

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

Matheus Carlos de Souza Santos

**Perfilagem magnética para determinação da
profundidade de fundações armadas em torres
de telecomunicação: ensaios de campo e
inversão de dados**

São Paulo
2021

Matheus Carlos de Souza Santos

**Perfilagem magnética para determinação da
profundidade de fundações armadas em torres
de telecomunicação: ensaios de campo e
inversão de dados**

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
2021

Aos meus eternos Idilio e Odette

Agradecimentos

Essa dissertação foi concluída após dois anos e meio de trabalho, passando por altos e baixos mas sempre buscando fazer o meu melhor. Agradeço imensamente a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho fosse concluído. Em especial, gostaria de agradecer:

Primeiramente, ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Alberto Mendonça, por todos os conselhos, críticas e conversas que garantiram o enriquecimento do projeto e meu crescimento pessoal. Foi uma enorme honra tê-lo como orientador ao longo desse caminho, auxiliando nas decisões como professor e amigo.

Aos docentes e funcionários do IAG/USP, que desde a graduação me fizeram sentir em casa e foram essenciais na minha motivação acadêmica. Em especial ao professor Carlos Chaves, pela contribuição como relator ao longo do mestrado, que muito contribuiu com o desenvolvimento do estudo; e ao professor Chiquinho, pela orientação e parceria em minha monitoria PAE que muito contribuiu para meu crescimento acadêmico.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior) pelo suporte financeiro, sem o qual esta pesquisa não teria se concretizado.

Ao IPT e à empresa American Tower, por disponibilizarem os dados utilizados no presente estudo.

A todos amigos e colegas do IAG pelo apoio e companhia, tanto nas conversas descontraídas quanto nas reuniões e estudos enriquecedores.

Preciso agradecer ao ITA e ao IPT pelo auxílio na compreensão de aspectos técnicos e práticos da geotecnia e da geofísica aplicada. Em especial aos pesquisadores Tiago Souza, Paulo Hemsí e Otávio Gandolfo pela contribuição imensurável na pesquisa, caminhando junto a mim na integração da geofísica à geotecnia e obtendo resultados muito satisfatórios.

Aos meus amigos de longa data Guita, Henrique, Gu e Joyce (e meu amado afilhado Miguel), pelas risadas, conselhos, abraços e apoio que foram essenciais para me manter esperançoso por dias melhores.

Impossível não agradecer a todos os profissionais da linha de frente no combate à pandemia, sem os quais teria sido impossível ter o mínimo de psicológico possível para seguir em frente na pesquisa. Agradeço em especial a todos os funcionários do hospital Dom Alvarenga, que salvaram a vida de meu pai mesmo diante de um quadro tão complicado, o que me proporcionou o gás final para poder concluir esse estudo da melhor forma possível.

Por fim, agradeço aos meus pilares. À minha mãe Goreth e ao meu pai Adalberto por todo o apoio e amor, sempre acreditando no meu potencial e me ensinando que não há nada mais forte do que nosso vínculo. Ao meu irmão Gabriel, pelos conselhos e paciência ao longo de toda minha vida que me fizeram tê-lo como ídolo. À minha amada companheira Ana Laura, que me inspira a dar o meu máximo e a ser a melhor versão de mim, e me motiva a lutar pelo nosso futuro. À minha querida avó Odette, minha primeira professora e minha segunda mãe, sempre preocupada com o melhor para mim. E ao meu saudoso e amado avô Idilio, que vibrava a cada pequena conquista de seus netos e sempre levantava meu astral com suas histórias e brincadeiras, e que sei que nunca deixará de estar ao meu lado - como sempre esteve.

Resumo

Informações técnicas sobre fundações profundas de torres de telecomunicação podem estar indisponíveis ou incompletas por perda do projeto original da fundação ou por informações pouco confiáveis da documentação de construção. Esse problema é relevante dado que torres de telecomunicação comumente são sujeitas à demanda de novas cargas por expansão das redes. Avaliações não destrutivas por métodos geofísicos foram realizadas para determinar a profundidade da base de fundações profundas, um parâmetro chave para calcular-se suas capacidade de carga suportada. O método é realizado pela descida de um sensor de perfilagem magnética em um furo situado próximo à estrutura desconhecida, medindo assim o campo magnético ao longo do furo. Nós apresentamos um conjunto de aplicações numéricas e de campo que mostram que não há um atributo característico no campo observado que possa ser utilizado para determinar a profundidade da fundação de forma incontestável. Verificamos que a maior parte do campo medido ao longo do furo (especialmente próximo à superfície) é perturbado por instalações em superfície, e desenvolvemos um procedimento de inversão impondo um maior peso ao ajuste das medidas profundas. A eficácia da técnica é ilustrada por ensaios de campo em diferentes ambientes geológicos, com os resultados comparados ao *as-built* (documentação de construção) das fundações e/ou a avaliações com métodos alternativos. Nós mostramos que ambiguidades relacionadas a inomogeneidades profundas podem levar a profundidades subestimadas, o que demanda uma análise conjunta com métodos alternativos para melhor caracterizar a estrutura. A proximidade do furo à fundação pode reduzir tais ambiguidades e aprimorar o método.

Palavras-chave: perfilagem magnética, fundações profundas, profundidade de fundações, avaliação não destrutiva, método de inversão.

Abstract

Technical information about deep foundations of telecommunication towers may be unavailable or incomplete due to lack of the original foundation design or unreliable information on construction documentation. Such a problem is relevant since telecommunication towers often are subjected to new loading demands from expanding networks. Non-destructive evaluation with geophysical methods has been applied to determine the depth to the bottom of deep foundations, a key parameter to evaluate their bearing capacity and settlements. This is done by lowering a borehole magnetometry sensor down a drill hole installed close to the unknown structure, thereby measuring the magnetic field along the testing drill hole. We summarize a set of numerical and field-work applications showing that no single characteristic attribute of the observed field can undoubtedly be used to determine the foundation depth. We verify that most of the measured field along the testing drill hole (especially near the surface) is disturbed by fields from facilities at the ground surface and develop a data inversion procedure selectively enforcing data fitting to measurements at the lower portions of the drill hole. The efficacy of this technique is illustrated with field tests in different geological scenarios with results compared with the foundations' "as-built" documentation and/or independent evaluation with other methods. We show that ambiguities related to deep inhomogeneities may lead to sub-estimate depths, which demand a joint analysis with independent methods to better characterize the structure. The proximity of the borehole to the foundation can diminish such ambiguities and enhance the method.

Key-words: borehole magnetometry, deep foundations, foundation depth, non-destructive evaluation, inversion method.

Lista de Figuras

- 2.1 Estrutura eletrônica de preenchimento das camadas de energia para alguns elementos da tabela periódica, do Sódio (Na) ao Zinco (Zn). Adaptado de Tauxe (2005). 10
- 2.2 (A) Variação da magnetização de um corpo ferrimagnético em função da intensidade do campo externo H , com a devida mudança da configuração dos domínios até atingir-se a saturação (M_s). (B) Ciclo de histerese (curva contínua em vermelho), com aplicação até saturações avante e reversa (S e S'). A magnetização remanente após retirada do campo externo (M_r) e a coercividade (H_c) também estão representadas. A curva tracejada azul indica a obtenção inicial de magnetização, representando. Adaptado de Callister e Rethwisch (2010). 14
- 2.3 Superfícies polarizadas (+ e -) por acúmulo de densidade de cargas σ_m , magnetização \mathbf{M} e campo interno de desmagnetização \mathbf{H}_d para uma estrutura (barra) em forma de haste: (A) magnetização \mathbf{M} ao longo do eixo longitudinal da barra, com superfícies polarizadas muito distantes entre si e conseqüente campo desmagnetizante \mathbf{H}_d nulo; (B) magnetização \mathbf{M} ao longo do eixo transversal da barra, com densidade de cargas σ_m em superfícies próximas gerando um campo desmagnetizante \mathbf{H}_d anti-paralelo e de intensidade similar a \mathbf{M} . Adaptado de Dunlop e Özdemir (1997) 18
- 2.4 Curva das componentes axial e radial esperadas associadas a: (A) barra magnética homogênea com equivalentes polos norte N e sul S; (B) barra magnética sob stress na região central, com geração de polos norte N e sul S na região de deformação e conseqüente modificação das curvas das componentes axial e radial do campo. Adaptado de Atherton e Jiles (1986) 20
- 2.5 Modelo esquemático de um ímã quebrado representando deformações internas a uma barra de aço. Ainda que a fratura não seja visível na barra em escala macroscópica, o processo esquemático demonstra o escape do fluxo magnético interno na região da fratura ou esforço na barra, caracterizando um fluxo externo similar ao de uma barra magnética de polarização oposta. Adaptado de Hillemeier e Scheel (1998) 21
- 2.6 Arranjo padrão de perfilagem. Adaptado de Desbrandes (1982) apud Tittman (1987) 27
- 3.1 (A) Visão geral de um furo de sondagem próximo a uma torre de telecomunicação para determinação da profundidade de sua fundação. (B) Preparo do arranjo de perfilagem magnética. (C) Tripé suspendendo a sonda para medidas ao longo do furo. (D) Componentes da sonda OPTV utilizada nas tomadas de dados do presente estudo. 36

3.2	Componente vertical do campo magnético (B_z) medido em três sites distintos. Medidas de descida (linha cinza sólida) e de subida (linha preta tracejada) da sonda. Furos de monitoramento dispostos próximos a fundações do tipo estacas raíz (A e B) e tipo tubulão (C) com as respectivas profundidades (linha pontilhada) de 13.5m, 9.0m e 8.25m, respectivamente. As profundidades foram estimadas pelo método paralelo sísmico e por informações litológicas de perfuração.	37
3.3	Representação da contribuição anômala associada a cada grupo componente da armação de uma fundação do tipo tubulão (a) com furo posicionado no lado leste e (b) com furo posicionado no lado norte. Adaptado de Sun et al. (2009)	40
3.4	(A) Representação simplificada da estrutura de armação em uma fundação do tipo tubulão. (B) Representação simplificada da estrutura de armação em uma fundação do tipo estacas raíz. (C) Representação simplificada utilizando um prisma equivalente ao volume de armação concretada e magnetização calculada segundo a Equação 8.	45
4.1	(A) Simulação numérica do modelo simples NS1 composto por dois prismas e soluções alternativas S_1 e S_2 obtidas pela inversão dos dados; intensidade de magnetização (em A/m) e direção de magnetização (flechas para cima e para baixo) estão anotadas para cada prisma. (B) Função peso de distribuição gaussiana cumulativa, centrada na profundidade $z_\mu=10$ m com faixa de tolerância $z_\sigma=1$ m. (C) Dados sintéticos (círculos) e ajuste aos dados dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul). (D) Derivada vertical do conjunto de dados sintéticos (círculos) e ajuste da derivada dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul).	64
4.2	Mosaico de valores da função objetivo do modelo NS1 em função das profundidades dos prismas mais inferiores z_3 e z_4 , com profundidade do prisma intermediário z_2 fixada em: (A) 9,5 m; (B) 10,0 m; e (C) 10,5 m. Curva de nível de 3 a 1 ($\times 10^6$) demarcadas em amarelo com espaçamento unitário para representação da região de ajuste válido. As figuras (A) e (B) mostram a tendência para um mínimo com $z_3 \approx z_2$ e $z_4=10$ m, coincidente com o modelo numérico. A figura (C) mostra a existência de um mínimo alternativo com $z_3 > z_2$ e $z_4 \approx 11,3$ m, e portanto um ajuste com mudança de polarização e profundidade superestimada.	65
4.3	(A) Simulação numérica do modelo complexo NS2 composto por quatro prismas e soluções alternativas S_1 e S_2 obtidas pela inversão dos dados; intensidade de magnetização (em A/m) e direção de magnetização (flechas para cima e para baixo) estão anotadas para cada prisma. (B) Função peso de distribuição gaussiana cumulativa, centrada na profundidade $z_\mu=9,1$ m com faixa de tolerância $z_\sigma=1$ m. (C) Dados sintéticos (círculos) e ajuste aos dados dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul). (D) Derivada vertical do conjunto de dados sintéticos (círculos) e ajuste da derivada dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul).	69

4.4	Mosaico de valores da função objetivo do modelo NS2 em função das profundidades dos prismas mais inferiores z_3 e z_4 , com profundidade do prisma intermediário z_2 fixada em: (A) 9,0 m; (B) 9,4 m; e (C) 9,8 m. Curva de nível de 3 a 1 ($\times 10^6$) demarcadas em amarelo com espaçamento unitário para representação da região de ajuste. As figura (A) mostra a possibilidade de um ajuste num mínimo sem mudança de polarização, numa profundidade subestimada. A figura (B) mostra um outro mínimo, com mudança de polarização profunda e resultado equivalente ao modelo numérico. A figura (C) apresenta a possibilidade de um terceiro ponto de mínimo, o qual superestima a profundidade com um prisma de polarização oposta mais espesso que o do modelo numérico.	71
4.5	(A) Simulação numérica do modelo simples NS3 próximo ao furo e composto por dois prismas, com soluções similares S_1 e S_2 obtidas pela inversão dos dados; intensidade de magnetização (em A/m) e direção de magnetização (flechas para cima e para baixo) estão anotadas para cada prisma. (B) Função peso de distribuição gaussiana cumulativa, centrada na profundidade $z_\mu=10,0\text{m}$ com faixa de tolerância $z_\sigma=1\text{m}$. (C) Dados sintéticos (círculos) e ajuste aos dados dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul). (D) Derivada vertical do conjunto de dados sintéticos (círculos) e ajuste da derivada dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul).	72
4.6	Mosaico de valores da função objetivo do modelo NS3 em função das profundidades dos prismas mais inferiores z_3 e z_4 , com profundidade do prisma intermediário z_2 fixada em: (A) 9,5 m; (B) 10,0 m; e (C) 10,5 m. Curva de nível de 1 a 10 ($\times 10^6$) demarcadas em amarelo com espaçamento unitário para representação da região de convergência. As figuras (A) e (B) mostram a tendência para um mínimo com $z_3 \approx z_2$ e $z_4=10\text{m}$, coincidente com o modelo numérico. A figura (C) não apresenta nenhum valor abaixo de 10×10^6 , indicando a inexistência nessa fatia de modelos que ajustem os dados.	74
5.1	Geometria da fundação da torre em Jardim São Luis segundo <i>as-built</i> (A) em planta, com posicionamento do furo e (B) em corte, demonstrando a profundidade de 8 metros da construção.	76
5.2	(A) Sismograma obtido pelo ensaio paralelo sísmico para o site em Jardim São Luis; (B) Plotagem das primeiras chegadas pickadas para cada um dos geofones, com a profundidade estimada em 8,0 m.	77
5.3	Resultados para o Caso 1, em Jardim São Luis, com profundidade real (linha pontilhada) definida pelo <i>as-built</i> . (A) Modelos de magnetização alternativos S_1 e S_2 obtidos pela inversão dos dados; intensidade de magnetização (em A/m) e direção de magnetização (flechas para cima e para baixo) estão anotadas para cada prisma. (B) Função peso de distribuição gaussiana cumulativa, centrada na profundidade $z_\mu=6,5\text{m}$ (linha tracejada) com faixa de tolerância $z_\sigma=1\text{m}$. (C) Dados observados (círculos) e ajuste aos dados dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul). (D) Derivada vertical do conjunto de dados observados (círculos) e ajuste da derivada dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul).	79

5.4	Geometria da fundação da torre em Campo Largo (A) em planta, com o posicionamento do furo utilizado na perfilagem e (B) em corte, com as dimensões do bloco e das estacas mas sem informações a respeito da profundidade.	81
5.5	(A) Sismograma obtido pelo ensaio paralelo sísmico para o site em Campo Largo; (B) Plotagem das primeiras chegadas pickadas para cada um dos geofones, com a profundidade estimada em 13,5 m. . . .	82
5.6	Resultados para o Caso 2, em Campo Largo, com profundidade real (linha pontilhada) definida pelo método PS. (A) Modelos de magnetização alternativos S_1 e S_2 obtidos pela inversão dos dados; intensidade de magnetização (em A/m) e direção de magnetização (flechas para cima e para baixo) estão anotadas para cada prisma. (B) Função peso de distribuição gaussiana cumulativa, centrada na profundidade $z_\mu=12,5\text{m}$ (linha tracejada) com faixa de tolerância $z_\sigma=1\text{m}$. (C) Dados observados (círculos) e ajuste aos dados dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul). (D) Derivada vertical do conjunto de dados observados (círculos) e ajuste da derivada dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul). . . .	83
5.7	Geometria da fundação da torre em Niterói (A) em planta, com o posicionamento do furo utilizado na perfilagem e (B) em corte, com as dimensões do bloco e das estacas mas sem informações a respeito da profundidade.	85
5.8	(A) Sismograma obtido pelo ensaio paralelo sísmico para o site em Niterói; (B) Plotagem das primeiras chegadas pickadas para cada um dos geofones, sem a capacidade de estimar uma profundidade devido à falta de contraste na velocidade de propagação da onda	86
5.9	Resultados para o Caso 3, em Niterói, com profundidade real (linha pontilhada) estimada pelo topo da rocha dura. (A) Modelos de magnetização alternativos S_1 e S_2 obtidos pela inversão dos dados; intensidade de magnetização (em A/m) e direção de magnetização (flechas para cima e para baixo) estão anotadas para cada prisma. (B) Função peso de distribuição gaussiana cumulativa, centrada na profundidade $z_\mu=9,4\text{m}$ (linha tracejada) com faixa de tolerância $z_\sigma=1\text{m}$. (C) Dados observados (círculos) e ajuste aos dados dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul). (D) Derivada vertical do conjunto de dados observados (círculos) e ajuste da derivada dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul). . . .	87

Sumário

1	Introdução	1
2	Aspectos Teóricos	5
2.1	Fundamentos do magnetismo	5
2.1.1	Princípios do magnetismo	5
2.1.2	Campo geomagnético	7
2.1.3	Magnetismo dos materiais	8
2.1.4	Histerese	13
2.1.5	Anisotropia magnética	14
2.2	Magnetização de barras de ferro e aço	16
2.2.1	Intensidade de magnetização	17
2.2.2	Direção de magnetização	17
2.2.3	Anomalias por inomogeneidades estruturais	19
2.3	Perfilagem Geofísica de poços	21
2.3.1	Aspectos gerais - Perfuração	22
2.3.2	Aspectos gerais - Perfilagem	24
2.3.3	Perfilagem magnética	26
2.4	Modelagem e Inversão	29
3	Metodologia	34
3.1	Perfilagem magnética em fundações armadas	34
3.2	Representação da armação por prismas retangulares	38
3.3	Modelagem magnética de prismas	41
3.4	Formulação do problema inverso	46
3.5	Função Objetivo	49
3.5.1	Função Ajuste - Quadrados Mínimos	49
3.5.2	Função Peso - Determinação de Arestas	50
3.5.3	Aplicação de vínculos	52
3.5.4	Resolução por convergência pelo método do ponto interior . . .	53
3.5.5	Mínimo local e global	57
3.5.6	Análise gráfica de ambiguidades	58
4	Simulação Numérica	61
4.1	Modelo NS1 - Fundação homogênea	62
4.2	Modelo NS2 - Heterogeneidade profunda	67
4.3	Modelo NS3 - Proximidade ao furo	71
5	Estudos de caso	75
5.1	Caso 1 - Jardim São Luis	76
5.2	Caso 2 - Campo Largo	80
5.3	Caso 3 - Niterói	84
6	Conclusão	89
	Bibliografia	91
	Anexos	100

1 Introdução

A aplicação de métodos geofísicos vem tendo crescente importância nas áreas de geotecnia e engenharia civil. Uma das inúmeras aplicações tem sido o monitoramento e reparação de estruturas de engenharia civil, possibilitando recuperação de informações perdidas sobre projetos construtivos ou variáveis com o tempo relacionadas a propriedades físicas. A geofísica se torna promissora pela capacidade analítica não-destrutiva, permitindo inferir características geométricas e estruturais sem a necessidade de contato direto com o corpo de interesse. No que se diz respeito à engenharia de fundações, a profundidade do bloco e o comprimento armado são informações das mais importantes, uma vez que têm um impacto significativo na carga suportada. Após construída, uma estrutura pode precisar suportar maiores cargas que as previstas quando da definição de seu projeto. A ausência ou inconfiabilidade de plantas, cortes e relatórios geram, por vezes, insegurança na reutilização de estruturas a serem submetidas a maiores cargas (Jalinoos and Olson, 1996; Hossain et. al, 2013). Além disso, defeitos ao longo da estrutura também podem ser encontrados (Kog, 2009; Lee et. al, 2018) e comprometem a qualidade da fundação.

Métodos geofísicos para determinação da profundidade da fundação valem-se de furos de sondagem nas proximidades da estrutura a ser estudada (Jo et. al, 2003; Sun et. al, 2009; Gandolfo et. al, 2017). A utilização de furos permite a obtenção de dados com menor interferência da infra-estrutura existente na superfície do terreno (geradores, antenas, etc). Na literatura, diversos métodos não-destrutivos foram aplicados no intuito de determinar profundidade de fundações. O método paralelo sísmico (PS) é um dos principais procedimentos utilizados na caracterização de fundações profundas (Stain, 1982; Olson et. al, 1995; Souza et. al, 2016), analisando-se o contraste da velocidade de propagação sísmica entre a fundação e a rocha encaixante na região basal.

Embora tenda a apresentar ótimos resultados na determinação da profundidade de fundações, o método paralelo sísmico se restringe à determinação do limite concretado e não permite a análise da armação, além de ser ineficaz em fundações apoiadas em rocha dura - devido ao baixo contraste de velocidade de propagação sísmica. Métodos elétricos e eletromagnéticos também podem ser utilizados para determinação de comprimento de armação (Tallini et. al, 2004; Dong et. al, 2007), mas apresentam aquisição de dados custosas e demoradas (Su et. al, 2020). Diante disso, o método magnético tem se mostrado promissor na caracterização de armação em fundações devido ao forte contraste de propriedades magnéticas entre a estrutura armada e o solo - somados a seu baixo custo e rápida aplicação.

O método de perfilagem magnética consiste em descer um magnetômetro fluxgate no furo vizinho ao alvo, medindo-se as componentes do campo em profundidade. Variações mais intensas do campo magnético anômalo tendem a ocorrer próximo à base da fundação devido ao seu contraste de propriedades magnéticas com relação à rocha encaixante. O método magnético aplicado ao estudo de concreto armado foi inicialmente proposto e desenvolvido por Pla et. al (1994), a partir de modelagem da resposta magnética de tais estruturas. A partir daí, a análise por métodos matemáticos (Newston and Eberhard, 1995; Cha et. al, 2000) se deu conjuntamente a inferências qualitativas e aplicações de campo do método de perfilagem para o estudo de fundações (Jo et. al, 2003; Jalinoos et. al, 2006; Dong et. al, 2009; Sun et. al, 2011; Coe et. al, 2019). No Brasil, o método ainda é pouco empregado, mas estudos pioneiros já têm sido desenvolvidos na comparação com outros métodos e caracterização da perfilagem magnética (Gandolfo et. al, 2017). O método se mostrou promissor e os resultados satisfatórios evidenciaram um grande potencial.

Embora procedimentos qualitativos ou semi-quantitativos tenham se mos-

trado eficientes na estimativa da profundidade de fundações armadas, não se há uma regra geral capaz de definir a profundidade para qualquer perfil magnético. Pequenas variações na porcentagem da seção transversal armada ou na disposição das barras na armação podem resultar em padrões anômalos distintos. Dong et al. (2011) mostram um caso onde a variação no número de elementos compondo a armação ao longo da barra resultam em grandes variações do campo associado em torno da região. Fraturas (Hillemeier e Scheel, 1998), stress acumulado (Atherton et al., 1983) ou stress termal proveniente de soldas (Dybala e Nadulicz, 2017) são exemplos de variações estruturais nas barras que podem resultar em anomalias do fluxo magnético. Desse modo, um elemento magnético contínuo pode comportar-se como duas porções adjacentes com polarização oposta, tendo-se tal região facilmente confundida com a base da fundação (Hemsi et al., 2021). Nota-se portanto que as curvas obtidas em campo nem sempre irão se comportar de modo simples, podendo resultar em estimativas divergentes a depender da análise qualitativa adotada e do site de estudo.

A aplicação da perfilagem magnética como método não destrutivo para caracterização da profundidade de fundações pode ser abordada como um problema de detecção de aresta em que um ou alguns prismas sejam usados como uma representação simples da estrutura magnética complexa do concreto armado. Embora tenha similaridades com problemas de definição dos limites laterais de contato em aplicações comuns de geofísica de exploração (Kearey et al., 1984; Telford et al., 1990), a perfilagem magnética aplicada a fundações apresenta alguns agravantes no que diz respeito ao volume de dados disponível - uma vez que comumente trabalha-se com o perfil obtido em um único furo para caracterização de uma estrutura tri-dimensional. Por outro lado, uma forte premissa de que a magnetização é conhecidamente alinhada verticalmente pode

ser considerada, uma condição incomum em outros problemas de detecção de aresta conhecidos. A premissa parte do fato de que a maioria das barras de aço/ferro que compõem a armação são verticais (Sun et al., 2009), cada barra carregando consigo uma magnetização remanente anisotropicamente alinhada. Estruturas com forma de barra tendem a apresentar uma forte anisotropia de forma com fácil magnetização em seu eixo longitudinal (Dunlop e Özdemir, 1997, p.92; Clapham, L. et al., 1999). Esse comportamento permite a representação do concreto armado por modelos mais simples, tais como um simples dipolo magnético vertical (Jo et al., 2003).

O presente estudo visa desenvolver uma abordagem simples e efetiva para estimativa de parâmetros que permita-nos obter a profundidade da armadura da fundação diante das ambiguidades do método magnético e caracterizar informações estruturais de densidade e integridade da armação próximo à base. O método proposto mostra um importante peso no ajuste associado ao intervalo profundo do perfil para lidar com variações estruturais e filtrar a interferência de campos gerados por fontes magnéticas em superfície. O algoritmo desenvolvido é primeiramente aplicado a dados sintéticos gerados por simulações numéricas para ilustrar a abordagem proposta para diferentes condições, e então adotado no estudo de três casos reais em cenários distintos para determinação da profundidade de suas fundações.

2 Aspectos Teóricos

2.1 Fundamentos do magnetismo

Antes de compreendermos a resposta magnética associada às armações de estruturas de fundação, é importante fazermos um breve levantamento dos fundamentos que regem a teoria do magnetismo. Nessa subseção, buscaremos resumir os aspectos mais importantes associados ao magnetismo e necessários para compreender nosso objeto de estudo. Para uma compreensão mais aprofundada, recomendamos a leitura dos livros de Jiles (1991), Dunlop e Özdemir (1997), Nussenzveig (1997) e Tauxe (2005).

2.1.1 Princípios do magnetismo

Embora não consigamos vê-lo, a existência do campo magnético pode ser percebida por seu efeito em objetos físicos, tal como pelo torque exercido sobre a agulha de uma bússola, por exemplo. Entretanto, campos magnéticos diferem em alguns aspectos de outros campos potenciais - como o gravitacional e o elétrico -, uma vez que seu comportamento não é radial a partir de uma “carga magnética”. Enquanto podemos tratar de cargas elétricas unitárias positivas ou negativas, o magnetismo nos mostra a inexistência de monopolos magnéticos, sendo a estrutura mais simples possível a de um dipolo magnético por pares de cargas opostas. Desse modo, as linhas de campo que escapam de um polo divergem para o polo oposto, e o fluxo total sobre uma superfície que engloba o dipolo é nula - como observado pela lei de Gauss magnética, enunciada como uma das equações de Maxwell (Nussenzveig, 1997). É importante mencionar que, ainda que não haja o análogo a uma carga elétrica para o magnetismo, muitas propriedades magnéticas podem ser explicadas a partir da consideração de polos magnéticos fictícios (Dunlop e Özdemir, 1997).

O campo magnético é originado a partir de correntes elétricas ou da variação de campo elétrico. Desse modo, o campo magnético pode ser definido em função das correntes de condução e de deslocamento responsáveis por sua geração, com direção e sentido definidos pela “regra da mão direita” rotacionando perpendicularmente à direção da corrente, e intensidade proporcional à magnitude da corrente. Essas observações regem a lei de Ampère-Maxwell, que relaciona o rotacional de um campo magnético à variação temporal do campo elétrico e à densidade de corrente associada, e também diz respeito a uma das equações de Maxwell para o eletromagnetismo (Nussenzveig, 1997).

Associado ao campo magnético está seu momento magnético. O momento magnético atua como um vetor direcionado com sentido do polo negativo para o polo positivo do dipolo, e sua intensidade pode ser relacionada à separação entre os polos. Ao enrolarmos um fio formando uma espira, por exemplo, a corrente que percorre o fio será responsável pelo surgimento de um campo magnético similar ao de um ímã centrado com momento magnético alinhado com a normal da área vazada interna ao loop formado - de modo que o momento magnético pode ser relacionado à corrente e à geometria do fio indutor (Tauxe, 2005).

Em um material, cada átomo tem seu momento magnético associado devido ao comportamento de suas cargas subatômicas (veja subseção 2.1.3), e o momento magnético de um objeto é dado pela somatória dos momentos magnéticos atômicos (Dunlop e Özdemir, 1997). Considerando-se o objeto em escala macroscópica, é interessante compreender o conceito de magnetização, que diz respeito ao momento magnético do material por unidade de volume. Desse modo, um objeto com magnetização não nula tem associado a si a geração de um campo magnético. Uma vez que o momento magnético subatômico responde a um campo externo atuante sobre o corpo, a magnetização induzida pelo campo externo pode ser associada ao campo por um parâmetro conhecido

por susceptibilidade magnética, que mensura a capacidade que o material tem de magnetizar-se diante da estimulação de um campo magnético externo. A susceptibilidade magnética é uma propriedade intrínseca do material, mas pode variar segundo fator externo de temperatura (Tauxe, 2005).

2.1.2 Campo geomagnético

Compreender o campo geomagnético é essencial no estudo de campos relacionados a corpos magnetizáveis, uma vez que a componente referente à magnetização induzida terá relação direta com o campo indutor - que comumente tem como seu principal componente o campo geomagnético atuante na localização da tomada dos dados (Kearey et al., 1984). Embora campos relacionados ao fluxo de correntes elétricas na ionosfera e a materiais magnetizados na crosta também componham o campo ambiente num determinado momento de um estudo de geofísica aplicada, a componente principal do campo ambiente ainda diz respeito ao gerado pelo núcleo externo da Terra, estando associado às correntes de convecção do mesmo - que é composto majoritariamente por ferro e níquel, além de algum outro elemento mais leve (Tauxe, 2005). A dinâmica do fluido que compõe o núcleo externo atua como um dínamo auto-sustentável, criando um enorme campo magnético que engloba o planeta. O resultado é um campo predominantemente dipolar, representado por um dipolo centrado na Terra, com eixo não axial e variável no tempo geológico (Tauxe, 2005). Embora a componente predominante seja a dipolar, é importante para o estudo geofísico considerar-se também as componentes não dipolares e compreender o vetor resultante sobre uma determinada localização numa determinada data.

