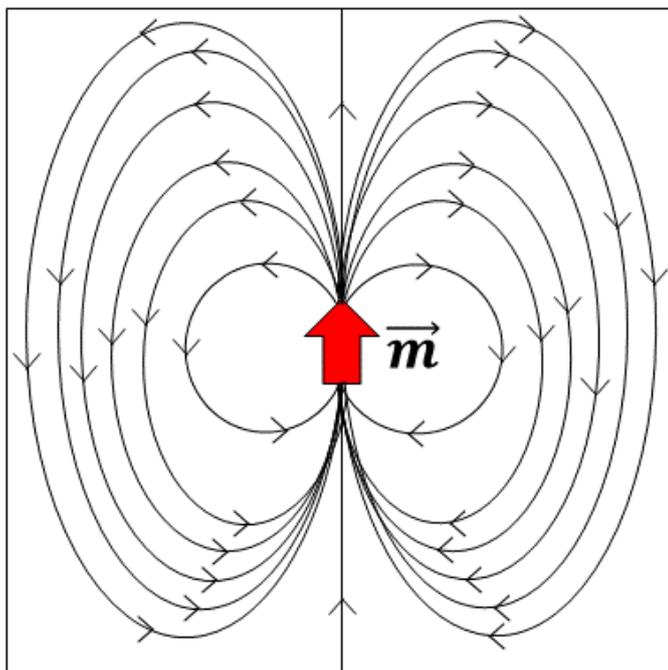


Figura 2.1: Esquematização das linhas de intensidade de campo magnético (H) produzido por um dipolo magnético vertical (DMV) e seu momento de dipolo (\vec{m}).

coordenadas esféricas, na interface entre as duas regiões. A condição de fronteira imposta consistia em igualar a intensidade do campo magnético a zero nas bordas da esfera.

De acordo com o que foi discutido em 1.3.3, o elemento escolhido para discretizar a camada de ar e o substrato foi o tetraedro, com adensamento da malha nas imediações do transmissor, mantendo elementos maiores nas demais regiões. O adensamento da malha em pontos com maior variação dos campos visa manter a acurácia da modelagem, sem demanda computacional excessiva. O número de elementos na malha considerada foi de 62.931 e o tempo de modelagem para cada frequência utilizada foi de aproximadamente 51 s. A Figura 2.2 ilustra a discretização da malha próxima do transmissor (DMV).

Uma vez construído o modelo, o próximo estágio foi computar a resposta numérica. As Figuras 2.3 e 2.4 mostram os resultados obtidos para IP e Q e comparados com os resultados de Butler e Zhang (2016). Nos dois casos, os cálculos foram realizados em 100 pontos com separação de 20 m ao longo de um perfil na direção y , distante 20 m do dipolo magnético vertical, situado na origem do sistema de coordenadas.

Pela Figura 2.3, percebe-se que o nível de ruído numérico aumenta na vizinhança do DMV para todas as frequências utilizadas. A acurácia pode ser aprimorada com o aumento de elementos na malha, porém com substancial acréscimo no tempo de computação e demanda de memória (Butler e Zhang, 2016).

Na Figura 2.4, destacamos que a distorção nos valores da componente imaginária de H_z nas proximidades do transmissor irá exigir especial atenção quando da interpretação dos dados experimentais pois algumas medidas foram realizadas muito próximas do transmis-

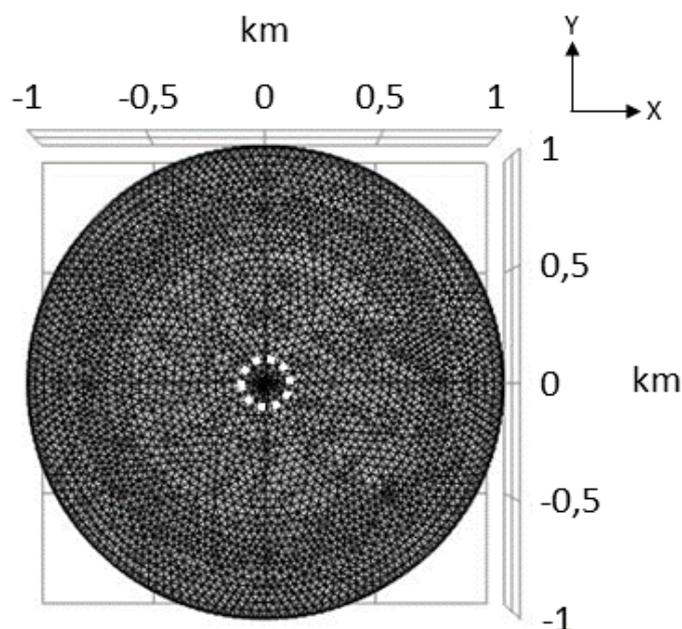


Figura 2.2: Distribuição da malha ao longo da interface entre o ar e o meio e do DMV (porção delimitada pelo círculo branco tracejado).

sor. As distorções no campo H_z compromete o cálculo da condutividade elétrica a partir da equação (33).

Uma característica comum às componentes IP e Q de H_z apresentadas nas Figuras 2.3 e 2.4 para ambos os trabalhos é a diferença entre as curvas analítica e numérica próximas à fronteira da esfera para a frequência de 100 Hz (IP) e para as frequências de 100 e 1.000 Hz (Q) a partir de 1 *skin depth* (aproximadamente 500 m). Para aprimorar o cálculo da resposta numérica neste local, Butler e Zhang (2016) aumentaram o número de elementos da malha e utilizaram um recurso do COMSOL[©] que permite estender a fronteira do domínio. Esses procedimentos, no entanto, acarretaram aumento significativo no tempo de processamento e melhora nos resultados apenas para a frequência de 100 Hz.

2.2. Resposta Numérica de um Modelo Reduzido em Escala

O segundo cenário no qual os cálculos feitos no COMSOL[©] foram validados teve a finalidade de comparar a resposta numérica obtida por meio do MEF (Ansari e Farquharson, 2014) resultantes da modelagem eletromagnética conduzida em laboratório (modelagem física), empregando um modelo com elevado contraste de condutividade elétrica. Este experimento, conduzido em escala reduzida por Farquharson et al. (2006), teve como objetivo estudar cenários encontrados na exploração mineral, nos quais corpos sulfetados com condutividade elevada aparecem encaixados em rochas também condutivas.

O arranjo experimental ilustrado na Figura 2.5 consistiu em imergir um cubo de grafita de 14 cm de aresta e condutividade elétrica de 63.000 S.m^{-1} em um tanque de dimensões

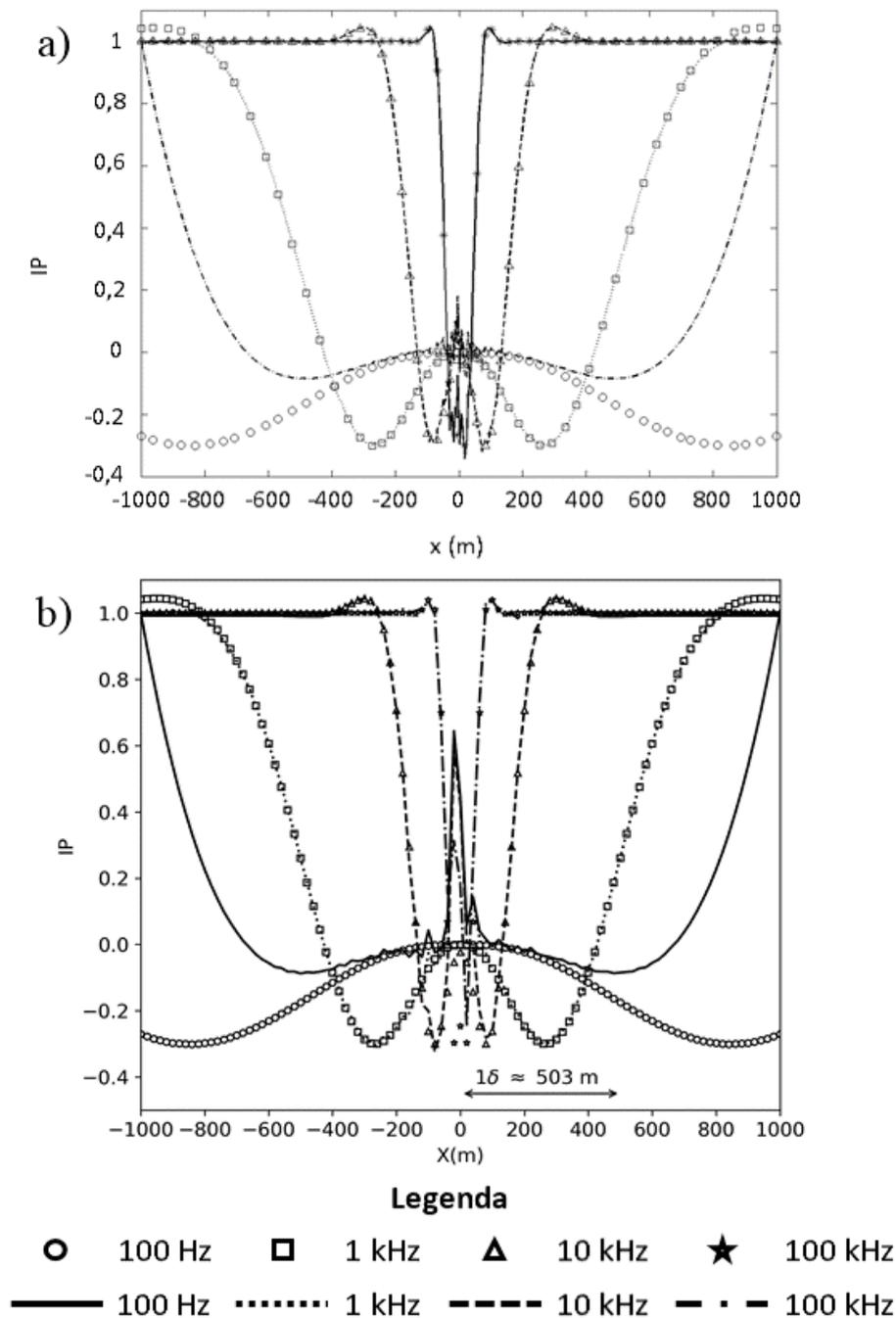


Figura 2.3: Resposta da componente real de H_z para o modelo de semi-espaço homogêneo em um perfil na direção y e a 20 m do transmissor (DMV). (a) Resultados obtidos por Butler e Zhang (2016) e (b) Resultados obtidos neste trabalho. Resultados analíticos (círculo, quadrado, triângulo e estrela) e numéricos (linhas) para cada frequência.

