UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

WELITOM RODRIGUES BORGES

**Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no
Planejamento Urbano e Meio Ambiente:
Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP**

São Paulo

2007

WELITOM RODRIGUES BORGES

**Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no
Planejamento Urbano e Meio Ambiente:
Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP**

Tese apresentada ao Instituto de
Astronomia, Geofísica e Ciências
Atmosféricas para obtenção do título de
Doutor em Geofísica.

Área de Concentração: Geofísica Aplicada

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Porsani

São Paulo

2007

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Welitom Rodrigues Borges

Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP

Tese apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas para obtenção do título de Doutor em Geofísica.

Área de Concentração: Geofísica Aplicada

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. Jorge Luis Porsani

Instituição: IAG/USP

Assinatura: _____

Prof. Dr. Carlos Alberto Mendonça

Instituição: IAG/USP

Assinatura: _____

Prof. Dr. José Gouveia Luiz

Instituição: IG/UFPA

Assinatura: _____

Prof. Dr. Walter Malagutti Filho

Instituição: IGc/UNESP-Rio Claro

Assinatura: _____

Prof. Dr. Shozo Shiraiwa

Instituição: ICET/UFMT

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram com o desenvolvimento desta pesquisa e, em especial:

Ao Prof. Dr. Jorge Luís Porsani que desenvolveu orientação segura, caracterizada por profundo respeito e confiança, durante todo o período da pesquisa. No final, estou certo que perdi um orientador, mas ganhei um grande amigo. Valeu Porsani!

À FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo) pela concessão da bolsa de doutorado, processo 02/07510-0 e pelo apoio financeiro por meio do projeto 02/07509-1.

Ao Departamento de Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas pela oportunidade de realizar esta pesquisa.

Aos professores doutores Francisco Yukio Hiodo, Vagner Roberto Elis e Carlos Alberto Mendonça, pelas discussões e ajuda na aquisição dos dados.

A equipe de aquisição de dados geofísicos, mais unida que já acompanhei no IAG, Selmita, Emas e Ernande (vulgo calça frouxa). Sem eles não haveria dados do *background* da área de pesquisa.

Ao IPT/SP, representado pelos geólogos Luiz Antônio Pereira de Souza, Carlos Alberto Birelli, Vicente L. Galli e pelo técnico Valter Domingos da Silva, pelas facilidades de empréstimo das antenas de 250 MHz, utilizadas durante a aquisição dos dados de campo.

Ao Prof. Dr. Lázaro Valentim Zuquette da Escola de Engenharia de São Carlos/USP, pelo empréstimo do equipamento SYSCAL PRO, utilizado para a aquisição dos dados de tomografia elétrica.

Aos colegas Ozéias da Silva (IAG/USP), José (PCO/USP) e ao Joselito pela ajuda nas escavações das trincheiras e na instalação dos alvos na área do SCGR.

Aos inúmeros colegas que auxiliaram na aquisição dos dados: Manuelle, Robson, Elivelton, Gilmar, Sérgio Fachin (Bob Esponja), Márcia Hatae, Vinícius, Paulo (Baiano), Nilton (Jabiraca), Cláudia, Dionísio, Marcus, Oleg, Gregório e ao Marcelo.

Aos professores doutores Shozo Shiraiwa e Mário José Pereira, ambos da Universidade Federal do Mato Grosso, pelo apoio e incentivo durante todo o decorrer do doutorado.

Ao Prof. Dr. Martin Tygel e à equipe do Laboratório de Geofísica Computacional da Unicamp, Alcides, Lucas, Fernando, Clebson, Ricardo, Armando e Charles pela compreensão e pelo apoio na etapa final da tese.

Aos inúmeros amigos da Pós-Graduação: Alexandre Lago, Marcelo Peres, Selma Rodrigues, Elizete Silva, Manuelle Paixão, Sérgio Fachin, Sérgio Bezerra, Eric Font, Daniel Franco, Fábio Lucas, Gelvan Hartman, Mário Rosalez, Marcelo Bianchi, Ivan Zevallos, Emilson Leite, Miguel Carminatti, Fábio Perosi, Juliana Alencar, Soraya Tuma, George França, Marcelo Bendelak, Shimeles Woldemichael, Érika Reyes, Renato Frazão, Rodrigo Ortega, Allana Dutra, Danilo Oliveira, Alexandre Lopes, Deborah Souza, Everton Bomfim, Eduardo Rocha, Francisca Souza, Ahmad Meguid, Henrique Dal Pozzo, Luciano Konzen e Marcelo Teles, pelo companheirismo durante o período do doutorado.

Aos colegas Jorge (Quarta), Leandro (Cabelo), Gilmar (Hindu), Leandro Moutinho, e Rodrigo Toffolli, por terem me acolhido em Sampa.

A minha família pelo carinho, em especial a minha mãe, Doracina; ao meu pai, Tarzan; ao meu irmão, Wilson; a minha irmã, Ádia; e aos meus sobrinhos, Alexandre e José.

Ao meu bom e paciente amigo, Rodrigo Toffolli, pela revisão da tese. Eventuais erros são de nossa mútua responsabilidade.

Às secretárias do Departamento de Geofísica, do IAG/USP, representadas por Maria Perpetua dos Santos Couto (Teca) e Virgínia Gomes de Macedo Teixeira, pela presteza no atendimento quando solicitado. Muito obrigado, meninas!

À secretária dos Cursos de Pós-Graduação do IAG/USP, Rosemary Feijó, pela presteza no atendimento aos pós-graduandos.

Aos técnicos do IAG/USP pela assistência na infra-estrutura necessária para o desenvolvimento dessa pesquisa, em especial ao Edílson Brito, ao Marcos Claro e ao Leonardo Schneider.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, auxiliaram-me no desenvolvimento desta pesquisa.