Utilizar um modelo matemático que permita estimar o valor do campo num determinado instante e local é de grande importância e interesse para a aplicação de métodos magnetométricos. Diante da complexidade do campo geomagnético,

o cálculo a partir do potencial admite uma solução por harmônicos esféricos em função de polinômios de Legendre (Merrill et al., 1996) - que descrevem a multipolaridade magnética. Coeficientes de Gauss permitem analisar a influência interna e externa em relação ao tempo, e são estimados a partir do ajuste a conjunto de dados de campo magnético obtidos por observatórios e satélites num mesmo período. Sendo o modelo uma função do raio, da longitude e da co-latidade, pode-se obter uma estimativa do campo magnético em um determinado momento sobre um determinado ponto espacial desejado, fixado pela altitude, latitude e longitude. Essa complexa modelagem é utilizada como Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF). O modelo IGRF tem seus coeficientes revisados e atualizados de 5 em 5 anos pela Associação Internacional de Geomagnetismo e Aeronomia (IAGA), sendo disponibilizado online (www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml) para acesso público de modo a permitir o cálculo das componentes vetoriais para uma determinada data e localização definida pelo usuário.

2.1.3 Magnetismo dos materiais

Segundo as equações de Maxwell, sabemos que campos magnéticos são gerados a partir de correntes elétricas de condução e de deslocamento. Entretanto, por vezes vemos materiais apresentarem campo magnético associado, ainda que não haja correntes elétricas percorrendo estes em escala macroscópica. Isso ocorre porque, em escala atômica, correntes elétricas intrínsecas são geradas a partir da movimentação dos elétrons (Tauxe, 2005). Entender a origem desse fenômeno, ainda que de forma não aprofundada - sem imergir muito nas explicações quânticas associadas a este -, é importante no estudo de anomalias magnéticas originadas por corpos de interesse, uma vez que tais comportamentos atômicos são a base para a compreensão da magnetização induzida e

remanente que o material pode apresentar.

Embora uma representação da movimentação orbital do elétron em torno do núcleo seja comumente utilizada para assimilar a uma pequena corrente elétrica, essa representação não é condizente com a realidade, uma vez que considerando-se a mecânica clássica tal sistema teria perda de energia e eventual colisão com o núcleo (Tauxe, 2005). O movimento orbital dos elétrons só pode ser explicado a partir da mecânica quântica, pela probabilidade de se estar num determinado ponto do espaço definido por uma série de equações de onda propostas por Schrödinger. A função de probabilidade $\Psi(r, \theta, \phi)$ é dependente dos números quânticos l , m e n , que são únicos para cada elétron pertencente ao átomo e definem um estado de energia único e bem estabelecido para cada elétron junto a seu momento de spin s . O número quântico n representa a camada de energia, o número quântico l representa o momento angular orbital total do elétron, o número quântico m representa a componente do momento angular orbital na direção de um campo magnético aplicado, e o número quântico s diz respeito ao momento angular de spin também na direção de um campo magnético externo (Dunlop e Özdemir, 1997). Diante das combinações energéticas dispostas pelas possíveis combinações de números quânticos, a estrutura eletrônica tem seu preenchimento governado por três principais regras (Tauxe, 2005):

1. Pelo princípio de Pauli, a combinação de números quânticos dos elétrons em um mesmo átomo não pode se repetir, havendo sempre uma distinção de pelo menos um valor dentre os quatro números quânticos. Desse modo, cada órbita (definida pela combinação dos números quânticos n , l e m) pode contar com até dois elétrons pareados (devido aos spins s opostos, de valores $\pm\frac{1}{2}$).
2. O preenchimento das órbitas se dá em ordem de energia crescente. A ordem de preenchimento pode variar em ocasiões específicas de interação

atômica, mas é comumente adotada segundo o diagrama de Pauling.

- Segundo a regra de Hund, o preenchimento eletrônico deve se dar de modo que os spins apresentem o maior paralelismo possível. A Figura 2.1, adaptada do livro de Tauxe (2005), ilustra essa estruturação para alguns elementos. Pela regra de Hund, o preenchimento das camadas de energia começa com a inserção de elétrons todos com spins para cima, e somente após o preenchimento de todas se dá a inserção dos elétrons com spin para baixo.

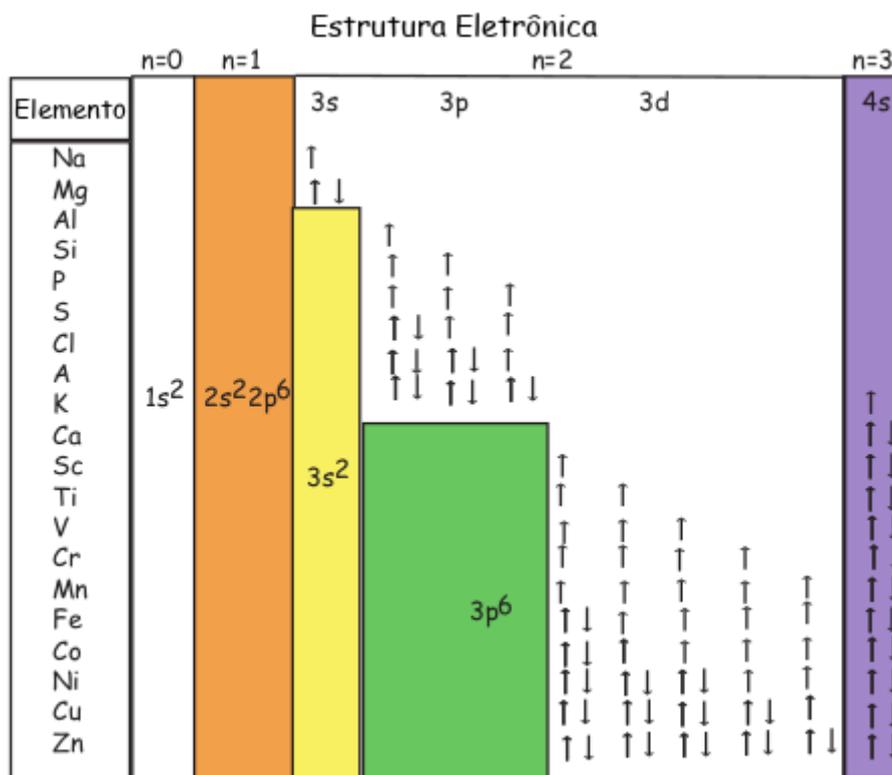


Figura 2.1: Estrutura eletrônica de preenchimento das camadas de energia para alguns elementos da tabela periódica, do Sódio (Na) ao Zinco (Zn). Adaptado de Tauxe (2005).

O comportamento diamagnético diz respeito à reação dos movimentos orbitais dos elétrons diante da aplicação de um campo magnético, e é portanto um comportamento existente em todos os materiais (Callister e Rethwisch, 2010)

- embora seja mascarado em materiais com comportamento paramagnético ou ferromagnético, uma vez que a intensidade destes é muito maior. O diamagnetismo se dá por precessão dos elétrons em torno da direção de um campo externo aplicado, produzindo uma componente de rotação que induz um pequeno campo em sentido oposto ao campo indutor. Desse modo, observa-se que materiais diamagnéticos apresentam uma susceptibilidade magnética fraca e negativa (Dunlop e Özdemir, 1997).

O paramagnetismo se dá por momento magnético resultante proveniente de spins não emparelhados. Diante de um campo magnético externo, exerce-se um torque nos momentos magnéticos de spin, de modo a alinhá-los com o campo que exerce tal força. Entretanto, há uma tendência de aleatoriedade da orientação devido à energia térmica, de modo que o alinhamento se dá por uma competição entre a energia térmica e a energia magnética. Ao retirar-se o campo externo, o regime volta a ser conduzido somente pela energia térmica, retomando uma orientação ao acaso e um momento magnético resultante nulo. A susceptibilidade magnética é portanto positiva e comumente baixa (devido a poucos spins não emparelhados e à competição com a energia térmica), além de inversamente proporcional à temperatura (Dunlop e Özdemir, 1997).

Por fim, materiais ferromagnéticos diferem dos paramagnéticos e dos diamagnéticos pela posição próxima ocupada por alguns átomos na rede cristalina, o que permite uma interação de troca entre os elétrons vizinhos capaz de alinhar espontaneamente os momentos magnéticos atômicos a partir de um forte campo molecular (Callister e Rethwisch, 2010). Alguns materiais apresentam comportamento antiferromagnético, com alinhamento de átomos vizinhos em direções exatamente opostas e conseqüente cancelamento global dos momentos magnéticos, não apresentando nenhum momento magnético total. A maioria dos materiais encontrados na natureza, por sua vez, apresentam comportamento

ferrimagnético: a estrutura cristalina da molécula apresenta cancelamento incompleto dos momentos de *spin*, com alguns átomos adjacentes alinhados de forma oposta e outros de forma paralela em direção e sentido. A magnetita mineral (Fe_3O_4), por exemplo, apresenta íons Fe^{+2} e Fe^{+3} , onde os íons Fe^{+3} se arranjam de forma anti-paralela no arranjo cristalino enquanto os íons Fe^{+2} são responsáveis pelo momento magnético líquido do material. Essa propriedade permite que, a partir da adição de outros íons metálicos substituindo íons de ferro na estrutura cristalina, materiais de outras composições sejam produzidos de forma a se cobrir uma variedade de propriedades magnéticas (Callister e Rethwisch, 2010).

O pareamento global de átomos adjacentes é o que caracteriza o comportamento ferrimagnético. Os momentos magnéticos de spin de átomos vizinhos alinham-se mutualmente paralelamente dentro de regiões conhecidas como domínios (Jiles, 1991; Callister e Rethwisch, 2010). Entende-se por domínio uma região, comumente com dimensões microscópicas (da ordem de $1\mu\text{m}$), com polarização magnética alinhada numa única direção (Sheriff, 2002). Domínios adjacentes são separados por paredes de domínios, as quais apresentam uma mudança gradual da direção de polarização de um domínio para o outro. O aumento do campo externo incita um alinhamento de domínios desalinhados e uma expansão das paredes de domínio, de modo que o material retém uma magnetização residual (remanente) mesmo após remoção do campo magnético externo (ver subseção 2.1.4). Entretanto, assim como no paramagnetismo, o aumento da temperatura atua contrário ao alinhamento dos momentos magnéticos, nesse caso também devido à expansão dos cristais e enfraquecimento das energias de troca (Dunlop e Özdemir, 1997). A magnetização remanente pode ser extraída somente com a aplicação de um campo magnético oposto ou pela disposição do material sob uma temperatura acima da nomeada temperatura de Curie, a qual

é caracterizada pela energia térmica se tornar dominante e o material passar a apresentar comportamento paramagnético (Sheriff, 2002).

2.1.4 Histerese

Histerese é um fenômeno que ocorre em materiais para os quais a resposta magnética associada a um campo externo indutor varia não linearmente com o aumento da intensidade e, após retirado o campo indutor, retêm-se uma magnetização remanente (Sheriff, 2002). O fenômeno de histerese ocorre, portanto, em materiais ferromagnéticos/ferrimagnéticos, em que o campo indutor e induzido não são linearmente proporcionais. Conforme a intensidade do campo indutor é aumentada, os domínios tendem a se alinhar com sua direção e as paredes de domínio expandem-se para domínios mais próximos ao alinhamento ao campo externo (como representado na Figura 2.2A). Esse processo é relacionado ao aumento da intensidade do campo externo até que a unidade macroscópica tenha um único domínio em todo seu volume, tendo assim atingido a magnetização de saturação M_S (Callister e Rethwisch, 2010).

A curva de histerese é utilizada para representação da saturação, remanência e coercividade de um material diante da aplicação de campos magnéticos em sentidos opostos (Figura 2.2B). O material com domínios aleatoriamente alinhados é exposto a um campo externo crescente (linha azul pontilhada na Figura 2.2B) até que se atinga o ponto S de saturação. O fenômeno de histerese ocorre quando, após removido o campo externo indutor, o material mantém uma magnetização remanente M_r . Para que a amostra volte a ter uma magnetização nula, é necessário aplicar-se um campo $-H_c$ em sentido oposto ao aplicado para a saturação, a intensidade H_c sendo definida como coercividade. Continuando-se a aumentar a intensidade do campo em sentido oposto, as paredes de domínio também sofrerão expansão com alinhamentos próximos ao do

campo oposto, de modo que também pode-se atingir uma saturação S' para alinhamento com o campo no sentido oposto. A remoção do campo quando nessa saturação resultará numa magnetização remanente em sentido oposto à obtida inicialmente. Uma segunda reversão do campo e aumento da intensidade até o primeiro ponto de saturação S fecha o ciclo da curva de histerese (Callister e Rethwisch, 2010).

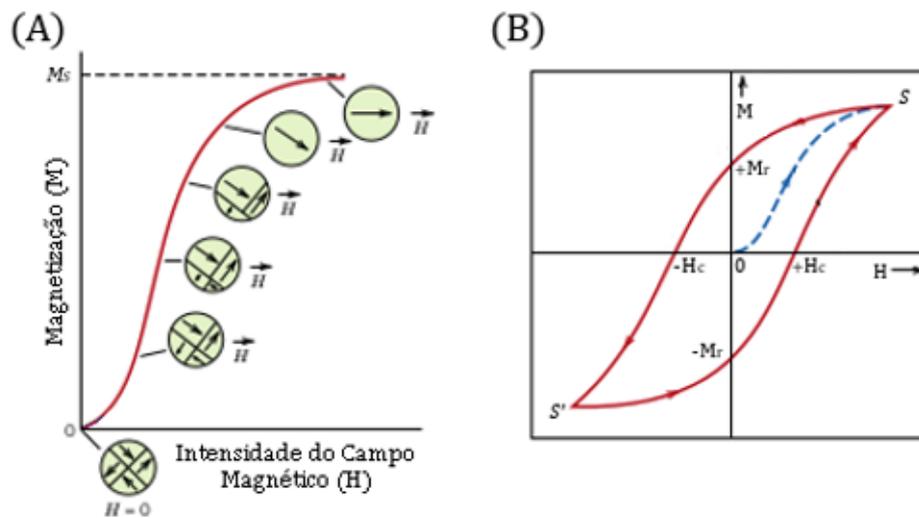


Figura 2.2: (A) Variação da magnetização de um corpo ferrimagnético em função da intensidade do campo externo H , com a devida mudança da configuração dos domínios até atingir-se a saturação (M_s). (B) Ciclo de histerese (curva contínua em vermelho), com aplicação até saturações avante e reversa (S e S'). A magnetização remanente após retirada do campo externo (M_r) e a coercividade (H_c) também estão representadas. A curva tracejada azul indica a obtenção inicial de magnetização. Adaptado de Callister e Rethwisch (2010).

2.1.5 Anisotropia magnética

Entende-se por anisotropia a existência de uma tendência direcional de alguma característica ou propriedade física de um material (Sheriff, 2002). No que se refere ao magnetismo de materiais, a existência de anisotropias magnéticas pode induzir o alinhamento dos momentos magnéticos em uma determinada direção preferencial. Tais anisotropias são comuns, e se devem aos principais

fatores determinantes da magnetização de um material: intensidade dos momentos magnéticos atômicos, distância entre os íons vizinhos, e disposição da rede cristalina. Apresentaremos uma breve explicação dos três principais tipos de anisotropia magnética: magnetocristalina, magnetoestrictiva e magnetoestática (ou de forma).

Como mencionado na subseção anterior, a magnetização de um material está diretamente relacionada às interações entre átomos vizinhos, de modo a influenciar inclusive no alinhamento paralelo dos momentos magnéticos e surgimento de domínios em materiais ferromagnéticos. Desse modo, a disposição dos elétrons na rede cristalina e sua devida simetria são fatores que afetam tais processos de troca, originando eixos preferenciais de magnetização. Dá-se a esta preferência originada o nome de anisotropia magnetocristalina, cuja energia é mínima quando os momentos magnéticos estão alinhados a tais eixos preferenciais de fácil magnetização (Lowrie, 2007). Por se tratar de uma tendência originada pelo espaçamento e disposição atômicos, a anisotropia magnetocristalina é fortemente relacionada à temperatura (Tauxe, 2005).

Outro tipo de anisotropia se dá pela magnetoestrictão, e pode ser relacionada à anisotropia magnetocristalina pois também diz respeito à disposição da rede cristalina. Entretanto, a anisotropia magnetoestrictiva surge da mudança espontânea das dimensões do cristal, seja por atuação de um campo externo ou de um stress físico. Quando da aplicação de um campo externo, há a indução da mudança de direção dos momentos magnéticos e ajuste das distâncias entre as ligações para equilíbrio energético, o que produz tensões que podem modificar a forma do material. Da aplicação de um esforço (tensão externa), tem-se a possibilidade de haver deformação elástica do material e, portanto, alteração da separação dos momentos atômicos (Lowrie, 2007).

Por fim, tem-se a anisotropia de forma (também conhecida por magneto-

estática). Como sugerido pelo próprio nome, a tendência direcional da magnetização está diretamente relacionada à forma dos cristais magnéticos. Assim como num dielétrico interno a um capacitor, a magnetização do material induz uma polarização das faces do material, sendo gerado um campo desmagnetizante de modo a opor a magnetização (Dunlop e Özdemir, 1997). Segundo a forma do material, os pólos de superfície gerados nas faces do cristal podem ter diferentes separações, sendo o campo desmagnetizante mais intenso na direção das faces mais próximas e menos intenso na direção das faces mais distantes. Desse modo, a magnetização apresenta maior oposição nas direções de maior proximidade das faces do cristal e, conseqüentemente, um eixo de fácil magnetização alinhado na direção de maior distanciamento das faces. A anisotropia de forma é, portanto, diretamente relacionada ao formato do cristal (Lowrie, 2007).

2.2 Magnetização de barras de ferro e aço

Compreender o comportamento magnético de armação de fundações requer, essencialmente, a compreensão de parâmetros e características magnéticas associados a barras de ferro e aço. Os altos valores de susceptibilidade magnética associada ao ferro e aço, da ordem de 10^3 (Faria e Lima, 2005), representa não somente a alta intensidade de anomalias magnéticas associadas a corpos compostos de tais materiais, mas também a variação que tal anomalia pode apresentar diante de alterações externas físicas e estruturais. A título de comparação, a susceptibilidade magnética associada a materiais diamagnéticos e paramagnéticos é da ordem de 10^{-6} a 10^{-4} (Callister e Rethwisch, 2010), e a de minerais magnéticos comumente mapeados por magnetometria (tais como magnetita) é da ordem de 10^2 (Faria e Lima, 2005).

2.2.1 Intensidade de magnetização

Ligas de ferro e aço apresentam tipicamente um valor de momento magnético da ordem de 0,1 a 1 Am^2 por quilograma (Breiner, 1999). Considerando que a densidade do ferro e do aço assumem ambos valores em torno de $7,8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, podemos utilizar a razão do momento magnético pelo volume para obter a estimativa da intensidade de magnetização associada a tais materiais. Desse modo, tem-se que ligas de ferro e aço apresentam valores de magnetização da ordem de 780 a 7800 A/m. Esse intervalo de valores, entretanto, tem que ser utilizado somente como base para compreender a alta intensidade anômala proveniente de magnetização remanente e induzida de tais materiais. A variação de valores apresentados em diferentes estudos evidencia a cobertura escassa das propriedades magnéticas de ferro e aço na literatura, podendo apresentar intensidade magnética ainda maiores. Bevan (2002) mostra momentos magnéticos associados a inúmeros materiais compostos por ferro e/ou aço, e embora a maioria se situe no intervalo de 0,1 a 1 Am^2/kg dado por Breiner (1999), há também casos (como arame farpado e encanamentos em subsuperfície) que superam tais valores, chegando até mesmo à ordem de 10 Am^2/kg - o que representaria uma magnetização dez vezes maior que a máxima do intervalo de Breiner.

2.2.2 Direção de magnetização

A magnetização é uma propriedade vetorial, tendo a si associada uma direção e sentido. O comportamento vetorial da magnetização associada a um corpo pode tender à direção do campo geomagnético indutor para a componente induzida, mas pode ter direção diferente deste devido à componente remanente. A razão de Koenigsberger (razão da componente de magnetização remanente pela induzida) é tipicamente alta para aço e ferro (Bevan, 2002) - e, portanto, a magnetização tem direção predominantemente associada à direção de indução

no momento de resfriamento da estrutura abaixo de sua temperatura de Curie.

O estudo de armações de fundações trata de estruturas compostas e representadas essencialmente (ver seções 3.1 e 3.2) por barras de aço/ferro alongadas em forma de haste (“*rod-like*”). Desse modo, o desconhecimento com relação à direção de magnetização pode ser contornado, uma vez que a magnetização associada a cada barra terá seu comportamento controlado por uma anisotropia magnética de forma (ver seção 2.1). Segundo Dunlop e Özdemir (1997), a anisotropia de forma associada a um grão esferoidal prolato resulta num eixo de fácil magnetização paralelo ao eixo principal (alongado). Da mesma forma, uma barra infinitamente alongada em relação ao diâmetro da seção transversal apresentará polarização magnética por acúmulo de uma densidade de cargas σ_m nas superfícies axiais, mas não nas longitudinais (Figura 2.3). Desse modo, a magnetização transversal associada à estrutura terá uma componente desmagnetizante interna anti-paralela, enquanto o campo desmagnetizante será aproximadamente nulo para a componente longitudinal - e, portanto, a direção da magnetização será predominantemente alinhado à direção do eixo longitudinal das barras.

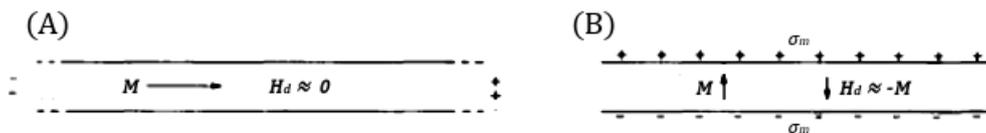


Figura 2.3: Superfícies polarizadas (+ e -) por acúmulo de densidade de cargas σ_m , magnetização M e campo interno de desmagnetização H_d para uma estrutura (barra) em forma de haste: (A) magnetização M ao longo do eixo longitudinal da barra, com superfícies polarizadas muito distantes entre si e conseqüente campo desmagnetizante H_d nulo; (B) magnetização M ao longo do eixo transversal da barra, com densidade de cargas σ_m em superfícies próximas gerando um campo desmagnetizante H_d anti-paralelo e de intensidade similar a M . Adaptado de Dunlop e Özdemir (1997)

2.2.3 Anomalias por inomogeneidades estruturais

Embora o comportamento esperado para o campo magnético gerado por magnetização de hastes alongadas seja equivalente ao de densidades de magnetização nas extremidades longitudinais da barra (Figura 2.3), a existência de inomogeneidades ao longo da estrutura podem resultar em anomalias pontuais relacionadas a mudanças cristalográficas ou influência sobre o comportamento do fluxo magnético. Atherton et al. (1983) realizaram um experimento com dois canos de aço, fixando uma das extremidades de cada cano e afastando-os por um macaco conectado à outra extremidade de ambos. Induziu-se uma força no centro da estrutura onde um selo envolvendo ambos os canos tensiona de modo contrário ao afastamento, buscando-se compreender a influência do stress na resposta magnética. O estudo foi conduzido tanto com a aplicação de stress crescente de forma contínua quanto com a aplicação de stresses crescentes mas com intervalos de relaxamento entre a obtenção de cada perfil magnético. Os resultados mostram que o esforço aplicado na região central do cano de aço pode ser magneticamente representado pela superimposição de uma barra magnetizada de polarização oposta (Figura 2.4). Esse fenômeno pode ter relação com a deformação magnetostrictiva do material diante do esforço aplicado, mas não é estritamente associado a esta - uma vez que a aplicação de stress resulta também em mudanças irreversíveis da magnetização do corpo e influencia em sua histerese (Atherton et al., 1983; Atherton e Jiles, 1986). Desse modo, anomalias pontuais do comportamento magnético da estrutura podem estar associadas não somente a esforços atuantes no momento da medida, mas também à história mecânica da estrutura.

Ainda se tratando de anomalias relativas ao campo relacionado a barras compostas por ligas de aço, Hillemeier e Scheel (1998) analisam o comportamento magnético associado a fraturas em armações concretadas. Assim como no

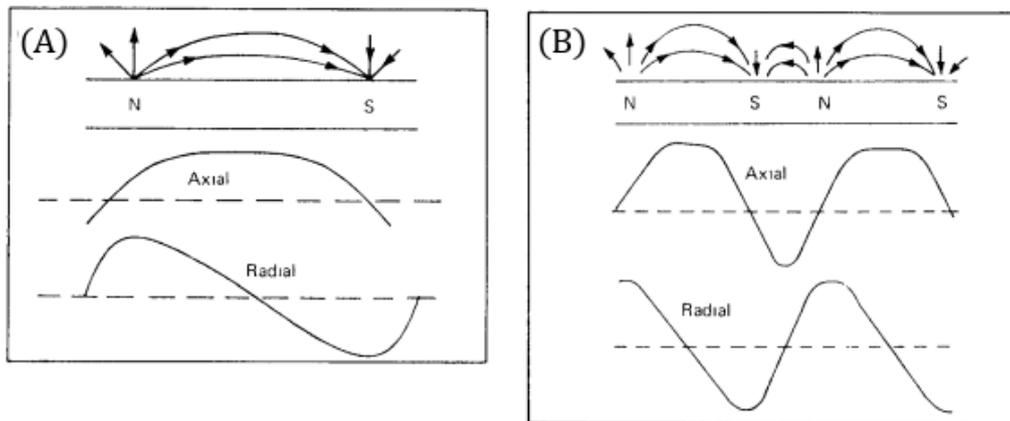


Figura 2.4: Curva das componentes axial e radial esperadas associadas a: (A) barra magnética homogênea com equivalentes polos norte N e sul S; (B) barra magnética sob stress na região central, com geração de polos norte N e sul S na região de deformação e consequente modificação das curvas das componentes axial e radial do campo. Adaptado de Atherton e Jiles (1986)

trabalho de Atherton et al. (1983), os autores indicam que as inomogeneidades apresentadas podem também ter seu campo magnético associado representado por barras dipolares de polarização oposta à principal (Figura 2.5). Nesse caso, entretanto, esse comportamento é característico de um escape (*leakage*) do fluxo de campo. Os autores realizam ainda um conjunto de medidas do pico anômalo em relação ao tamanho da fratura e mostram que, mesmo quando o tamanho da fratura tende para um valor nulo, o pico anômalo não o faz - de modo que a distorção da estrutura é suficiente para causar o escape do fluxo, e pode-se relacionar ao comportamento apresentado para aplicação de esforços.

Dybala e Nadulicz (2017) mostram a aplicação prática da observação magnética anômala no diagnóstico da qualidade de estruturas de aço, localizando locais de solda - bem como a qualidade dessa solda - a partir do escape de fluxo associado à descontinuidade mecânica/estrutural do corpo. Esses trabalhos mostram que a resposta magnética de barras de aço/ferro está relacionada a processos construtivos e envolvem a influência de esforços, sejam eles mecânicos ou térmicos. Conseqüentemente, inomogeneidades - sejam essas estruturais, mecânicas ou

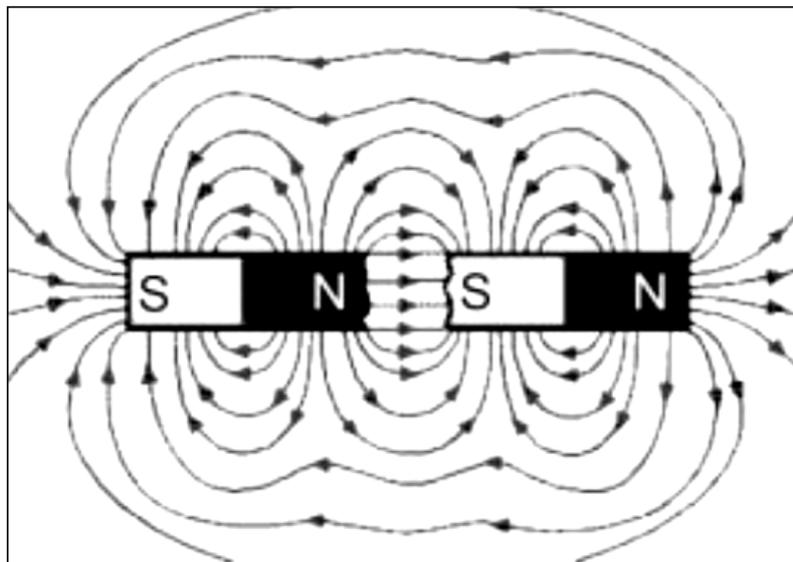


Figura 2.5: Modelo esquemático de um ímã quebrado representando deformações internas a uma barra de aço. Ainda que a fratura não seja visível na barra em escala macroscópica, o processo esquemático demonstra o escape do fluxo magnético interno na região da fratura ou esforço na barra, caracterizando um fluxo externo similar ao de uma barra magnética de polarização oposta. Adaptado de Hillemeier e Scheel (1998)

cristalográficas - dispostas ao longo de estruturas de aço são fortemente influentes na resposta magnética associada ao corpo.

2.3 Perfilagem Geofísica de poços

Originalmente, o método geofísico de perfilagem foi desenvolvido por motivação da exploração de hidrocarbonetos. A aplicação buscava a determinação da natureza dos fluidos de formações sedimentares saturadas a partir de medidas de resistividade elétrica (Schlumberger et al., 1932). Desde então, a ideia de se explorar formações geológicas a partir da variação de propriedades físicas em profundidade se mostrou muito promissora, incentivando estudos a partir do sensoriamento de diversas outras propriedades. Atualmente, os estudos de perfilagem geofísica permitem, sejam individualmente ou em estudos integrados, a determinação de características essenciais na exploração da formação, tais como: densidade, porosidade, permeabilidade, presença e orientação de fraturas, carac-

terísticas estruturais, presença de elementos radioativos, etc. (Tittman, 1987). Os levantamentos de perfilagem permitem a exploração de tamanho leque de propriedades devido à utilização de diversos sensores: elétrico, acústico, eletromagnético, ótico, magnético, emissão gama, densidade, potencial espontâneo, etc. Os sensores são içados em furos de sondagem de modo a obter-se um perfil das propriedades em função da profundidade.

2.3.1 Aspectos gerais - Perfuração

Compreender as etapas que envolvem o ambiente de estudo de perfilagem, desde a perfuração do furo a ser estudado, é essencial para uma melhor interpretação dos dados coletados. O material utilizado no revestimento, por exemplo, pode resultar em ruídos dependendo da propriedade física a ser investigada (Gandolfo et al., 2017). Além disso, o diâmetro do furo pode não ser suficiente para utilização de determinadas sondas, ou a profundidade não ser competente para determinada exploração. Os aspectos gerais da etapa de perfuração permitem compreender a possibilidade - ou não - da utilização de determinado furo para o objetivo de estudo.

Furos de sondagem são perfurações realizadas comumente com o intuito de caracterizar a litologia do ambiente de estudo a partir de ferramentas de pequeno diâmetro (Conciani et al., 2013). Por vezes, confunde-se com a utilização do termo poço, que também são utilizados na sondagem. Entretanto, por definição, poço permite a observação visual do perfil - e portanto apresenta grandes diâmetros para permitir o acesso de um observador (ABNT, 2016). Ainda assim, alguns aspectos a serem considerados na perfuração de poços são também importantes na perfuração de furos de sondagem.