5 m × 3 m × 1,5 m contendo salmoura com condutividade elétrica 7,3 S.m⁻¹. O arranjo geométrico usado para medir a resposta eletromagnética usou bobinas Tx e Rx (dipolos verticais) separadas em 20 cm. O momento magnético na bobina Tx foi de 1 A.m². Neste caso, as frequências utilizadas no experimento foram de 1, 10, 100, 200 e 400 kHz.

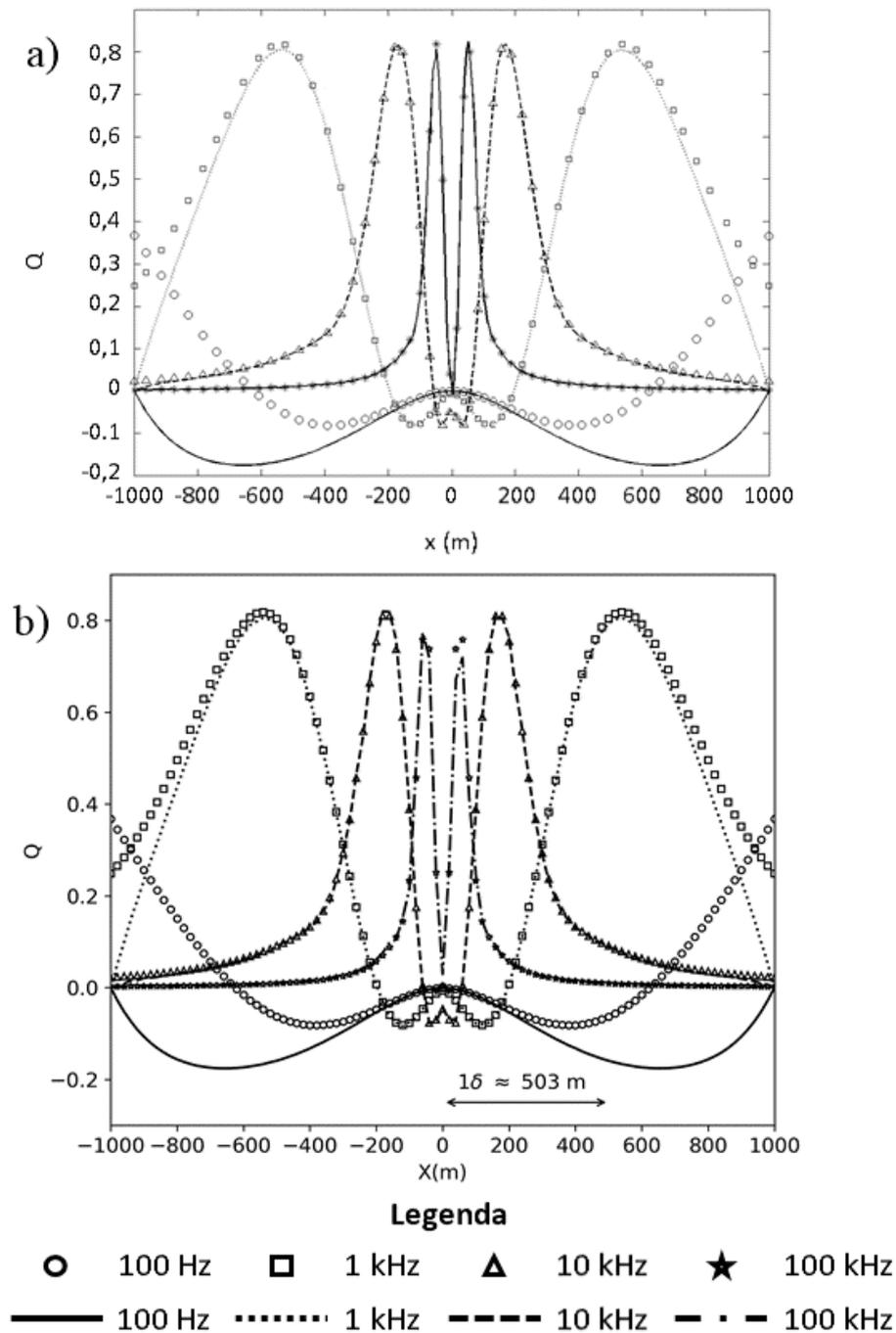


Figura 2.4: Resposta da componente imaginária de H_z para o modelo de semi-espaço homogêneo em um perfil na direção y e a 20 m do transmissor (DMV). (a) Resultados obtidos por Butler e Zhang (2016) e (b) Resultados obtidos neste trabalho. Resultados analíticos (círculo, quadrado, triângulo e estrela) e numéricos (linhas) para cada frequência.

Para a validação do programa, o modelo numérico foi construído a partir do mesmo domínio esférico com raio de 2,94 m, equivalente a 10 vezes o *skin depth* da onda EM para a maior frequência utilizada no experimento (400 kHz), em um meio com a condutividade elétrica da salmoura. Um cubo com as dimensões e condutividade do bloco de grafite foi

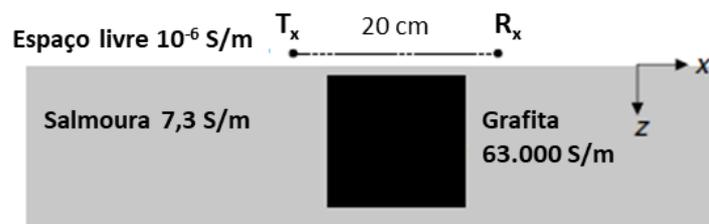


Figura 2.5: Esquemática do experimento realizado por Farquharson et al. (2006) para avaliar as respostas experimental e numérica de um modelo de alto contraste de condutividade elétrica. Modificado de Ansari e Farquharson (2014).

colocado na origem do sistema (centro da esfera). O par de bobinas foi configurado para deslocamentos no passo de 2 cm a cada iteração. O número de elementos na malha foi 114.729 e o tempo computacional gasto para executar o conjunto de 25 deslocamentos foi de 28 minutos. A Figura 2.6 mostra a disposição dos elementos da malha na interface entre a camada de ar e a salmoura (Figura 2.6a) e os elementos dispostos nas bordas do bloco de grafita (Figura 2.6b). A Figura 2.7 mostra os resultados obtidos pelo MEF, tal como efetuados por Butler e Zhang (2016) e no presente trabalho. A comparação é feita utilizando as componentes real e imaginária de H_z para a frequência de 100 kHz. Os resultados numéricos nos dois casos são comparados com os resultados numéricos obtidos por Ansari e Farquharson (2014).

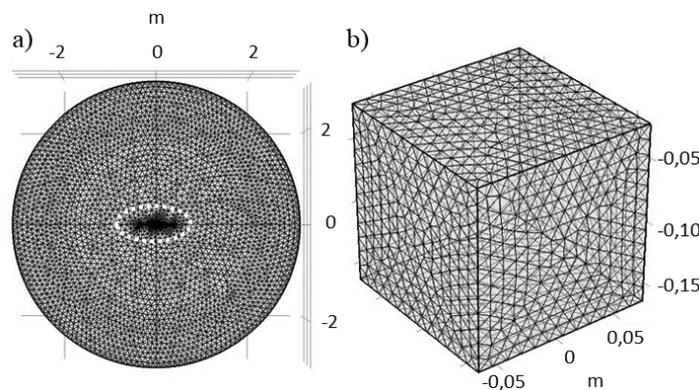


Figura 2.6: Distribuição dos elementos e dos nós que constituem a malha por elementos finitos no contexto da segunda validação. (a) Interface entre o ar e a salmoura, sendo a região dos pontos de medida delimitada pela elipse (linha tracejada branca); (b) Cubo de grafita.

Pelas Figuras 2.7a e 2.7b, percebe-se que, utilizando a frequência de 100 kHz, a amplitude da componente em fase (IP) é maior do que a amplitude da componente em quadratura (Q) na região onde o cubo foi posicionado. Observa-se que a componente real delimita os limites laterais do cubo de grafita, enquanto para a componente imaginária, em razão de sua menor amplitude, não é tão efetiva.