Finalmente, eu não poderia deixar de agradecer à minha esposa, Aline, que compreendeu a importância deste desafio acadêmico, e suportou meus nervosismos e minhas ausências, dando apoio, incentivo e equilíbrio espiritual, fundamentais para a realização desta pesquisa.

“Hakuna Matata!”

(Expressão Suahili)

RESUMO

BORGES, W.R. **Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP**. 2007. 256p. Tese (doutorado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, SP, 2007.

A implantação do Sítio Controlado de Geofísica Rasa (SCGR), do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG), da Universidade de São Paulo (USP), é um marco na história da geofísica nacional. Trata-se do primeiro local de estudos controlados de geofísica rasa, instalado no Brasil. O SCGR está localizado próximo ao Instituto de Física, em frente ao IAG/USP, compreendendo uma área de 1500 m² (50 m x 30 m). Nesta área, foram instalados diferentes alvos, com dimensões variadas e em diferentes profundidades, dispostos em sete linhas de 30 metros. Os alvos escolhidos tiveram como finalidade reproduzir uma pequena amostra dos principais objetos que são encontrados em ambiente urbano. O objetivo do estudo foi o de caracterizar os alvos instalados no SCGR, por meio da utilização de diferentes métodos geofísicos, com ênfase no método *Ground Penetrating Radar* (GPR), seguido dos métodos de eletrorresistividade e eletromagnético indutivo (EM-38). Esta caracterização consistiu em avaliar o desempenho e a confiabilidade dos métodos geofísicos, quando aplicados sobre alvos com propriedades físicas conhecidas. A coleta de dados foi realizada antes e depois da instalação do sítio controlado, permitindo, assim, a caracterização geofísica do meio (*background*) e dos alvos. Os resultados geofísicos foram apresentados na forma de perfis 2D e de cortes em profundidade em blocos volumétricos, Quase-3D. Os dados geofísicos do *background* evidenciam uma camada de aterro, com espessura de até 2,8 metros, repousando sobre sedimentos argilosos da planície de inundação do rio Pinheiros. O EM-38 possibilitou o mapeamento de todos os objetos metálicos enterrados até a profundidade máxima de 1,5 metro. A identificação de alguns alvos metálicos, enterrados na profundidade de 0,5 metro, também foi possível com os resultados de cargabilidade. Os dados de resistividade elétrica permitiram a identificação de um tubo metálico guia, enterrado no centro da área, a 0,5 metro de profundidade, e de alvos representativos de materiais geológicos. Os resultados de GPR permitiram o imageamento da maioria dos alvos implantados na área do SCGR, com melhor resolução aqueles que mostram maior contraste dielétrico. A pesquisa contribui para o refinamento dos métodos de campo aplicados aos problemas reais do cotidiano, principalmente, em estudos de geotecnia, planejamento urbano, arqueologia e meio ambiente.

Palavras Chave: Sítio Controlado de Geofísica Rasa, GPR, IAG, EM-38, Tomografia Elétrica.

ABSTRACT

BORGES, W.R. **Geophysics characterization of shallow targets with applications in the urban planning and environmental: Study on the Shallow Geophysical Test Site of IAG/USP**. 2007. 256p. Thesis (Doctoral) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, SP, 2007.

The implantation of the Shallow Geophysical Test Site (SCGR) of the Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences Institute (IAG), from University of São Paulo (USP), is a mark in national geophysical history. It is the first site Shallow geophysical study site installed in Brazil. This Test Site is located next to Physics Institute in front of IAG/USP, comprehending an area of 1500 m² (50 m x 30 m). In this area, different targets were installed, with varied dimensions and different depths, buried in seven lines of 30 meters. Targets were chosen aiming at reproducing a small sample of main objects found in urban environment. The goal of the study was characterizing targets installed in SCGR by using different geophysical methods with emphasis in Ground Penetrating Radar (GPR), electric and inductive electromagnetic (EM-38) methods. This characterization consisted in evaluating the performance and reliability of geophysical methods, when applied in targets whose physical properties are well-known. Measurements were carried out before the targets installation in subsurface, in order to obtain data from land background or geologic horizons before disturbances. In a second stage, geophysical data were obtained after target installation. Geophysical results were shown in 2D profiles, and depth slices in volumetric blocks, Quasi-3D. Geophysical data from land background showed an earthwork layer, with thickness up to 2.8 meters, above loamy sediments of Pinheiros River. EM-38 enabled the mapping of all metallic targets buried until 1.5 meter of maximum depth. The identification of some metallic targets also buried in the depth of 0.5 meter was possible with chargeability results. Electric resistivity data allowed the identification of a metallic tube buried at the centre of the area, to 0.5 meter of depth, and of representative geological materials targets. GPR results identified the majority of targets buried in SCGR with better resolution than those ones shown highest dielectric contrast. This research contributes for geophysical method refinement applied to everyday problems mostly in geotechnical, urban planning, archaeological and environmental studies.

Keywords: Shallow Geophysical Test Site, GPR, IAG, EM-38, Electric Tomography.

APRESENTAÇÃO

A presente tese está organizada em sete capítulos que se referem ao agrupamento temático, não correspondendo, necessariamente, à ordem cronológica em que foi desenvolvida a pesquisa. Essa forma de apresentação foi escolhida, a fim de sistematizar o conteúdo abordado de forma mais objetiva.

No capítulo 1, é descrita uma breve revisão sobre as áreas de testes controlados existentes na literatura internacional, os objetivos e a justificativa da pesquisa.

O capítulo 2 traz uma descrição detalhada do processo de instalação do Sítio Controlado de Geofísica Rasa do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (SCGR do IAG/USP). Nesse capítulo, também é apresentada uma descrição da geologia da área, bem como, as informações acerca das constituições e espessuras das camadas sedimentares superficiais, obtidas durante a implantação dos alvos no SCGR.

Os fundamentos teóricos, as metodologias de aquisição, de processamento e modelagem de dados, dos métodos *Ground Penetrating Radar* (GPR), eletrorresistividade e eletromagnético indutivo são apresentados no capítulo 3.