A norma NBR 12212/1992 da ABNT, que regulamenta projetos de perfuração de poços para captação de água, especifica a importância da deter-

minação de diâmetro. O diâmetro do poço é importante no controle de bombas a serem utilizadas. Em furos geotécnicos, embora o diâmetro seja naturalmente menor, o controle do diâmetro na execução do projeto também é de grande importância - visando garantir a capacidade de utilizar as sondas necessárias, cobrindo suas dimensões. A norma NBR 8036/1983 diz respeito à perfuração de furos de sondagem, e especifica a importância da determinação da profundidade. É necessário garantir que o furo se estenda até profundidades mínimas de interesse para estudos de perfilagem. Na perfilagem magnética, por exemplo, é necessário pelo menos alguns metros além da estrutura de interesse (Gandolfo et al., 2017) para que a análise do campo magnético gerado pelo corpo permita inferir suas extremidades.

A etapa de perfuração consiste na utilização de sondas de diferentes características - rotativa, roto-pneumática, percussiva - para trituração, desgaste e fragmentação das rochas (Costa Filho et al., 1998; ABNT, 2001). A perfuração deve ter seu ritmo controlado devido a mudanças do material ao longo do perfil geológico, evitando balanços da broca e prejuízos à verticalidade do furo. Após realizada a perfuração dos primeiros metros, é adicionado um revestimento de diâmetro interno previamente definido, o qual irá condizer com o diâmetro final do furo. Para perfuração de furos exploratórios, é importante a escolha do revestimento a ser utilizado, uma vez que o material pode influenciar as medidas a serem tomadas. Para perfilagem magnética, por exemplo, revestimentos com ligas de ferro ou aço não podem ser empregados na construção do furo (IPT, 2019b).

A perfuração da rocha sã pode ter auxílio na estabilização junto à inserção de lama de perfuração (ABNT, 2001). A lama de perfuração trata-se de um fluido com densidade, pH e viscosidade controlados para sustentação das paredes do furo durante a perfuração e transporte ascendente dos resíduos brocados.

Os resíduos ascendem pelo espaço externo ao revestimento, e são comumente tratados por “amostras de calha”. A amostragem de calha é realizada de 2 em 2 metros ou a cada mudança de litologia (ABNT, 1992) e tem grande importância no mapeamento do perfil litológico por exploração direta. Amostras podem também por vezes serem coletadas pela própria broca, mas sua aplicação é mais incomum devido à necessidade de ascender o equipamento de perfuração a cada amostragem. A utilização de amostragem de calha é muito importante para uma primeira compreensão da formação e do ambiente a ser estudado, mas a amostra pode sofrer alterações no processo de perfuração e ascensão à superfície (Tittman, 1987). Desse modo, a perfilagem continua desempenhando papel importante na caracterização litológica, sendo a amostragem de calha um método complementar ao estudo.

Por fim, o furo é vedado por preenchimento com calda de cimento. A cimentação ocorre no espaço anelar entre a parede litológica e o revestimento, e se dá a partir do fundo do furo até a superfície. Garante assim o bom acoplamento com o solo e verticalidade do furo e o tamponamento de sua extremidade inferior (IPT, 2019b). Furos geotécnicos são úteis na obtenção de propriedades físicas do seu entorno, permitindo caracterização geológica (Schepers et al., 2001; Guo et al., 2021) ou mapeamento de estruturas antrópicas (Hossain et al., 2013; Souza et al., 2016).

2.3.2 Aspectos gerais - Perfilagem

O método de perfilagem consiste na determinação de um ou mais parâmetros físicos do material no entorno de um furo (Sheriff, 2002), percorrendo-se longitudinalmente o furo com uma sonda para obtenção dos parâmetros e caracterização de formações. Por sonda, define-se o aparato a ser içado no furo para sensoriar e registrar determinada propriedade física (Sheriff, 2002). Uma

sonda pode conter um ou mais sensores físicos, a ser deslocado ao longo de uma região de interesse. As perfilagens são realizadas em furos - sejam de captação de água, sejam exploratórios - para caracterização da variação de propriedades físicas em profundidades, diretamente associadas a mudanças litológicas ou a corpos anômalos (Kearey et al., 1984; Tittman, 1987).

De grande importância na petrofísica (Lipeng et al., 2001; Coconi-Morales et. al, 2010) e na hidrogeologia (Keys, 1990; Stumm et. al, 2001; Kowalski, 2017), a perfilagem geofísica é comumente realizada no intuito de caracterizar camadas com potencial reservatório com relação à porosidade, permeabilidade, etc., além de avaliar o fluido associado à rocha saturada. Entretanto, o desenvolvimento do método permitiu a aplicação a outras áreas de estudo com base em diferentes propriedades físicas. No âmbito geotécnico, a perfilagem geofísica tem conquistado importante espaço na caracterização de estruturas em subsuperfície por sua essência não-destrutiva (Olson et. al, 1995; Denis et al., 2002; Rausche, 2004). A perfuração de um ou mais furos vizinhos a regiões de obras geotécnicas (Coe et al., 2019; IPT, 2019b) permite o acesso indireto às estruturas, acatando por exemplo o mapeamento e controle de sistemas de tubulação (Butchibabu et al., 2021) ou o acompanhamento de segurança por estudo de variação do perfil ao longo de meses ou anos.

O método de perfilagem apresenta aplicação em diferentes configurações, a serem definidas segundo o estudo de interesse. Segundo Paillet e Ellefsen (2005), podem-se dividir em quatro categorias: (1) convencional, em que todo o equipamento da perfilagem dispõe-se em um único furo, como por exemplo numa perfilagem raio gamma com simples suspensão de um sensor (Wahl, 1983; Paillet e Reese, 2000); (2) direto, em que a realização se dá também em um único furo, mas com levantamento realizado concomitantemente à perfuração (Robertson e Campanella, 1983); (3) superfície-furo, em que parte do equipamento se dispõe

no furo e outra parte fora, tal como numa perfilagem sísmica com fonte em superfície (Souza et al., 2016); (4) furo-furo, com utilização de dois furos no levantamento, dado como exemplo um mapeamento por radar eletromagnético, dispondo-se em um furo a antena transmissora e no outro a antena receptora (Wright et al., 1984).

A Figura 2.6, adaptada de Tittman (1987), apresenta uma representação do arranjo básico de perfilagem convencional. O arranjo utilizado com instrumentação básica de perfilagem consiste na conexão da sonda, dispondo de um ou mais sensores, a uma das extremidades de um cabo multinúcleo blindado. Na outra extremidade do cabo, conecta-se um registrador em superfície para registro gráfico e para conversão analógica-digital e registro para posterior processamento. O cabo é suspenso em uma polia que sustenta a sonda instalada sobre o furo, num tripé ou outra possível estrutura, e a descida da sonda içada é controlada a partir de uma roldana próxima à extremidade do cabo em superfície. Acoplado a esta roldana se situa um transdutor de giros, o qual controla e determina a profundidade da sonda. Os sensores internos da sonda comumente precisam de alimentação elétrica, a qual é fornecida através dos cabos multinúcleo por baterias ou ligação direta à rede elétrica. Os equipamentos dispostos em superfície - tais como registrador, polia, roldana - geralmente são instalados num caminhão de aquisição especial, facilitando a locomoção e disposição próxima à boca do furo em campo.

2.3.3 Perfilagem magnética

O método de perfilagem magnética (Levanto, 1959) consiste no levantamento dos valores de campo magnético em furo a partir de sensor acoplado à sonda, tendo por padrão a aplicação por método convencional segundo classificação de Paillet e Ellefsen (2005). Os dados são comumente processados por correção

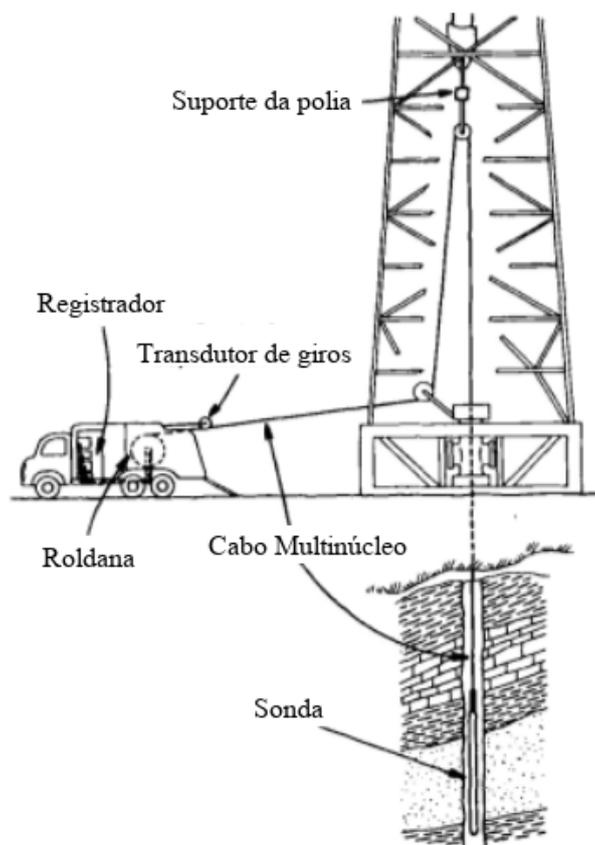


Figura 2.6: Arranjo padrão de perfilagem. Adaptado de Desbrandes (1982) apud Tittman (1987)

geomagnética, onde o efeito de um campo regional de referência é removido dos dados do levantamento e o campo residual restante após a correção associa-se a corpos magnéticos anômalos (Kearey et al., 1984; Coe et al., 2019). O campo regional é, muitas vezes, estimado a partir do Campo Geomagnético de Referência Internacional (IGRF). Entretanto, essa abordagem não é sempre válida pela existência de corpos anômalos extensos em determinadas regiões ou estruturas antrópicas de pouco interesse, e outros valores de campo regionais são considerados na correção. Numa perfilagem magnética em ambiente antrópico, pode-se considerar o campo regional como uma “baseline” profunda para qual a curva de dados tende a um valor constante. Surge daí a necessidade da extensão do furo a profundidades que excedam em alguns metros o limite basal

da fundação, de modo que se haja a observação dessa tendência para um valor regional (Gandolfo et al., 2017) que apresente pouca influência de corpos em superfície. Contudo, isso nem sempre é possível, dado que há casos que a profundidade do furo é limitada por formações geológicas muito resistentes à perfuração.

O método de perfilagem magnética é, na maioria das vezes, realizado a partir de sondas contendo um magnetômetro fluxgate triaxial (e.g., Jo. et al., 2003). O magnetômetro fluxgate (Primdahl, 1979; Mussett e Khan, 2000) funciona a partir do princípio da lei de Ampère, onde a distribuição da densidade de corrente está diretamente ligada à variação do campo magnético. Para cada direção de medida, o sensor fluxgate possui duas bobinas com núcleos de alta permeabilidade magnética e enrolamento opostos dispostos mutuamente próximos. Às bobinas aplica-se corrente de igual intensidade, suficiente para saturar o material que constitui o núcleo. A presença de um campo externo causa um desequilíbrio nessa saturação, gerando assim uma saturação diferencial em sua direção. A diferença de potencial gerada a partir dessa relação é utilizada na determinação da intensidade do campo magnético externo. A disposição de pares de núcleos/bobinas em eixos ortogonais é responsável pela capacidade de se determinar a intensidade do campo nas três direções cartesianas.

Devido à disposição ortogonal dos núcleos do magnetômetro fluxgate, as medidas realizadas em furo disporão de três componentes, sendo uma vertical e duas horizontais, além do campo total resultante da somatória das três componentes. É importante se atentar, entretanto, na forma como tais eixos estão alinhados ao longo da sonda. A obtenção das componentes horizontais pode ser comprometida por rotação da sonda, uma vez que o sistema de referência da sonda não condiz necessariamente com o sistema de referência geomagnético fixado. Algumas sondas têm centralizadores ou acelerômetros acoplados a fim de

permitir a fixação ou correção do alinhamento dos eixos horizontais em relação ao sistema regional fixado. Ainda assim, é importante realizar-se um teste de repetibilidade dos perfis de descida e subida para averiguar a confiabilidade do alinhamento. A componente vertical, por sua vez, é melhor definida devido ao alinhamento natural da sonda suspensa por atuação gravitacional. Esse é um dos motivos pelos quais a componente vertical é comumente utilizada para análise de perfis magnéticos (Jo et al., 2003; Sun et al., 2009; Ehmann et al., 2016).

2.4 Modelagem e Inversão

Compreender o comportamento associado a diferentes aspectos caracterizantes de um corpo consiste num importante - e por vezes essencial - ramo da análise científica. A esse conjunto de aspectos dá-se o nome de parâmetros, os quais são responsáveis por descrever as propriedades físicas, químicas ou geométricas do meio. Entende-se por problema direto o uso de uma função (modelo matemático) estabelecida que relacione matematicamente os parâmetros envolvidos no problema à resposta física associada (Sheriff, 2002; Aster et al., 2004). A análise de um comportamento predito a partir de um modelo imposto permite inferir relações quantitativas e qualitativas dos parâmetros envolvidos no problema. Na geofísica, entende-se por modelagem a obtenção de um conjunto de parâmetros que, aplicado ao modelo matemático, apresente uma resposta predita similar à de um conjunto de dados observados (Kearey, 1984). Vale mencionar que o ajuste do conjunto de dados preditos ao conjunto de dados observados não garante que a modelagem proposta se assemelhe ao modelo real (Sheriff, 2002). A busca do conjunto de parâmetros que permita a modelagem para um determinado conjunto de dados pode ser realizada de forma iterativa, determinando a causa a partir da observação dos efeitos. A esse método dá-se

o nome de inversão (Sheriff, 2002).

O modelo matemático consiste em uma função capaz de representar uma resposta segundo as propriedades físicas e geométricas associadas ao problema, estabelecendo a relação funcional entre parâmetros e dados preditos. Pelo modelo matemático, pode-se presumir que a função é capaz de reconstituir valores exatamente iguais aos medidos numa condição de ausência de ruídos. Essa consideração não é estritamente real, uma vez que a modelagem costuma incorporar simplificações associadas à discretização, geometria, etc - o que resulta em um conjunto de resíduos com propriedades distintas no ajuste (Aster et al., 2004). Utilizar o modelo matemático de modo a fornecer diferentes conjuntos de parâmetros (hipóteses) e comparar os dados preditos aos dados observados é o que se conhece por modelagem direta. A aplicação do método de modelagem direta, segundo Blakely (1995), condiz no ajuste de corpos com parâmetros estimados e comparação da resposta obtida aos dados de campo, com variação dos parâmetros de forma interativa e sistemática até obtenção de um vetor de parâmetros que conceda uma resposta suficientemente semelhante à almejada.

Embora o método se mostre eficiente, sua aplicação pode ser pouco viável dependendo do objeto de estudo, uma vez que a variação de valores somente por simples discretização pode ser muito extenso e exaustivo para problemas dispostos com parâmetros variáveis em grandes intervalos e diversas dimensões. Diminuir o número de iterações associada à busca do modelo, assim como filtrar as ambiguidades associadas e ter melhor controle sobre as incertezas, são procedimentos essenciais na efetivação e otimização da modelagem direta. Esses quadros podem ser almejados e alcançados a partir de informações preliminares obtidas por observações prévias, conhecimento bibliográfico ou aplicação de outros métodos científicos - mesmo que tais informações se caracterizem somente como estimativas, e que seja válido somente inferir um intervalo limitado dentro

do qual o parâmetro terá seu valor disposto (Oliveira Jr e Uieda, 2011).

Métodos de inversão, por sua vez, são utilizados visando estimar-se automaticamente os parâmetros do modelo considerado de modo que os dados preditos sejam os mais próximos possíveis dos dados observados. Implicitamente assume-se um critério para mediação do ajuste, de modo a inferir a equivalência entre a curva teórica e a real. O função de ajuste comumente se dá a partir da diferença entre os valores medidos e calculados a partir do modelo, a diferença elevada ao quadrado para impedir o cancelamento de diferenças positivas e negativas (estimador de quadrados mínimos).

Devemos considerar que os dados estão comumente associados a incertezas, tornando estatísticas as inferências do modelo. A não-linearidade de sistemas físicos e o número finito de dados observados também devem ser considerações a se fazer. Aster et al. (2004) diz ser necessário indagar-se: sobre a existência de solução para o problema; sobre a unicidade de tal solução; e sobre a estabilidade de tal solução. Para todas as respostas positivas, estaremos diante de um problema bem-posto, com solução atingível. Problemas mal-postos, por sua vez, podem ser estudados a fundo, analisados e modificados para se tornarem bem-postos - se diante de situações favoráveis, tais como informações preliminares sobre o modelo. Problemas geofísicos geralmente se enquadram nesta circunstância, e somente a presença de apreciações complementares e conhecimento técnico permite a exclusão e interpretação acerca das ambiguidades.

Observemos mais a fundo cada uma das situações: A existência de solução pode não ocorrer para casos de simplificação excessiva no desenvolvimento do problema inverso, incapacitando um ajuste aos dados obtidos devido à complexidade da formação real; A não-unicidade, por sua vez, é o quadro mais comum apresentado em estudos geofísicos, pois a maioria dos dados podem apresentar comportamentos semelhantes para combinações distintas dos parâmetros do

problema. Essa ambiguidade pode por vezes ser contornada através de análises externas e conhecimentos prévios que caracterizem o problema; A análise de estabilidade, por fim, é responsável pela garantia da viabilidade de um modelo. Resultados que se ajustem bem aos dados de entrada mas que apresentem variações bruscas relacionadas a pequenas mudanças de algum parâmetro indicam uma alta sensibilidade, e não são considerados consistentes para a inversão geofísica. Uma vez que dados de campo são ruidosos e propriedades físicas podem variar segundo influências externas, essa pequena variação de valores não pode representar uma situação de mudança brusca no resultado, uma vez que isso inviabilizaria a qualidade e confiabilidade da inversão (Aster et al., 2004).

Nota-se, pelo apresentado anteriormente, que a grande maioria dos problemas físicos de maior complexidade são mal-postos. Ainda assim, a importância de se estudar tais fenômenos com o método inverso é evidenciada na obra de Aster et al. (2004). Segundo os autores, as equações serão obrigatoriamente inconsistentes em circunstâncias nas quais há mais pontos de coleta de dados do que parâmetros envolvidos na formulação. Desse modo, nenhuma resposta de inversão será capaz de se ajustar perfeitamente a todos os dados. Entretanto, mesmo diante de uma situação em que não se é capaz de obter uma solução exata, a estimativa dos parâmetros é válida e busca os melhores ajustes encontrados para a equação de modelagem adotada.

A função de ajuste é definida pelo usuário conforme o comportamento de equidade esperado entre a curva de dados preditos e observados. Entretanto, muitas vezes a função de ajuste não é suficiente, diante de inúmeras combinações de parâmetros que retornem um valor equivalente representativo da diferença entre as curvas. Desse modo, adota-se a regularização, um procedimento matemático relativo à imposição de restrições conforme informações *a priori* sobre o problema (Oliveira Jr e Uieda, 2011). A função de ajuste combinada a consi-

derações *a priori* - sejam estas considerações geológicas, matemáticas, técnicas, ou de qualquer outra natureza - passa a ser a função objetivo do problema inverso. Sendo a função objetivo a representativa do valor de diferença entre as curvas diante de vínculos associados ao problema, o objetivo da inversão é estimar parâmetros que minimizem esta função objetivo (Aster et al., 2004).

3 Metodologia

Como explicado no capítulo anterior, visar a obtenção de um algoritmo de inversão requer, primeiramente, a compreensão do problema disposto e a definição de uma abordagem para otimização dos resultados. Após compreensão de como o problema se comporta, define-se a modelagem matemática a ser utilizada para representação do problema disposto. Em seguida, define-se a função objetivo a ser minimizada. A resolução do problema representativo da minimização da função objetivo, de forma iterativa ou não - a depender da linearidade ou não-linearidade da equação -, será responsável pela obtenção do vetor de parâmetros que melhor ajusta a curva de dados. Esses aspectos serão tratados de forma detalhada neste capítulo, de modo a caracterizar a abordagem matemática por trás dos algoritmos desenvolvidos.

3.1 Perfilagem magnética em fundações armadas

Dois tipos distintos de fundações armadas comumente empregadas na sustentação de torres de telecomunicação foram abordadas no presente estudo: tubulão e estacas raíz. Ambas são fundações escavadas e moldadas in loco, sendo a profundidade de escavação pré-definida no projeto construtivo e confirmada na realização em campo. Fundações do tipo tubulão são elementos de grande diâmetro ($> 0,8\text{m}$, geralmente da ordem de 1 a 2 metros) e consistem na perfuração de um buraco cilíndrico, disposição de uma armação de aço/ferro no buraco e posterior cimentação para preenchimento completo do furo. São comumente usados como um único elemento de fundação isolado. Fundações estacas raíz, por sua vez, contam com estacas de diâmetro pequeno (da ordem de 0,08 a 0,50 m) inseridas no solo após escavação e revestimento, e com posterior cimentação. Comumente mais de uma estaca é inserida em uma disposição pré-definida, todas conectando-se posteriormente a um bloco de concreto em

superfície a ser usado de base da torre. Para ambos os tipos de fundação as armações apresentam uma disposição similar dos componentes, com barras verticais dispostas circularmente para formação de um cilindro atado por estribos transversais ou um reforço espiral no entorno.

A aplicação do método de perfilagem magnética no estudo de fundações armadas consiste num problema com cenário particular, uma vez que tem-se uma cobertura de dados escassa para mapear e caracterizar uma estrutura magnética complexa. Devido ao alto custo associado à perfuração de furos de sondagem, é comum que somente o perfil tomado num único furo próximo a um dos lados da estrutura esteja disponível para interpretação, impedindo uma análise tridimensional e uma inversão mais bem-posta para caracterização da estrutura. Além disso, devido ao pequeno número de perfis até então realizados no ramo e à distinção do comportamento da curva caso a caso, definir um comportamento característico associado ao limite basal da fundação torna-se inviável, uma vez que a resposta pode ser muito distinta até mesmo para fundações do mesmo tipo com projetos de construção similares.

A Figura 3.1 ilustra o cenário de campo da aquisição dos dados. A sonda é suspensa por um tripé e conectada a um cabo, ligado a uma roldana com transdutor de giros para determinação da profundidade. As perfilagens magnéticas realizadas no presente estudo consistiram na descendência de uma sonda Robertson Geologging OPTV (Optical Televiewer). Embora trate-se de uma sonda óptica para filmagem das paredes do furo, a sonda OPTV conta com um magnetômetro fluxgate acoplado para posicionamento no furo. O conjunto de dados do magnetômetro pode ser utilizado para uma análise do perfil magnético uma vez que apresenta resolução da ordem de 1nT e monitora as componentes do campo magnético em função da profundidade em intervalos de até 1cm. Embora a sonda conte com um centralizador para impedir sua rotação ao longo do furo

vertical, é importante mencionar que tal confiabilidade deve ser analisada caso haja interesse nas componentes horizontais. Entretanto, o teste de perfilagem magnética aplicado a fundações armadas visa analisar somente a componente vertical (Jo et al., 2003; Sun et al., 2009; Dong et al., 2011), uma vez que seu alinhamento é mais confiável - por suspensão da sonda a cabo e alinhamento natural por gravidade - e sua influência é dominante - pelo maior volume e maior contribuição das barras verticais.

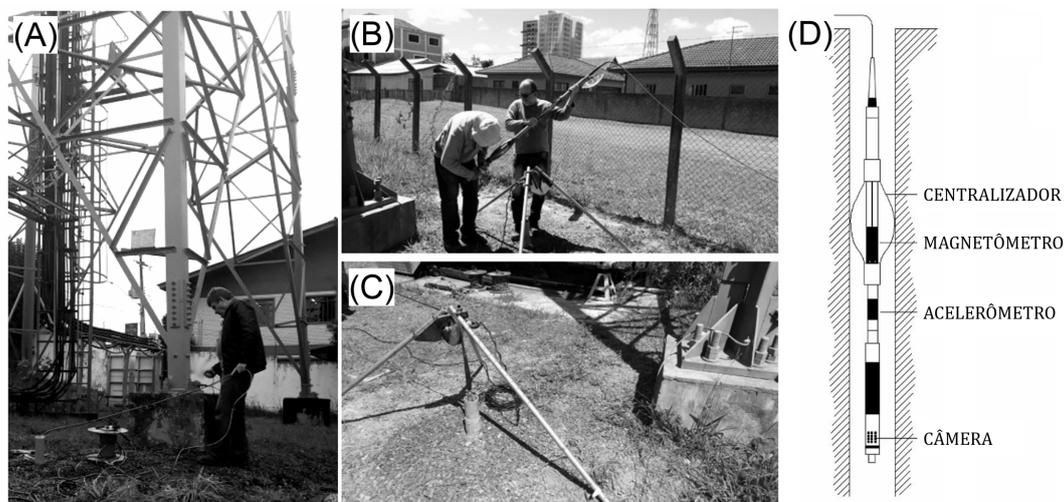


Figura 3.1: (A) Visão geral de um furo de sondagem próximo a uma torre de telecomunicação para determinação da profundidade de sua fundação. (B) Preparo do arranjo de perfilagem magnética. (C) Tripé suspendendo a sonda para medidas ao longo do furo. (D) Componentes da sonda OPTV utilizada nas tomadas de dados do presente estudo.

Considerando a complexidade da resposta magnética de fundações armadas e a abordagem adotada por análise da componente vertical, a Figura 3.2 apresenta o teste de repetibilidade - por plotagem dos perfis de descida e subida - da componente vertical para três torres estudadas. A disposição do teste em três locais distintos visa manifestar como o comportamento da curva diverge caso a caso, mesmo que diante de procedimentos construtivos similares. Nota-se, analisando-se os perfis de repetibilidade na Figura 3.2, a inexistência de um padrão bem definido do comportamento da curva que permita a inferência da

profundidade da fundação a partir de uma feição característica.

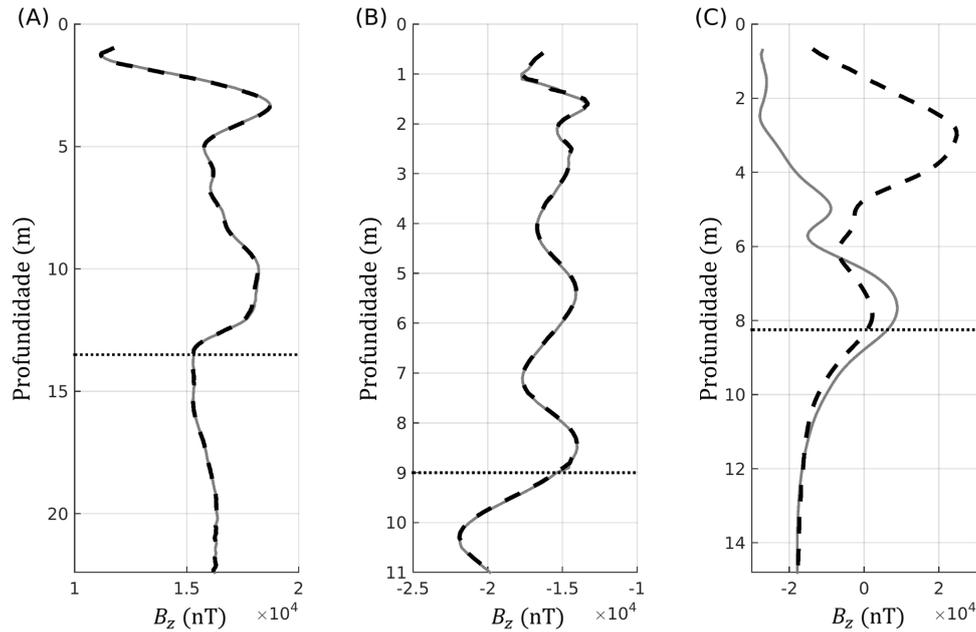


Figura 3.2: Componente vertical do campo magnético (B_z) medido em três sites distintos. Medidas de descida (linha cinza sólida) e de subida (linha preta tracejada) da sonda. Furos de monitoramento dispostos próximos a fundações do tipo estacas raiz (A e B) e tipo tubulão (C) com as respectivas profundidades (linha pontilhada) de 13.5m, 9.0m e 8.25m, respectivamente. As profundidades foram estimadas pelo método paralelo sísmico e por informações litológicas de perfuração.

As Figuras 3.2A e 3.2C ilustram dois casos em que o furo é profundo o suficiente para se observar o decaimento do campo ao se distanciar do fim da fundação, tendendo para um valor base de campo local, enquanto tal comportamento não é observado nos dados da Figura 3.2B coletados em um furo mais raso.

A incoerência na repetibilidade da Figura 3.2C é essencial na análise do ambiente magneticamente conturbado em sites de torres de telecomunicação. O comportamento dos perfis de subida e descida da sonda são muito distintos no mesmo furo - principalmente nas porções mais rasas - devido a um ambiente magneticamente ruidoso acima da superfície. Isso ocorreu por uma condição fortuita, onde as mudanças na resposta observada da descida para a subida

podem ser relacionadas a maquinários móveis na superfície atuando como fontes magnéticas intensas. Essa análise permite inferir que os dados coletados contam, além da complexidade da estrutura, com interferências de grande intensidade de outras fontes que não a fundação armada alvo, influenciando nesse caso até mesmo no posicionamento do pico anômalo profundo. Entretanto, é notório pela Figura 3.2C que essa influência é mais intensa em menores profundidades, e principalmente que o decaimento da curva em grandes profundidades mantém um comportamento bem definido - e pode ser associado à fundação, com interferência muito menor de fontes em superfície.

Conforme mencionado por Sun et al. (2009) e anteriormente observado em Jo et al. (2003), as componentes verticais tendem a ter um comportamento de vale entre duas cordilheiras (*ridges*), o *ridge* profundo estando centrado próximo à base da fundação. Esse comportamento pode gerar confusões em casos com mudança na armação ao longo da estrutura, como mostrado por Dong et al. (2011) pela disposição de um *ridge* central que indicava uma mudança na magnetização associada à estrutura, e não sua base. Além disso, a Figura 3.2 explicita que esse comportamento não é comum a todos os casos, mas que analisar o decaimento da curva - o que incluiria o *ridge* profundo em casos nos quais ocorre a feição - nos parece uma conduta mais apropriada na análise.

3.2 Representação da armação por prismas retangulares

Sabemos, das seções anteriores, que o problema direto requer um modelo representativo do problema a ser estudado. No âmbito da engenharia de fundações, representar a parcela cimentada de fundações profundas costuma ser tarefa simples, já que de modo generalizado consiste num corpo em formato cilíndrico com variações no formato da base. Entretanto, quando deseja-se explorar a resposta magnética de tais estruturas, a parcela a ser representada deve ser a armação

interna - comumente composta por ligas de ferro ou de aço. A representação da armadura se torna mais complexa, não somente por sua malha com barras verticais, transversais e espirais, mas também por sua variação em relação ao tipo de fundação profunda.