Em termos de validação, a Figura 2.7 mostra que os resultados da modelagem pelo MEF nesta Dissertação recuperou as variações e amplitudes calculadas nos outros traba-

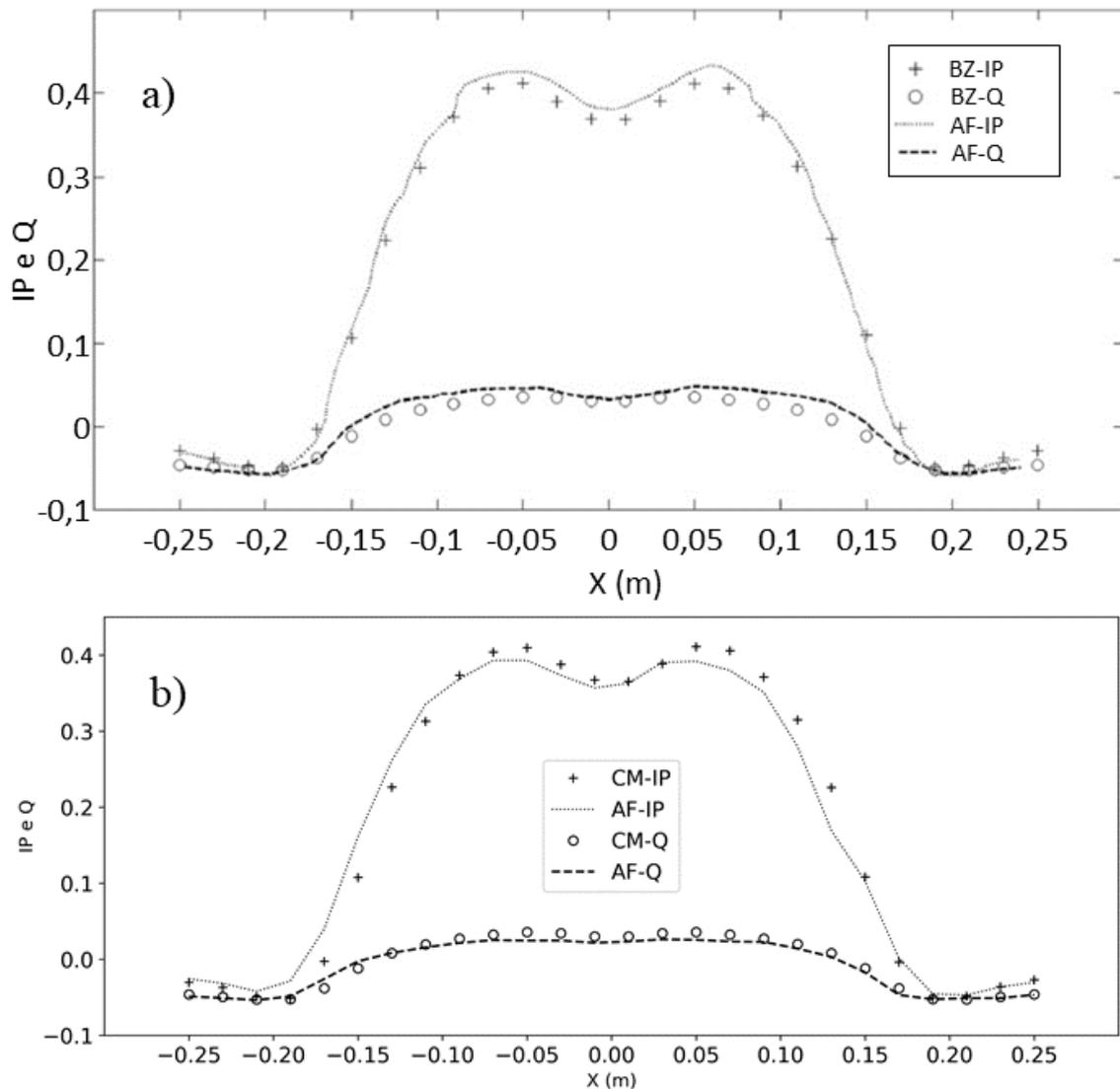


Figura 2.7: Comparação entre resultados numéricos obtidos por Ansari e Farquharson (2014) — AF das componentes IP e Q (linhas tracejadas e pontilhadas) com resultados numéricos (símbolos) obtidos por (a) Butler e Zhang (2016) — BZ e (b) no presente trabalho — CM.

lhos (Ansari e Farquharson, 2014; Butler e Zhang, 2016), validando o modelo desenvolvido para as condições (dimensões, frequências, dentre outros) representadas no experimento.

2.3. Teste de Consistência para Incorporação das Dimensões do EM34

Antes de calcular as distorções causadas por estruturas metálicas em medidas de condutividade elétrica com o EM34, foi realizado um teste de consistência no COMSOL[®] com a finalidade de averiguar diversos parâmetros (parametrização da malha, frequência de aquisição, separação entre as bobinas e valores de condutividade elétrica do modelo) que poderiam influenciar a acurácia no cálculo da condutividade aparente pela expressão (33).

Considerando um perfil de 60 metros de comprimento e um modelo de terra homogênea,

empregou-se uma malha para englobar uma esfera com raio de 314 m, correspondente a 10 vezes o *skin depth* para a frequência de 6.400 Hz e para a menor condutividade elétrica do teste (40 mS.m^{-1}). A frequência e a separação entre as bobinas transmissora e receptora foram escolhidas de modo a representar o funcionamento do condutivímetro EM34 com separação entre as bobinas de 10 m, enquanto os valores de condutividade elétrica testados no modelo foram selecionados conforme valores frequentemente encontrados em estudos ambientais ($40, 50$ e 100 mS.m^{-1}) e o valor considerado como limite de detecção do equipamento (1000 mS.m^{-1}), consoante o manual do fabricante (McNeill, 1980). As bobinas foram orientadas no modo HCP (horizontal coplanar) do EM34, correspondente a uma bobina Tx representada por um dipolo magnético alinhado com a vertical. A Figura 2.8 ilustra a construção do modelo para este teste de consistência no programa.

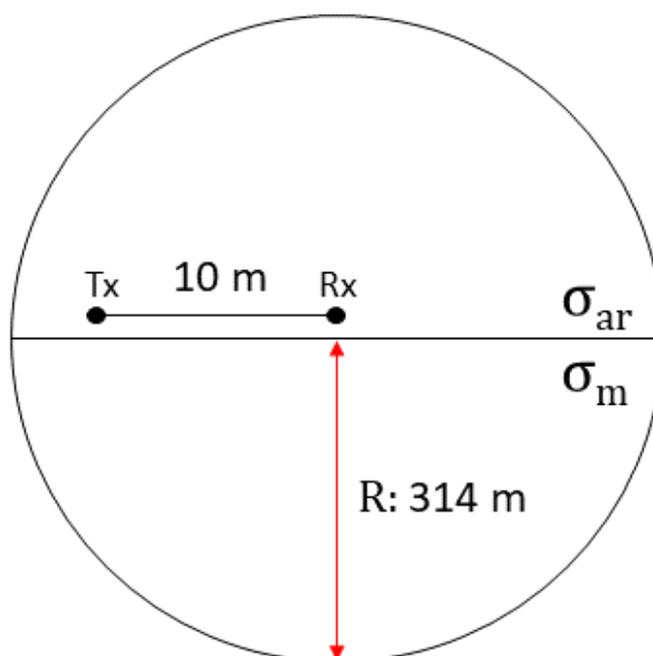


Figura 2.8: Esquemática dos parâmetros geométricos e físicos empregados no teste de consistência. Em todas as simulações do teste de consistência, o valor de condutividade elétrica do ar (σ_{ar}) foi a 10^{-6} S.m^{-1} . Já os valores da condutividade elétrica do meio (σ_m) escolhidos foram 40, 50, 100 e 1.000 mS.m^{-1} .

Neste teste de consistência, o número total de elementos gerados para discretizar o domínio da Figura 2.8 foi 78.510. Posteriormente, calculou-se a condutividade aparente (33) em cada ponto do perfil por meio da razão entre as intensidades dos campos magnéticos secundário e primário para o arranjo HCP (31) para comparar com a distribuição, valor médio e 1 desvio padrão dos resultados numéricos. Os resultados para cada valor de condutividade elétrica a partir dos valores verdadeiros são apresentados na Figura 2.9 e na Tabela 2.1.

Pela Figura 2.9 e pela Tabela 2.1, nota-se que o valor médio obtido numericamente é próximo do valor previsto analiticamente considerando o arranjo HCP e 1 desvio padrão (s),