No capítulo 4, são discutidos os resultados de testes realizados com os diferentes métodos de investigação empregados nesse estudo, com o objetivo de determinar os melhores parâmetros de campo. Desse modo, são apresentados os parâmetros de campo utilizados antes e depois da implantação dos alvos na área do SCGR.

No capítulo 5, são descritas as principais etapas utilizadas no processamento e na modelagem dos dados obtidos antes e após a instalação do SCGR do IAG/USP.

Os resultados e as interpretações das investigações geofísicas realizadas na área de pesquisa são discutidos no capítulo 6. As principais conclusões e as recomendações do estudo estão apresentadas no capítulo 7.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Mapa de localização do Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP, mostrando as possíveis fontes de interferências superficiais e o comportamento da topografia.....	52
Figura 2.2 – Fotos mostram a escavação das trincheiras na área do SCGR do IAG/USP. a) Escavação mecânica; b) Escavação manual	53
Figura 2.3 – Foto mostra a retirada manual da grama para posterior recuperação da paisagem, na área do SCGR do IAG/USP.....	53
Figura 2.4 – Mapa evidencia o contorno do topo dos buracos, obtido com a utilização da estação total, onde foram implantados os alvos dentro do SCGR do IAG/USP.	54
Figura 2.5 – Fotos da aquisição de dados topográficos dos alvos enterrados na área do SCGR do IAG/USP. (a) Posicionamento com o prisma sobre o centro de um tambor metálico. (b) Registro da posição do prisma com a estação total.....	55
Figura 2.6 – Fotos mostram a compactação do solo durante a implantação dos alvos no SCGR do IAG/USP. Compactação (a) manual e (b) com o auxílio de água	55
Figura 2.7 – Foto do tubo metálico guia enterrado a 0,5 metro de profundidade ao longo da posição Y = 15 metros na área do SCGR do IAG/USP.....	55
Figura 2.8 – Disposição espacial e fotos dos alvos enterrados na Linha de Arqueologia implantada na área do SCGR do IAG/USP.	58
Figura 2.9 – Disposição espacial e fotos de alguns dos alvos instalados na Linha de Canos de PAD implantada na área do SCGR do IAG/USP	59
Figura 2.10 – Disposição espacial e fotos de alguns dos alvos instalados na Linha de Manilhas de concreto implantada na área do SCGR do IAG/USP.....	60
Figura 2.11 – Disposição espacial e fotos de alguns dos alvos instalados na Linha de Tambores de aço de 200 litros implantada na área do SCGR do IAG/USP.....	61
Figura 2.12 – Disposição espacial e fotos de alguns dos alvos instalados na Linha de Tambores plásticos implantada na área do SCGR do IAG/USP	62
Figura 2.13 – Disposição espacial e fotos de alguns dos alvos instalados na Linha de Tubos de ferro implantada na área do SCGR do IAG/USP	63
Figura 2.14 – Disposição espacial e fotos de alguns dos alvos instalados na Linha de Tubos da Sabesp, Eletropaulo e comunicações, implantada na área do SCGR do IAG/USP.....	64
Figura 2.15 – (a) Dimensões das caixas de concreto, com dutos envelopados, enterradas na Linha de Tubos da Sabesp, Eletropaulo e comunicações, implantada na área do SCGR do IAG/USP. Representação gráfica das caixas de concreto, e respectivos alvos, construídas nas distâncias de 13 metros (b) e 17 metros (c)	65
Figura 2.16 – Fotos de blocos (a) de rocha e (b) de concreto, encontrados dentro do aterro do SCGR do IAG/USP	66

Figura 2.17 – Mapa de isolinhas de espessura da cobertura antrópica dentro da área do SCGR do IAG/USP, elaborado a partir das trincheiras escavadas para a implantação dos alvos. (a) Mapa do aterro argilo-arenoso. (b) Mapa do aterro argiloso.....	67
Figura 3.1 – (a) Diagrama de antenas GPR (modo biestático) ilustrando o comportamento das frentes de onda. (b) Traço esquemático mostrando as chegadas das principais frentes de onda do GPR	71
Figura 3.2 – (a) Esquema de aquisição de dados no modo common offset (S = espaçamento entre as antenas, e n_x = espaçamento entre os traços). (b) três traços de GPR mostrando a chegada da onda aérea, da <i>groundwave</i> e da onda refletida no nível d’água	79
Figura 3.3 – Esquema da sondagem de velocidade do tipo CMP (a) e do tipo WARR (b). (c) Exemplo de CMP adquirida próxima ao Monumento a Ramos de Azevedo (projeto de Galileu Emendabili), em frente ao Instituto de Pesquisas e Tecnologias – IPT do Estado de São Paulo. (d) Principais frentes de onda identificadas na CMP.....	80
Figura 3.4 – Esquemas de: (a) transiluminação common offset. (b) tomografia direta. (c) Vertical Radar Profiling – VRP. (d) transiluminação variável	81
Figura 3.5 – (a) Modelo geotécnico utilizado para gerar o conjunto de dados GPR 3D. Cortes, na profundidade de 0,5 metro, mostrando a perda de resolução com o aumento do espaçamento entre os perfis de: (b) 0,1 metro; (c) 0,2 metro; (d) 0,4 metro; (e) 1 metro; (f) 2 metros.....	82
Figura 3.6 – Cortes na mesma profundidade em cubos GPR, Quase-3D, com as aquisições realizadas em direções distintas (a) e (b); e composição dos dois [(a) e (b)] conjuntos de dados (c)(modificado de GSSI, 2003).....	83
Figura 3.7 – Cortes em profundidade de aquisições GPR, Quase-3D, mostrando resultados com boa resolução (a) e com má resolução (b) (GRASMUECK et al., 2005)	83
Figura 3.8 – Esquema de distribuição de antenas em uma aquisição GPR 3D real	85
Figura 3.9 – Gráfico mostra a relação entre a permissividade dielétrica do meio versus o comprimento de onda para diferentes frequências do GPR (velocidade de propagação da onda eletromagnética no vácuo – 0,3 m/ns)	85
Figura 3.10 – (a) Modelo geotécnico utilizado para gerar o conjunto de dados GPR Quase-3D. Cortes, na profundidade de 0,5 metro, mostram as distorções das imagens com o aumento no erro de posicionamento dos traços de: (b) 0,1 metro; (c) 0,2 metro; (d) 0,4 metro; e (e) 1 metro.	88
Figura 3.11 – (a) representação esquemática de um cano de PVC enterrado no solo que ocorre na USP. Cortes em profundidade dos conjuntos de dados GPR, Quase-3D, adquiridos com (b) espaçamento entre os perfis de 0,5 metro, e erros de posicionamento dos traços de 0,1 metro; e com (b) espaçamento entre os perfis de 0,25 metro, e os pontos bem posicionados.....	89
Figura 3.12 – (a) representação esquemática de um tubo metálico enterrado no solo que ocorre no SCGR do IAG/USP. Cortes, na profundidade de 0,5 metro, nos conjuntos de dados GPR, Quase-3D, adquiridos com antenas blindadas de 200 MHz (GSSI), usando espaçamento entre os perfis de 0,2 metro. (b) Perfis perpendiculares ao tubo. (c) Perfis paralelos ao tubo. (d) Todos os perfis. Todos migrados com velocidade constante de 0,07 m/ns.	89