Na literatura, são alguns os trabalhos que buscam a representação - simplificada ou não - da armação de fundações para caracterização da resposta magnética associada. Sun et al. (2009) realizaram a modelagem de maneira complexa para uma fundação armada do tipo tubulão, de modo a analisar a influência na resposta anômala magnética associada a fatores qualitativos e quantitativos da tomada de dados. O modelo consistiu na somatória da anomalia magnética representativa de barras de aço individuais que, conjuntamente, formam a armação. Tais barras foram divididas em três grupos segundo sua disposição na composição da estrutura: principais, dispostas na vertical; círculos transversais, dispostos com seu centro coincidente ao eixo médio das barras verticais; e círculos espirais, dispostos ao longo de toda a estrutura espiralando externamente as barras verticais. A quantidade de barras pertencente a cada grupo, assim como seus respectivos diâmetros, são informações fornecidas pelo autor e controláveis na utilização do modelo.

Os resultados do trabalho de Sun et al. mostraram, dentre outros aspectos, como cada um desses grupos representativos das disposições das barras influenciam na resposta magnética anômala do componente vertical. Essa influência varia de acordo com o posicionamento do furo, sendo a anomalia exclusivamente associada às barras verticais para furos posicionados ao lado leste/oeste da estrutura (Figura 3.3A). Em furos situados ao lado norte/sul, nota-se uma pequena influência das barras espirais nas profundidades associadas às extremidades e das barras transversais com comportamento aproximadamente senoidal. Embora possam influenciar na disposição da curva anômala, as barras transver-

sais e espirais pouco modificam o comportamento associado à curva no limite inferior da fundação (Figura 3.3B), modificando apenas a amplitude do sinal - e, ainda assim, com uma baixa intensidade em relação à apresentada pelas barras verticais.

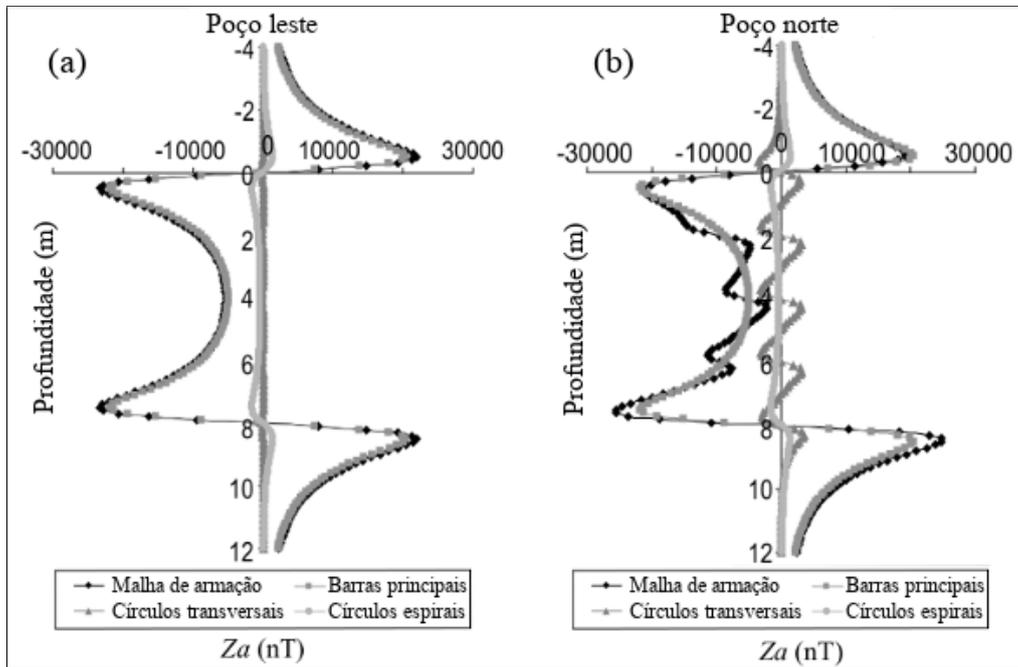


Figura 3.3: Representação da contribuição anômala associada a cada grupo componente da armação de uma fundação do tipo tubulão (a) com furo posicionado no lado leste e (b) com furo posicionado no lado norte. Adaptado de Sun et al. (2009)

A definição de um modelo representativo da estrutura é essencial para se analisar seu comportamento magnético. A influência magnética anômala da fundação armada - principalmente no que se diz respeito à sua extremidade inferior - é representada predominantemente por suas barras verticais (Figura 3.3). Assim, pode-se simplificar a modelagem para corpos alongados verticalmente que se aproximem do formato da armação. Dong et al. (2011) apresentam resultados satisfatórios na modelagem do comportamento de curvas de dados reais a partir de representação da estrutura por um cilindro vertical. De forma ainda mais simplificada, Jo et al. (2003) representam o comportamento da

fundação pelo modelo de um dipolo simples.

No presente projeto, a abordagem escolhida para modelagem da armação foi da representação por prismas com base retangular. Essa escolha se deu pela possibilidade de, a partir de um conjunto de segmentos prismáticos acoplados verticalmente, representar-se a complexidade da estrutura magnética por consideração de intervalos em profundidade com valores médios de magnetização. Cada intervalo é constituído por um prisma homogêneo representativo da armação concretada na região, e a mudança de comportamento entre prismas adjacentes pode indicar uma mudança de quantidade (número de barras por unidade de volume) ou de acoplamento da armação. Além disso, a utilização de uma média volumétrica de magnetização diminui o número de parâmetros envolvidos em relação à modelagem de Sun et al. (2009), simplificando-se futuramente o algoritmo de inversão.

3.3 Modelagem magnética de prismas

A curva de campo anômalo associado à armação de uma fundação pode ser aproximada, de forma simples, por um prisma de base retangular. Nesta seção, visamos desenvolver sucintamente a matemática envolvida na modelagem da componente vertical do campo magnético anômalo deste corpo. O procedimento de modelagem foi desenvolvido em Matlab, utilizando como base o programa de Mendonça e Meguid (2008) desenvolvido em Fortran. A modelagem matemática do campo magnético anômalo foi obtida com base na literatura, principalmente nos trabalhos de Bhattacharyya (1964), Talwani (1965) e Plouff (1976).

Talwani (1965) introduz uma formulação do campo magnético anômalo associado a um corpo de forma arbitrária. Considerando-se um elemento de volume infinitesimal - com arestas Δx , Δy e Δz - interno a um corpo Q , seu potencial magnético (no SI) calculado na origem é dado por:

$$\Omega = \frac{\mu_0 \mathbf{m} \cdot \mathbf{R}}{4\pi R^3} \quad (1)$$

onde μ_0 é a constante de permeabilidade magnética no vácuo ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{N/A}^2$), \mathbf{m} é o vetor momento magnético do elemento volumétrico (Am^2) e \mathbf{R} é o vetor representativo da distância entre o elemento volumétrico e a origem (m). Se considerarmos a magnetização \mathbf{M} do corpo como sendo uniforme, então $\mathbf{m} = \mathbf{M}\Delta x\Delta y\Delta z$. O potencial magnético pode ser escrito em função das três componentes da magnetização do elemento, de modo que:

$$\Omega = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M_x x + M_y y + M_z z}{R^3} \Delta x \Delta y \Delta z . \quad (2)$$

As três componentes anômalas associadas ao corpo Q podem então ser obtidas a partir do cálculo do campo magnético do elemento infinitesimal a partir da derivada do potencial e, em seguida, a integração volumétrica dessa derivada nos limites do corpo. Ou seja:

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint -\frac{\delta\Omega}{\delta x} dx dy dz \\ B_y &= \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint -\frac{\delta\Omega}{\delta y} dx dy dz \\ B_z &= \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint -\frac{\delta\Omega}{\delta z} dx dy dz . \end{aligned} \quad (3)$$

Substituindo-se os valores de Ω da Equação (2) em (3) e derivando em relação a x , y e z , as componentes do campo podem ser escritas em função das componentes da magnetização:

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\mu_0}{4\pi} (M_x V_1 + M_y V_2 + M_z V_3) \\ B_y &= \frac{\mu_0}{4\pi} (M_x V_2 + M_y V_4 + M_z V_5) \\ B_z &= \frac{\mu_0}{4\pi} (M_x V_3 + M_y V_5 + M_z V_6) \end{aligned} \quad (4)$$

sendo

$$\begin{aligned}
V_1 &= \iiint \frac{3x^2 - R^2}{R^5} dx dy dz & V_4 &= \iiint \frac{3y^2 - R^2}{R^5} dx dy dz \\
V_2 &= \iiint \frac{3xy}{R^5} dx dy dz & V_5 &= \iiint \frac{3yz}{R^5} dx dy dz \\
V_3 &= \iiint \frac{3xz}{R^5} dx dy dz & V_6 &= \iiint \frac{3z^2 - R^2}{R^5} dx dy dz .
\end{aligned} \tag{5}$$

Dado que queremos definir a anomalia magnética associada a um prisma retangular, a integração volumétrica realizada para obtenção dos termos em (5) será realizada para os limites laterais e vertical definidos pelos vértices do prisma em questão (Plouff, 1976). Como no presente trabalho utilizaremos somente a componente vertical da anomalia, B_z , podemos simplificar a abordagem daqui em diante com definição somente dos termos V_3 , V_5 e V_6 . A resolução dos demais termos para obtenção das demais componentes, tal como para a anomalia total, podem ser encontradas no trabalho de Plouff (1976).

Portanto, resolvendo-se para o volume de um prisma retangular as integrais triplas referentes aos termos multiplicadores na componente vertical e dispondo-os conforme suas contribuições pelas componentes do vetor de magnetização, temos a componente anômala $B_z(x, y, z)$. O presente trabalho utiliza a solução apresentada por Mendonça e Meguid (2008) que, embora tenha uma forma algébrica distinta da apresentada por Plouff (1976) ou até mesmo por Blakely (1995), dispõe de um cálculo equivalente.

$$\begin{aligned}
B_z(x, y, z) &= (-1)^{i+j+k} \frac{\mu_0 M}{4\pi} \left(\frac{u}{2} \ln \left[\frac{R - (x - x_i)}{R + (x - x_i)} \right] \right. \\
&\quad \left. + \frac{t}{2} \ln \left[\frac{R - (y - y_j)}{R + (y - y_j)} \right] + v \tan^{-1} \left[\frac{(x - x_i)(y - y_j)}{(z - z_k)R} \right] \right) \tag{6}
\end{aligned}$$

onde as componentes M_x , M_y e M_z do vetor de magnetização são expressas em função dos seus cossenos diretores (t, u, v) , de modo que $M_x = tM$, $M_y = uM$ e $M_z = vM$, sendo M a intensidade de magnetização. Os cossenos

diretores (t, u, v) relacionam-se à inclinação I e declinação D magnéticas por $t = \cos(I) \cos(D)$, $u = \cos(I) \sin(D)$, e $v = \sin(I)$. A distância R , variável segundo os índices i, j e k , é definida como a distância de cada vértice para o ponto sobre o qual o campo é calculado, de modo que $R \equiv R_{i,j,k}$ sendo $R_{i,j,k} = [(x - x_i) + (y - y_j) + (z - z_k)]^{\frac{1}{2}}$. Os índices $i, j, k=1,2$ cobrem os limites de integração definidos pelos vértices do prisma.

Considerando o problema de fundações, a representação por prismas visa aproximar a influência da somatória das barras verticais - que representam o maior volume armado e a influência magnética dominante. Como também já mencionado anteriormente, as barras de aço ou ferro comumente apresentam uma direção de magnetização paralela ao seu eixo longitudinal. Desse modo, o problema pode ser simplificado pela inferência da direção de magnetização longitudinal aos prismas, de modo que o cosseno diretor (t, u, v) assumirá valores $(0,0,1)$ ou $(0,0,-1)$, para uma magnetização apontando para baixo ou para cima, respectivamente. Desse modo, a Equação 6 pode ser simplificada, tendo-se a medida efetuada numa profundidade z de um furo situado numa posição (x_b, y_b) por:

$$B_z(x_b, y_b, z) = (-1)^{i+j+k} \frac{\mu_0 M}{4\pi} \left(v \tan^{-1} \left[\frac{(x_b - x_i)(y_b - y_j)}{(z - z_k)R} \right] \right) \quad (7)$$

com v podendo ser igual a 1 ou a -1, a depender do sentido da magnetização.

Os termos geométricos e as coordenadas espaciais na Equação 9 estão representadas na Figura 3.4. Tem-se um sistema cartesiano centrado em $(x, y, z) = (0,0,0)$, com o eixo z apontando para baixo. Os pontos espaciais (x_i, y_j) para $i, j=1,2$ representam os vértices do prisma, com z_k sendo a profundidade do topo ($k = 1$) ou da base ($k = 2$) do prisma. A Figura 3.4 mostra como o presente estudo visa aproximar fundações do tipo tubulão (3.4A) e do tipo estacas raíz (3.4B) a partir de uma representação prismática que engloba a somatória do

volume armado e concretado (3.4C). Considerando-se um conjunto de N barras verticais com volume V_l e vetor de magnetização \mathbf{M}_l cada, a magnetização $\widetilde{\mathbf{M}}$ do volume prismático V_p pode ser aproximada por

$$\widetilde{\mathbf{M}} \approx \sum_{l=1}^N V_l \mathbf{M}_l / V_p \quad (8)$$

uma vez que a magnetização do concreto, por ser muito menor, pode ser desconsiderada. Para um conjunto de $N = N_1 + N_2$ barras com intensidade de magnetização $M_l = |\mathbf{M}_l|$, sendo N_1 e N_2 o número de barras com magnetização para baixo e para cima respectivamente, a magnetização média correspondente $\widetilde{\mathbf{M}} = \left(\sum_{l=1}^{N_1} V_l M_l / V_p - \sum_{l=N_1+1}^{N_2} V_l M_l / V_p \right) \mathbf{z}$ pode ter sua direção apontada para cima ou para baixo, a depender da quantidade N_1 e N_2 de barras que compõem a estrutura. Em uma posição externa à fundação, o campo magnético anômalo gerado pela estrutura complexa pode ser modelado de forma simplificada por um bloco uniforme com magnetização média $\widetilde{\mathbf{M}}$.

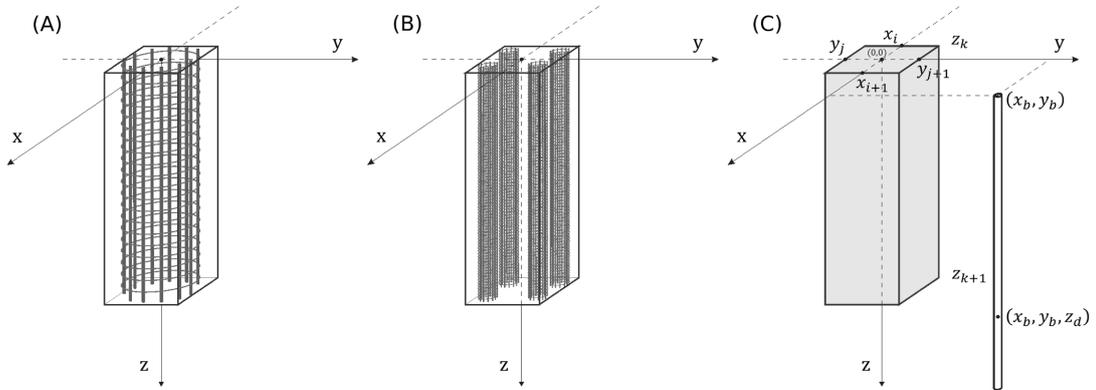


Figura 3.4: (A) Representação simplificada da estrutura de armação em uma fundação do tipo tubulão. (B) Representação simplificada da estrutura de armação em uma fundação do tipo estacas raíz. (C) Representação simplificada utilizando um prisma equivalente ao volume de armação concretada e magnetização calculada segundo a Equação 8.

Diante do disposto nesta subseção, vimos que podemos calcular, num certo ponto do espaço, a componente vertical anômala associada a um corpo prismático

retangular a partir de sua intensidade de magnetização, direção de magnetização e coordenadas dos vértices. Ao longo da armação de uma fundação, entretanto, podemos observar a mudança de comportamento magnético devido a variações na porcentagem da seção transversal armada ou na disposição estrutural da armação. Tais variações ao longo da estrutura podem ser comumente representadas por prismas magnéticos de intensidade de magnetização distinta e/ou de polarização oposta. Considerando que o presente estudo busca, a partir de dados magnéticos, melhor compreender as caracterizações estruturais na região basal de fundações, a representação do corpo se dará pela somatória de prismas com mesma área transversal - permitindo representar mudanças nas propriedades magnéticas ao longo da armadura.

3.4 Formulação do problema inverso

Conforme disposto na subseção 3.3, a anomalia vertical referente à estrutura representativa da fundação é obtida a partir da somatória da influência de prismas retangulares individuais. Além disso, é importante lembrar que os dados constituem um perfil n -dimensional a ser aproximado. Desse modo, vamos começar considerando um vetor n -dimensional \mathbf{h} com entradas h_d indicativas da componente vertical do campo magnético medidas ao longo do furo em profundidades z_d , $d = 1 : n$. A componente vertical do campo magnético equivalente $b_d = B_z(x_b, y_b, z_d)$ é calculada para um conjunto de N_p prismas acoplados verticalmente. Cada prisma apresenta uma intensidade de magnetização desconhecida \widetilde{M}_l e uma direção de magnetização vertical v_l - podendo estar direcionada para cima ou para baixo. A componente $B_z(x_b, y_b, z_d)$ pode ser escrita, a partir da Equação 7, como:

$$B_z(x_b, y_b, z_d) = \sum_{l=1}^{N_p} \frac{\mu_0}{4\pi} v_l \widetilde{M}_l \left\{ (-1)^{i+j+1} \tan^{-1} \left[\frac{(x_b - x_i)(y_b - y_j)}{(z_d - z_{l-1})R} \right] + (-1)^{i+j} \tan^{-1} \left[\frac{(x_b - x_i)(y_b - y_j)}{(z_d - z_l)R} \right] \right\} \quad (9)$$

com $i, j=1,2$ e com os parâmetros z_{l-1} e z_l representando, respectivamente, a profundidade do topo e da base do l -ésimo prisma. Para o prisma mais raso, o seu topo é inferido como disposto em superfície, de modo que $z_0 = 0$ m.

A Equação 9, referente à anomalia vertical resultante de um corpo representativo da armadura sobre um certo ponto (x, y, z) , pode ser disposta em função dos parâmetros variáveis envolvidos, de modo que a resposta do modelo $b_d \equiv b_d(\mathbf{q}, z_d)$ avaliada numa profundidade z_d do furo torna-se:

$$b_d(\mathbf{q}, z_d) = \sum_{l=1}^{N_p} B_z(\mathbf{p}_l, z_d) \quad (10)$$

sendo que N_p é o número de prismas que compõem a representação, \mathbf{p}_l é o vetor 9×1 de parâmetros associado a cada prisma e \mathbf{q} é o vetor $(9N_p) \times 1$ contendo todos os N_p vetores de parâmetros.

Conforme mostrado por Talwani (1965) e representado nas Equações 6-8, o usuário precisa somente das coordenadas dos vértices do polígono, das coordenadas do ponto sobre o qual a anomalia magnética está sendo determinada e da intensidade e direção de magnetização para calcular o valor da anomalia magnética. As coordenadas (x_b, y_b, z_d) dos pontos de observação são bem conhecidas, sendo (x_b, y_b) fixados no centro do furo, conforme representado na Figura 3.4, e z_d variável segundo a profundidade no furo a ser observada. As coordenadas horizontais do vértice (x_i, y_j) também são bem conhecidas segundo a seção transversal da fundação concretada observada em superfície. Os valores de intensidade e direção de magnetização são desconhecidos. Assim, o vetor \mathbf{q}

de parâmetros do modelo é dado em função dos parâmetros de cada vetor \mathbf{p}_l associado a cada um dos prismas:

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 \\ \mathbf{p}_2 \\ \mathbf{p}_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \mathbf{p}_{N_p} \end{bmatrix} \quad \mathbf{p}_l = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ L_x \\ L_y \\ z_{l-1} \\ z_l \\ \widetilde{M}_l \\ I_l \\ D_l \end{bmatrix} \quad (11)$$

sendo x_c e y_c as coordenadas do centro dos prismas representativos da fundação armada e L_x e L_y a largura dos lados, formando assim a seção transversal - e permitindo inferir as coordenadas horizontais x_i e y_j dos vértices a serem inseridas na modelagem. Os demais são parâmetros desconhecidos, a serem determinados por minimização da função objetivo no método de inversão. Vale mencionar, entretanto, que uma vez que a direção de magnetização é considerada vertical - com cosseno diretor $(0,0,1)$ ou $(0,0,-1)$ -, o valor de D_l é irrelevante na influência magnética vertical e o parâmetro I_l pode ser substituído pelo parâmetro v_l , uma vez que $v = \sin(I)$. Além disso, sendo os prismas acoplados verticalmente e tendo-se $z_0 = 0$ m, o topo dos demais prismas pode ser tomado como um parâmetro equivalente à base do prisma anterior. Desse modo, é possível realizar uma re-parametrização de (11), visando a simplificação do problema e disposição somente dos parâmetros desconhecidos. Tem-se um problema com $M_p = 3N_p$ parâmetros desconhecidos, que podem ser organizados num vetor $\boldsymbol{\omega}$ composto por entradas triplas $\boldsymbol{\rho}_l$ para $l = 1 : N_p$, sendo:

$$\boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\rho}_1 \\ \vdots \\ \boldsymbol{\rho}_{N_p} \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\rho}_l = \begin{bmatrix} z_l \\ \widetilde{M}_l \\ v_l \end{bmatrix}. \quad (12)$$

3.5 Função Objetivo

Ciente dos parâmetros a serem estimados pelo método inverso, definidos na Equação 12, visa-se definir uma função objetivo a ser minimizada para garantir a menor discrepância entre os dados preditos pela função representativa do modelo e os dados observados em campo - dispostos num vetor de entrada no algoritmo de inversão. A presente seção tem o objetivo de descrever a função objetivo definida para o presente estudo, a partir do método de ajuste para análise residual e determinação de vínculos baseados no objetivo do estudo e informações *a priori*. A função objetivo será composta por uma parte que garante ajuste aos dados e outra que força que o ajuste seja priorizado em uma região de interesse.

3.5.1 Função Ajuste - Quadrados Mínimos

Temos, da equação 10, a resposta do modelo preditivo em função dos parâmetros do prisma. Tomando-se os parâmetros conhecidos como constantes, podemos reescrever a resposta b_d do modelo numa profundidade z_d como $b_d = B_z(\boldsymbol{\omega}, z_d)$, deixando claro sua dependência com os parâmetros desconhecidos do modelo prismático. Tendo-se por h_d os valores do componente vertical do campo magnético medidos em campo ao longo do furo, um valor residual pontual r_d pode ser obtido a partir da subtração termo a termo dos dados preditos pelos dados observados:

$$r_d = b_d(\boldsymbol{\omega}, z_d) - h_d \quad (13)$$

O número n de dados observados é determinado segundo a discretização adotada na coleta pela sonda, de modo que n pode ser obtido pela divisão da profundidade do furo pelo intervalo de discretização. O resíduo total, dado pela somatória dos resíduos ponto a ponto, pode ser tomado como um bom indicador da discrepância entre a curva de dados preditos e a curva de dados observados. Entretanto, a somatória simples dos termos r_d pode mascarar a qualidade da análise uma vez que a subtração em (13) pode adquirir valores tanto positivos quanto negativos, os quais podem se cancelar. Desse modo, toma-se uma abordagem por quadrados mínimos (*least squares*), a qual consiste em analisar o quadrado dos resíduos de modo a garantir que a discrepância ponto a ponto seja sempre um valor positivo - e sua somatória seja sempre cumulativa. A função de ajuste das curvas passa a ser tida por:

$$\Phi(\boldsymbol{\omega}) = \|\mathbf{r}(\boldsymbol{\omega})\|_2^2 = \sum_{d=1}^n [h_d - b_d(\boldsymbol{\omega}, z_d)]^2 \quad (14)$$

de modo que o objetivo da inversão é o de obter o conjunto de parâmetros $\boldsymbol{\omega}$ que minimize tal função ajuste. Algumas considerações, entretanto, ainda precisam ser tomadas para garantir o melhor ajuste do problema disposto - de detecção de aresta de uma fundação a partir de dados escassos e ruidosos.

3.5.2 Função Peso - Determinação de Arestas

Nota-se pela função ajuste de quadrados mínimos disposta pela Equação 14, tal como explicitado na subseção anterior, que o resíduo total calculado é dado pela somatória dos resíduos associados a cada um dos pontos de medidas m em profundidade. O estudo em questão, todavia, tem por interesse principal a resolução de um problema de aresta: estimar a profundidade de fundação e analisar como o comportamento estrutural da região basal influencia nessa estimativa.

Os dados observados próximos à superfície apresentam maiores influências de estruturas antrópicas em superfície, tanto pelos equipamentos utilizados na perfilagem quanto pela própria estrutura sustentada pela fundação. Além disso, conforme mencionado por Coe et al. (2019), uma anomalia muito intensa é esperada devido à presença de grande quantidades de ferro/aço associados ao *pile cap* (bloco de fundação, situado entre a edificação e a fundação para distribuição das cargas). A região mais central da fundação também pode apresentar comportamento anômalo não esperado para o modelo, como mencionado na seção 3.2 e ilustrado na Figura 3.3. Isso se deve ao fato de que a representação por prismas retangulares desconsidera a influência das barras transversais, que podem causar anomalias de menor intensidade ao longo da estrutura.

A representação adotada pela modelagem representa bem o comportamento das barras verticais, de modo que o limite inferior está associado a um comportamento esperado de picos anômalos de sinal oposto. Sendo assim, queremos que nossos dados preditos busquem ajustar essa região mais basal, a partir dos últimos picos anômalos. Isso pode ser almejado a partir da aplicação de uma função peso, de modo a modificar a função ajuste Φ para uma função ajuste que analise com maior peso os resíduos em maiores profundidades. Por essas razões, é necessário definir uma função peso que priorize o ajuste da anomalia em maiores profundidades. A função peso $w_d(z_d, z_\mu, z_\sigma) \equiv w_d$ inferida é dada por:

$$w_d = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{z_d - z_\mu}{\sqrt{2}z_\sigma} \right) \right] \quad (15)$$

onde z_μ é uma estimativa inicial da profundidade da fundação e z_σ é um parâmetro característico relacionado à incerteza da estimativa. Essa função peso desconsidera quase totalmente o ajuste nas profundidades mais rasas (assume valores $w_d \approx 0$) enquanto busca um ajuste válido ($0 < w_d < 1$) no entorno

da profundidade z_μ e prioriza um melhor ajuste ($w_d \approx 1$) para as maiores profundidades, analisando o decaimento da curva para o valor regional. Os pesos assim definidos priorizam o comportamento do decaimento da curva após o limite de aresta da fundação. O parâmetro central z_μ da função peso pode ser inferido pelo último pico (em módulo) anômalo disposto na derivada vertical do perfil, uma estimativa qualitativa aplicada na literatura (Jo et al., 2003; Dong et al., 2011). O parâmetro de largura do ajuste intermediário z_σ pode ser estimado aproximadamente pela metade da distância entre os dois pontos nulos que cercam o último pico da derivada (tal como observado em Dong et al., 2011). Se tal comportamento não existir na curva, determina-se o parâmetro de forma empírica por tentativa e erro. A determinação dos parâmetros de centralização e largura (z_μ e z_σ) estabelece a região profunda a partir da qual se dará mais importância ao ajuste do perfil magnético, mas não forçam que o resultado da inversão para a profundidade se situe nesse intervalo.

Desse modo, considerando-se a aplicação da função peso para controle do nosso objetivo de ajuste, temos a função objetivo:

$$Q(\boldsymbol{\omega}) = \sum_{d=1}^n w_d (h_d - b_d)^2 \quad (16)$$

3.5.3 Aplicação de vínculos

Vínculos e funções regularizadoras são importantes na obtenção de modelos mais próximos do real, uma vez que a maioria dos problemas reais são mal-postos e suas superamostragens podem resultar em infinitas soluções para o problema inverso. Para o conjunto de parâmetros $\boldsymbol{\omega}$ a serem estimados pela inversão, alguns vínculos e limites podem ser definidos segundo informações técnicas, lógicas e geométricas. A profundidade da base de cada prisma z_l deve estar definida num intervalo entre a superfície e o fundo do furo $0 \leq z_l \leq$

z_n , uma vez que uma premissa do método de perfilagem magnética é que a profundidade do furo exceda a profundidade da fundação. A profundidade da base de cada prisma acoplado devem estar vinculadas entre si, de modo que $z_{l+1} \geq z_l$ para evitar interpenetração de prismas. Os valores de magnetização do prisma \widetilde{M}_l devem estar limitados próximos a um valor de referência \widetilde{M}_0 indicativo da magnetização média esperada para a estrutura. Esse intervalo pode ser estabelecido de acordo com a complexidade do problema, por exemplo estabelecendo-se um limite $0.9\widetilde{M}_0 \leq \widetilde{M}_l \leq 1.1\widetilde{M}_0$ para uma liberdade de $\pm 10\%$ no valor da magnetização. A direção de magnetização, como já mencionado, pode assumir somente valores que indiquem uma magnetização vertical para cima ou para baixo - e, portanto, só pode assumir valores $\|v_l\| = 1$.

Desse modo, temos uma série de vínculos definidos por inequações que devem ser considerados na resolução da função objetivo $Q(\boldsymbol{\omega})$. Os vínculos podem ser organizados de modo que todas as equações - se houverem - sejam representadas por uma conjunto de funções $\mathbf{f}(\boldsymbol{\omega})$ e todas as inequações sejam representadas por um conjunto de funções $\mathbf{g}(\boldsymbol{\omega})$. O problema a ser resolvido pode então ser formulado:

$$\begin{cases} \min & Q(\boldsymbol{\omega}) \\ \text{sujeito a} & \mathbf{f}(\boldsymbol{\omega}) = 0 \\ & \mathbf{g}(\boldsymbol{\omega}) \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

3.5.4 Resolução por convergência pelo método do ponto interior

Métodos de otimização de funções são muito estudados na matemática estatística, visando permitir que problemas dispostos das mais diversas maneiras possam ser resolvidos e seus pontos de máximo ou mínimo sejam determinados (Aster et al., 2004; Nocedal e Wright, 2006). No ramo dos métodos inversos, um dos métodos de otimização mais bem avaliados para minimização de funções

objetivo não-lineares com parâmetros vinculados é o método do ponto interior (Byrd e Nocedal, 1998). Diante da obtenção de uma função objetivo complexa para o problema proposto, nossa abordagem para o presente estudo se deu na busca do mínimo da função objetivo a partir do método mencionado.