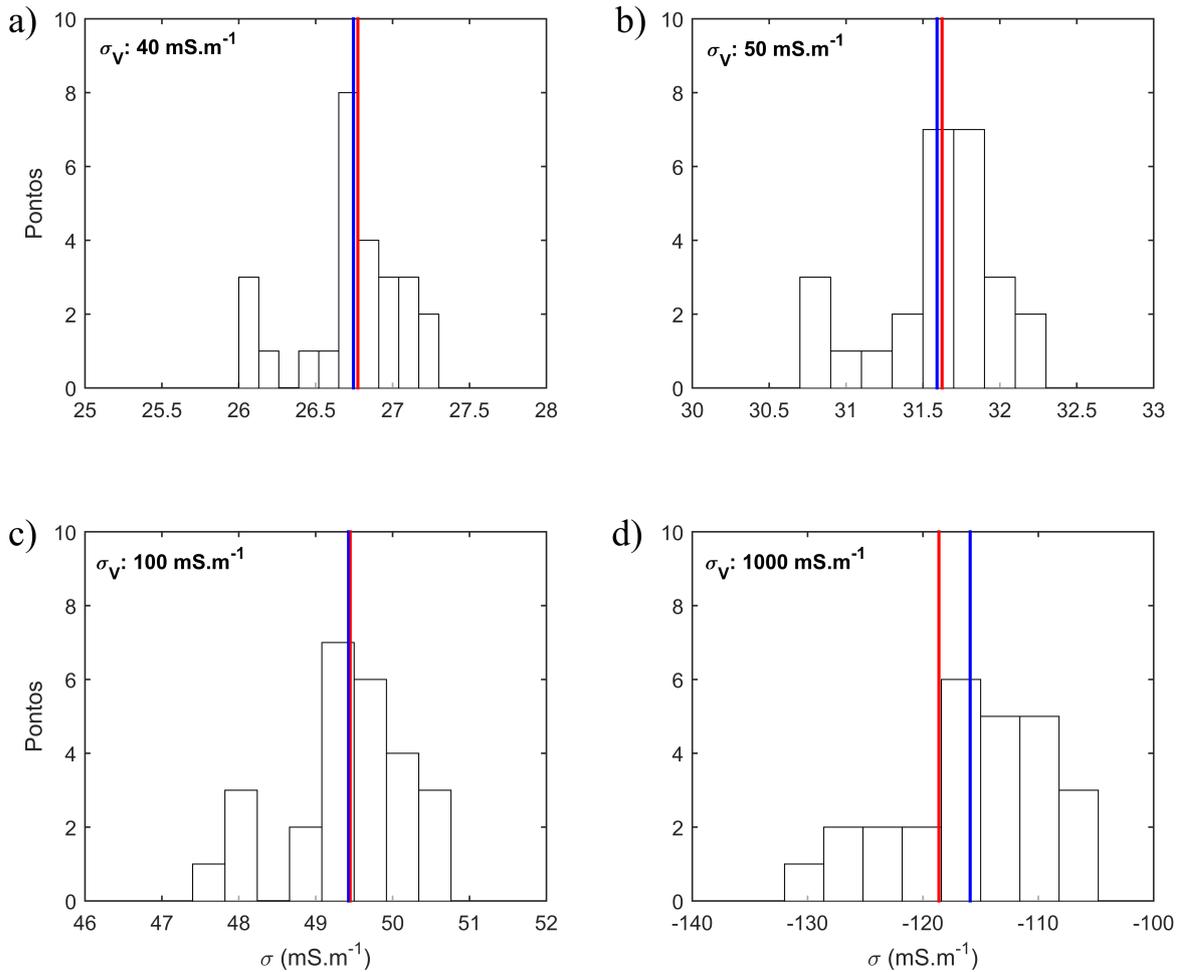


Figura 2.9: Histograma com os valores de condutividade elétrica obtidas numericamente para quatro valores de condutividade elétrica (a) 40 mS.m⁻¹; (b) 50 mS.m⁻¹; (c) 100 mS.m⁻¹ e (d) 1000 mS.m⁻¹ ao longo de um perfil de 60 m de comprimento. O valor médio ao longo do perfil (linha azul) foi comparado com o resultado previsto pela fórmula analítica do EM34 para o arranjo horizontal coplanar (linha vermelha).

validando o programa para simulações numéricas envolvendo um modelo de semi-espço homogêneo. Os valores de condutividade elétrica previstos pela equação (33), sob premissa de validade de número de indução baixo, são recuperados pelos resultados das simulações numéricas para os três primeiros cenários com substratos menos condutivos (40, 50 e 100 mS.m⁻¹) para os quais o número de indução se mantém menor do que 1 (0,32; 0,36 e 0,50; nesta ordem). Entretanto, no que diz respeito ao valor verdadeiro (σ_V), os valores previstos analiticamente e obtidos numericamente estão distantes nos três primeiros cenários, o que levanta a questão sobre valores de condutividade para os quais a aproximação dada pela equação (33) se aplica, sem acarretar distorções significativas na determinação da condutividade verdadeira do meio. Observa-se que, para B igual a 1,59, o valor previsto pela aproximação de número de indução baixo fornece um valor negativo, sem significado físico, para a condutividade do meio. Esse resultado é importante sob dois aspectos: primeiro,

Tabela 2.1: Condutividade elétrica verdadeira (σ_V), prevista pela expressão analítica (σ^{AN}) e por meio da média simples de 26 pontos localizados ao longo do perfil construído para a simulação numérica de um modelo de semi-espaço homogêneo ($\sigma^{EF} \pm s^{EF}$), além do número de indução (B) considerando a frequência de aquisição igual a 6400 Hz e separação entre Tx e Rx de 10 m. Os valores de condutividade elétrica verdadeiros foram selecionados de forma a representar situações encontradas em estudos ambientais (Cenários 1 a 3) e o valor máximo de leitura do EM34 (Cenário 4). As condutividades estão em mS.m^{-1} . O número de indução (B) calculado de acordo com a seção 1.1.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
σ_V	40	50	100	1.000
σ^{AN}	26,8	31,6	49,4	-118,6
$\sigma^{EF} \pm s^{EF}$	$26,7 \pm 0,3$	$31,6 \pm 0,4$	$49,4 \pm 0,8$	$-115,9 \pm 6,7$
B	0,32	0,36	0,50	1,59

confirma a acurácia da modelagem numérica mesmo para meios muito condutivos; segundo, permite refletir sobre quais contextos geológicos estes valores podem ocorrer.

No desenvolvimento desse teste de consistência, constatou-se que a geração da malha e a acurácia da solução encontrada no programa são dependentes da frequência, da separação entre as bobinas transmissora e receptora e da condutividade do meio. Especificamente, deve-se adensar a malha na região onde as bobinas Tx e Rx estão posicionadas de forma que o tamanho máximo do elemento seja aproximadamente 17 vezes menor do que a separação entre as bobinas e o tamanho mínimo seja aproximadamente 1.667 vezes menor. Esses parâmetros no dimensionamento da malha foram incorporados na modelagem de dados reais apresentados no Capítulo 3.

2.3.1. Distorções no Cálculo da Condutividade Elétrica Aparente com Número de Indução “Não — Baixo”

A partir da Tabela 2.1 e da Figura 2.9d, o fato de a condutividade aparente ser negativa quando a condutividade elétrica do semi-espaço homogêneo é o valor máximo que o EM34 detecta ($\sigma = 1.000 \text{ mS.m}^{-1}$) despertou o interesse em compreender a partir de qual número de indução os valores verdadeiros de condutividade elétrica para um modelo de semi-espaço homogêneo divergem do valor obtido considerando a aproximação por B baixo. Dessa forma, decidiu-se calcular a condutividade aparente pela equação (33) por meio da razão entre a intensidade dos campos secundário e primário para os arranjos HCP (31) e VCP (32) e em função dos parâmetros empregados no teste de consistência. A Figura 2.10 mostra a divergência dos valores de condutividade analítica (σ^{AN}) previstos pela aproximação de número de indução da equação (33) e a condutividade verdadeira (σ_V) do meio. O cálculo foi realizado com valores de condutividade elétrica entre 0,1 e 1.000 mS.m^{-1} . O erro relativo entre σ^{AN} e σ_V foi calculado segundo

$$E_R = \frac{|\sigma^{AN} - \sigma_V|}{|\sigma_V|} \quad (39)$$

Nas Figuras 2.10a e 2.10b, percebe-se que as curvas analíticas para os arranjos HCP se distanciam da curva verdadeira a partir de $3,5 \text{ mS.m}^{-1}$ e 14 mS.m^{-1} , respectivamente, quando o erro relativo é igual ou superior a 10 %. O número de indução para estes dois valores está na ordem de 0,2. Essa observação permite contribuir com o questionamento (Caminha-Maciel e Figueiredo, 2013) sobre qual valor de B deve ser muito menor do que 1 para que a aproximação por número de indução baixo é capaz de verificar a condutividade elétrica verdadeira de um substrato homogêneo. Nesta pesquisa, foi estabelecido o termo de “número de indução não-baixo” para valores de B maiores que 0,2, a partir do qual o erro entre σ^{AN} e σ_V tornam-se maiores que 10 %.

Tal como mostra a Figura 2.10a, o valor crítico de $610,9 \text{ mS.m}^{-1}$ ($1,6 \Omega\text{m}$) delimita a faixa de condutividade a partir da qual valores negativos de condutividade elétrica são esperados para a fórmula do EM34, considerando o arranjo HCP, separação de 10 m ou genericamente para arranjos com número de indução igual a 1,2. Essa observação corrobora o resultado da simulação numérica considerando um meio homogêneo de condutividade equivalente a 1.000 mS.m^{-1} ($B = 1,6$) e a observação descrita em Frischknecht et al. (1991).

Na Figura 2.10b, nota-se que o erro relativo entre os valores de condutividade elétrica verdadeiro e os valores previstos analiticamente no caso dos arranjos HCP e VCP são distintos, sendo o erro relativo sistemicamente maior no arranjo HCP. Para o valor de $3,5 \text{ mS.m}^{-1}$, por exemplo, o erro relativo no arranjo HCP é de 10 %, enquanto para o arranjo VCP é de 5 %.

Pela Figura 2.10c, verifica-se que, a partir do valor crítico observado na Figura 2.10a, existe a possibilidade de medir valores negativos de condutividade elétrica para alguns materiais como água fresca, água salina, argilas, grafita, rochas ígneas máficas e sulfetos maciços. Para lidar com esta situação, é necessário comparar a base de dados experimental com uma base de dados sintéticos, como mostra Selepeng et al. (2016) em um estudo voltado para o mapeamento de intrusões de dacitos na região da prefeitura de Akita – Japão.