Figura 3.13 – Cortes, na profundidade de 0,5 metro, nos conjuntos de dados GPR, Quase-3D, mostrando o efeito da migração. (a) Dado não migrado. (b) Dado migrado.	90
Figura 3.14 – Visualização em 3D de eventos hiperbólicos provenientes de tubulações. (a) Dado não migrado. (b) Dado migrado	91
Figura 3.15 – Intervalos de resistividade/condutividade elétrica de algumas rochas e materiais	92
Figura 3.16 – Ocorrência de fluídos no solo (modificado de MEYBOOM, 1967, apud McNEILL, 1980)	95
Figura 3.17 – (a) Representação tridimensional de um potencial semi-esférico em volta de um eletrodo de corrente pontual em um meio homogêneo. (b) Decaimento do potencial nas proximidades do eletrodo de corrente pontual (adaptado de REYNOLDS, 1997)	96
Figura 3.18 – Linhas, de fluxos de correntes e equipotenciais, para duas fontes pontuais (eletrodos) de corrente em um meio homogêneo (modificado de DOBRIN, 1960). (a) Vista no plano. (b) Seção vertical. (c) Variação do potencial na superfície	98
Figura 3.19 – Principais técnicas de aquisição de dados de eletrorresistividade. (a) Sondagem Elétrica Vertical – SEV. (b) Tomografia Elétrica – TE. (c) Perfilagem elétrica de poço – PEP	100
Figura 3.20 – Principais arranjos eletródicos utilizados em ensaios de campo e seus fatores geométricos (adaptado de LOKE, 2004)	101
Figura 3.21 – Arranjo de eletrodos para uma investigação 2D e a sequência de medidas utilizadas para construir uma pseudoseção (adaptada de LOKE, 2004)	102
Figura 3.22 – Distribuição de pontos investigados em uma pseudoseção com diferentes arranjos. (a) Wenner e gradiente. (b) Dipolo-dipolo e pólo-dipolo. (c) Wenner-Schlumberger. (d) Pólo-pólo	104
Figura 3.23 – Arranjo de eletrodos dipolo-dipolo axial e a sequência de medidas utilizadas para construir uma pseudoseção	104
Figura 3.24 – Arranjo de eletrodos Wenner-Schlumberger e a sequência de medidas utilizadas para construir uma pseudoseção	105
Figura 3.25 – Arranjo de eletrodos pólo-pólo e a sequência de medidas utilizadas para construir uma pseudoseção	106
Figura 3.26 – Arranjo de eletrodos pólo-dipolo e a sequência de medidas utilizadas para construir uma pseudoseção	106
Figura 3.27 – Arranjo de eletrodos gradiente/quadrado e a sequência de medidas utilizadas para construir uma pseudoseção	107
Figura 3.28 – Formas de anomalias geolétricas em resposta às simulações de aquisições de dados de tomografia elétrica, realizadas sobre um dique intrusivo. Modelos gerados no programa Res2Dmod, versão 3.01 (GEOTOMO, 2002). (a) Modelo geológico. Respostas de um dique condutivo com os arranjos, (b) dipolo-dipolo, (c) Wenner, (d) pólo-pólo, (e) polo-dipolo, (f) Wenner-Schlumberger e (g) gradiente. Respostas de um dique resistivo com os arranjos, (h) dipolo-dipolo, (i) Wenner, (j) pólo-pólo, (k) polo-dipolo, (l) Wenner-Schlumberger, e (m) gradiente.	110