Diante da função objetivo (Equação 17), temos o objetivo de determinar o conjunto de parâmetros responsável por seu valor mínimo. Para facilitar a resolução do problema, é desejável que as restrições impostas por inequações sejam transformadas em restrições de igualdade. Desse modo, podemos reescrever a função objetivo e suas restrições como:

$$\begin{cases} \min & Q(\boldsymbol{\omega}) \\ \text{sujeito a} & \mathbf{f}(\boldsymbol{\omega}) = 0 \\ & \mathbf{g}(\boldsymbol{\omega}) + \mathbf{s} = 0 \\ & \mathbf{s} \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

onde \mathbf{s} é um conjunto de variáveis de folga estritamente positivas, utilizadas na transformação de inequações em equações mantendo-se o vínculo associado (Clapham, C. e Nicholson, 2009). Para t vínculos de inequação, existe um s_i associado a cada vínculo de desigualdade g_i , $i = 1 : t$. Nota-se, entretanto, que a Equação 18 agora passa a ter inequações para o conjunto de variáveis de folga \mathbf{s} representando o vínculo de não-negatividade dessas variáveis - o que mantém a complexidade de se resolver o problema. A função objetivo é mais uma vez reorganizada, de modo que:

$$\begin{cases} \min & \psi(\boldsymbol{\omega}, \mu) = Q(\boldsymbol{\omega}) - \mu \sum_{i=1}^t \ln s_i \\ \text{sujeito a} & \mathbf{f}(\boldsymbol{\omega}) = 0 \\ & \mathbf{g}(\boldsymbol{\omega}) + \mathbf{s} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

onde μ é um parâmetro positivo de barreira que garante a importância com que o vínculo de barreira (dado pelas inequações) é imposto. O logaritmo natural garante o valor positivo associado a cada variável de folga s_i . Embora a Equação 19 não seja equivalente à Equação 17, sua solução é atingível de forma muito mais simples. Resolvendo-se o problema da Equação 19, o processo deve ser repetido iterativamente conforme diminui-se o valor de μ - de modo que resultará numa sequência de soluções que convergirá para a solução da Equação 17 conforme μ converge para zero (Byrd e Nocedal, 1998).

O problema agora consiste em encontrar o conjunto de parâmetros $\boldsymbol{\omega}$ e as variáveis de folga \mathbf{s} associadas que minimizem a função. Tratando-se agora de uma função objetivo somente associada a vínculos de igualdade, podemos reescrevê-la pelo Lagrangiano:

$$\mathcal{L}(\boldsymbol{\omega}, \mathbf{s}, \boldsymbol{\lambda}_f, \boldsymbol{\lambda}_g) = Q(\boldsymbol{\omega}) - \mu \sum_{i=1}^t \ln s_i + \boldsymbol{\lambda}_f^T \mathbf{f}(\boldsymbol{\omega}) + \boldsymbol{\lambda}_g^T (\mathbf{g}(\boldsymbol{\omega}) + \mathbf{s}) \quad (20)$$

onde $\boldsymbol{\lambda}_f$ e $\boldsymbol{\lambda}_g$ são vetores contendo os multiplicadores de Lagrange de cada um dos vínculos. A partir das derivadas parciais, analisemos as condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT), necessárias para que a solução do problema não-linear seja ótima (Nocedal e Wright, 2006):

$$\begin{aligned} \nabla Q(\boldsymbol{\omega}) + \mathbf{A}_h(\boldsymbol{\omega})\boldsymbol{\lambda}_f + \mathbf{A}_g(\boldsymbol{\omega})\boldsymbol{\lambda}_g &= 0 \\ \mathbf{S}\boldsymbol{\lambda}_g - \mu\mathbf{e} &= 0 \\ \mathbf{f}(\boldsymbol{\omega}) &= 0 \\ \mathbf{g}(\boldsymbol{\omega}) + \mathbf{s} &= 0 \end{aligned} \quad (21)$$

onde $\mathbf{A}_f(\boldsymbol{\omega}) = (\nabla f_1(\boldsymbol{\omega}), \dots, \nabla f_n(\boldsymbol{\omega}))$ e $\mathbf{A}_g(\boldsymbol{\omega}) = (\nabla g_1(\boldsymbol{\omega}), \dots, \nabla g_n(\boldsymbol{\omega}))$ representam os vetores de gradiente dos conjuntos de funções \mathbf{f} e \mathbf{g} e $\mathbf{e} =$

$(1, \dots, 1)^T$ e $\mathbf{S} = \text{diag}(s_1, \dots, s_t)$. A segunda equação foi multiplicada pela matriz diagonal \mathbf{S} de modo a transformar uma equação racional em quadrática, facilitando a aplicação do método de Newton para resolução.

O mínimo do sistema de equações não lineares que respeitam às condições de KKT (Equação 21) pode então ser obtido a partir da aplicação do método de Newton para obtenção de raízes por convergência.

$$\begin{bmatrix} \nabla_{\omega\omega}^2 \mathcal{L} & 0 & \mathbf{A}_f(\omega) & \mathbf{A}_g(\omega) \\ 0 & \mathbf{\Lambda} & 0 & \mathbf{S} \\ \mathbf{A}_f^T(\omega) & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{A}_g^T(\omega) & \mathbf{I} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\omega \\ \delta s \\ \delta\lambda_f \\ \delta\lambda_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\nabla Q(\omega) - \mathbf{A}_f(\omega)\lambda_h - \mathbf{A}_g(\omega)\lambda_g \\ \mu e - \mathbf{S}\lambda_g \\ -\mathbf{f}(\omega) \\ -\mathbf{g}(\omega) - \mathbf{s} \end{bmatrix} \quad (22)$$

sendo $\mathbf{\Lambda}$ uma matriz diagonal com as entradas dos multiplicadores de Lagrange λ_g . A resolução do problema é iterativa, necessitando assim a definição de um conjunto de parâmetros $(\omega, \mathbf{s}, \lambda_f, \lambda_g)$ inicial. A resolução da Equação 22 para o conjunto de parâmetros iniciais definidos nos fornece um passo $(\delta\omega, \delta s, \delta\lambda_f, \delta\lambda_g)$, o qual é somado ao conjunto de parâmetros iniciais e inferido como novo conjunto de parâmetros iniciais. O valor da função objetivo é calculado a cada passo e comparado, de modo que a aceitabilidade ou não do passo anterior é definida segundo uma função mérito (Nocedal e Wright, 2006). A função mérito é responsável por mensurar o valor da função objetivo somado a uma penalidade por extrapolação de barreiras para o conjunto de parâmetros obtidos após o passo. A diminuição do valor da função mérito a cada passo indica a aceitabilidade do passo adotado (Byrd e Nocedal, 1998).

O gradiente do Lagrangiano (Equação 20) representativo da função objetivo em relação a ω e \mathbf{s} compreendem relações que permitem inferir valores iniciais dos multiplicadores de Lagrange segundo os valores iniciais definidos para ω e

s. Os valores iniciais de \mathbf{s} , por sua vez, estão vinculados aos valores iniciais dos parâmetros a serem estimados. Desse modo, o conjunto inicial de parâmetros $(\boldsymbol{\omega}, \mathbf{s}, \boldsymbol{\lambda}_f, \boldsymbol{\lambda}_g)$ a ser aplicado sobre o problema para resolução iterativa é obtido a partir de escolha aleatória dos parâmetros desconhecidos $\boldsymbol{\omega}$ dentro de seus limites definidos. O método do ponto interior obtém iterativamente passos que tendem para um ponto crítico, a ser verificado como ponto de mínimo a partir da comparação do valor associado a uma função mérito calculada a cada passo - sendo a tendência da função mérito diminuir a cada passo.

3.5.5 Mínimo local e global

A abordagem de otimização pelo método do ponto interior é classificada como um método gradiente, uma vez que suas derivadas parciais são utilizadas na determinação do passo a partir do método de Newton, visando assim tender ao mínimo - geralmente disposto pelo vale de uma função convexa. Envolve, portanto, o cálculo da função e de suas derivadas a cada iteração realizada. A função objetivo pode ser vista como uma sequência de soluções no espaço de parâmetros envolvidos no modelo matemático. A trajetória da busca no espaço de soluções, entretanto, é definido segundo um conjunto de parâmetros inicial que indica o “ponto de partida” do caminhamento dos conjuntos de parâmetros analisados na função objetivo. Desse modo, dependendo da escolha do modelo inicial - normalmente escolhido de forma aleatória -, pode-se obter um modelo inverso referente a uma convergência para um mínimo local. O mínimo local pode apresentar um bom ajuste, mas a existência de um mínimo global indica a possibilidade de um ótimo ajuste dos dados segundo um outro modelo. Por vezes, entretanto, tanto o mínimo global quanto os locais apresentam valores baixos da função objetivo e podem ser considerados como soluções (Aster et al., 2004). Algoritmos de busca global diminuem a dependência da solução

encontrada com a escolha do modelo inicial, sendo por outro lado mais custosos computacionalmente.

Visando a solução global para problemas com função objetivo complexas, diversos algoritmos de busca global foram desenvolvidos na literatura. Alguns exemplos de métodos de busca global muito satisfatórios e comumente empregados em problemas complexos são a Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization*, Kennedy e Eberhart, 1995) e a Busca de Cuco (*Cuckoo Search*, Yang e Deb, 2009). Todavia, o problema estudado no presente trabalho diz respeito à anomalia de campo magnético vertical, a qual apresenta uma função objetivo com comportamento suave com relação à variação do conjunto de parâmetros. Como o problema é suave e não apresenta mínimos definidos em intervalos muito estreitos, podemos buscar por mínimos alternativos simplesmente repetindo a busca partindo de conjuntos de parâmetros iniciais diferentes (Aster et al., 2004). Essa análise de soluções para diversas escolhas iniciais pode ser automatizada, realizando a inversão pelo método do ponto interior k vezes, sendo k um valor definido pelo usuário. O algoritmo realiza k inversões pelo método do ponto interior, devolvendo o conjunto de parâmetros obtido por inversão que apresente o menor valor associado à função objetivo. Permite assim a análise do valor mínimo para o qual convergiu para diversos modelos iniciais adotados, a partir dos quais se faz o caminhamento por derivação e método de Newton.

3.5.6 Análise gráfica de ambiguidades

No presente estudo o problema abordado mostrou resultados ambíguos até mesmo para casos controlados de simulação numérica (como pode ser visto no capítulo 4). A consideração de mínimos globais não é suficiente para providenciar o modelo correto, uma vez que os ajustes obtidos em mínimos locais

são similares e portanto os valores associados à função objetivo são próximos entre si. Diferente de um problema de minimização de energia ou de custos monetários, por exemplo, a obtenção do mínimo global em nosso estudo não condiz necessariamente com a solução esperada - e nossa análise se baseia em modelos, sejam mínimos locais ou global, que garantam um bom ajuste dentro do erro experimental.

A aplicação de uma metodologia de análise gráfica sobre as simulações numéricas permite uma melhor visualização do comportamento da função objetivo em relação a alguns parâmetros, bem como a disposição de mínimos ambíguos. A análise conta com a plotagem do valor da função objetivo. Entretanto, diante de $3N_p$ parâmetros a serem estimados, tem-se um problema $(3N_p + 1)$ -dimensional. É necessário definir-se uma abordagem para se buscar uma análise visual de tal problema.

Um modelo com 4 prismas ($N_p = 4$) permite analisar tanto ocasiões de estrutura homogênea quanto com heterogeneidades profundas, de modo que: o primeiro prisma, mais raso, pode ser representativo de influências superficiais; o segundo prisma representativo da armação como um todo com direção de magnetização normal; o terceiro prisma representativo de uma heterogeneidade, tendo direção de magnetização oposta; e o quarto prisma, mais profundo, retornando a uma magnetização normal e ao comportamento padrão da estrutura. Para casos homogêneos em profundidade, o terceiro prisma terá uma espessura nula, e o segundo e quarto terão um comportamento contínuo. A existência de um terceiro prisma com espessura não nula que possibilite o ajuste do modelo indica a possibilidade de uma heterogeneidade profunda. Essa abordagem garante, portanto, a fixação de quatro dos parâmetros desconhecidos - referentes à direção de magnetização. Os parâmetros de intensidade também podem ser inferidos com valores fixados, uma vez que buscamos a análise gráfica para si-

mulações numéricas com tais valores conhecidos. Fixando-se também a profundidade do primeiro prisma segundo o modelo proposto, tem-se a possibilidade de representação da função objetivo variável com relação às profundidades z_2 , z_3 e z_4 - possibilitando análise comparativa de como a função a ser minimizada se comporta em relação à homogeneidade ou heterogeneidade estrutural próxima à base. A plotagem pode ser feita em diversas figuras, cada uma representativa de uma profundidade z_2 e mostrando os valores da função objetivo em função das variáveis z_3 e z_4 .

4 Simulação Numérica

A realização de testes de simulação numérica visa, primeiramente, validar o método desenvolvido para a estimativa da profundidade de um modelo conhecido a partir de seu conjunto de dados sintéticos. Essa validação consiste em, a partir da inferência de modelos simples, averiguar: se o método converge para soluções de ajuste da curva, se apresenta estabilidade nas soluções para diversos conjuntos de parâmetros iniciais, se o problema dispõe de ambiguidades, etc. Ademais, simulações numéricas de modelos representativos de cenários distintos permitem uma análise controlada de como fatores específicos afetam a resposta associada e como a inversão se comporta dentro do cenário a ser estudado. Caso não seja validada a eficiência do procedimento de análise quantitativa com a aplicação sobre simulações numéricas controladas, nada indica que o mesmo irá ser eficiente para aplicações complexas - tais como a realidade.

A simulação numérica baseia-se na ideia de dados sintéticos. Dados sintéticos correspondem à resposta de um modelo conhecido e são obtidos pela inferência dos parâmetros no modelo direto. Para simular um dado experimental, os dados sintéticos são comumente corrompidos artificialmente com ruídos. Entretanto, a amplitude do sinal anômalo proveniente de estruturas de ferro/aço é muito maior que o ruído experimental - da ordem de 10^2 a 10^3 vezes o nível de ruído -, e portanto ruídos artificiais pouco influenciam no presente estudo e não foram aplicados. Os dados sintéticos são inseridos no programa de inversão junto à informação a priori disposta para problemas de fundação. No presente estudo, três modelos distintos foram analisados a fim de ilustrar a complexidade associada ao problema de aresta diante da possibilidade de heterogeneidades ao longo da estrutura e de seu devido comportamento ambíguo.

4.1 Modelo NS1 - Fundação homogênea

O primeiro modelo traz uma análise de um cenário simples, tendo-se uma fundação profunda armada integralmente com comportamento magnético homogêneo ao longo de sua extensão. Um prisma raso, entretanto, é inserido de modo a inferir-se uma região ruidosa próxima à superfície e analisar a capacidade da inversão em obter a profundidade correta com a abordagem do problema de aresta proposto no estudo.

A fundação armada foi representada por um modelo simples composto por dois prismas, ambos com uma intensidade de magnetização de 30 A/m, o prisma raso (base em $z_1=1,5\text{m}$) com direção de magnetização apontando para baixo ($v_1=+1$) e o outro prisma (base em $z_2=10,0\text{m}$) com magnetização direcionada para cima ($v_2=-1$). O furo foi disposto a uma distância de 1,3 metro do lado mais próximo da estrutura, de modo que $(x_b, y_b)=(1.3, 0)$. A estrutura foi representada por um prisma de dimensões 2,0m x 2,0m. Para a inversão, definindo-se a magnetização de referência $\widetilde{M}_0 = 30$ A/m, foi tomado um intervalo $25 \leq \widetilde{M}_l \leq 35$ A/m para a intensidade de magnetização média desconhecida. O valor de referência $z_\mu=10$ m foi definido pelo pico profundo observado na derivada vertical do campo (Figura 4.1D). O parâmetro de desvio $z_\sigma=1$ m foi definido pela extensão do *ridge* profundo. A função peso (Equação 15) correspondente é mostrada na Figura 4.1B.

A inversão dos dados foi realizada utilizando-se 4 prismas ($N_p = 4$), iniciando a busca a partir de um conjunto de parâmetros aleatoriamente escolhidos dentro dos vínculos de barreira do problema. O algoritmo foi rodado 100 vezes ($k = 100$) com conjuntos de parâmetros iniciais distintos, os resultados comumente convergindo para modelos semelhantes à solução S_1 ou à solução S_2 desse caso, como dispostos na Figura 4.1.

Ambas soluções apresentam um ótimo ajuste na região de interesse dos da-

dos do modelo teórico NS1, como pode ser observado nas Figuras 4.1C e 4.1D. Todavia, as soluções mostram modelos substancialmente diferentes e com profundidades da base consideravelmente distintas. O modelo S_1 apresenta somente dois prismas na escala gráfica da figura devido à espessura quase nula dos outros dois, o que indica que, mesmo para uma inversão considerando $N_p = 4$, um modelo mais simples com somente 2 prismas é suficiente para representar a anomalia. Por sua vez, o modelo S_2 representa a variação profunda próxima à base como proveniente de uma mudança na direção de magnetização, e não como a base do prisma mais profundo. Ainda assim, o ajuste da resposta ao conjunto de dados é similar ao obtido pelo modelo S_1 . A profundidade da fundação é superestimada na solução S_2 (10,94 m) e precisamente estimada na solução S_1 (9,96 m). Dado que o programa tem interesse no ajuste de dados em grandes profundidades para detecção de base, o prisma raso representativo de influencias ruidosas superficiais não é recuperado com precisão para ambos os casos - o que mostra que tais ruídos superficiais são pouco sentidos em grandes profundidades.

A intensidade de magnetização da estrutura foi satisfatória para o modelo S_1 (margem de erro de 7%), mas foi subestimada no modelo S_2 . Esse resultado sugere a importância de se limitar a magnetização em um intervalo mais estreito, diminuindo-se as ambiguidades associadas. Entretanto, um intervalo mais amplo representa melhor casos práticos, onde tem-se um desconhecimento da intensidade de magnetização associada à estrutura. Os ajustes observados também permitem inferir que, pelo menos para essa simulação numérica, não se há a necessidade de se realizar uma inversão conjunta para ajuste da componente vertical e de sua derivada - uma vez que o ajuste da componente vertical (Figura 4.1C) garante automaticamente o ajuste de sua derivada vertical (Figura 4.1D).

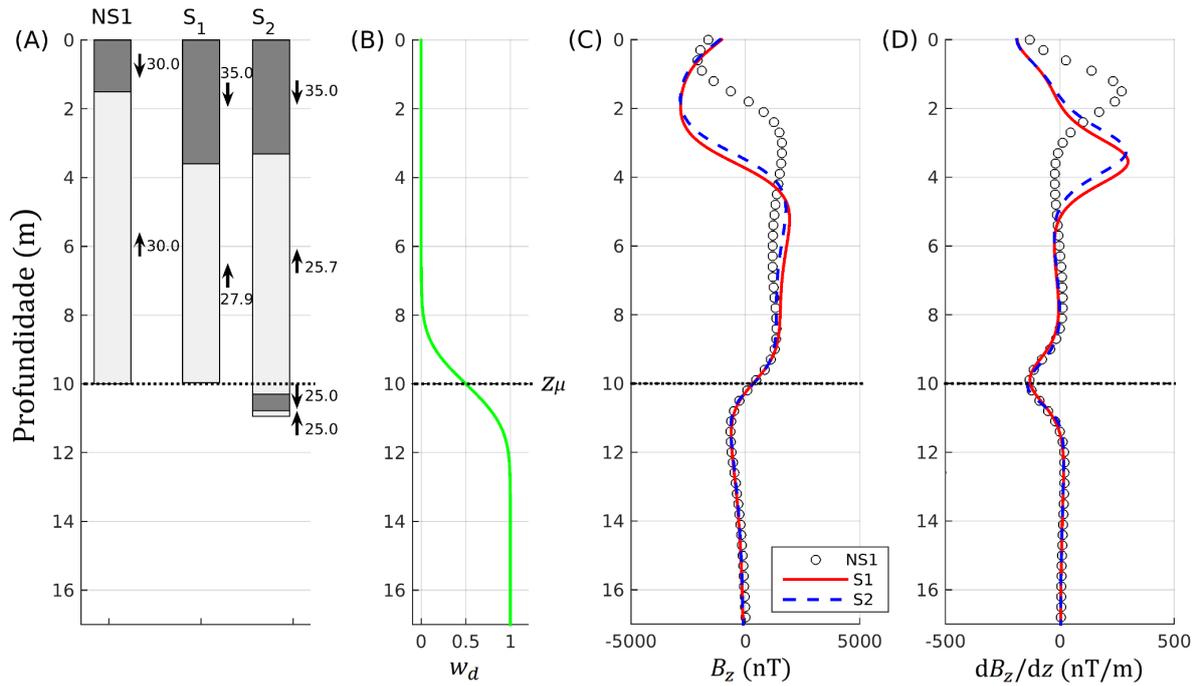


Figura 4.1: (A) Simulação numérica do modelo simples NS1 composto por dois prismas e soluções alternativas S_1 e S_2 obtidas pela inversão dos dados; intensidade de magnetização (em A/m) e direção de magnetização (flechas para cima e para baixo) estão anotadas para cada prisma. (B) Função peso de distribuição gaussiana cumulativa, centrada na profundidade $z_\mu=10$ m com faixa de tolerância $z_\sigma=1$ m. (C) Dados sintéticos (círculos) e ajuste aos dados dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul). (D) Derivada vertical do conjunto de dados sintéticos (círculos) e ajuste da derivada dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul).

Os resultados obtidos para o modelo NS1 mostram a possibilidade de modelos distintos com ajustes igualmente válidos para o mesmo conjunto de dados, havendo então uma ambiguidade associada ao problema. A representação dessa ambiguidade pode ser buscada mapeando-se a função objetivo, com abordagem tal como disposta na metodologia (subseção 3.5.6). O problema conta com $(3N_p + 1)$ dimensões, sendo impossível dispor uma representação gráfica. Para tanto, fixamos alguns dos parâmetros para representação de fatias. Considerando $N_p = 4$ (ver subseção 3.5.6), os parâmetros de direção de magnetização foram fixados como: $v_1 = +1$, $v_2 = -1$, $v_3 = +1$ e $v_4 = -1$. A profundidade

$z_1 = 1,5$ m foi fixada conforme o modelo imposto, assim como as intensidades de magnetização $\widetilde{M}_l=30$ A/m, $l=1:4$. Desse modo, tem-se uma representação simplificada, apenas para se possibilitar a observação da disposição dos mínimos (soluções alternativas) na função objetivo para uma mesma base de dados. O mapeamento da função objetivo é ilustrado na Figura 4.2 A, B e C, com valores de z_2 de 9,5 m, 10,0 m e 10,5 m, respectivamente. As imagens trazem variação dos valores de z_3 no eixo horizontal e dos valores de z_4 no eixo vertical, respeitando-se o vínculo do problema de que $z_4 \geq z_3$.

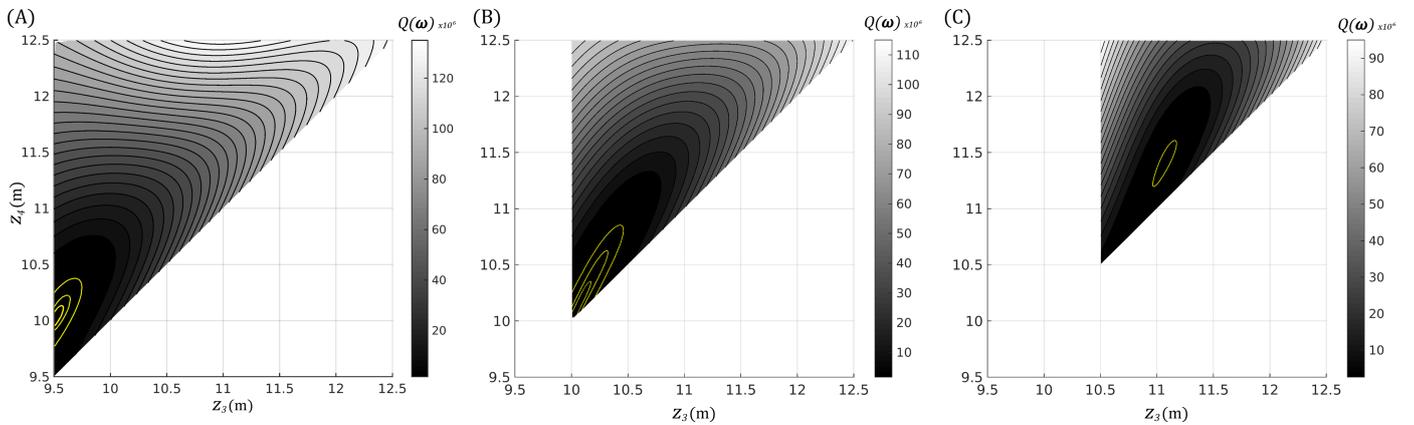


Figura 4.2: Mosaico de valores da função objetivo do modelo NS1 em função das profundidades dos prismas mais inferiores z_3 e z_4 , com profundidade do prisma intermediário z_2 fixada em: (A) 9,5 m; (B) 10,0 m; e (C) 10,5 m. Curva de nível de 3 a 1 ($\times 10^6$) demarcadas em amarelo com espaçamento unitário para representação da região de ajuste válido. As figuras (A) e (B) mostram a tendência para um mínimo com $z_3 \approx z_2$ e $z_4=10$ m, coincidente com o modelo numérico. A figura (C) mostra a existência de um mínimo alternativo com $z_3 > z_2$ e $z_4 \approx 11,3$ m, e portanto um ajuste com mudança de polarização e profundidade superestimada.

Assim como observado nos modelos obtidos pelo programa de inversão, a função objetivo $Q(\boldsymbol{\omega})$ apresenta altos valores (da ordem de 10^6) até mesmo para resultados que ajustam-se aos dados. Esses altos valores são provenientes das altas intensidades do campo associado ao problema e à potenciação ao quadrado desses valores de resíduo na definição da função objetivo. Ao rodar o programa algumas vezes, percebe-se que os modelos que se ajustam aos dados comumente

apresentam valores da função objetivo menores que 3×10^6 . Desse modo, linhas de contorno de 1 a 3 ($\times 10^6$) são traçadas para melhor caracterização das regiões de mínimo para a qual deve convergir a solução - a depender do conjunto de parâmetros iniciais tomados.

As representações gráficas obtidas mostram que, para $z_2=9,5\text{m}$ (Figura 4.2A), a função objetivo tende para um mínimo numa região onde $z_3=9,5\text{m}$ (terceiro prisma de espessura nula) e $z_4 \approx 10,0\text{m}$, sendo assim a representação de uma estrutura magneticamente homogênea em profundidade. Entretanto, as linhas de contorno admitem valores num intervalo com z_3 de 9,5 a 9,7m (possibilitando pequenas inomogeneidades) e z_4 de 9,8 a 10,35m. Para $z_3=10,0\text{m}$ (Figura 4.2B), a tendência do mínimo também é para uma profundidade de 10m, numa região onde ambos os prismas apresentam espessura nula ($z_3 \approx z_4 \approx 10,0\text{m}$). As linhas de contorno, por sua vez, mostram a possibilidade de ajuste para profundidades maiores da estrutura em ocasiões com inomogeneidades profundas, admitindo valores num intervalo z_3 de 10,0 a 10,4m e z_4 de 10,0 a 10,85m. Por fim, para a fixação de $z_2=10,5\text{m}$ (Figura 4.2C), mostra-se uma tendência para um outro mínimo numa região em que $z_3 \approx 11,1\text{ m}$ e $z_4 \approx 11,4\text{ m}$. Esse mínimo entretanto encontra-se dentro da curva de contorno de 3×10^6 , e portanto admite valor da função objetivo maior que 2×10^6 - mas ainda assim que se ajuste aos dados. A curva de contorno engloba uma região que admite valores num intervalo de z_3 de 10,95 a 11,15m e z_4 de 11,2 a 11,6m. É importante perceber que, dentro desse intervalo, os valores de z_3 sempre resultam num prisma de polarização oposta com espessura não nula, e portanto a necessidade de uma inomogeneidade profunda para permitir o ajuste da curva. Os resultados obtidos pela análise gráfica evidenciam a existência de mínimos locais para o problema de fundações, com modelos alternativos obtidos a depender do conjunto de parâmetros iniciais adotado. Essas considerações sugerem, então, que

existem ao menos duas soluções possíveis dentro da busca espacial na função objetivo: a de uma fundação mais rasa homogênea e a de uma fundação mais profunda com inhomogeneidade próxima à base. Ambas soluções foram obtidas pelo programa de inversão, e ajustam os dados sintéticos pois apresentam resposta magnética equivalente.

A simulação numérica do modelo NS1 ilustra um dos principais problemas que encontramos na interpretação de dados de perfilagem magnética para estimativa da profundidade de fundações: variações do campo similares à observada próxima à base da estrutura podem ser causadas por mudanças internas da estrutura e pela conseqüente oposição da direção de magnetização. Uma fundação mais profunda, como o modelo S_2 obtido, pode apresentar o comportamento de *ridge* associado a um contraste interno de magnetização ao invés do contraste da fundação com a formação encaixante. Ainda que diante de ambigüidades interpretativas, esses resultados mostram que a perfilagem magnética é sensível a mudanças na intensidade e direção de magnetização, transparecendo-se como um método promissor na avaliação de variações de porcentagem da seção transversal armada ou de disposição estrutural da armadura.

4.2 Modelo NS2 - Heterogeneidade profunda

O segundo modelo busca analisar a resposta de um caso com magnetização complexa em profundidade, apresentando mudança na direção de magnetização proveniente de heterogeneidade profunda. Novamente tem-se um prima raso representativo de anomalias ruidosas próximas à superfície. A fundação foi representada por um modelo composto por quatro prismas, todos com intensidade de magnetização de 30 A/m. O primeiro prisma (base em $z_1=1,5\text{m}$) apresenta direção de magnetização para baixo ($v_1=+1$) e representa o ambiente ruidoso próximo à superfície; o segundo prisma (base em $z_2=9,4\text{m}$) tem

direção de magnetização para cima ($v_2=-1$) e representa a extensão da estrutura sem heterogeneidades na armação; o terceiro prisma (base em $z_3=9,7\text{m}$) tem uma polarização oposta ($v_3=+1$) e representa o contraste ocasionado por uma heterogeneidade profunda; e o quarto prisma (base em $z_4=10,0\text{m}$) retoma a polarização normal ($v_4=-1$) e representa a continuidade da magnetização "normal" da fundação até a sua base. O furo foi disposto a uma distância de 1 metro do lado mais próximo da estrutura, de modo que $(x_b, y_b)=(1,0)$. A estrutura foi representada por um prisma de dimensões $2,0\text{m} \times 2,0\text{m}$. Para a inversão, assim como no primeiro modelo de simulação numérica, tomou-se um intervalo $25 \leq \widetilde{M}_l \leq 35 \text{ A/m}$. O valor de referência $z_\mu=9,1 \text{ m}$ foi definido pelo pico profundo disposto na derivada vertical do campo (Figura 4.3D), com parâmetro de desvio $z_\sigma=1 \text{ m}$. Observa-se que esse é um caso típico onde a estimativa qualitativa não coincide com a profundidade real, assim como observado em algumas aplicações de campo - as quais motivaram em parte o presente estudo.