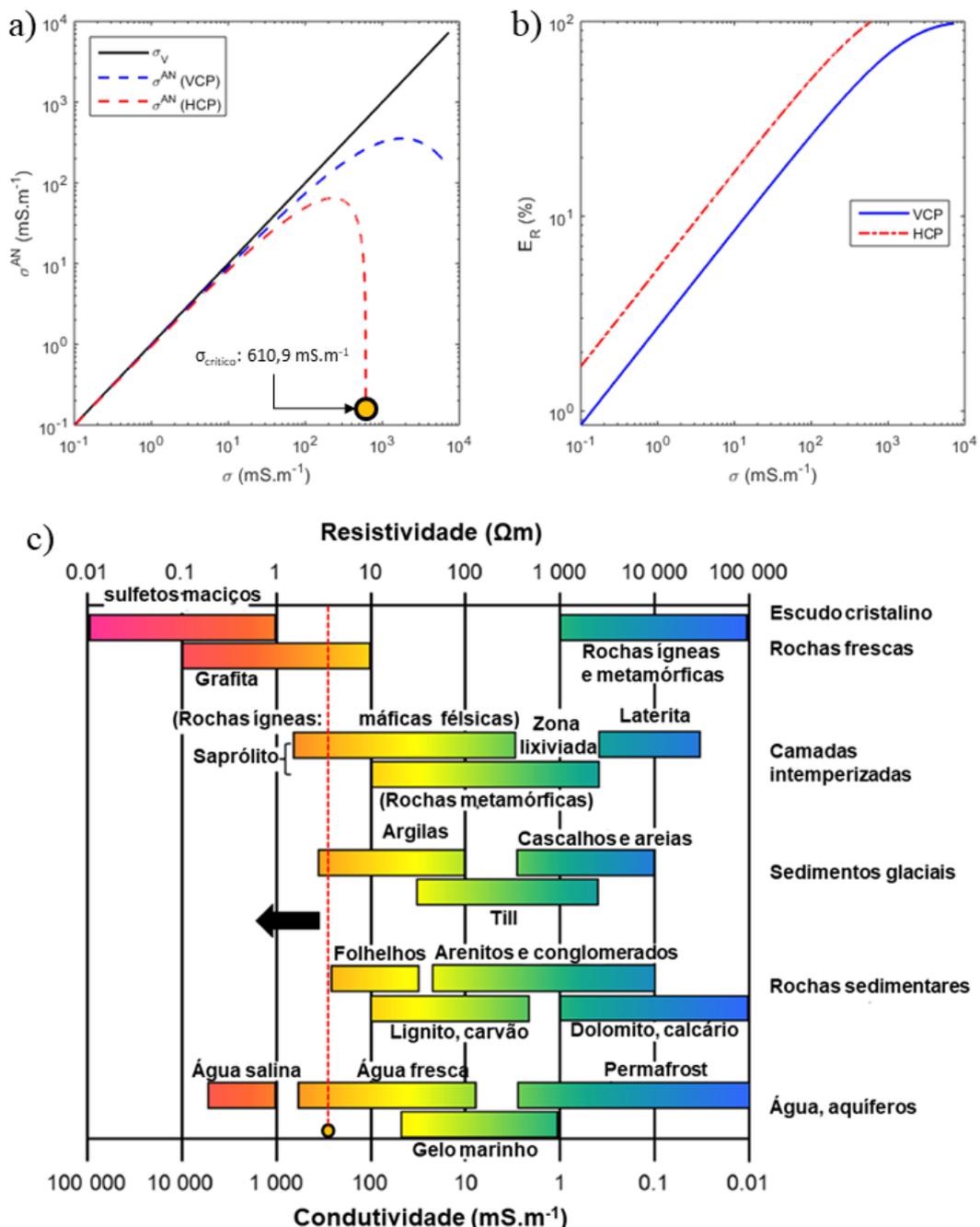


Figura 2.10: (a) Valores de condutividade elétrica verdadeiro (σ_V) e analítico (σ^{AN}) para os arranjos VCP e HCP do EM34 para a frequência de 6400 Hz e separação entre as bobinas de 10 m; (b) Erro relativo em porcentagem entre o valor verdadeiro e o valor previsto para os arranjos VCP e HCP do EM34; (c) Valores típicos de resistividade/condutividade elétrica para materiais geológicos (modificado de GeoSci., 2019) e valor crítico de condutividade (círculo amarelo) igual a $610,9 \text{ mS.m}^{-1}$ ($1,6 \Omega\text{m}$). Para meios com condutividade maior do que este valor, a condutividade elétrica fornecida pelo arranjo HCP é negativa. Erros da ordem de 5 % são verificados para meios com condutividade de 1 mS.m^{-1} no arranjo HCP e meios com condutividade de $3,5 \text{ mS.m}^{-1}$ no arranjo VCP.

3. Distorções Causadas por Estruturas Metálicas em Medidas com o EM34

Tendo validado o modelo para as frequências e dimensões compatíveis com os estudos de campo realizados com o EM34, apresenta-se nesse Capítulo a modelagem de estruturas metálicas representando diferentes configurações de cercas.

As propostas deste Capítulo são destacar o procedimento experimental de campo que gerou a base de dados utilizada, detalhar os procedimentos empregados na modelagem numérica utilizando o módulo AC/DC do programa COMSOL[®] e discutir os resultados obtidos por essas abordagens.

3.1. Descrição da Base de Dados Experimentais

Os dados experimentais utilizados nesta pesquisa para comparar com a resposta obtida numericamente são provenientes de Urenha (2018). O objetivo deste trabalho consistiu em quantificar experimentalmente a distorção causada por cercas compostas de fios metálicos nos dados de condutividade aparente medidos pelo equipamento EM34.

A aquisição dos dados envolveu três estágios: escolha das áreas de teste, levantamentos geofísicos preliminares para evitar locais com construções subterrâneas (dutos, galerias, etc.), determinação da condutividade elétrica aparente na ausência de uma estrutura simulando cercas com três fios, para em seguida computar a variação nos valores de condutividade aparente deslocando a cerca em relação à posição dos sensores (bobinas Tx-Rx do EM34).

As duas áreas de estudo (Figura 3.1) foram escolhidas dentro do campus Butantã da Universidade de São Paulo, sendo a Área 1 localizada em frente ao IAG e a Área 2 próxima à Faculdade de Odontologia. Em termos geológicos (Iritani, 1993), a Área 1 encontra-se em um terreno composto por sedimentos quaternários provenientes da Bacia de São Paulo (areias, argilas e cascalhos) e a Área 2 encontra-se em um terreno constituído pelas rochas sedimentares da Formação São Paulo (siltitos, argilitos e arenitos). Os trabalhos experimentais foram conduzidos por Urenha (2018), com a participação do autor desta Dissertação em todas as fases do estudo. O reconhecimento preliminar das áreas de teste foi executado com técnicas de caminhamento elétrico (CE) e eletromagnético. Foram realizados perfis para caracterizar o terreno e posicionar as bobinas do EM34 em locais onde a variação de condutividade ao longo do perfil fosse mínima, evitando regiões do perfil perturbadas por escavações ou obras subterrâneas. De acordo com essas técnicas, Urenha (2018) descreveu que o modelo de resistividade para a Área 1 foi constituído por três camadas, sendo a camada superficial com resistividade de $1.000 \Omega.m$ (interpretada como solo composto por argila), a segunda camada menos resistiva a partir de 5 metros com resistividade de $22 \Omega.m$ (presença do nível d'água) e uma terceira camada iniciando em 9 metros de profundidade e resistividade de $400 \Omega.m$ (material argilo-arenoso resistivo). Já o modelo de resistividade para a

Área 2 foi composta por duas camadas, sendo a primeira de resistividade de $22 \Omega.m$ (rocha alterada com porção argilosa) e espessura de 7,8 metros, enquanto a segunda camada foi caracterizada com uma resistividade de $150 \Omega.m$ (rocha extremamente friável).

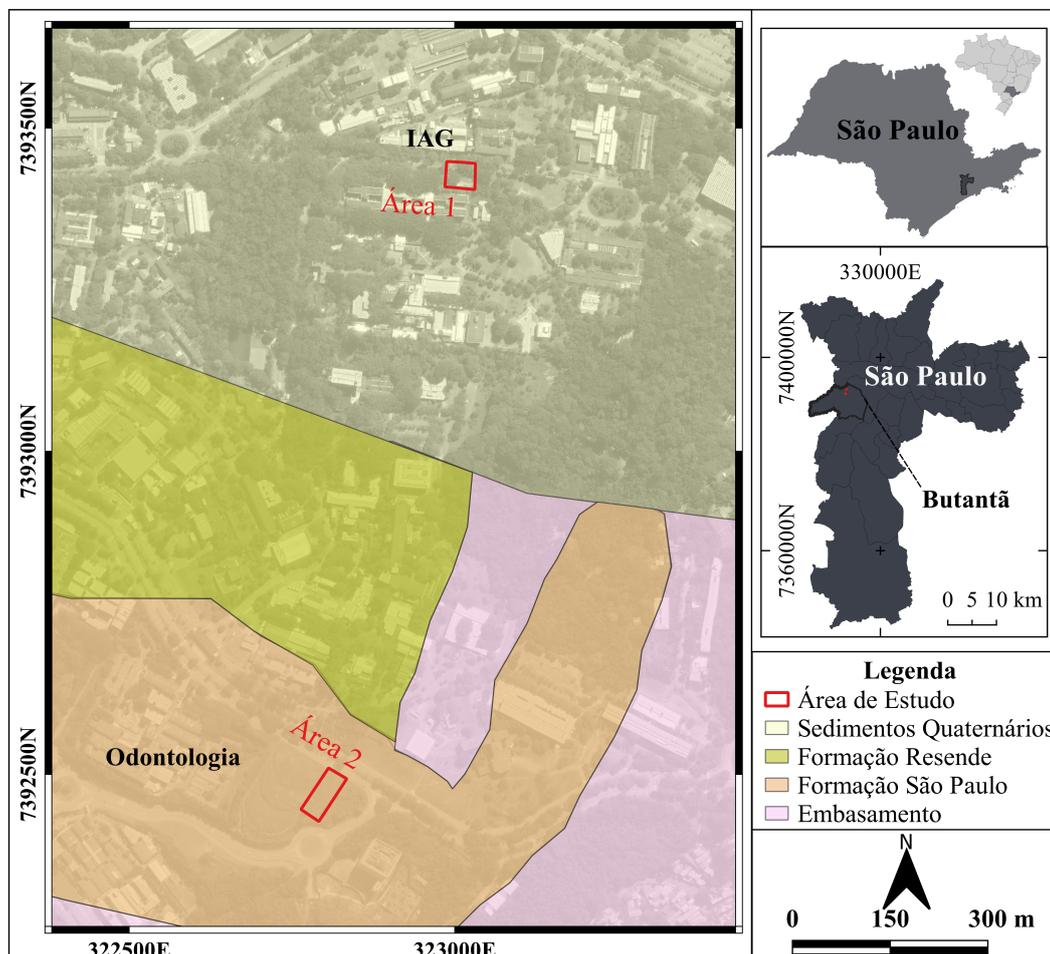


Figura 3.1: Localização das áreas (retângulos vermelhos) onde as aquisições dos dados experimentais foram executadas e mapa geológico da região do estudo (Adaptado de Marangoni et al., 2017). O sistema de referência do mapa é baseado em SIRGAS 2000/UTM Zona 23S. Fonte: Imagens Google.