- Figura 3.29** – Diagrama esquemático de malha de elementos finitos utilizada pelo programa Res2dinv (versão 3.53, GEOTOMO, 2003a)..... 112
- Figura 3.30** – Esquema de um sistema de prospecção eletromagnética. A bobina transmissora, energizada com uma corrente alternada (I_p), produz um campo magnético primário ($\vec{H}_p$) que induz correntes secundárias (I_s) no condutor em subsuperfície. A bobina receptora mede a resultante entre $\vec{H}_p$ e $\vec{H}_s$ 113
- Figura 3.31** – Diagrama de vetores de respostas eletromagnéticas (modificado de MACLEAN et al., 1991) 114
- Figura 3.32** – Seis configurações comuns de antenas dipolares: (a) horizontal coplanar, (b) vertical coplanar, (c) perpendicular, (d) vertical coaxial, (e) nula, e (f) paralela ... 115
- Figura 3.33** – Configuração esquemática do equipamento EM31 durante a aquisição em campo, nos modos DMH e DMV 118
- Figura 3.34** – Disposição do equipamento EM-38 nos modos de aquisição. (a) Dipolo Magnético Vertical. (b) Dipolo Magnético Horizontal 119
- Figura 3.35** – Função resposta impulsiva (ϕ) para os dipolos magnético horizontal, $\phi_H(z)$, e vertical, $\phi_V(z)$, em função da profundidade (McNEILL, 1980)..... 120
- Figura 4.1** – Trenó GPR desenvolvido para aquisição de dados de GPR. a) Trenó sem as antenas. b) Trenó com as antenas de 100 MHz..... 122
- Figura 4.2** – *Hip chain trigger* fixado na parte traseira do trenó para aquisição dos dados GPR 122
- Figura 4.3** – Radargamas adquiridos com antenas não-blindadas de 100 MHz e 200 MHz acopladas no trenó. st = stack. IT= intervalo entre traços. VD= velocidade de deslocamento do rebocador. Radargamas com os parâmetros de aquisição: a) 100 MHz, st = 64 traços, IT = 0,2 m, VD = 1,0 m/s; b) 100 MHz, st = 64 traços, IT = 0,2 m, VD = 0,5 m/s; c) 100 MHz, st = 32 traços, IT = 0,2 m, VD = 0,2 m/s. d) 200 MHz, st = 32 traços, IT = 0,05 m, VD = 0,2 m/s..... 124
- Figura 4.4** – Esquema de como foram adquiridos os perfis GPR ao longo da área do SCGR..... 124
- Figura 4.5** – Fotos de algumas aquisições realizadas com o GPR na área do SCGR do IAG/USP, antes da implantação dos alvos. a) Aquisição com antenas GPR de 100 MHz blindadas. b) Antenas de 200 MHz no trenó. c) Antenas de 200 MHz no modo passo-a-passo. d) Antenas blindadas de 250 MHz. e) Antenas blindadas de 500 MHz. f) Antenas blindadas de 1GHz 125
- Figura 4.6** – Disposição das SEVs realizadas para verificar o comportamento do subsolo, antes da implantação dos alvos na área do SCGR do IAG/USP 127
- Figura 4.7** – (a) Eletrodo não polarizável utilizado nas aquisições de dados elétricos. (b) Umedecimento do solo onde foi instalado o eletrodo poroso com solução de sulfato de cobre 128
- Figura 4.8** – Equipamento Syscal R2, fabricado pela IRIS. Do lado esquerdo a unidade conversora e do direito a unidade de controle e armazenamento de dados..... 128
- Figura 4.9** – Disposição dos pontos de investigação obtidos com o imageamento elétrico. (a) Na área do SCGR. (b) Ao longo das linhas 129

Figura 4.10 – Curva de voltagem no domínio do tempo, ilustrando as janelas dos parâmetros utilizados em campo durante a aquisição dos dados de TE no SCGR do IAG/USP.....	130
Figura 4.11 – (a) Comutador eletrônico de eletrodos utilizados na TE. (b) Sistema de conexão entre o eletrodo e o cabo de potencial utilizado para diminuir o tempo de aquisição de dados.....	130
Figura 4.12 – Medidas de condutividade aparente, obtidas com o EM-38, sobre o mesmo perfil mostrando o <i>drift</i> instrumental provocado pela variação da temperatura ambiente (adaptada de SUDDUTH et al., 2001).....	131
Figura 4.13 – (a) Resposta da temperatura do painel de controle (PC) e bobina receptora do EM-38 com o centro do equipamento (painel de controle) coberto com um cobertor elétrico ligado até 130 minutos e desligado de 130 a 250 minutos. (b) Resposta da σ , que diminui quando o PC está coberto e aumenta quando o cobertor elétrico é desligado (adaptado de ROBINSON et al., 2004).....	132
Figura 4.14 – (a) Resposta da temperatura do painel de controle (CP) e bobina receptora do EM-38 com o centro do equipamento (painel de controle) coberto com um cobertor elétrico ligado. (b) Resposta da σ_a (adaptado de ROBINSON et al., 2004)..	132
Figura 4.15 – Localização dos pontos de investigação com o equipamento EM-38 na área do SCGR do IAG/USP	133
Figura 4.16 – Fotos de algumas aquisições realizadas com o GPR na área do SCGR do IAG/USP. a) Aquisição com antenas blindadas de 500 MHz (RAMAC I). b) Antena blindada de 100 MHz (SIR 3000). c) Aquisição com antena blindada de 200 MHz (SIR 3000). d) Antena blindada de 400 MHz (SIR 3000)	135
Figura 4.17 – (a) Perfil adquirido sobre a Linha 27NS (tambores de aço) com espaçamento entre os traços de 0,025 metro (Dado bruto). (b) Espectro f-k do perfil GPR adquirido na Linha 27NS. O tracejado indica que Kx tem a maior energia no intervalo $\cong \pm 2,5$ (1/m).....	136
Figura 4.18 – Seções geoeletricas da Linha 15 (manilhas de concreto), modeladas no software Res2dinv, com os alvos sobrepostos e interfaces geológicas. Arranjos: (a) dipolo-dipolo. (b) pólo-dipolo. (c) pólo-pólo. (d) Wenner Schlumberger	141
Figura 4.19 – Seções geoeletricas da Linha 15 (manilhas de concreto), modeladas no software Res2dinv, com os alvos sobrepostos e interfaces geológicas. Arranjos: (a) Wenner alpha. (b) Wenner beta. (c) Wenner gamma	142
Figura 4.20 – Seções geoeletricas da Linha 15 (manilhas de concreto), modeladas no software Res2dinv, com os alvos sobrepostos e interfaces geológicas. Seções adquiridas com o arranjo dipolo-dipolo e espaçamento entre os dipolos de (a) 0,5 metro e de (b) 0,25 metro.....	143
Figura 4.21 – (a) Foto do eletrorresistivímetro SYSCAL PRO, utilizado nas aquisições multieletródos na área do SCGR. (b) Foto evidencia uma aquisição elétrica multieletródos sobre a Linha de tambores metálicos.	143
Figura 4.22 – Esquema da aquisição e disposição de dados de eletrorresistividade com o equipamento SYSCAL PRO, utilizando o modo manual, com 10 canais em cada deslocamento.	144