Observando-se a eficiência de uma representação estrutural com quatro prismas, o parâmetro N_p foi novamente fixado como 4. Os resultados obtidos para diversos conjuntos de parâmetros iniciais comumente convergiram para modelos semelhantes às soluções S_1 ou S_2 , dispostas na Figura 4.3. Ambas soluções apresentam bom ajuste na região de interesse, como pode ser observado nas Figuras 4.3C e 4.3D. Entretanto, isso se deve novamente a uma ambiguidade entre um modelo homogêneo mais raso e um modelo mais profundo com mudança no comportamento magnético próximo à base. O modelo S_1 apresenta um modelo simples com somente dois prismas e profundidade subestimada (9,35 m). O modelo S_2 apresenta quatro prismas e a mudança de polarização profunda esperada, com uma profundidade da estrutura estimada precisamente (10,02 m). Nota-se a inexistência do prisma raso no modelo S_2 evidenciando a irrelevância dos ruídos superficiais para ajuste na região de interesse, tendo-se um prisma

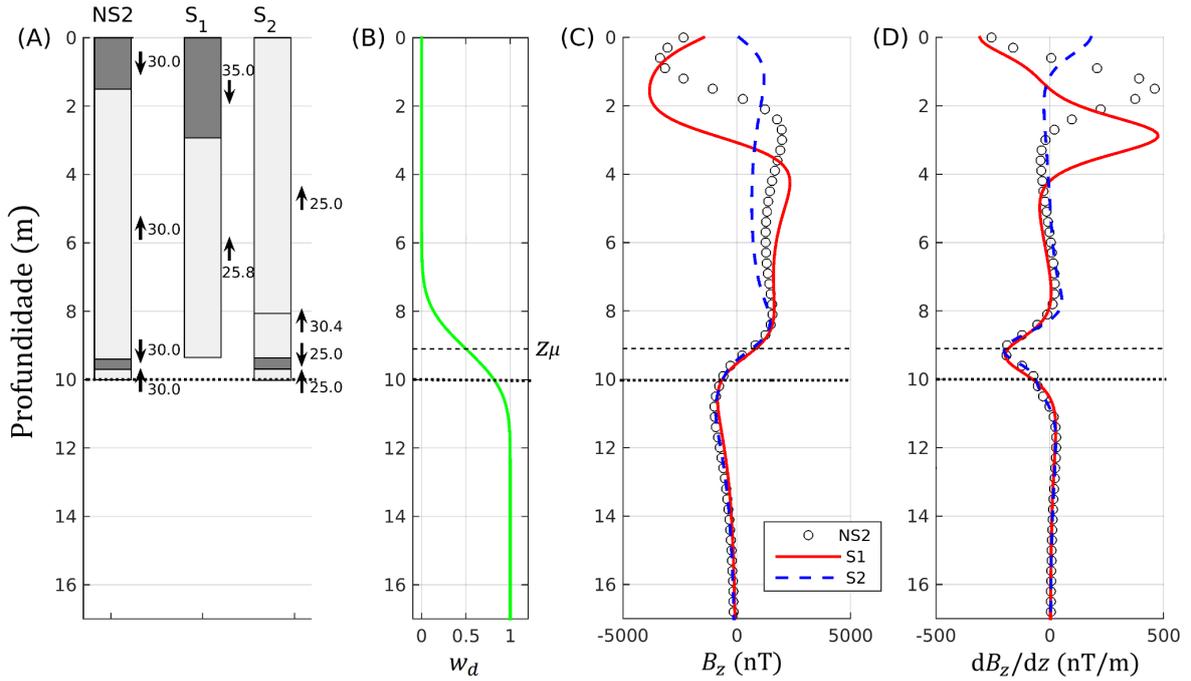


Figura 4.3: (A) Simulação numérica do modelo complexo NS2 composto por quatro prismas e soluções alternativas S_1 e S_2 obtidas pela inversão dos dados; intensidade de magnetização (em A/m) e direção de magnetização (flechas para cima e para baixo) estão anotadas para cada prisma. (B) Função peso de distribuição gaussiana cumulativa, centrada na profundidade $z_\mu=9,1$ m com faixa de tolerância $z_\sigma=1$ m. (C) Dados sintéticos (círculos) e ajuste aos dados dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul). (D) Derivada vertical do conjunto de dados sintéticos (círculos) e ajuste da derivada dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul).

com intensidade próxima à esperada ($\widetilde{M}_2=30,4$ A/m) sendo suficiente para recuperar a amplitude. O ajuste da derivada vertical (Figura 4.3D) se mostra ligeiramente melhor para o modelo S_2 , demonstrando a importância da análise do decaimento da curva após o último pico da derivada. Entretanto, ambos os ajustes de dados podem ser considerados satisfatórios, ainda mais considerando que, para casos reais, diferenças tão pequenas nas curvas podem estar associadas a ruídos pontuais na tomada de dados.

Para a análise gráfica, fixaram-se a maioria dos parâmetros desconhecidos - tal como proposto na metodologia e aplicado na primeira simulação numérica - de modo a permitir uma representação visual com um número de dimensões

palpável. As direções de magnetização foram fixadas em $v_1 = +1$, $v_2 = -1$, $v_3 = +1$ e $v_4 = -1$. A profundidade $z_1 = 1,5$ m foi fixada conforme o modelo imposto, assim como as intensidades de magnetização $\widetilde{M}_l=30$ A/m, $l=1:4$. As plotagens estão dispostas na Figura 4.4 A, B e C, com valores de z_2 de 9,0 m, 9,4 m e 9,8 m, respectivamente.

Novamente, são traçadas linhas de contorno de 1 a 3 ($\times 10^6$) com espaçamento unitário para caracterização das regiões de mínimo para a qual um conjunto de parâmetros inicial tende a convergir. Nota-se, pela Figura 4.4A, a existência de um mínimo em torno de uma região com $z_3 \approx 9,1$ m e $z_4 \approx 9,6$ m, um modelo com representação de polarização oposta quase irrelevante (espessura em torno de 0,1 m) e uma estrutura com base mais rasa que o modelo real. Entretanto, apresenta uma região de ajuste no intervalo de z_3 de 9,0 a 9,35m e z_4 de 9,1 a 9,9m, mostrando até mesmo possibilidade de ajuste com profundidade bem próxima do modelo real. A Figura 4.4B mostra a tendência para uma região de mínimo condizente com o modelo real, com valores de $Q(\boldsymbol{\omega})$ dentro de uma curva de contorno com valores menores em relação aos outros casos (mínimo global). Todavia, dentro das curvas de ajuste válido, pode apresentar profundidades de z_4 num intervalo de 9,4 a 10,4m. A Figura 4.4C mostra ainda a existência de mínimos locais para representações com um prisma com polarização oposta mais espesso (z_3 variando de 10,0 a 10,4m, com mínimo local em torno de 10,3m) e uma profundidade da fundação ainda maior que a do modelo real ($z_4 \approx 10,7$ m para o mínimo local, mas com um intervalo variando de 10,0 a 10,95m). Entretanto, tal mínimo não deve ajustar os dados tão bem quanto os demais, uma vez que nenhum modelo similar a este foi obtido em mais de 100 aplicações do algoritmo ao conjunto de dados sintéticos.

A simulação numérica do modelo NS2 reforça os resultados obtidos na simulação numérica do modelo NS1, comprovando que a curva associada a uma es-

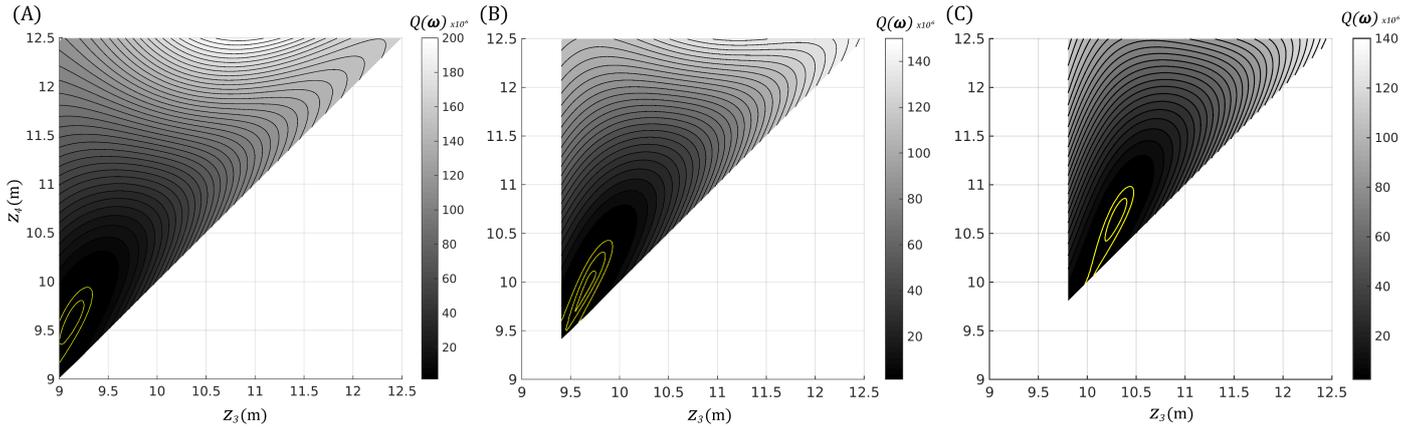


Figura 4.4: Mosaico de valores da função objetivo do modelo NS2 em função das profundidades dos prismas mais inferiores z_3 e z_4 , com profundidade do prisma intermediário z_2 fixada em: (A) 9,0 m; (B) 9,4 m; e (C) 9,8 m. Curva de nível de 3 a 1 ($\times 10^6$) demarcadas em amarelo com espaçamento unitário para representação da região de ajuste. As figura (A) mostra a possibilidade de um ajuste num mínimo sem mudança de polarização, numa profundidade subestimada. A figura (B) mostra um outro mínimo, com mudança de polarização profunda e resultado equivalente ao modelo numérico. A figura (C) apresenta a possibilidade de um terceiro ponto de mínimo, o qual superestima a profundidade com um prisma de polarização oposta mais espesso que o do modelo numérico.

trutura com heterogeneidade magnética profunda é facilmente confundida com a de uma fundação homogênea mais rasa e que, para tais casos, a estimativa qualitativa é ineficiente.

4.3 Modelo NS3 - Proximidade ao furo

O terceiro modelo visa compreender melhor os resultados da perfilagem magnética para furos mais próximos à fundação. O modelo NS3 inferido é similar ao modelo NS1, de modo a permitir uma comparação dos resultados obtidos que embasa uma análise sobre a influência da proximidade dos furos no conjunto de dados. Desse modo, a fundação foi representada por um prisma raso (base em $z_1=1,5$ m) com direção de magnetização para baixo ($v_1=+1$) seguido por um prisma extenso (base em $z_2=10,0$ m) com direção de magnetização para cima ($v_2=-1$), ambos com intensidade de magnetização de 30 A/m. O furo foi

posicionado a uma distância de 30 centímetros do lado mais próximo da estrutura, 1 metro mais próximo que o modelo NS1, sendo assim $(x_b, y_b)=(0.3,0)$. Novamente, as dimensões da estrutura foram tomadas como 2,0m x 2,0m. Para a inversão, o intervalo de magnetização foi inferido por $25 \leq \widetilde{M}_l \leq 35$ A/m. O valor de referência $z_\mu=10$ m foi tomado como o pico profundo claramente demarcado na curva da derivada vertical do campo (Figura 4.5D). O parâmetro desvio foi novamente tomado por $z_\sigma=1$ m, fornecendo uma curva da função peso em função da profundidade tal como disposta na Figura 4.5B.

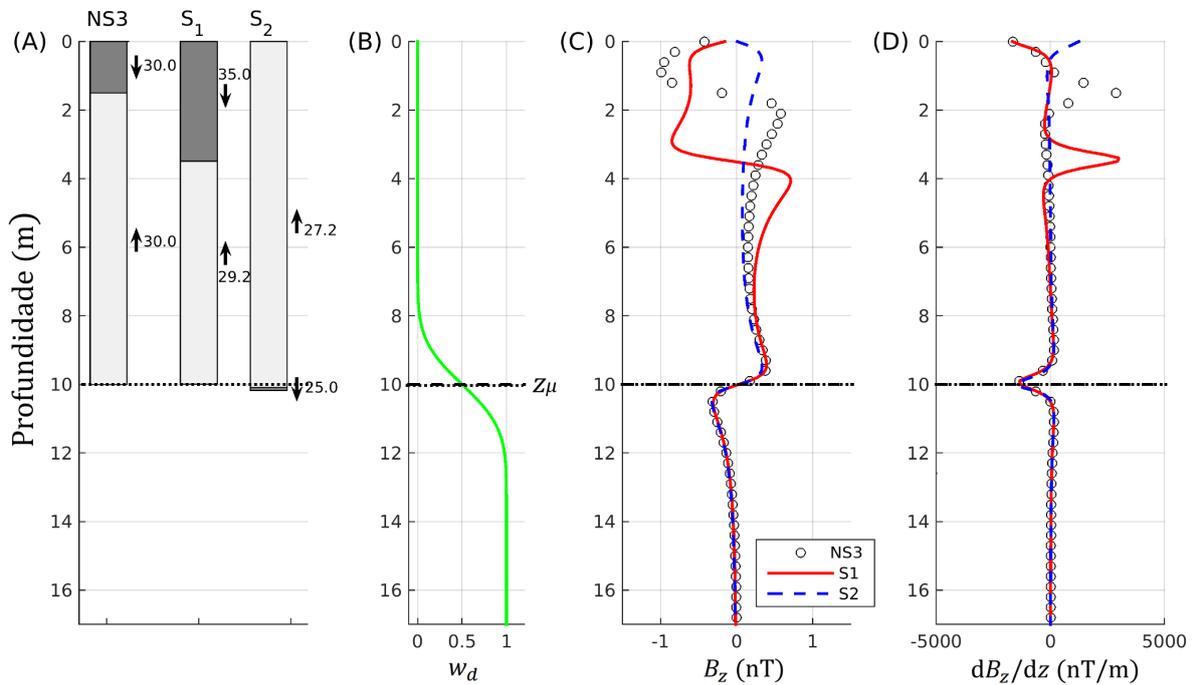


Figura 4.5: (A) Simulação numérica do modelo simples NS3 próximo ao furo e composto por dois prismas, com soluções similares S_1 e S_2 obtidas pela inversão dos dados; intensidade de magnetização (em A/m) e direção de magnetização (flechas para cima e para baixo) estão anotadas para cada prisma. (B) Função peso de distribuição gaussiana cumulativa, centrada na profundidade $z_\mu=10,0$ m com faixa de tolerância $z_\sigma=1$ m. (C) Dados sintéticos (círculos) e ajuste aos dados dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul). (D) Derivada vertical do conjunto de dados sintéticos (círculos) e ajuste da derivada dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul).

Para a inversão, novamente definiu-se $N_p=4$ para observação de possíveis modelos alternativos. Os resultados obtidos para 50 execuções do programa

($k=50$) convergiram para modelos semelhantes às soluções S_1 ou S_2 , que também se assemelham muito entre si quanto à profundidade da estrutura, fornecendo sempre ótimo ajuste à curva de dados sintéticos na região de interesse (Figura 4.5). O modelo S_1 apresenta um prisma mais raso não coincidente com o disposto no modelo NS1 e outro prisma com intensidade de magnetização muito próxima à do modelo de entrada e profundidade precisamente estimada ($z_2=9,99$ m). Para o modelo S_2 , não há a presença do prisma raso e há um prisma pouco espesso ($\approx 0,09$ m) na região basal com polarização oposta, tendo-se uma estrutura ligeiramente mais profunda ($z_2=10,18$ m) do que o modelo de entrada. Ainda para S_2 , a intensidade de magnetização é subestimada, novamente evidenciando que um intervalo mais estreito diminuiria as ambiguidades nos resultados. Para ambos os casos, a falta de concordância do modelo (e das curvas) em profundidades rasas não compromete o ajuste na profundidade de interesse, reforçando a irrelevância dos comportamentos magnéticos próximos à superfície.

A análise gráfica para a função objetivo foi realizada com a mesma abordagem, fixando-se as direções de magnetização $v_1 = +1$, $v_2 = -1$, $v_3 = +1$ e $v_4 = -1$, as intensidades de magnetização $\widetilde{M}_l=30$ A/m, $l=1:4$, e a profundidade do prisma mais raso $z_1=1,5$ m. As plotagens estão dispostas na Figura 4.6 A, B e C, com valores de z_2 de 9,5 m, 10,0 m e 10,5 m respectivamente. Para esse caso, optou-se por traçar as linhas de contorno de 1 a 10 ($\times 10^6$), dado que a região de ajuste é muito estreita e a área coberta por valores menores que 3×10^6 é quase imperceptível na escala. Desse modo, observa-se claramente as regiões de ajuste muito bem definidas, com z_4 em torno de 9,9 e 10,1m na Figura 4.6A e em torno de 10,0 e 10,25m na Figura 4.6B - retomando com grande precisão a profundidade de 10m do modelo.

A comparação entre as regiões de mínimo dispostas na análise gráfica do

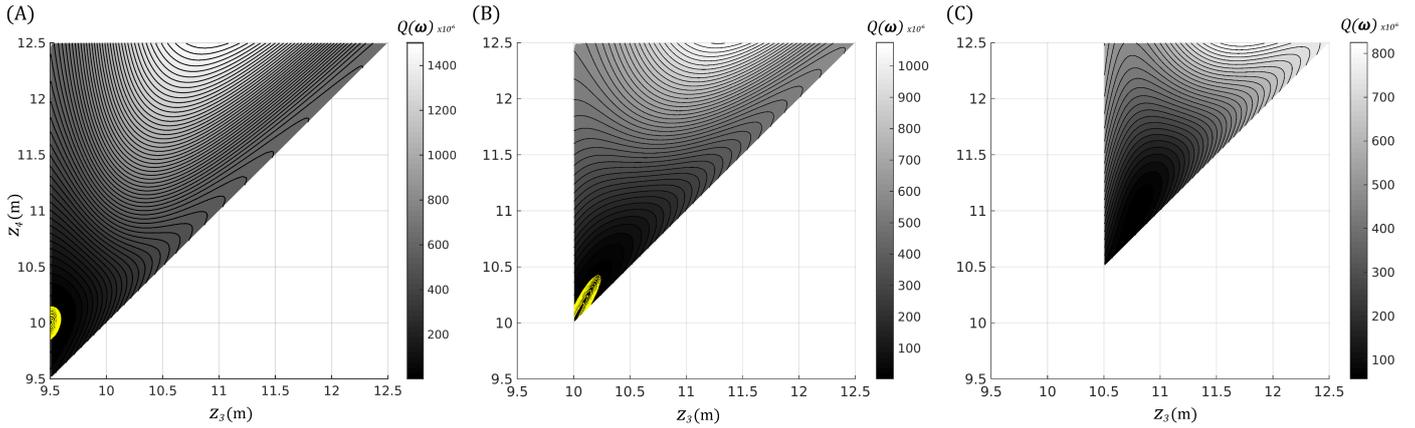


Figura 4.6: Mosaico de valores da função objetivo do modelo NS3 em função das profundidades dos prismas mais inferiores z_3 e z_4 , com profundidade do prisma intermediário z_2 fixada em: (A) 9,5 m; (B) 10,0 m; e (C) 10,5 m. Curva de nível de 1 a 10 ($\times 10^6$) demarcadas em amarelo com espaçamento unitário para representação da região de convergência. As figuras (A) e (B) mostram a tendência para um mínimo com $z_3 \approx z_2$ e $z_4=10$ m, coincidente com o modelo numérico. A figura (C) não apresenta nenhum valor abaixo de 10×10^6 , indicando a inexistência nessa fatia de modelos que ajustem os dados.

problema NS3 em relação ao problema NS1 fortalece os resultados obtidos na inversão: diante da proximidade do furo, as ambiguidades antes apresentadas não são mais notadas. Isso deve-se muito provavelmente ao fato de que, para um furo mais distante, anomalias tais como a de uma heterogeneidade profunda se apresentam de forma muito mais suave - como pode ser observado na comparação entre as derivadas, com variação muito mais brusca para o caso NS3. As Figuras 4.6A e B mostram uma região de mínimo muito mais estreita e limitada, justificando os valores de profundidade obtidos na inversão sempre muito próximos ao esperado. A Figura 4.6C mostra que, para uma estrutura mais profunda do que o modelo real, a existência de uma mudança de polarização profunda marcante não é suficiente para também ajustar o conjunto de dados sintéticos - não apresentando sequer linhas de contorno igual ou menores a 10×10^6 .

5 Estudos de caso

Neste capítulo, serão apresentados três estudos de caso da aplicação de perfilagem magnética na determinação da profundidade de fundações armadas. Os ensaios foram realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) sob contrato da empresa American Tower. Em todos os casos, a avaliação da profundidade das fundações foi requisitada diante da demanda da expansão das redes de telecomunicação atendidas na região, instalando-se novas antenas e aumentando-se portanto a carga a ser suportada pela torre. Os casos apresentados resumem a nossa experiência na avaliação de mais de 8 casos utilizando o método da perfilagem magnética como ferramenta auxiliar na investigação. Os dados magnéticos foram obtidos por um sensor magnético fluxgate interno a uma sonda Robertson Geologging Optical Televiewer (OPTV). As tomadas tiveram espaçamento de 1 cm, mas foram rearranjados para 10 cm para otimizar a inversão. Os dados do método paralelo sísmico, aqui dispostos para comparação dos resultados, foram obtidos com a utilização de geofones de frequência 8 Hz dispostos ao longo do furo com espaçamento de 50 cm. Os sismogramas foram registrados por um sismômetro SmartSeis (Geometrics) de 12 canais e 32 bits. As inversões foram todas realizadas fixando-se $N_p = 4$, tal como para as simulações numéricas. A escolha por $N_p = 4$ se justifica por ser o menor número de prismas para, sobre um modelo base com $N_p = 2$, poder se representar um intervalo heterogêneo em profundidade. Para inversões realizadas com $N_p \geq 5$, os modelos obtidos são similares aos obtidos com $N_p = 4$ e os prismas adicionais ou ficam distribuídos em profundidades rasas (sem influência na região de interesse) ou apresentam espessura nula.

5.1 Caso 1 - Jardim São Luis

O primeiro local de realização dos ensaios foi a estação SPO063SS (IPT, 2014), situada no bairro Jardim São Luis, no município de São Paulo - SP. Trata-se de uma torre de telecomunicação sustentada por uma fundação do tipo tubulão com diâmetro de 2,3 m. O furo foi realizado a uma distância de 1,2 m do lado norte da fundação (como disposto na planta da fundação, Figura 5.1A), estendeu-se em profundidade até 15 m - visando exceder a profundidade da fundação - e foi revestido com um tubo impermeável de PVC, com diâmetro externo de 85,0 mm e diâmetro interno de 75,6 mm. O espaço anelar foi preenchido com calda de cimento, também utilizada no tamponamento da extremidade inferior dos tubos. Duas sondagens mais profundas para caracterização estratigráfica foram realizadas e mostraram a ocorrência de silte argilo-arenoso ao longo de todo o perfil, com resistência crescente ao longo de sua profundidade. O nível d'água foi demarcado a uma profundidade de 19,6 m.

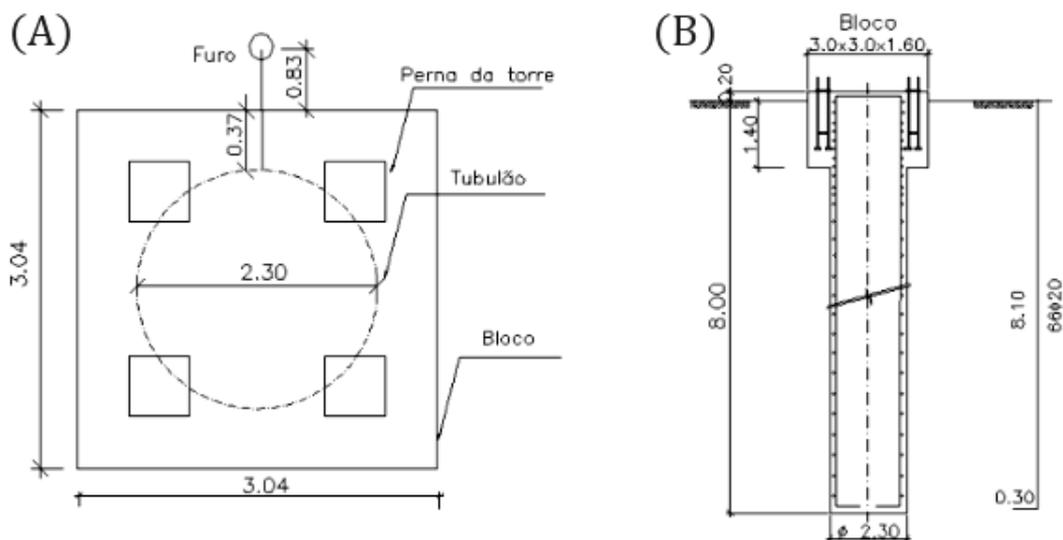


Figura 5.1: Geometria da fundação da torre em Jardim São Luis segundo *as-built* (A) em planta, com posicionamento do furo e (B) em corte, demonstrando a profundidade de 8 metros da construção.

O Caso 1 trata de uma torre para a qual a profundidade da fundação é conhecida, e seu estudo visa analisar os resultados da abordagem aqui proposta para um caso real controlado. O relatório *as-built*, que se refere ao relatório da construção realizado após finalização da obra, indica uma profundidade de 8 m para a fundação e uma armação integral (Figura 5.1B). O método paralelo sísmico, realizado no mesmo furo da perfilagem magnética, estimou precisamente a profundidade como 8.0 m (Figura 5.2) pelo contraste de uma velocidade por volta de 4000 m/s - referente ao tubulão - para uma velocidade de 455 m/s - referente aos sedimentos finos da bacia de São Paulo.

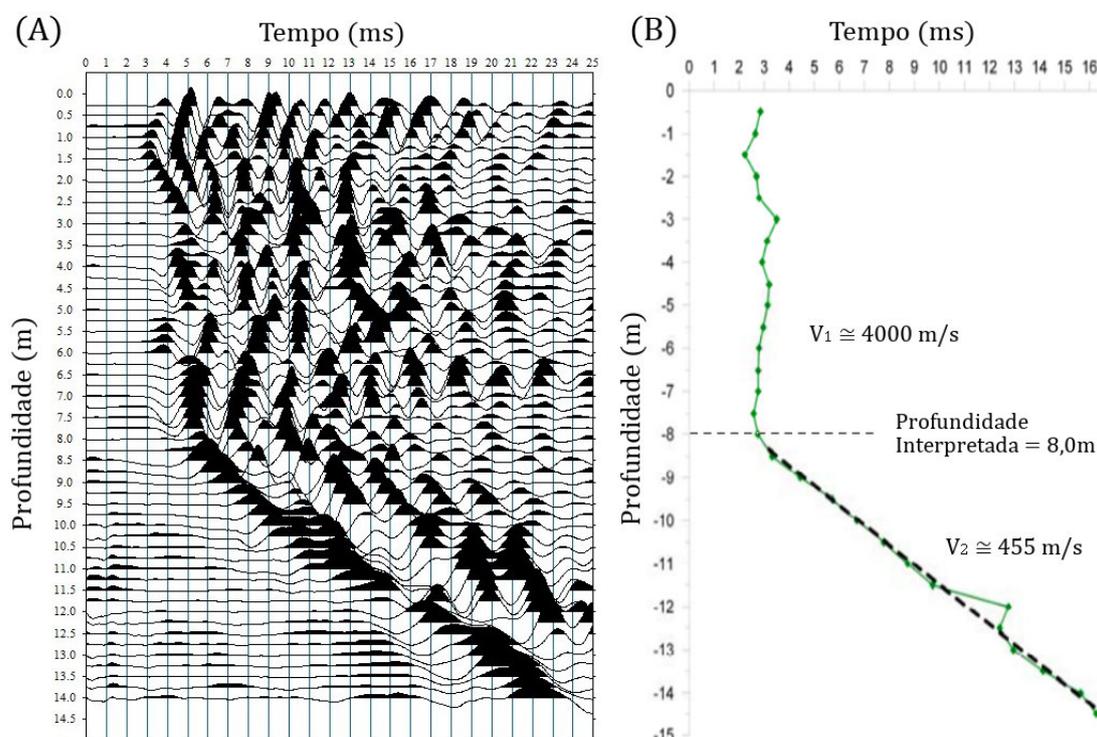


Figura 5.2: (A) Sismograma obtido pelo ensaio paralelo sísmico para o site em Jardim São Luis; (B) Plotagem das primeiras chegadas pickadas para cada um dos geofones, com a profundidade estimada em 8,0 m.

O conjunto de dados obtidos por perfilagem magnética (círculos na Figura 5.3C) mostra um comportamento não característico da curva, não apresentando um *ridge* profundo e nenhum outro tipo de variação característica próxima à

profundidade conhecida da fundação. Trata-se de uma situação típica para qual as estimativas qualitativas, baseadas em variações de alta amplitude em B_z ou em sua derivada vertical, podem ser errôneas. Para a inversão, o primeiro passo é a determinação de uma magnetização média \widetilde{M}_0 para permitir a determinação dos limites dos valores de intensidade de magnetização. \widetilde{M}_0 foi estimado como 90 A/m por tentativa e erro de ajuste da amplitude com um modelo simples de dois prismas. O intervalo foi então definido como $81 \leq \widetilde{M}_l \leq 99$ A/m, permitindo uma variação de $\pm 10\%$ da média estimada. A profundidade estimada qualitativamente $z_\mu=6,5$ m foi definida mantendo-se o critério do último pico de dB_z/dz , mesmo conhecendo-se a profundidade real de 8,0 m pelo *as-built*. O parâmetro $z_\sigma=1$ m foi definido por padrão, e não foi maior pois não há evidência nos dados para se imaginar uma estimativa mais profunda e nem o comportamento de *ridge* comumente observado (Dong et al., 2011). A função peso (Figura 5.3B) mostra que um ajuste prioritário é dado para o decaimento da curva em altas profundidades, e que o ajuste é irrelevante até uma profundidade em torno de 5 m. Aplicados tais parâmetros e vínculos e assumindo-se $N_p=4$, o algoritmo de inversão foi rodado 100 vezes, convergindo para soluções tais como S_1 ou S_2 (Figura 5.3).

Nota-se que a solução S_2 estima a profundidade com boa precisão (7,9 m) apesar de apresentar mudanças de polarização próximo à base da estrutura. A solução S_1 por sua vez retorna um valor incorreto para a profundidade da base (6,5 m), mas também apresenta um ótimo ajuste da resposta aos dados observados.