Uma vez escolhidos os locais para teste, procedeu-se a aquisição mantendo as bobinas Tx e Rx do EM34 separadas em 10 m (frequência de 6.400 Hz) e em uma mesma posição, colocando a estrutura metálica representando cercas com diferentes configurações (fios conectados e não conectados) em diferentes posições de forma a manter as bobinas fixas em um mesmo local com a finalidade de impedir movimentos relativos durante a realização do levantamento e perder a orientação entre os planos das bobinas, especialmente no arranjo VCP (Figura 3.2b). A condutividade elétrica aparente do meio foi medida antes da inclusão e depois da remoção da cerca do local, sendo a posição onde as bobinas foram colocadas considerada a origem do perfil (Figura 3.3). Este procedimento foi realizado para controlar a deriva instrumental do equipamento, pois a aquisição dos dados na presença da cerca durava

entre 60 e 120 minutos. Essa medida inicial e final foi adquirida no total de seis vezes para calcular a média e o desvio padrão.

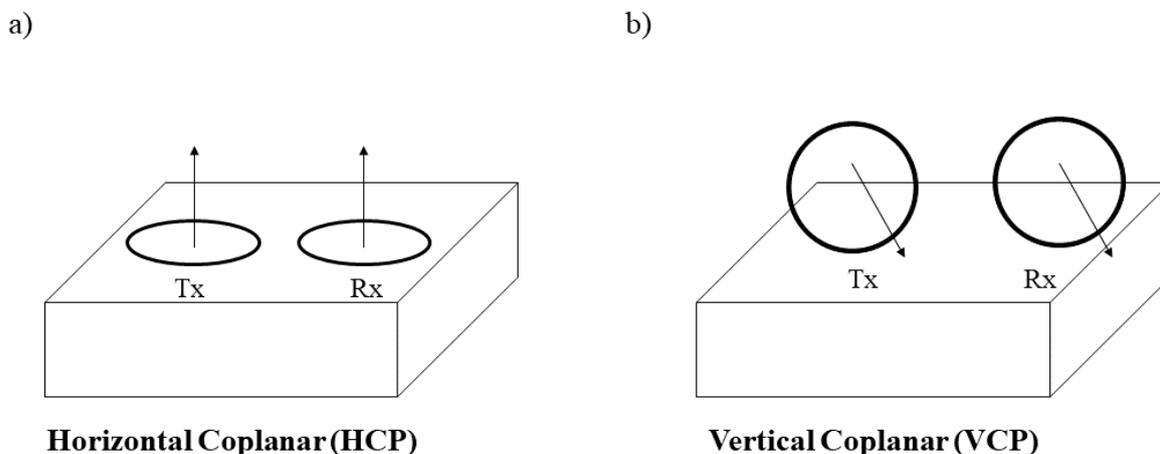


Figura 3.2: Arranjos de bobinas empregados no estudo experimental da influência de cercas em dados adquiridos com o EM34. (a) Horizontal Coplanar (HCP), onde o momento de dipolo está alinhado com o eixo das cotas e (b) Vertical Coplanar (VCP), onde o momento de dipolo pode ser alinhado com o eixo das abcissas ou com o eixo das ordenadas.

As medidas com a presença da cerca em cada local foram realizadas em duas fases (Figura 3.3). Na primeira, a cerca foi deslocada para se distanciar entre 0,5 e 14 metros com respeito à posição das bobinas. Na segunda fase, a cerca foi deslocada para se aproximar das bobinas entre 14 e 0,5 m, posições similares ao primeiro contexto. Em ambos estágios, a orientação da cerca permaneceu paralela ao posicionamento das bobinas e a condutividade elétrica aparente foi medida três vezes para considerar o erro experimental decorrentes da deriva do equipamento e do posicionamento da cerca.

A cerca simulada neste estudo foi composta por três fios de material galvanizado, cada fio com diâmetro de 1,65 mm de diâmetro e 30 m de comprimento. Os fios foram mantidos com separação constante de 20 cm e o fio inferior posicionado a 10 cm do solo. Estacas de madeira com base de cimento foram utilizadas para manter constante a separação entre os fios, facilitar a movimentação da cerca e manter sua orientação na vertical. O comprimento de 30 m para a cerca (Urenha, 2018) foi definido com base no triplo da separação entre as bobinas (10 m) e no dobro da sensibilidade do equipamento (McNeill, 1980) para a frequência de 6.400 Hz no arranjo HCP (15 m).

A configuração da cerca com fios conectados representa uma situação que a cerca se comporta como um conjunto de espira, facilitando a geração de campos secundários a partir da indução causada pela componente magnética gerada pela bobina transmissora. O fio não conectado simula situações em que os campos secundários são gerados pelo campo elétrico da fonte dipolar. Em termos práticos, a cerca com fios não-conectados simula cercas divisórias utilizadas na agricultura familiar. A cerca com fios interconectados representa cercas reforçadas empregadas em áreas com pecuária.

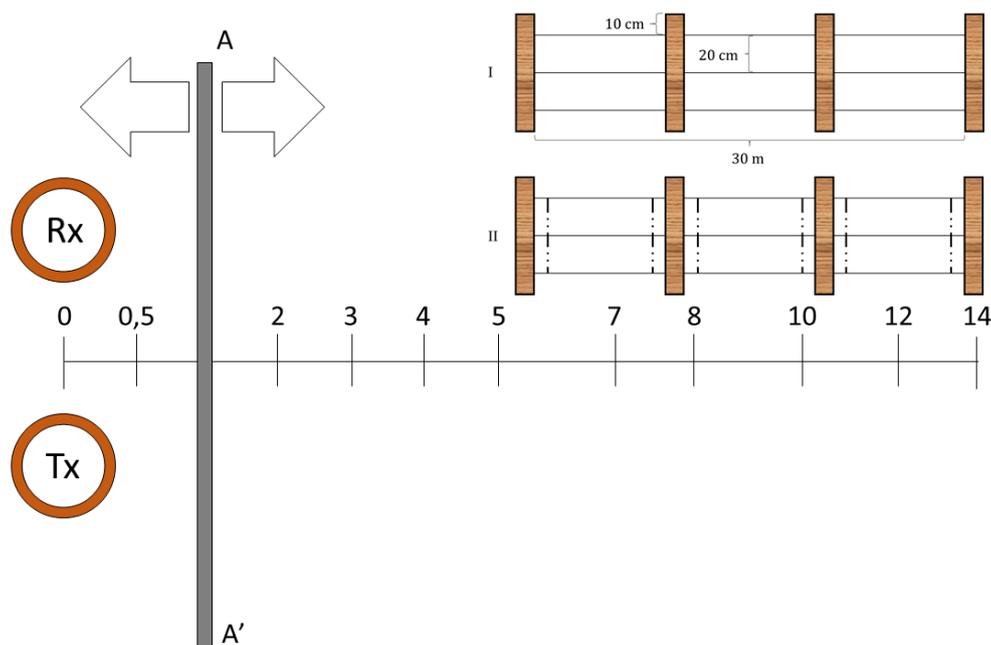


Figura 3.3: Esquema da aquisição dos dados experimentais nas duas áreas de teste. Inicialmente, medidas de condutividade aparente foram tomadas sem a presença da composição de fios representando uma cerca e valores médios computados. Em seguida, a estrutura metálica (cerca AA') foi posicionada paralelamente às bobinas Tx e Rx (círculos laranjas) em distâncias crescentes de afastamento (seta para a direita, de 0,5 a 14 m) em relação ao par de bobinas e, em seguida, se aproximando da cerca (de 14 a 0,5 m, seta para a esquerda) com repetição de medidas nas mesmas posições. A simulação das cercas com fios não conectados (I) e conectados (II) e dimensões.

3.2. Geração da Base de Dados Sintéticos

Na modelagem numérica, foi construído um domínio esférico com raio de 300 m, equivalente a 10 vezes o comprimento da cerca e aproximadamente 10 vezes o *skin depth* para a frequência de 6.400 Hz e para a menor condutividade elétrica do teste de consistência ($40 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ na seção 2.3). Em testes preliminares com o valor verdadeiro do diâmetro do fio, os cálculos não foram finalizados por falta de memória RAM requerida para adensar a malha na vizinhança dos fios. Empregou-se então fios com diâmetros maiores (100 mm) que o verdadeiro (1,65 mm) mantendo, porém, a mesma condutância (50 S) por metro de fio. Esta condutância, por sua vez, foi obtida medindo a resistência elétrica em 20 cm de fio por um multímetro. Os conectores da cerca com fios conectados foram também representados por dois cilindros (diâmetro de 100 mm) inclusos nas extremidades dos cilindros horizontais para fechar o circuito que simula a cerca como um conjunto de espiras.

A condutividade elétrica do meio homogêneo foi definida com base no valor médio medido pelo EM34 antes da instalação da cerca. Como tais medidas foram realizadas antes e após a movimentação da estrutura metálica (duração de aproximadamente 2 horas), observou-se uma deriva nos valores médios obtidos. Por essa razão, e considerando que o

efeito de deriva comumente é causado pelo aquecimento do aparelho é maior nos estágios iniciais de operação, optamos por utilizar os seis últimos valores do experimento como representativos da condutividade aparente do terreno.