Figura 4.23 – Medidas de condutividade elétrica aparente, obtidas com o EM-38, sobre a linha 27NS do SCGR do IAG/USP. O gráfico mostra a variação nos valores medidos conforme há mudança na altura do equipamento.....	145
Figura 4.24 – Medidas de condutividade elétrica aparente, obtidas com o EM-38, sobre a linha 21NS do SCGR do IAG/USP. O gráfico mostra a variação nos valores medidos de acordo com o horário diurno.....	145
Figura 4.25 – Croqui ilustrando as aquisições realizadas com o EM38 sobre cada faixa de alvos instalados no SCGR do IAG/USP.....	146
Figura 5.1 – Seções GPR realizadas sobre a Linha 17NS, com antenas de 100 MHz. a) antenas não-blindadas, no modo passo-a-passo; b) antenas não-blindadas no modo contínuo; e c) antenas blindadas no modo contínuo.....	149
Figura 5.2 – Seções GPR realizadas sobre a Linha 17NS. a) seção obtida com antenas não-blindadas de 200 MHz no modo passo-a-passo e b) no modo contínuo. c) seção obtida com antenas blindadas de 250 MHz.....	150
Figura 5.3 – Seções GPR realizadas sobre a Linha 17NS. a) seção obtida com antenas blindadas de 500 MHz e b) blindadas de 1 GHz.....	151
Figura 5.4 – Blocos retangulares elaborados com os dados de GPR, Quase-3D, adquiridos, na área do SCGR antes da implantação dos alvos, com as antenas de: 100 MHz não-blindadas (a) no modo passo-a-passo e (b) no modo contínuo; (c) 100 MHz blindadas no modo contínuo; 200 MHz não-blindadas (d) no modo passo-a-passo e (e) no modo contínuo; e (f) 250 MHz blindadas no modo contínuo.....	152
Figura 5.5 – (a) Bloco retangular mostrando a interpolação entre as linhas de GPR, Quase-3D, obtidas com as antenas não-blindadas de 100 MHz no modo contínuo. (b) e (c) Limite entre o aterro e os sedimentos argilosos da planície de inundação do rio Pinheiros gerados no software ReflexW	152
Figura 5.6 – (a) Mapa de espessura do aterro na área do SCGR, obtido pela interpretação de dados de GPR adquiridos com antenas não-blindadas de 100 MHz. (b) Mesmo mapa suavizado (média móvel entre cinco pontos).....	153
Figura 5.7 - Mapas de espessura do aterro dentro da área do SCGR. (a) obtido pela interpretação de dados de GPR, Quase-3D, com antenas não-blindadas de 100 MHz e suavizado e (b) obtido com a escavação das trincheiras. (c) Diferença entre o mapa de espessura (b) e (a).....	153
Figura 5.8 – Curvas de campo e modelos 1D das SEVs realizadas no SCGR do IAG/USP, antes da instalação dos alvos. Curvas de (a) Resistividade elétrica aparente e (b) Cargabilidade média aparente. Modelos 1D de (c) Resistividade elétrica. (d) Cargabilidade.....	156
Figura 5.9 – Mapas de resistividade elétrica e isoessura dos horizontes geolétricos elaborados com os resultados das SEVs obtidas na área do SCGR do IAG/USP, antes da instalação dos alvos. Horizonte 1 (a) SEVs NS e (b) SEVs EW. Horizonte 2 (c) SEVs NS e (d) SEVs EW. Horizonte 3 (e) SEVs NS e (f) SEVs EW	157
Figura 5.10 – Mapas de cargabilidade e isoessura dos horizontes geolétricos elaborados com os resultados das SEVs obtidas na área do SCGR do IAG/USP, antes da instalação dos alvos. Horizonte 1 (a) SEVs NS e (b) SEVs EW. Horizonte 2 (c) SEVs NS e (d) SEVs EW. Horizonte 3 (e) SEVs NS e (f) SEVs EW.	158