Conforme apresentado na Figura 5.3 os resultados da análise para o Caso 1 poderiam ser tratados como inconclusivos, uma vez que obtém-se uma estimativa errônea pelo procedimento qualitativo (ponto de amplitude máxima em profundidade para a derivada vertical) ou então representações não únicas

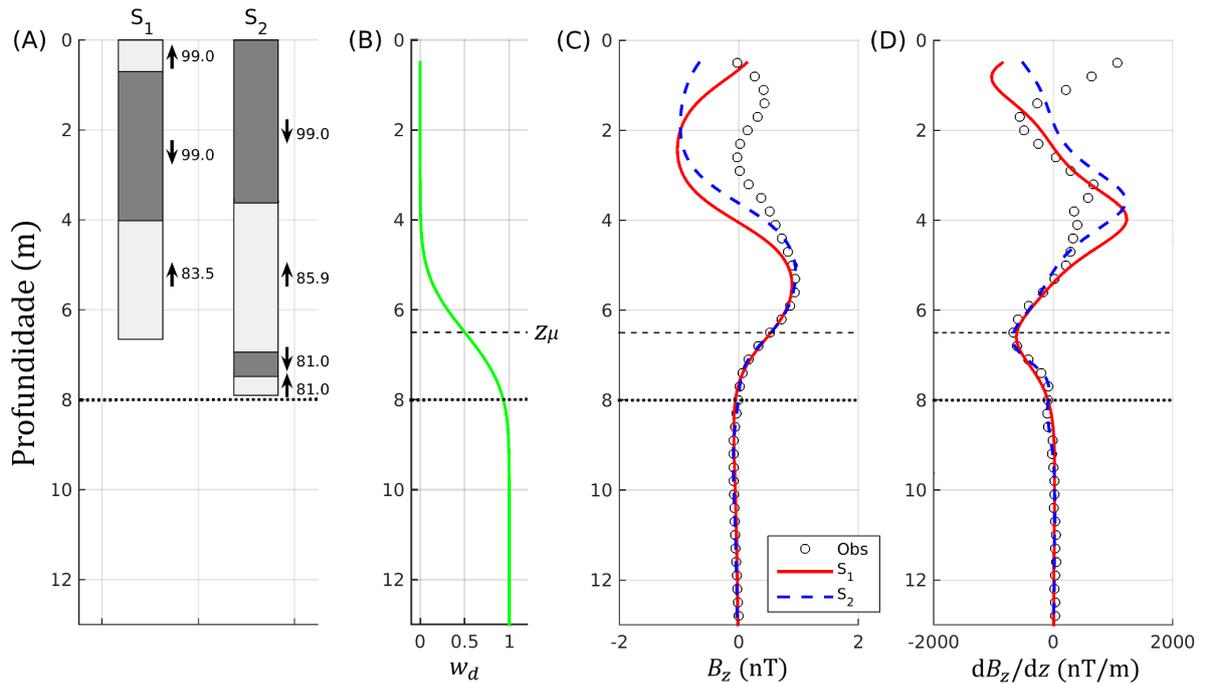


Figura 5.3: Resultados para o Caso 1, em Jardim São Luis, com profundidade real (linha pontilhada) definida pelo *as-built*. (A) Modelos de magnetização alternativos S_1 e S_2 obtidos pela inversão dos dados; intensidade de magnetização (em A/m) e direção de magnetização (flechas para cima e para baixo) estão anotadas para cada prisma. (B) Função peso de distribuição gaussiana cumulativa, centrada na profundidade $z_\mu=6,5$ m (linha tracejada) com faixa de tolerância $z_\sigma=1$ m. (C) Dados observados (círculos) e ajuste aos dados dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul). (D) Derivada vertical do conjunto de dados observados (círculos) e ajuste da derivada dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul).

(soluções S_1 e S_2) pelo procedimento quantitativo de inversão. Um outro ponto de vista pode ser levado em consideração partindo-se do pressuposto de que os resultados obtidos pelo método paralelo sísmico (PS) são sempre uma boa inferência da profundidade da fundação para casos com contraste de velocidade. Dessa forma, a solução S_1 pode ser descartada por ser inconsistente com a profundidade obtida pelo paralelo sísmico (8,0 m). Por sua vez, a solução S_2 expressa não só a possibilidade do ajuste magnético para a profundidade determinada pelo PS, mas também caracteriza uma heterogeneidade na disposição da armação em profundidade. A intensidade de magnetização na região de

mudança de polarização é equivalente para ambos os prismas (81 A/m), e não caracteriza mudanças na porcentagem da seção transversal armada na porção profunda.

A mudança de polarização pode portanto representar variação na disposição dos módulos compondo a armação. Embora análises visuais de tais inhomogeneidades sejam impraticáveis devido à inviabilidade de escavação, a interpretação do comportamento anômalo por variações internas e consequente escape de fluxo magnético baseia-se em trabalhos publicados sobre a magnetização de estruturas de aço (Atherton et al., 1983; Hillemeier e Scheel, 1998; Dong et al., 2011). A interpretação conjunta dos métodos magnético e sísmico contribuem para uma melhor compreensão e caracterização da estrutura desconhecida, uma realização promissora do presente estudo e difícil de se alcançar sem uma análise aprofundada dos dados coletados.

5.2 Caso 2 - Campo Largo

O segundo local de realização dos ensaios foi a estação CLG002B3 (IPT, 2019a), situada no município de Campo Largo - PR. Trata-se de uma torre de telecomunicação sustentada por uma fundação do tipo estacas raiz, contendo quatro estacas com 0,41 m de diâmetro cada dispostas próximas aos vértices de um bloco de concreto retangular com dimensões 1,8 x 2,2 m. O furo foi realizado a uma distância de 0,65 m do lado norte da fundação (como disposto na planta da fundação, Figura 5.4A), estendeu-se em profundidade até 23,5 m - visando exceder a profundidade da fundação - e foi revestido com um tubo impermeável de PVC, com diâmetro externo de 85,0 mm e diâmetro interno de 75,6 mm. O espaço anelar foi preenchido com calda de cimento, também utilizada no tamponamento da extremidade inferior dos tubos. Duas sondagens a percussão com ensaio SPT foram realizadas no local, com os boletins de campo

descrevendo a presença de uma argila plástica arenosa a pouco arenosa até 5,7 m de profundidade, seguida de uma argila siltosa a arenosa com dureza crescente até profundidade de 14 a 15 m. Abaixo dessa profundidade, tem-se uma camada de argila silto-arenosa rija a dura com fragmentos de rocha e caulim, até uma profundidade em torno de 20 m onde as sondagens atingiram a rocha dura. O nível d'água é raso na região, e foi encontrado entre 1,6 a 1,9 m de profundidade.

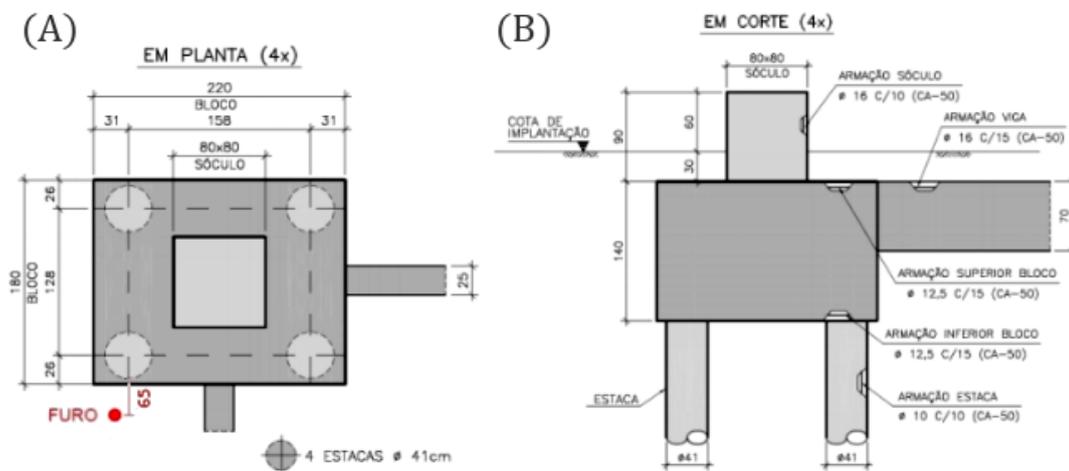


Figura 5.4: Geometria da fundação da torre em Campo Largo (A) em planta, com o posicionamento do furo utilizado na perfilagem e (B) em corte, com as dimensões do bloco e das estacas mas sem informações a respeito da profundidade.

O Caso 2 trata de um site para o qual a profundidade da fundação é desconhecida, mas o resultado do teste paralelo sísmico se apresenta de forma satisfatória para estimativa da profundidade, com grande contraste de velocidade entre a fundação e a rocha encaixante. A inexistência de dados referentes à profundidade no corte da fundação (Figura 5.4B) caracteriza um problema real sobre o qual o método de perfilagem magnética foi empregado. O método paralelo sísmico, realizado no mesmo furo da perfilagem magnética, estimou uma profundidade de 13,5 m para a base da fundação, claramente demarcado por um contraste de velocidade de propagação da onda de 3466 m/s no concreto

da estaca para 1766 m/s na argila do entorno (Figura 5.5).

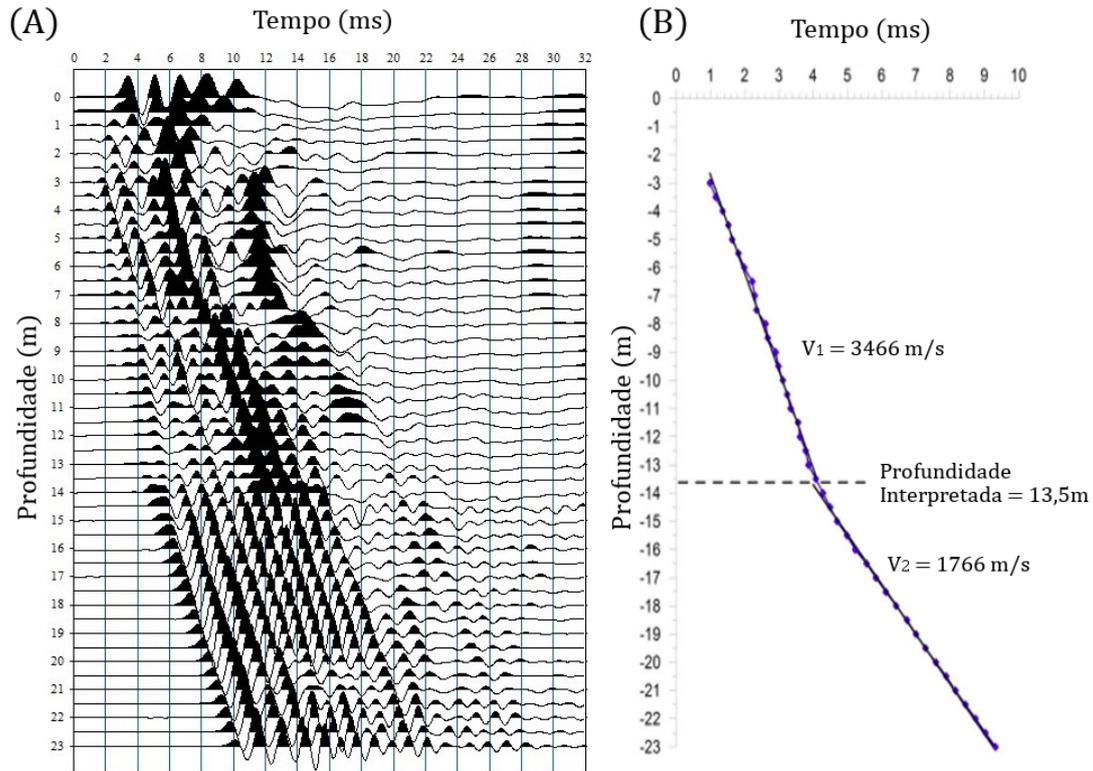


Figura 5.5: (A) Sismograma obtido pelo ensaio paralelo sísmico para o site em Campo Largo; (B) Plotagem das primeiras chegadas pickadas para cada um dos geofones, com a profundidade estimada em 13,5 m.

Para realização da inversão $\widetilde{M}_0=20$ A/m foi inferido, novamente estimado por ajuste da amplitude profunda para um modelo simples com dois prismas. As intensidades foram então limitadas num intervalo amplo ($\pm 25\%$), de modo que $15 \leq \widetilde{M}_l \leq 25$ A/m. Seguindo os mesmos critérios dos exemplos anteriores os parâmetros da função peso foram definidos como $z_\mu=12,5$ m e $z_\sigma=1$ m, garantindo a busca do ajuste da curva focada em profundidades maiores que 11m (Figura 5.6B).

Assim como para o Caso 1 (Jardim São Luis), duas soluções distintas (S_1 e S_2) se mostraram possíveis, ambas obtidas pela inversão com $N_p=4$ - ainda que os resultados apresentem soluções com um ou mais prismas com espessura irrelevante. Como pode-se perceber na Figura 5.6, S_1 apresentou profundidade

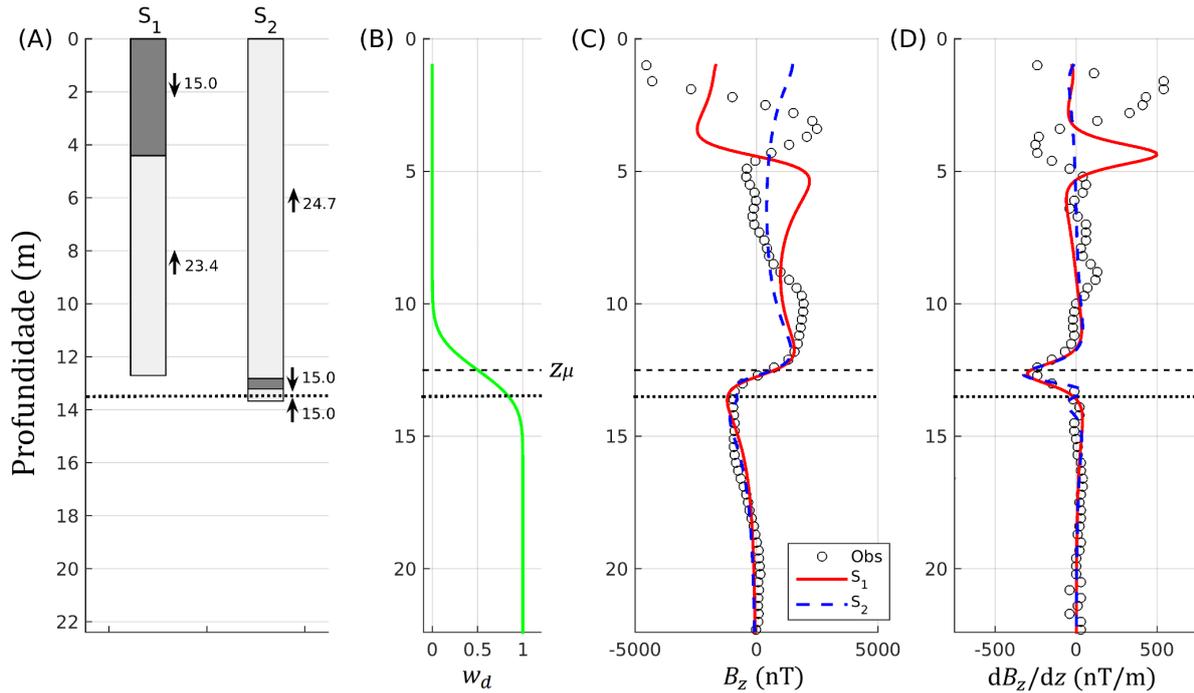


Figura 5.6: Resultados para o Caso 2, em Campo Largo, com profundidade real (linha pontilhada) definida pelo método PS. (A) Modelos de magnetização alternativos S_1 e S_2 obtidos pela inversão dos dados; intensidade de magnetização (em A/m) e direção de magnetização (flechas para cima e para baixo) estão anotadas para cada prisma. (B) Função peso de distribuição gaussiana cumulativa, centrada na profundidade $z_\mu=12,5$ m (linha tracejada) com faixa de tolerância $z_\sigma=1$ m. (C) Dados observados (círculos) e ajuste aos dados dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul). (D) Derivada vertical do conjunto de dados observados (círculos) e ajuste da derivada dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul).

estimada em 12,70 m e S_2 profundidade em 13,67 m, a segunda satisfatoriamente próxima à profundidade de 13,5 m estimada pelo método PS. A profundidade estimada qualitativamente ($z_\mu=12,5$ m) pelo pico mais profundo da derivada da componente vertical é próxima à obtida pelo modelo simples S_1 , ambas retornando uma profundidade subestimada em relação ao esperado. Assim como no Caso 1, a solução S_2 representativa da estrutura prevê uma mudança da direção de polarização da magnetização da estrutura próxima à sua base. É interessante observar que, se comparado com o Caso 1, a intensidade de magnetização obtida no Caso 2 é da ordem de quatro vezes menor, possivelmente associado a uma

menor porcentagem armada - sugerindo que o conteúdo armado do concreto pode variar caso a caso e a depender do tipo de fundação. De fato, segundo as normas técnicas brasileiras para projeto de estruturas de concreto (ABNT, 2014), a seção transversal armada deve apresentar de 0,4% a 8,0% da seção real. Analisando-se a fórmula da magnetização média ($\widetilde{\mathbf{M}} \approx \sum_{l=1}^N V_l \mathbf{M}_l / V_p$), esse intervalo de variação do percentual armado possibilita valores de magnetização média $\widetilde{\mathbf{M}}$ até 20 vezes maior de um site para outro, considerando-se $\sum_{l=1}^N V_l / V_p \approx 0,004$ e $0,08$ (a magnetização das barras \mathbf{M}_l assumida constante). O tipo de fundação, entretanto, não apresenta relação com o fenômeno de escape de fluxo representado por polarização oposta em profundidade - uma vez que tanto o Caso 1 quanto o Caso 2, com tipos distintos de fundação, apresentaram modelos com tal fenômeno.

5.3 Caso 3 - Niterói

O terceiro local de realização dos ensaios foi a estação NTI005VV (IPT, 2019b), situada no município de Niterói - RJ. Trata-se de um poste de telecomunicação sustentado por uma fundação do tipo estacas raíz, contendo oito estacas com 0,25 m de diâmetro cada, as estacas dispostas nas bordas de um bloco de concreto retangular com dimensões 3,0 x 3,0 m. O furo foi realizado a uma distância de 0,30 m do lado sul da fundação (como disposto na planta da fundação, Figura 5.7A) e estendeu-se em profundidade até 11,6 m. Embora a expectativa fosse de um furo mais profundo, a presença de rocha dura impenetrável impediu a continuidade da perfuração. O furo foi revestido com um tubo impermeável de PVC, com diâmetro externo de 85,0 mm e diâmetro interno de 75,6 mm. O espaço anelar foi preenchido com calda de cimento, também utilizada no tamponamento da extremidade inferior dos tubos. Em uma campanha anterior, duas sondagens a percussão com ensaio SPT haviam

sido realizadas para caracterização estratigráfica. Os resultados dos boletins de campo descrevem uma camada de argila arenosa vermelha rija da superfície até uma profundidade de 3,0 m, seguida de uma areia grossa marrom compacta a muito compacta até aproximadamente 9,0 m, a partir de onde foi constatada - por sondagem rotativa - a presença de rocha gnáissica pouco alterada e pouco fraturada. O nível d'água não foi encontrado nas sondagens realizadas.

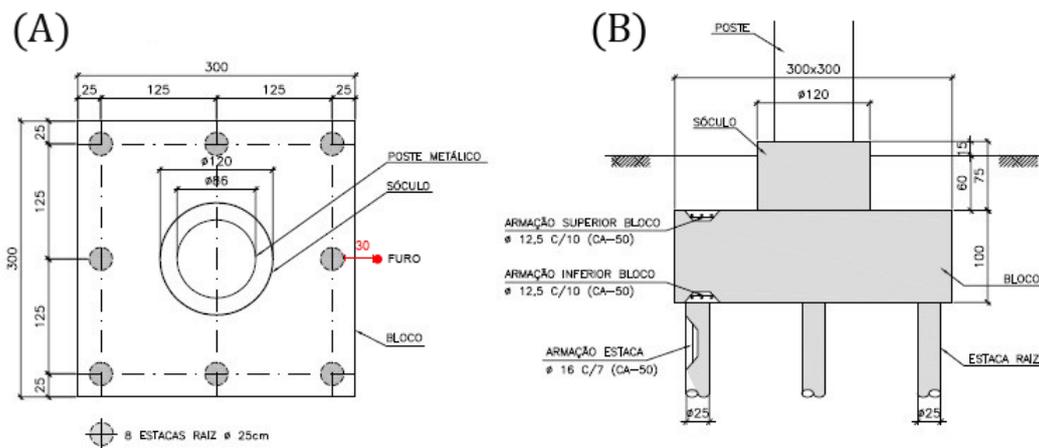


Figura 5.7: Geometria da fundação da torre em Niterói (A) em planta, com o posicionamento do furo utilizado na perfilagem e (B) em corte, com as dimensões do bloco e das estacas mas sem informações a respeito da profundidade.

O Caso 3 trata de um site para o qual a profundidade da fundação é desconhecida e não pode ser embasada no teste paralelo sísmico, uma vez que não se observa contraste de velocidade no conjunto de primeiras chegadas das ondas (Figura 5.8). Além disso, temos um caso com furo disposto muito próximo, a uma distância similar à da simulação numérica NS3. A inexistência de dados referentes à profundidade no corte da fundação (Figura 5.7B) e a ineficácia do método paralelo sísmico pelo contexto geológico trazem um cenário real para o qual a perfilagem magnética pode ser empregada promissoriamente para estimar a profundidade basal. Espera-se que a profundidade esteja disposta em torno de 9 m, dado que a base da fundação tem de estar em contato com a rocha

dura (pela falta de contraste de velocidade da onda) mas não deve penetrar a formação gnáissica por questões técnicas.

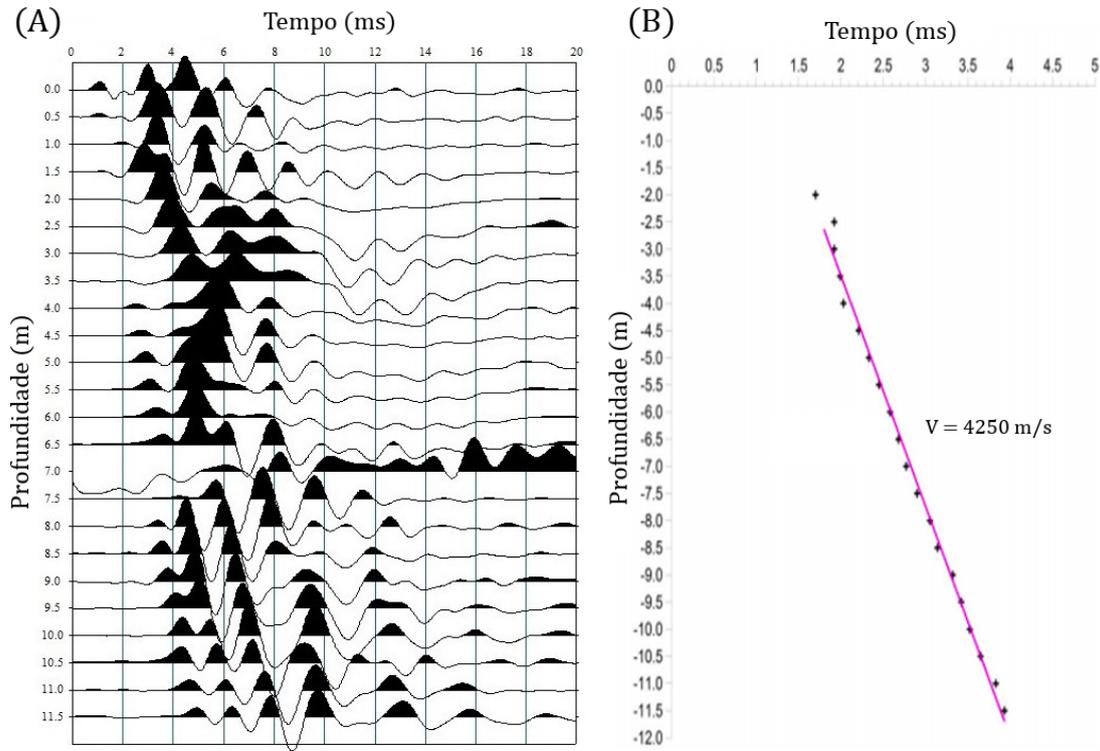


Figura 5.8: (A) Sismograma obtido pelo ensaio paralelo sísmico para o site em Niterói; (B) Plotagem das primeiras chegadas pickadas para cada um dos geofones, sem a capacidade de estimar uma profundidade devido à falta de contraste na velocidade de propagação da onda

Para a aplicação do algoritmo de inversão, a magnetização média inferida por tentativa e erro com um modelo simples foi de $\widetilde{M}_0=30$ A/m, valor próximo ao Caso 2 que também contava com uma fundação do tipo estacas raíz. O intervalo para o parâmetro de intensidade de magnetização na inversão foi definido como $25 \leq \widetilde{M}_l \leq 35$ A/m. O valor de profundidade estimado pelo último pico da derivada vertical foi de $z_\mu=9,4$ m, o parâmetro de desvio dado por $z_\sigma=1$ m por padrão. Entretanto, como pode ser visto na Figura 5.9, é impossível inferir-se que trata-se do pico mais profundo uma vez que o furo não se estende a uma profundidade suficiente para se perceber a tendência da curva para um valor de campo regional. Ainda assim, pressupõe-se ser o pico mais profundo

dado que ter o furo mais profundo que a fundação é um pré-requisito para aplicação do método e que, tal como a profundidade do furo foi limitada por questões litológicas, a da fundação também deve ter sido. O valor regional a ser subtraído do conjunto de dados bruto foi tomado como -17.700 nT, expresso pelo valor do campo na profundidade média entre o pico anômalo positivo e negativo do *ridge* profundo.

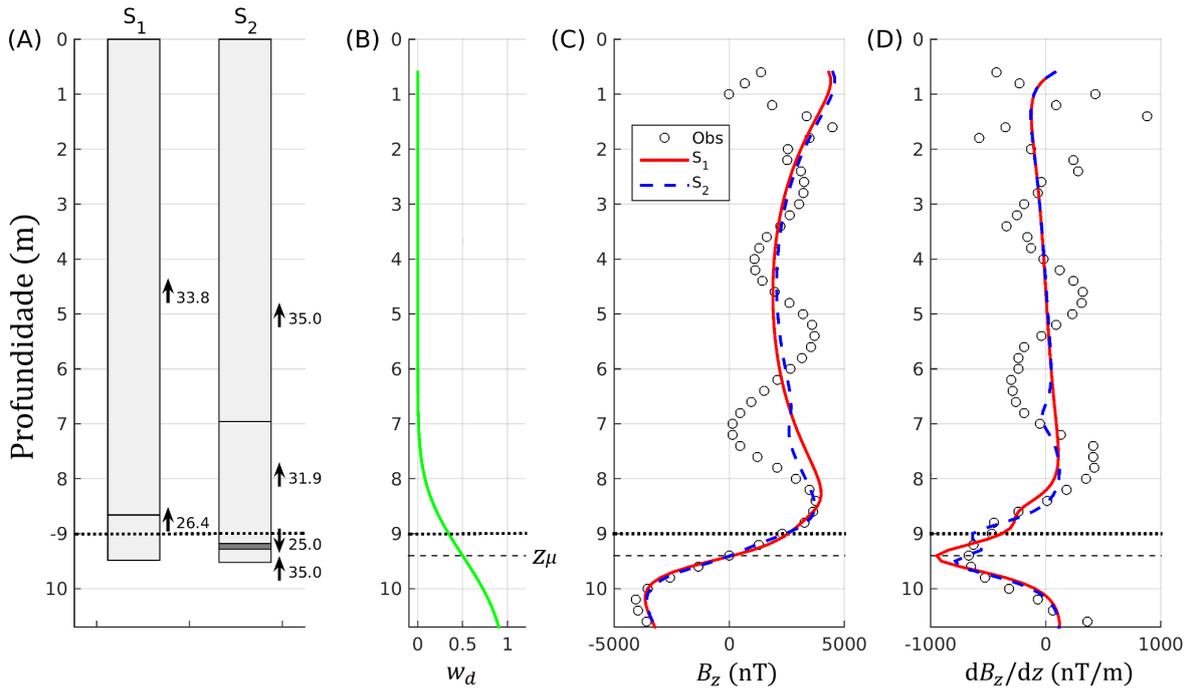


Figura 5.9: Resultados para o Caso 3, em Niterói, com profundidade real (linha pontilhada) estimada pelo topo da rocha dura. (A) Modelos de magnetização alternativos S_1 e S_2 obtidos pela inversão dos dados; intensidade de magnetização (em A/m) e direção de magnetização (flechas para cima e para baixo) estão anotadas para cada prisma. (B) Função peso de distribuição gaussiana cumulativa, centrada na profundidade $z_\mu=9,4$ m (linha tracejada) com faixa de tolerância $z_\sigma=1$ m. (C) Dados observados (círculos) e ajuste aos dados dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul). (D) Derivada vertical do conjunto de dados observados (círculos) e ajuste da derivada dos perfis associados às soluções S_1 (linha vermelha) e S_2 (linha azul).

A Figura 5.9 mostra os resultados obtidos pela inversão com $N_p=4$, tendo-se um modelo S_1 com somente dois prismas com espessura relevante e um modelo S_2 com um pequeno intervalo com mudança de polarização em profundidade.

As profundidades estimadas para as soluções S_1 (9,48 m) e S_2 (9,52 m) são praticamente iguais, sugerindo uma mudança de polarização irrelevante em S_2 e, portanto, a inexistência de modelos alternativos mais complexos. As profundidades obtidas podem ser tomadas como válidas em relação à esperada em torno de 9 m pelo topo da rocha gnáissica. A profundidade esperada se baseia em processos construtivos comumente associados a terrenos com formações graníticas ou gnáissicas, em que geralmente apoia-se a fundação no topo da rocha dura. A estimativa qualitativa ($z_\mu=9,4$ m) também é precisa para esse caso. Os resultados obtidos nesse estudo de caso comprovam as observações levantadas na simulação numérica NS3, de que a proximidade do furo garante mínimos mais bem definidos para a função objetivo e restringe a possibilidade de modelos alternativos que ajustem os dados. Com relação à intensidade de magnetização obtida para os modelos, os valores são próximos aos obtidos para o Caso 2. O Caso 1, por sua vez, apresenta um valor de magnetização em torno de três a quatro vezes maior que os casos 2 e 3. Sendo a intensidade da magnetização média relacionada ao volume de aço na estrutura concretada, pode-se presumir que tal variação dos valores esteja associado ao tipo de fundação, uma vez que fundações do tipo tubulão comumente apresentam maior porcentagem armada do que fundações do tipo estacas raíz.

6 Conclusão

No presente trabalho, discutimos e aprofundamos a análise de dados de perfilagem magnética na determinação da profundidade de fundações armadas de torres de telecomunicação, inferindo a qualidade dos resultados com base em relatórios *as-built*, perfis estratigráficos e/ou informações sísmicas. A determinação da profundidade da estrutura pelo método de perfilagem magnética mostra-se mais complexo do que o esperado, não demonstrando um padrão magnético característico nem sequer para estruturas construídas de forma similar. Esse comportamento magnético complexo impede a utilização de um ponto característico na anomalia observada que permita identificar a profundidade da estrutura indubitavelmente. A variabilidade de comportamentos apresentados pode ser atribuída a variações na porcentagem da seção transversal armada ao longo da estrutura ou na disposição das barras na jaula, bem como a stresses, fraturas e demais inomogeneidades estruturais. Tais variações podem não necessariamente prejudicar a fundação, mas certamente influem no comportamento magnético do corpo.

O conjunto de dados proveniente de estudos de caso apresentados neste trabalho é eficiente em demonstrar a variação do comportamento magnético caso a caso, principalmente sobrelevando como os dados da perfilagem são fortemente perturbados por fontes de campo magnético dispostas em superfície. Tais perturbações estendem-se até grandes profundidades, influenciando inclusive na amplitude na região em torno da base da fundação. Essa interferência é obviamente prejudicial ao estudo proposto e torna necessária uma abordagem distinta da análise normalmente utilizada, focando-se no ajuste de dados em maiores profundidades. Implementamos uma rotina de inversão considerando-se uma função objetivo de ajuste por quadrados mínimos com uma função peso associada, tal função peso com comportamento de uma distribuição Gaussiana

cumulativa de modo a garantir um ajuste focado em torno de uma estimativa inicial de profundidade e, principalmente, de seu decaimento posterior para um valor regional. A minimização não-linear estima parâmetros magnéticos da estrutura e sua devida profundidade.