Conforme mencionado anteriormente, optamos por discretizar a geometria do problema com elementos tetraédricos, totalizando 157.931 elementos para a situação em que os fios da cerca estavam desconectados e 160.594 elementos para a situação onde os fios encontravam-se conectados. Os elementos foram adensados na interface que define a superfície do terreno, na vizinhança das bobinas Tx e Rx e dos fios que compõem a cerca. Dessa forma, os elementos nessas regiões tiveram tamanhos variáveis entre 5,8 mm e 12 metros, dependendo de sua posição na malha. Para discretizar a cerca, o tamanho dos elementos ao longo dos cilindros variou entre o seu diâmetro (100 mm) e 1 m.

Para ambos os cenários, a cerca foi deslocada de forma similar ao experimento com afastamento incremental de 0,75 e 1,5 m para avaliar a variação da condutividade aparente no sensor em função da proximidade da estrutura metálica.

3.3. Resultados e Discussões

As Figuras 3.4 e 3.5 apresentam os resultados experimentais e numéricos para cada configuração da cerca.

Tal como mostra a Figura 3.4, a cerca com fios desconectados não acarreta distorções nas medidas de condutividade aparente, tanto no arranjo HCP quanto VCP para ambas áreas de estudo. Numericamente, estas tendências dos valores experimentais são devidamente recuperadas e o valor de condutividade elétrica obtido variou entre $8,3 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ (VCP) e $9,8 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ (HCP) para a Área 1 (Figuras 3.4a e 3.4c), enquanto para a Área 2 (Figuras 3.4b e 3.4d) variou entre $11,6 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ (VCP) e $16,5 \text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ (HCP).

Nas Figuras 3.5b e 3.5d, as quais correspondem ao levantamento realizado quando os fios da cerca estão conectados na Área 2, nota-se que as curvas são iniciadas no afastamento de 1 m. A justificativa por esse início foi baseada na ausência de convergência da modelagem numérica quando se posiciona a cerca a apenas 0,5 m do par Tx-Rx. Esse problema requer o adensamento da malha (o que se mostrou inviável utilizando o computador disponível para a presente pesquisa) ou levar em conta as dimensões das bobinas na representação numérica.

Pelas Figuras 3.4 e 3.5, é possível inferir que a hipótese formulada por Urenha (2018), na qual os campos distorcidos pela cerca são dependentes da condutividade aparente encontrada no terreno, é sustentada pelos resultados numéricos. O resultado numérico, neste caso, recuperou tendências similares ao que foi obtido experimentalmente para cada configuração de cerca.

Esses resultados, apesar de metodologias substancialmente diferentes, divergem dos resultados obtidos por Filho et al. (2014), que inferiram uma distância mínima de 40 m para evitar interferências causadas por estruturas metálicas em zonas rurais e entre 200 e 400 m

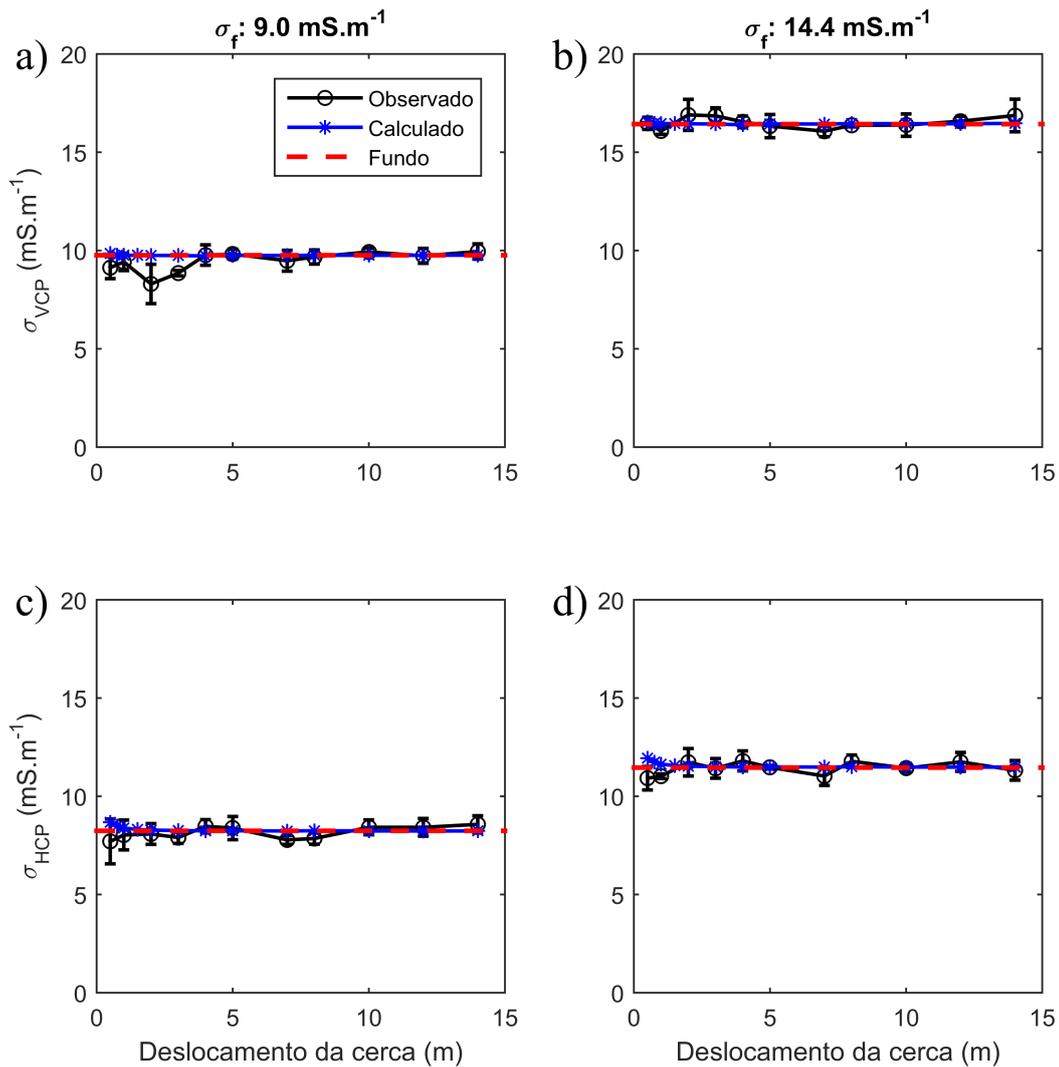


Figura 3.4: Resultados experimentais (círculos pretos) e numéricos (estrelas azuis) para o cenário em os fios da cerca estão desconectados. (a) e (c) Área 1; (b) e (d) Área 2. Percebe-se que neste cenário, a cerca não influencia na aquisição dos dados. O fundo (linha tracejada vermelha) é baseado na média dos seis últimos pontos da base de dados experimentais com a cerca desconectada. O valor de σ_f representa a média dos valores encontrados.

em áreas urbanas. Esse estudo, todavia, foi conduzido operando um sistema PROMIS-10 (IRIS Instruments[©]) na condição de número baixo com três separações de bobinas (20, 50 e 100 m), com as frequências disponíveis no equipamento (110 a 56.320 Hz) e o sistema de aquisição era deslocado em relação à cerca.

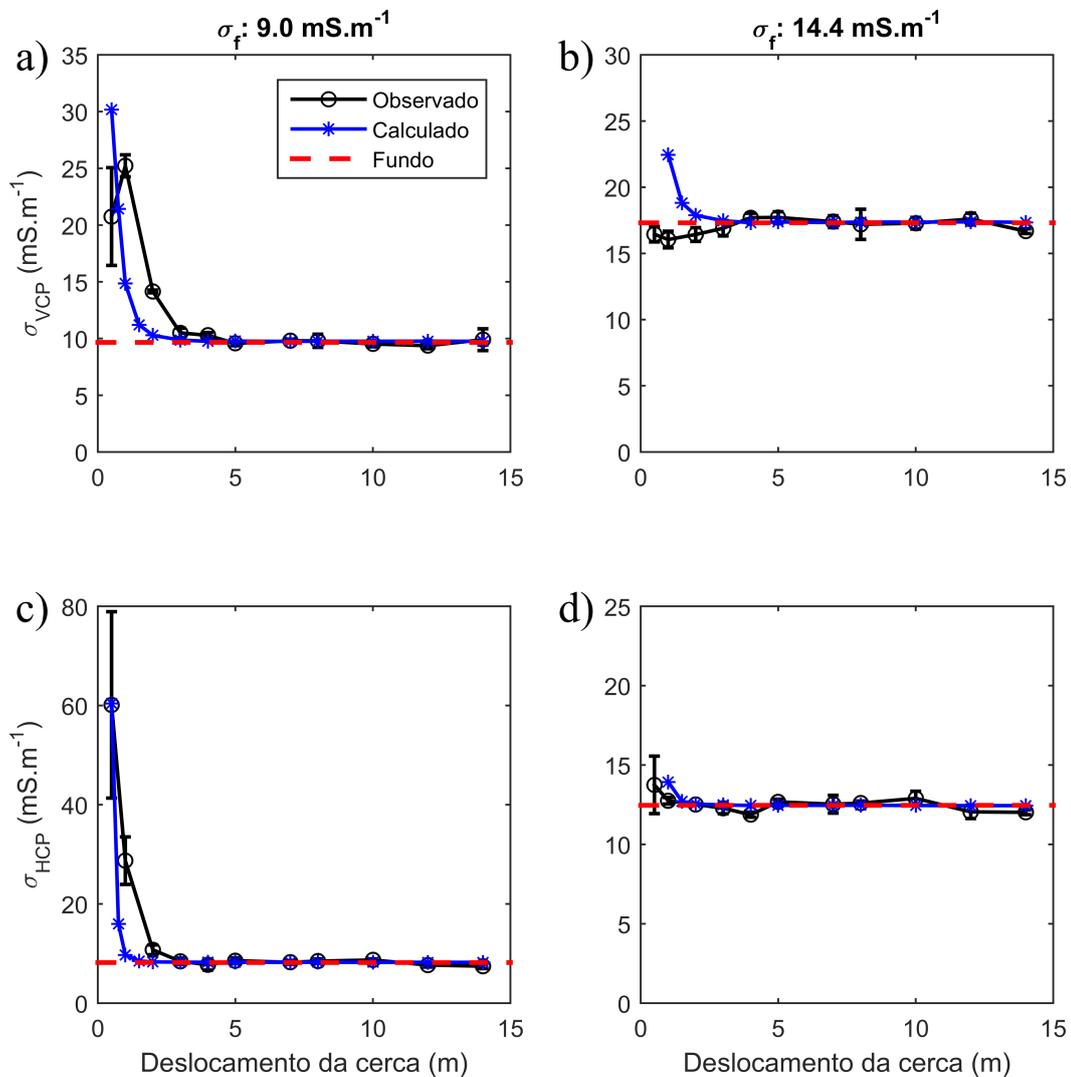


Figura 3.5: Resultados experimentais (círculos pretos) e numéricos (estrelas azuis) para o cenário em que os fios da cerca estão conectados. (a) e (c) Área 1; (b) e (d) Área 2. Percebe-se que, nesta situação, a cerca influencia significativamente a aquisição dos dados nos primeiros 2 m em ambas as áreas, sendo mais visível na Área 1 do que na Área 2. O fundo (linha tracejada vermelha) é baseado na média dos seis últimos pontos da base de dados experimentais com a cerca conectada. O valor de σ_f representa a média dos valores encontrados.