Figura 5.11 – Resultados da modelagem inversa dos dados de resistividade aparente (ρ_a) da linha 1NS do SCGR do IAG/USP. (a) Pseudo-seção de ρ_a dos dados de campo. (b) Pseudo-seção de ρ_a calculada. (c) Seção de resistividade elétrica, obtida por meio da modelagem inversa.....	159
Figura 5.12 – Resultados da modelagem inversa dos dados de cargabilidade média aparente (Mma) da linha 1NS do SCGR do IAG/USP. (a) Pseudo-seção de Mma dos dados de campo. (b) Pseudo-seção de Mma calculada. (c) Seção de cargabilidade, obtida por meio da modelagem inversa.....	160
Figura 5.13 – Histograma de distribuição de frequência dos dados de resistividade elétrica aparente do primeiro nível de investigação elétrica.....	161
Figura 5.14 – Mapa de isovalores de resistividade do Nível 1 da área do SCGR do IAG/USP, obtido por meio da técnica da tomografia elétrica, com o arranjo dipolo-dipolo. (a) Mapa com os dados brutos. (b) Mapa dos dados entre o intervalo $\bar{X} \pm 2SD$. (c) Mapa residual (a – b) mostrando os pontos que foram excluídos dos dados originais	162
Figura 5.15 – Mapa de isovalores de resistividade do Nível 1 da área do SCGR do IAG/USP obtido por meio da técnica da tomografia elétrica, com o arranjo dipolo-dipolo. (a) Dados sem suavização. (b) Dados suavizados.....	162
Figura 5.16 – Mapas de isovalores de resistividade aparente dos níveis de investigação, com as respectivas profundidades teóricas, da área do SCGR do IAG/USP, obtido por meio da técnica da tomografia elétrica com o arranjo dipolo-dipolo. Nota-se uma zona condutiva na parte leste da área, do primeiro ao quarto níveis.....	164
Figura 5.17 – Mapas de isovalores de cargabilidade aparente (Ma), dos níveis de investigação, com as respectivas profundidades teóricas, da área do SCGR do IAG/USP, obtido por meio da técnica da tomografia elétrica com o arranjo dipolo-dipolo. Notam-se os maiores valores de Ma na parte leste da área, do primeiro ao quarto níveis. Do quinto nível em diante os valores de Ma correspondem ao paleossolo (mais argiloso)	164
Figura 5.18 – Cortes, em profundidade, do bloco de inversão 3D dos dados de resistividade elétrica, adquiridos na área do SCGR do IAG/USP. (a) 0,0 m a 0,35 m. (b) 0,35 m a 0,75 m. (c) 0,75 m a 1,22 m. (d) 1,22 m a 1,75 m. (e) 1,75 m a 2,36 m. (f) 2,36 m a 3,06 m.....	165
Figura 5.19 – Cortes, em profundidade, do bloco de inversão 3D dos dados de cargabilidade adquiridos na área do SCGR do IAG/USP. (a) 0,0 m a 0,35 m. (b) 0,35 m a 0,75 m. (c) 0,75 m a 1,22 m. (d) 1,22 m a 1,75 m. (e) 1,75 m a 2,36 m. (f) 2,36 m a 3,06 m.....	165
Figura 5.20 – Mapas de isovalores, de condutividade elétrica aparente, obtidos com o EM-38 na área do SCGR do IAG/USP. Dados com o equipamento nos modos DMH (a) dados brutos e (b) dados suavizados, e DMV (c) dados brutos e (d) dados suavizados	166
Figura 5.21 – Mapas de isovalores, de susceptibilidade magnética, obtidos com o EM-38 na área do SCGR do IAG/USP. Dados com o equipamento no modo DMV (a) dados brutos e (b) dados suavizados.....	167

Figura 5.22 – Radargramas obtidos com antenas de diferentes frequências sobre parte da Linha 4 do SCGR do IAG/USP. Os refletores hiperbólicos representam um par de tambores metálicos. (B = blindada, NB = não-blindada)	168
Figura 5.23 – Modelos de velocidade, da onda eletromagnética, obtidos sobre a Linha de tambores metálicos do SCGR do IAG/USP, com diferentes frequências: (a) 100 MHz blindada, RAMAC; (b) 200 MHz blindada, SIR 3000; (c) 250 MHz blindada, RAMAC; (d) 400 MHz blindada, SIR 3000; e (e) 500 MHz blindada, RAMAC	170
Figura 5.24 – Cortes em profundidade dos dados GPR adquiridos sobre parte do tubo metálico de 3,8 cm de diâmetro enterrado na área do SCGR/IAG. Mapas mostrando o efeito do erro de posicionamento dos traços (a) e após as correções (b).....	171
Figura 5.25 – Visualização em volume dos resultados da interpolação dos perfis 2D adquiridos sobre tubos metálicos. (a) Cubo não migrado. (b) Cubo migrado.....	171
Figura 5.26 – Visualização em cortes no tempo (15,47 ns) dos resultados da interpolação dos perfis GPR 2D. (a) Seção não migrada. (b) Seção migrada.....	171
Figura 5.27 – Visualização em cortes no tempo (15,47 ns) do envelope dos traços. (a) Seção não migrada. (b) Seção migrada	172
Figura 5.28 – Gráficos mostrando os erros RMS, de resistividade elétrica (a) e cargabilidade (b), após cada iteração no software Res2dinv.....	173
Figura 5.29 – Modelo geolétrico da Linha 3, com as interfaces e as interferências (alvos) sobrepostas.	173
Figura 5.30 – Mapa de condutividade elétrica aparente do SCGR/IAG, adquirido no modo DMV, após a implantação dos alvos	174
Figura 6.1 – Perfis extraídos do cubo GPR, Quase-3D (100 MHz, Figura 5.5) da área do SCGR do IAG/USP, mostram a interface entre aterro e solo argiloso. (a) L26-x. (b) L08-y. (c) L20-y. (d) L32-y.....	177
Figura 6.2 – Cortes, em profundidade, do conjunto de dados GPR, Quase-3D (100 MHz) adquiridos, antes da implantação dos alvos no SCGR do IAG/USP (t = tempo; d=profundidade). Cortes nas profundidades de (a) 0,5 metro, (b) 1,02 metro, (c) 1,50 metro e (d) 3,51 metros. As partes mais escuras indicam áreas de alta refletividade e as claras de elevada absorção.....	179
Figura 6.3 – Modelo geológico-geolétrico elaborado a partir das SEVs executadas, na área do SCGR do IAG/USP, antes da implantação dos alvos.	180
Figura 6.4 – Relação entre resistividade elétrica aparente, polarizabilidade aparente e litologia (modificado de DRASKOVITS et al., 1990)	181
Figura 6.5 – Seções de resistividade elétrica das linhas onde foram implantados os alvos dentro da área do SCGR do IAG/USP. Os maiores valores de resistividade indicam o aterro presente na área e os menores valores (< 250 Ω .m) definem os sedimentos argilosos da planície de inundação do rio Pinheiros.....	183
Figura 6.6 – Seções de cargabilidade das linhas onde foram implantados os alvos dentro da área do SCGR do IAG/USP. Os valores elevados indicam materiais mais argilo-arenosos e os menores valores indicam materiais mais argilosos. Observa-se também que na parte leste da área os valores de cargabilidade são menores, indicando a maior concentração de argila nesta região.	184