Os resultados indicam a perfilagem magnética como um método com ambiguidades associadas, mas que pode ser muito eficiente na caracterização da estrutura se empregado numa análise conjunta com métodos independentes (como o paralelo sísmico). A análise conjunta do método magnético ao sísmico permite analisar qual modelo obtido pela inversão melhor representa a estrutura, caracterizando condições em que a estrutura apresenta um comportamento magnético uniforme ao longo de toda sua extensão ou que apresenta polarizações opostas em profundidade, indicando uma região com alguma inomogeneidade magnética estrutural. Além disso, para casos em que a perfuração do furo a uma distância próxima da estrutura é viável, as respostas magnéticas tornam-se mais intensas e as ambiguidades diminuem, tornando-o assim um método eficiente de forma independente. Desse modo, para estruturas com comportamento magnético simples o método de perfilagem magnética permite-nos obter profundidades com precisão equivalente ao método PS e em menor tempo, enquanto que para estruturas com comportamento magnético complexo o método pode ser usado para inferir-se propriedades relativas ao conteúdo armado e à disposição estrutural da armação - sendo útil na caracterização da estrutura. Recomendamos portanto que a aplicação de perfilagem magnética na determinação de profundidade de fundações seja, sempre que possível, aplicada junto a um método alternativo e a informações a priori, e que o furo seja localizado o mais próximo possível da estrutura para diminuir as ambiguidades associadas à interpretação.

Referências Bibliográficas

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 1983. NBR 8036: Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios, Rio de Janeiro, RJ.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 1992. NBR 12244: Construção de poço para captação de água subterrânea, Rio de Janeiro, RJ.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 2001. NBR 6484: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio, Rio de Janeiro, RJ.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 2014. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - procedimento, Rio de Janeiro, RJ.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 2016. NBR 9604: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas - Procedimento, Rio de Janeiro, RJ.

Alken, P., Thébault, E., Beggan, C.D. et al., 2021. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation, *Earth Planets Space*, 73, Article number 49. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>

Aster, R. C., Borchers, B. e Thurber, C. H., 2004. Parameter Estimation and Inverse Problems. *Elsevier Academic Press*.

Atherton, D. L., Coathup, L. W., Jiles, D. C., Longo, L., Welbourn, C. e Teitsma, A., 1983. Stress Induced Magnetization Changes of Steel Pipes - Laboratory Tests, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. Mag-19(4), 1564-1568.

Atherton, D. L. e Jiles, D. C., 1986. Effects of Stress on Magnetization, *NDT International*, 19(1), 15-19.

Bevan, B. W., 2002. The Magnetic Properties of Archaeological Materials, *Geosight Technical*

Report 5, *Geosight*, Weems, Virginia.

Bhattacharrya, B. K., 1964. Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization. *Geophysics*, 29, 517-531.

Blakely, R. J., 1995. Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications. *Cambridge University Press*, Cambridge.

Breiner, S., 1999. Applications Manual for Portable Magnetometers, *GeoMetrics*, San Jose, California.

Butchibabu, B., Khan, P.K., e Jha, P.C., 2021. Geophysical investigations for stability and safety mitigation of regional crude-oil pipeline near abandoned coal mines, *Journal of Geophysics and Engineering*, 18(1), 145-162. doi:10.1093/jge/gxab003

Byrd, R.H. e Nocedal, J., 1998. Active Set and Interior Methods for Nonlinear Optimization, *Documenta Mathematica*, Extra Vol. ICM 3, 667-676.

Callister, W.D. e Rethwisch, D.G., 2010. Materials science and engineering: an introduction, 8th edition. *John Wiley Sons*, Hoboken, New Jersey.

Cha, Y. H. e Suh, J. H., 2000. Inversion of Borehole Magnetic Survey Data for Estimating the Depth of Pile, in Uomoto, T., Non-destructive testing in civil engineering, 2000. *Elsevier*, 71-77

Clapham, C. e Nicholson, J., 2009. The Concise Oxford Dictionary of Mathematics, *Oxford Univesity Press*, Oxford.

Clapham, L., Heald, C., Krause, T. e Atherton, D. L., 1999. Origin of a Magnetic Easy Axis in Pipeline Steel, *Journal of Applied Physics*, 86(3), 1574-1580.

Clark, D. A. e Emerson, D. W., 1991. Notes on Rock Magnetization Characteristics in Applied Geophysical Studies. *Exploration Geophysics*, 22, 547-555.

- Coconi-Morales, E., Ronquillo-Jarillo, G., e Campos-Enriquez, J.O., 2010. Multi-scale analysis of well-logging data in petrophysical and stratigraphic correlation, *Geofísica Internacional*, 49(2), 55-67.
- Coe, J. T., Kermani, B. e Nyquist, J., 2019. Evaluation of Unknown Bridge Foundations Using Borehole-based Nondestructive Testing Methods: A Case Study in Urban Settings. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 24, 299-315.
- Conciani, W., Silva, C., Costa, C., Silva, J. e Silva, M., 2013. Manual do Sondador. *Editora do IFB*, Brasília.
- Costa Filho, W., Galvão, M., Lima, J., Leal, O., 1998. Noções básicas sobre poços tubulares: cartilha informativa, Serviço Geológico do Brasil (CPRM).
- Denis, A., Marache, A., Obelliane, T. e Breyse, D., 2002. Electrical resistivity borehole measurements: application to an urban tunnel site, *Journal of Applied Geophysics*, 50(3), 319-331. doi:10.1016/S0926-9851(02)00150-7
- Dong, P., Fan, J., Liu, C., Chen, G., Wang, L., Sun, B., e Pu, X., 2007. Magnetic anomaly characteristics out of reinforcement cage in cast-in-situ pile, *Progress in Geophysics*(in Chinese), 22(5), 1660–1665.
- Dong, P., Sun, B., Fan, J. and Wang, L., 2011. Determining Lengths of Reinforcements in Bored In Situ Concrete Piles Using the Magnetic Method, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 16, 37-46.
- Dunlop, D. J. e Özdemir, Ö., 1997. Rock Magnetism Fundamentals and Frontiers. *Cambridge University Press*, Cambridge.
- Dybala, J. e Nadulicz, K.M., 2017. Diagnostics of Welded Joints Using Passive and Active Magnetic Methods, *Diagnostyka*, 18(4), 51-59.

- Ehmann, S., Virgil, C., Hördt, A., e Leven, M., 2016. Directional location of buried objects using three-component magnetic borehole data demonstrated for the case of a drill string, *Geophysical Journal International*, 205, 1916-1925. doi:10.1093/gji/ggw139
- Faria, R. N. e Lima, L. F. C. P., 2005. Introdução ao Magnetismo dos Materiais. *Editora Livraria da Física*, Vol. 1.
- Feng, S., Liu, D., Cheng, X., Fang, H. e Li, C., 2017. A new segmentation strategy for processing magnetic anomaly detection data of shallow depth ferromagnetic pipeline. *Journal of Applied Geophysics*, 139, 65-72.
- Gandolfo, O.C.B., Souza, T.J., Aoki, P.C. e Hemsí, P.S., 2015. A determinação da profundidade de um elemento de fundação utilizando o ensaio sísmico paralelo (parallel seismic). *Fundações e Obras Geotécnicas*, 55, 54-58.
- Gandolfo, O.C.B., Souza, T.J., Hemsí, P.S. e Aoki, P.C., 2017. The parallel seismic method for foundation depth evaluation: a case study in Arthur Alvim, São Paulo, Brazil. *Conference: 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF*, Rio de Janeiro, Brazil.
- Guo, J., Wang, X., Wang, J., Dai, X., Wu, L., Li, C., Li, F., Liu, S., e Jessel, M., 2021. Three-dimensional geological modeling and spatial analysis from geotechnical borehole data using an implicit surface and marching tetrahedra algorithm, *Engineering Geology*, 284, 106047. doi:10.1016/j.enggeo.2021.106047
- Hemsí, P. S., Santos, M. C. S., Souza, T. J., Gandolfo, O. C. B. e Mendonça, C. A., 2021. Borehole Magnetometry Test for Evaluating a Caisson's Reinforced Depth: Experimental Results and Theoretical Modeling, *Geotechnical Testing Journal*, 45(1). doi:10.1520/GTJ20200300
- Hillemeier, B. e Scheel, H., 1998. Magnetic Detection of Prestressing Steel Fractures in Prestressed Concrete, *Materials and Corrosion*, 49, 799-804.
- Hossain, M. S., Khan, M. S., Hossain, J., Kibria, G. e Taufiq, T., 2013. Evaluation of

Unknown Foundation Depth Using Different NDT Methods. *Journal of performance of constructed facilities*, 27, 209-214. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000268.

IPT, 2014. Ensaio sísmico paralelo realizado no site SPO063SS, situado na Rua João de Santana, 393 - Jd. São Luiz, município de São Paulo. Relatório técnico N^o 140.905-205.

IPT, 2019a. Ensaio Paralelo Sísmico e Perfilagem Magnética para determinação da profundidade desconhecida de uma fundação, no site CLG002B3 município de Campo Largo, PR. Relatório técnico N^o 158.122-205.

IPT, 2019b. Ensaio Paralelo Sísmico e Perfilagem Magnética para determinação da profundidade desconhecida de uma fundação, no site NTI005VV município de Niterói, RJ. Relatório técnico N^o 158.156-205.

Jalinoos, F. e Olson, L. D., 1996. Determination of unknown depth of bridge foundations using nondestructive testing methods. *in Proceedings of Structural Materials Technology, and NDT Conference*, 91-97.

Jalinoos, F., Gibson, A., Diehl, J., Hadfield, P. e Gordon, G., 2006. Determination of unknown length of sheet piles using three geophysical logging methods. *In Proceedings of 2006 Highway Geophysics NDE Conference*.

Jiles, D., 1991. Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. *Chapman and Hall*, Ames (IA).

Jo, C.H., Cha, Y.H., Choi, J.H., 2003. A borehole magnetic logging tool for estimating unknown foundation depths. *In 2003 Highway Geophysics NDE Conference*, Orlando, FL, USA.

Kearey, P., Brooks, M. e Hill, I., 1984. An Introduction to Geophysical Exploration. *Blackwell Science*.

Kennedy, J. e Eberhart, R.C., 1995. Particle Swarm Optimization, *IEEE International Conference on Neural Networks*, Perth, Australia.

- Keys, W.S., 1990. Borehole geophysics applied to ground-water investigations, *U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations*, book 2(E-2).
- Kog, Y. C., 2009. Integrity Problem of Large-Diameter Bored Piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(2), 237–245. doi:10.1061/(asce)1090-0241(2009)135:2(237)
- Korenapov, V. e Marusenkov, A., 2012. Flux-Gate Magnetometers Design Peculiarities. *Surv Geophys*, 33, 1059-1079.
- Kowalski, A.C.G., 2017. Análise da conectividade de fraturas em maciços cristalinos utilizando perfilagem geofísica e modelos de percolação, *Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas*, Dissertação de Mestrado. doi:10.11606/D.14.2019.tde-10092018-080732
- Lee, J. S., Song, J. U., Hong, W. T. e Yu, J.D., 2018. Application of time domain reflectometer for detecting necking defects. *NDT and E International*, 100, 132-141. doi:10.1016/j.ndteint.2018.09.006
- Levanto, E., 1959. Symposium on the use of borehole data in geophysical exploration: a three-component magnetometer for small drill-holes and its use in ore prospecting. *Geophysical Prospecting*, 7(2), 183-195. doi:10.1111/j.1365-2478.1959.tb01461.x
- Lipeng, Z., Ruixue, B., Shuangyan, Y., e Bingqiang, Y., 2001. Identifying hydrocarbon source rock with log data, *Well Logging Technology*, 25(2), 146-152 (em chinês).
- Mendonça, C.A. e Meguid, A.M.A., 2008. Programs to compute magnetization to density ratio and the magnetization inclination from 3-D gravity and magnetic anomalies, *Computers Geosciences*. doi:10.1016/j.cageo.2007.09.013
- Merrill, R. T., McElhinny, M. W. e McFadden, P. L., 1996. The Magnetic Field of the Earth: Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle. *Academic Press*.

- Mussett, A.E. e Khan, M.A., 2000. Looking into the Earth: an introduction to geological geophysics, *Cambridge University Press*, Cambridge. doi:10.1017/CBO9780511810305
- Newston, C. M. e Eberhard, M. O., 1995. Two-Dimensional Magnetic Algorithm to Detect Reinforcing Steel, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 7(3), 141-147.
- Nocedal, J. e Wright, S., 2006. Numerical Optimization, 2nd edition. *Springer*, London.
- Nussenzveig, H. M., 1997. Curso de Física Básica - Volume 3, 1ª edição, *Edgard Blücher*, São Paulo.
- Oliveira Jr, V. C. e Uieda, L., 2011. Apostila do curso "Tópicos de inversão em Geofísica
- Olson, L.D., Jalinos F. e Aouad, M.F., 1995. *Determination of Unknown Subsurface Bridge Foundations*, NCHRPProject21-5 FinalReport, Washington, D.C..
- Paillet, F.L. e Ellefsen, K.J., 2005. Downhole Applications of Geophysics, *Near-Surface Geophysics*, Chapter 11, 439-471.
- Paillet, F.L. e Reese, R.S., 2000. Integrating borehole logs and aquifer tests in aquifer characterization, *Ground Water*, 38, 713-725.
- Pla, G. F., Eberhard, M. O., e Eberhard, P. H., 1994. Magnetic Imaging of Reinforcing Steel, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 13(1), 23-32.
- Plouff, D., 1976. Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections, *Geophysics*, 41, 727-741.
- Primdahl, F., 1979. The fluxgate magnetometer, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 12, 241-253.
- Rausche, F., 2004. Non-Destructive Evaluation of Deep Foundations, *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 5

Robertson, P.K. e Campanella, R.G., 1983. Interpretation of cone penetration tests - Part I (Sand) and Part II (Clay), *Canadian Geotechnical Journal*, 20.

Santos, M.C.S., 2017. Desenvolvimento de programa de inversão de dados para obtenção de profundidade de fundação através de perfilagem magnética. Graduation Monography. IAG, University of São Paulo, Brazil.

Scheel, H. e Hillemeier, B., 2003. Location of Prestressing Steel Fractures in Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15, 228-234.

Schepers, R., Rafat, G., Gelbke, C., e Lehmann, B., 2001. Application of borehole logging, core imaging and tomography to geotechnical exploration, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(6), 867-876. doi:10.1016/S1365-1609(01)00052-1

Schlumberger, C., Schlumberger, M., Leonardon, E.G., 1932. Electrical coring: A method of determining bottom-hole data by electrical measurements, *Transactions of the AIME*, 110(1), 237-272.

Souza, T. J., Hemi, P. S., Gandolfo, O. C. B., Aoki, P. C. e Ribeiro, A. F., 2016. Use of Parallel-Seismic and Induction-Logging Tests for Foundation Depth Evaluation Under Difficult Conditions, a Root-Pile Foundation Embedded in Rock. São Paulo, *Soils and Rocks*, 39, 261-272.

Spaldin, N. A., 2003. Magnetic Materials Fundamentals and Applications. *Cambridge University Press*, Cambridge.

Stain, R.T., 1982. Integrity Testing, *Civil Engineering*, 53-72.

Stumm, F., Chu, A., Lange, A.D., Paillet, F.L., Williams, J.H., e Lane Jr., J.W., 2001. Use of Advanced Borehole Geophysical Techniques to Delineate Fractured-Rock Ground-Water Flow and Fractures Along Water-Tunnel Facilities in Northern Queens County, New York, *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report*, 00-4276, 1-12.

- Su, M., Zhao, Y., Li, S., Xue, Y., Qiu, D., Wang, P., Kong, F., Xia, T., 2020. Parameter Preferences for Length Detection of Reinforcement Cage in Bored Pile, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(2), 04020002. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001386.
- Sun, B., Dong, P., Wang, C., Pu, X., Wu, Y., 2009. Quantitative analysis of magnetic anomaly of reinforcements in bored in-situ concrete piles. *Applied Geophysics*, 6(3), 275-286. doi:10.1007/s11770-009-0027-9
- Tallini, M., Giamberardino, A., Ranalli, D. e Scozzafava, M., 2004. GPR survey for investigation in building foundations, 10th International Conference on Ground Penetrating Radar, Delft.
- Talwani, M., 1965. Computation with the help of a digital computer of magnetic anomalies caused by bodies of arbitrary shape, *Geophysics*, 30(5), 797-817.
- Tauxe, L., Banerjee, S., Butler, R. e van der Voo, R., 2018. Essentials of Paleomagnetism, 5th Web Edition. Disponível em: <https://earthref.org/MagIC/books/Tauxe/Essentials/>
- Telford, W. M., Geldart, L. P. e Sheriff, R. E., 1990. Applied Geophysics, *Cambridge University Press*, Cambridge.
- Tittman, J., 1987. Geophysical Well Logging, *Methods of Experimental Physics*, 24(B), 441-615.
- Wahl, J.S., 1983. Gamma-ray logging, *Geophysics*, 48, 1536-1550.
- Wright, D.L., Watts, R.D., e Bramsoe, E., 1984. A short-pulse electromagnetic transponder for hole-to-hole use, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-22, 720-725.
- Yang, X. S. e Deb, S., 2009. Cuckoo Search via Lévy Flights, *Proceedings of world congress on nature and biologically inspired computing (NaBIC 2009)*, IEEE Publications, USA, 210-214.

Anexo 1

Trabalho em revisão (Moderate Revisions), submetido na Geophysics

Borehole magnetometry to determine the depth of reinforced foundations in telecommunication towers

Autores: Santos, M.C.S., Mendonça, C.A., Souza, T.J., Hemsí, P.S., Gandolfo, O.C.B.

Resumo: Technical information about deep foundations of built structures may in some cases be unavailable or incomplete due to lack of construction documentation and electronic media in which reports are stored. This problem is particularly relevant for telecommunication towers constructed two-to-three decades ago but still under operation and subjected to new loading demands from expanding networks. Non-destructive evaluation with geophysical methods has been applied to determine the depth to the bottom of deep foundations, a key parameter to evaluate their bearing capacity and settlements. This is done by lowering a borehole magnetometry (BM) sensor down drill holes installed close to the unknown structure, thereby measuring the magnetic field along the testing drill hole. The depth to the bottom of the structure using BM data configures an edge detection problem: a classical problem in magnetic data interpretation but in this case with poor data coverage (only a profile close to the structure) to characterize a complex magnetization distribution. We summarize a set of numerical and field-work applications showing that no single characteristic attribute of the observed field can undoubtedly be used to determine the foundation depth. We verify that most of the measured field along the testing drill hole (especially near the surface) is disturbed by fields from facilities at the ground surface and develop a data inversion procedure selectively enforcing data fitting to measurements at the lower portions of the drill hole. The efficacy of this technique is illustrated with field tests in different geological scenarios with results compared with the foundations' "as-built" documentation and/or independent evaluation with other methods.



Matheus Santos <mcarlossantos@gmail.com>

GEO-2021-0281 - Moderate Revision Required

Geophysics <onbehalf@manuscriptcentral.com>

15 de julho de 2021 08:25

Responder a: cgfarquh@mun.ca

Para: matheus.carlos.santos@usp.br

Cc: cgfarquh@mun.ca, matheus.carlos.santos@usp.br, carlos.mendonca@iag.usp.br, tiagojs@ita.br, paulosh@ita.br, gandolfo@ipt.br, otaviogandolfo@uol.com.br

15-Jul-2021

Re: GEO-2021-0281, Borehole magnetometry to determine the depth of reinforced foundations in telecommunication towers

Dear Author(s):

The review process has been completed for your manuscript listed above and the critiques of the reviewers are enclosed. Revision is necessary for your paper to be considered further for publication. I encourage you to revise your paper addressing the comments of the referees.

PLEASE NOTE:

Some reviewers and editors may have uploaded or "attached" separate review documents or edits of your manuscript in addition to their comments provided below. The files should be attached to this email. However, some files may have been too large to be delivered via e-mail. Please check your author center in ScholarOne to see if reviewers have uploaded additional files. To retrieve editor/reviewer attachments, if any were provided, please enter your Author Center at <https://mc.manuscriptcentral.com/geophysics>. Click Manuscripts with Decisions where you will see the paper listed. Under "status" of the paper, click "view decision letter." Scroll to the bottom of the screen and you will see the file attachments, if any were provided.

YOU ARE REQUIRED TO PROVIDE DETAILED, POINT-BY-POINT RESPONSES TO THE REFEREES COMMENTS, AS WELL AS A COPY OF THE PAPER WITH REVISIONS INDICATED (i.e., by underline, highlight, bold font, or red font). These additional documents will be uploaded as supplementary files. However, you must also supply a clean copy which will be uploaded as your main document.

****Before submitting your revised files, please ensure you have removed your name from document properties of your file and not revealed your identity when tracking changes. Also, please ensure you have removed author names in all revised/response documents****

When the revised version is ready to submit, enter your Author Center at <https://mc.manuscriptcentral.com/geophysics>. You will see the paper listed under Manuscripts with Decisions. Under Actions, click "create a revision."

Follow the steps for uploading a revised paper. When you get to the File Upload step, you will see the files for the previous version. **PLEASE DELETE THE FILES FROM THE PREVIOUS VERSION AND MAKE SURE ONLY THE FILES FOR THE CURRENT VERSION ARE UPLOADED.**

Please upload your revised manuscript within 8 weeks for moderate revision (5 weeks for minor revision and 10 weeks for major revision), after which your file will be closed. A deadline system has been implemented by Geophysics to shorten turnaround times for review and revision. If your manuscript is for a special section, submitting your revision earlier might be necessary in order for your paper to be reviewed and accepted before the section closing date. Please e-mail (geopapers@seg.org) if you have questions about the closing date and/or your due date.

If you decide not to pursue a rewrite, or you decide to submit the paper to another journal, please let us know as soon as possible.

Thank you for your contribution to GEOPHYSICS.

Sincerely,
Dr. Colin Farquharson
cgfarquh@mun.ca

GEOPHYSICS®

Borehole magnetometry to determine the depth of reinforced foundations in telecommunication towers

Journal:	<i>Geophysics</i>
Manuscript ID	Draft
Manuscript Type:	Technical Paper
Keywords:	engineering, magnetics, borehole geophysics
Manuscript Focus Area:	Engineering and Environmental Geophysics

SCHOLARONE™
Manuscripts

1 Geophysics
2
3
4
5

6 ABSTRACT
7
8
9
10

11 Technical information about deep foundations of built structures may in some cases be
12 unavailable or incomplete due to lack of construction documentation and electronic media
13 in which reports are stored. This problem is particularly relevant for telecommunication
14 towers constructed two-to-three decades ago but still under operation and subjected to
15 new loading demands from expanding networks. Non-destructive evaluation with
16 geophysical methods has been applied to determine the depth to the bottom of deep
17 foundations, a key parameter to evaluate their bearing capacity and settlements. This is
18 done by lowering well-logging sensors in drill holes installed close to the unknown
19 structure, the borehole magnetometry (BM) measuring the magnetic field along the
20 testing drill hole. The bottom depth detection from BM data configures an edge detection
21 problem, a classical problem in magnetic data interpretation but in this case using a poor
22 data coverage (only a profile close to the structure) to characterize a complex
23 magnetization distribution. We summarize a set of numerical and field-work applications
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

1 Geophysics

2
3 showing that no single characteristic attribute of the observed field can undoubtedly be
4
5
6
7 used to determine the foundation depth. We verify that most of the measured field along
8
9
10 the testing drill hole is disturbed by fields from facilities at the ground surface and develop
11
12
13 a data inversion procedure selectively enforcing data fitting to measurements at the lower
14
15
16 portions of the drill hole. The developed technique is illustrated with field tests in different
17
18
19 geological scenarios with results compared with the foundations' "as-built" documentation
20
21
22 and/or independent evaluation with other methods.
23
24
25
26
27
28
29
30

31 INTRODUCTION

32
33
34 Deep foundations are core constructing elements in building tall and large
35
36 constructions. Once constructed, a structure may be required to withstand increased
37
38 loading, different from the condition assumed in design. Procedures for non-destructive
39
40 evaluation (NDE) are thus required to ensure that the foundation can withstand the new
41
42 loading condition. Due to changes in local regulations, built and technical reports can be
43
44
45 incomplete or missing (Olson et al., 1998; Hossain et al., 2013; Coe et al., 2019) when
46
47
48 stored in different format media or partially reported according to modern standards
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Anexo 2

Trabalho aceito para publicação no Geotechnical Testing Journal

Borehole Magnetometry Test for Evaluating a Caisson's Reinforced Depth: Experimental Results and Theoretical Modeling

Autores: Hemsí, P.S., Santos, M.C.S., Souza, T.J., Gandolfo, O.C.B., Mendonça, C.A.

Resumo: The borehole magnetometry (BM) test was performed to evaluate the foundation reinforcement depth at a site where a telecommunication tower is supported by a single 2.3-m diameter caisson foundation of known as-built design. An OPTV probe containing a three-axial fluxgate magnetometer was lowered into a vertical borehole 2.35 m distant from the center of the caisson and the profiles for the total magnetic field flux density and its vertical component were acquired and used to generate, by subtracting the IGRF background, the profiles for the total, B_A , and vertical component, $B_{z,A}$, anomalous magnetic field. Four distinct graphical methods were used to evaluate the reinforced depth from the anomalous profiles and their first- and second-order derivatives. Two of the methods, including the one proposed in this study, based on locating the inflection points in the derivative profiles, evaluated the reinforced depth very close to the as-built depth (8.0 m). The reinforcement intensity of magnetization was then evaluated using the B_A profile and a method based on the bipolar model. Theoretical modeling of B_A and $B_{z,A}$ and the derivative profiles was then performed, using a 3-D prismatic model. By comparing modeled and experimental results, the induced magnetization was found to be an unsuited modeling assumption, with remanent magnetization being a better representation of the magnetic field around the caisson's steel reinforcement, in agreement with the theory, given the high Koenigsberger ratio for steel. Also, the modeling revealed the need for a more complex representation of the magnetic sources, with added prisms to represent the effects of a magnetically-noisy environment and above-ground structures, as well as the presence of inhomogeneity and polarization changes along the reinforcement length.



Matheus Santos <mcarlosssantos@gmail.com>

Decision on Manuscript ID GTJ-2020-0300.R1 - Geotechnical Testing Journal

Sara Welliver <onbehalf@manuscriptcentral.com>

4 de junho de 2021 09:17

Responder a: astm@jjeditorial.comPara: paulosh@ita.br, phemsi@yahoo.com.brCc: paulosh@ita.br, phemsi@yahoo.com.br, mcarlosssantos@gmail.com, tiagojs@ita.br, gandolfo@ipt.br, carlos.mendonca@iag.usp.br

04-Jun-2021

Dear Prof. Hemsi:

It is a pleasure to accept your manuscript entitled "Borehole Magnetometry (BM) Test for Evaluating a Caisson's Reinforced Depth: Experimental Results and Theoretical Modeling" in its current form for publication in the Geotechnical Testing Journal. Your paper will be reproduced in color online at no cost.

Your paper will now be edited by a professional copyeditor and typeset in the ASTM typesetting specifications. After the copyediting and typesetting, you will have the opportunity to review the PDF proof of your paper. Your proof will be coming from astm.caps@luminad.com. Please whitelist this address, add it to your contacts, or include it in your safe senders list.

Thank you for your fine contribution. On behalf of the Editors of the Geotechnical Testing Journal, we look forward to your continued contributions to the Journal.

If you are not already a member of ASTM International, we welcome you to join the conversation. Go to <http://www.astm.org/MEMBERSHIP/index.html> for membership details.

Sincerely,
Geotechnical Testing Journal editors

Editorial Office email: astm@jjeditorial.com



Geotechnical Testing Journal

Paulo Scarano Hemsí,¹ Matheus Carlos de Souza Santos,² Tiago de Jesus Souza,³ Otávio Coaracy Brasil Gandolfo,⁴ and Carlos Alberto Mendonça²

DOI: 10.1520/GTJ20200300

Borehole Magnetometry Test for
Evaluating a Caisson's Reinforced
Depth: Experimental Results and
Theoretical Modeling

Paulo Scarano Hemsí,¹ Matheus Carlos de Souza Santos,² Tiago de Jesus Souza,³ Otávio Coaracy Brasil Gandolfo,⁴ and Carlos Alberto Mendonça²

Borehole Magnetometry Test for Evaluating a Caisson's Reinforced Depth: Experimental Results and Theoretical Modeling

Reference

P. S. Hemsí, M. C. S. Santos, T. J. Souza, O. C. B. Gandolfo, and C. A. Mendonça, "Borehole Magnetometry Test for Evaluating a Caisson's Reinforced Depth: Experimental Results and Theoretical Modeling," *Geotechnical Testing Journal* <https://doi.org/10.1520/GTJ20200300>

ABSTRACT

The borehole magnetometry (BM) test was performed to evaluate the foundation reinforcement depth at a site where a telecommunication tower is supported by a single 2.3-m-diameter caisson foundation of known as-built design. An optical televiewer probe containing a three-axial fluxgate magnetometer was lowered into a vertical borehole 2.35 m distant from the center of the caisson and the profiles for the total magnetic field flux density, and its vertical component were acquired and used to generate, by subtracting the International Geomagnetic Reference Field background, the profiles for the total, B_A , and vertical component, $B_{z,A}$, anomalous magnetic field. Four distinct graphical methods were used to evaluate the reinforced depth from the anomalous profiles and their first- and second-order derivatives. Two of the methods, including the one proposed in this study, based on locating the inflection points in the derivative profiles, evaluated the reinforced depth very close to the as-built depth (8.0 m). The reinforcement intensity of magnetization was then evaluated using the B_A profile and a method based on the bipolar model. Theoretical modeling of B_A and $B_{z,A}$ and the derivative profiles was then performed using a three-dimensional prismatic model. By comparing modeled and experimental results, the induced magnetization was found to be an unsuited modeling assumption, with remanent magnetization being a better representation of the magnetic field around the caisson's steel reinforcement, in agreement with the theory, given the high Koenigsberger ratio for steel. Also, the modeling revealed the need for a more complex representation of the magnetic sources, with added prisms to represent the effects of a magnetically-noisy environment and above-ground structures, as well as the presence of inhomogeneity and polarization changes along the reinforcement length.

Manuscript received November 3, 2020; accepted for publication June 4, 2021; published online xxxx xx, xxxx.

¹ Division of Civil Engineering, Aeronautics Institute of Technology, Praça M. Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos São Paulo 12228-900, Brazil (Corresponding author), e-mail: paulosh@ita.br, <https://orcid.org/0000-0003-3094-5526>

² Department of Geophysics, Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences, University of São Paulo, Rua do Matão, 1226, São Paulo, São Paulo 05508-090, Brazil <https://orcid.org/0000-0001-9586-7640> (M.C.S.S.), <https://orcid.org/0000-0003-0400-6373> (C.A.M.)