Conclusões

Esta pesquisa teve como objetivo estudar a interferência de estruturas metálicas em medidas de condutividade elétrica realizadas com equipamentos eletromagnéticos (EM34) operando em número baixo de indução. Esse problema foi investigado de forma conjunta utilizando dados experimentais obtidos em condições de campo e modelagem numérica utilizando o método dos elementos finitos. A base de dados experimentais foi obtida em cooperação com o trabalho de Urenha (2018), no qual uma cerca foi simulada de forma a representar diversas situações práticas que aparecem nos estudos de campo. Cercas com fios não conectados, por exemplo, são representativas de locais com agricultura familiar; cercas com fios conectados (mais reforçadas) geralmente encontradas em fazendas com pecuária intensiva. O experimento desenvolvido apresenta um procedimento metodológico que permite individualizar a interferência causada por cercas e, com isso, quantificar adequadamente a magnitude e variáveis que condicionam a magnitude das distorções observadas nos dados. Estudos anteriores, movendo o sistema de aquisição na direção da estrutura, não conseguiram individualizar adequadamente as variações associadas às heterogeneidades do substrato geológico daquelas causadas pela interferência, além de tornar mais imprecisos a manutenção do alinhamento dos sensores, a repetibilidade das medidas e análise do erro experimental. A simulação da cerca por meio de uma estrutura transportável contornou grande parte dos problemas observados em estudos anteriores.

Os resultados numéricos obtidos nesta pesquisa, tais como já sugeridos por Urenha (2018), recomendam um procedimento de campo para verificar se os fios da cerca estão eletricamente conectados, condição em que a interferência é maior. Isso pode ser realizado utilizando o recurso de medição de resistência elétrica presente na maioria dos multímetros, também conhecido como “teste de continuidade” ou “de contato elétrico”. Para fios sem conectividade elétrica, o levantamento com o EM34, em princípio, pode ser conduzido até muito próximo da cerca, pois na ausência de configuração de espiras, as distorções associadas devem ficar na margem de erro das medidas. Para cercas com fios conectados, uma medida a ser considerada seria remover temporariamente os conectores (“tirantes”) para, dessa maneira, minimizar a interferência nas medidas.

A abordagem numérica realizada neste estudo contribui com a hipótese formulada por Urenha (2018), na qual a magnitude da interferência causada por uma estrutura metálica depende da condutividade elétrica do substrato. Os resultados numéricos apontam que, quando os fios da cerca estão conectados, a amplitude da condutividade elétrica aparente é maior em terrenos resistivos, respaldando os resultados experimentais.

A abordagem experimental proposta é adequada para estruturas leves, que como tais, podem ser transportadas na vizinhança do equipamento. No entanto, a modelagem de estruturas mais pesadas ou com campos ativos (antenas transmissoras, por exemplo) torna-

se viável quando conduzida numericamente. Como continuidade do trabalho, sugere-se a incorporação de modelos CAD na modelagem numérica para representar estruturas tais como dimensionadas nos projetos e obras de engenharia. Nesse contexto, a modelagem conduzida com estruturas móveis seria aplicada como um requisito preliminar para validar os estudos realizados com modelos de estruturas interferentes mais complexas.

Referências Bibliográficas

Ansari S., Farquharson C. G., 3D finite-element forward modeling of electromagnetic data using vector and scalar potentials and unstructured grids., *Geophysics*, 2014, vol. 79, p. 16.

Avdeev D. B., *Three-Dimensional Electromagnetic Modelling and Inversion from Theory to Application.*, *Surveys in Geophysics*, 2005, vol. 26, p. 32.

Bolève A., Revil A., Janod F., Mattiuzzo J. L., Jardani A., Forward Modeling and validation of a new formulation to compute self-potential signals associated with ground water flow., *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, vol. 11, p. 10.

Butler S., Zhang Z., Forward modeling of geophysical electromagnetic methods using Comsol., *Computers & Geosciences*, 2016, vol. 87, p. 10.

Caminha-Maciél G., Figueiredo I., Error Analysis in Measured Conductivity under Low Induction Number Approximation for Electromagnetic Methods, *ISRN Geophysics*, 2013, p. 4.

COMSOL, 2017. COMSOL Multiphysics Reference Manual. Stockholm, Sweden. Versão 5.3a edn

Farquharson C. G., Duckworth K., Oldenburg D. W., Comparison of integral equation and physical scale modeling of the electromagnetic responses of models with large conductivity contrasts., *Geophysics*, 2006, vol. 71, p. 8.

Filho O. A. d. S., Sordi D. A. d., Assis J. R. d., Effect of Wire Fences on Slingram Type Surveys. In VI Simpósio Brasileiro de Geofísica , Sociedade Brasileira de Geofísica, 2014, p. 6.

Frischknecht F. C., Labson V. F., Spies B. R., Anderson W. L., Profiling Methods Using Small Sources, 1991 in Nabighian M. N., ed., , *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Volume 2: Application, Parts A and B.* Society of Exploration Geophysicists Chapt. 3 p. 165.

GeoSci. Electrical Conductivity: Typical Values for Rocks, 2019., Disponível em: <https://is.gd/electricalcvalues>. Acesso em: 28 de jun. de 2019.

Hohmann G. W., Numerical Modeling for Electromagnetic Methods of Geophysics., 1988 in Nabighian M. N., ed., , *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Volume 1: Theory.* Society of Exploration Geophysicists Chapt. 5 p. 51.

Iritani M. A., Potencial Hidrogeológico da Cidade Universitária de São Paulo, Universidade de São Paulo, 1993, Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências.

- Jin J., *The Finite Element Method in Electromagnetics*. John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- Kearey P., Brooks M., Hill I., *Geofísica de Exploração*. 1 edn. Oficina de Textos, 2009.
- McNeill J., , 1980. Nota Técnica. 6. *Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers*. Geonics Limited.
- Marangoni Y. R., de Moura D. S., Ferreira H., *Mapas de anomalias gravimétricas da Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira – USP/SP*, Geologia USP, 2017, vol. 17, p. 11.
- Pridmore D. F., Hohmann G. W., Ward S. H., Sill W. R., *An investigation of finite-element modeling for electrical and electromagnetic data in three dimensions.*, *Geophysics*, 1981, vol. 46, p. 15.
- Qi Y., El-Kaliouby H., Revil A., Ahmed A. S., Ghorbani A., Li J., *Three-dimensional modeling of frequency- and time-domain electromagnetic methods with induced polarization effects.*, *Computers & Geosciences*, 2019, vol. 124, p. 7.
- Qian W., Boerner D. E., *Electromagnetic response of a discretely grounded circuit—An integral equation solution.*, *Geophysics*, 1994, vol. 59, p. 14.
- Ren Z., Kalscheuer T., Greenhalgh S., Maurer H., *A goal-oriented adaptive finite-element approach for plane wave 3-D electromagnetic modelling.*, *Geophysical Journal International*, 2013, vol. 194, p. 18.
- Schwarzbach C., Börner R.-U., Spitzer K., *Three-dimensional adaptive higher order finite element simulation for geo-electromagnetics—a marine CSEM example.*, *Geophysical Journal International*, 2011, vol. 187, p. 11.
- Selepeng A. T., Sakanata S., Nishitani T., *3D numerical modelling of negative apparent conductivity anomalies in loop-loop electromagnetic measurements: a case study at a dacite intrusion in Sugisawa, Akita Prefecture, Japan*, *Exploration Geophysics*, 2016, p. 15.
- Szarka L., *Geophysical aspects of man-made electromagnetic noise in the earth—A review.*, *Surveys in Geophysics*, 1988, vol. 9, p. 31.
- Urenha C., *Influências de estruturas metálicas na aquisição de dados eletromagnéticos obtidos com condutivímetro EM34.*, 2018, Trabalho de Graduação (Bacharel em Geofísica), USP (Universidade de São Paulo), São Paulo, Brasil.
- Wang X., Yue H., Liu G., Zhao Z., *The Application of COMSOL Multiphysics in Direct Current Method Forward Modeling.*. In *XI'AN Conference on Fine Geological Exploration and Groundwater & Gas Hazards Control in Coal Mines* , vol. 3, Elsevier BV, 2011, p. 6

Ward S. H., Hohmann G. W., *Electromagnetic Theory for Geophysical Applications.*, 1988 in Nabighian M. N., ed., *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Volume 1: Theory.* Society of Exploration Geophysicists. Chapt. 4. p. 181.