Figura 6.7 – Mapas de condutividade elétrica aparente no modo DMH (a) e DMV (b), e mapa de susceptibilidade magnética no modo DMV, obtidos na área do SCGR do IAG/USP, antes da instalação dos alvos. Os círculos indicam áreas anômalas	186
Figura 6.8 – Seções GPR da Linha 1 (arqueologia) do SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. (a) 100 MHz, blindada, RAMAC; (b) 200 MHz blindada, SIR3000; (c) 250 MHz blindada, RAMAC; (d) 400 MHz blindada, SIR 3000; e (e)500 MHz blindada, RAMAC.....	191
Figura 6.9 – Seções GPR da Linha 2 (Tubulação hidráulica) do SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. (a) 100 MHz, blindada, RAMAC; (b) 200 MHz blindada, SIR3000; (c) 250 MHz blindada, RAMAC; e (d) 500 MHz blindada, RAMAC.	193
Figura 6.10 – Parte das seções GPR, obtidas sobre um cano de PAD enterrado na profundidade de 0,5 metro, expondo uma inversão de polaridade, do pulso eletromagnético, sobre os canos com água e uma polaridade normal sobre o cano vazio. Seções adquiridas com as frequências de 200 MHz (a, b, c) e 250 MHz (d, e, f).....	194
Figura 6.11 – Seções GPR da Linha 3 (manilhas de concreto) do SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. (a) 100 MHz, blindada, RAMAC; (b) 200 MHz blindada, SIR3000; (c) 250 MHz blindada, RAMAC; (d) 400 MHz blindada, SIR 3000; e (e)500 MHz blindada, RAMAC.	195
Figura 6.12 – Seções GPR da Linha 4 (tambores metálicos) do SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. (a) 100 MHz, blindada, RAMAC; (b) 200 MHz blindada, SIR3000; (c) 250 MHz blindada, RAMAC; (d) 400 MHz blindada, SIR 3000; e (e)500 MHz blindada, RAMAC.	197
Figura 6.13 – Seções GPR da Linha 5 (tambores de plástico) do SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. (a) 100 MHz, blindada, RAMAC; (b) 200 MHz blindada, SIR3000; (c) 250 MHz blindada, RAMAC; (d) 400 MHz blindada, SIR 3000; e (e)500 MHz blindada, RAMAC.	199
Figura 6.14 – Seções GPR da Linha 6 (tubos de aço) do SCGR DO IAG/USP, com os alvos identificados. (a) 100 MHz, blindada, RAMAC; (b) 200 MHz blindada, SIR3000; (c) 250 MHz blindada, RAMAC; (d) 400 MHz blindada, SIR 3000; e (e)500 MHz blindada, RAMAC.....	203
Figura 6.15 – Seções GPR da Linha 7 (Cabos Elétricos, Hidráulicos e Conduítes de plástico e de PVC para passagem de cabos de Fibra Ótica) do SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. (a) 100 MHz, blindada, RAMAC; (b) 200 MHz blindada, SIR3000; (c) 250 MHz blindada, RAMAC; e (d)500 MHz blindada, RAMAC.	204
Figura 6.16 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 400 MHz), da área onde foram instalados os alvos arqueológicos no SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. Cortes realizados nas profundidades de: (a) 0,50 metro, (b) 0,52 metro, (c) 0,63 metro, e (d) 0,99 metro.	207
Figura 6.17 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 400 MHz), da área onde foram instalados os alvos arqueológicos no SCGR do IAG/USP, e o refletor relacionado ao muro de tijolos. Dados com ganhos de (a) 0,0625 e (b) 0,3....	208
Figura 6.18 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 200 MHz), da área onde foram instalados as manilhas de concreto no SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. Cortes realizados nas profundidades de: (a) 0,50 metro, (b) 0,75 metro, (c) 0,93 metro, (d) 0,97 metro, (e) 1,03 metro, e 1,62 metro.	209

Figura 6.19 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 400 MHz), da área onde foram instaladas as manilhas de concreto no IAG/USP, com os alvos identificados. Cortes realizados nas profundidades de: (a) 0,47 metro, (b) 0,50 metro, (c) 0,75 metro, (d) 0,93 metro, e (e) 1,03 metro.....	210
Figura 6.20 – Cortes, em profundidade no cubo GPR, Quase-3D, da área onde foram instaladas as manilhas de concreto no SCGR do IAG/USP, com o refletor relacionado ao alvo Mn4 (manilha de concreto de 0,48 metro de diâmetro externo). Resultados obtidos com as antenas de (a) 200 MHz e (b) 400 MHz.	211
Figura 6.21 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 200 MHz), da área onde foram instalados os tambores de aço no SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. Cortes realizados nas profundidades de: (a) 0,50 metro, (b) 1,0 metro e (c) 1,97 metro.	211
Figura 6.22 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 400 MHz), da área onde foram instalados os tambores de aço no SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. Cortes realizados nas profundidades de: (a) 0,50 metro e (b) 1,0 metro.....	212
Figura 6.23 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 200 MHz), da área onde foram instalados os tambores de plástico no SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. Cortes realizados nas profundidades de: (a) 0,50 metro, (b) 1,0 metro, e (c) 1,50 metro	212
Figura 6.24 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 400 MHz), da área onde foram instalados os tambores de plástico no SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. Cortes realizados nas profundidades de: (a) 0,50 metro e (b) 0,95 metro.....	213
Figura 6.25 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 200 MHz), da área onde foram instalados alguns tambores de plástico no SCGR do IAG/USP, com os refletores relacionados aos tambores enterrados na profundidade de 1,5 metro. Dados com ganhos de (a) 0,0625 e de (b) 1,0.....	213
Figura 6.26 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 200 MHz), da área onde foram instalados os tubos de aço no SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados Cortes realizados nas profundidades de: (a) 0,50 metro, (b) 1,0 metro, e (c) 1,50 metro	214
Figura 6.27 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 400 MHz), da área onde foram instalados os tubos de aço no SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados Cortes realizados nas profundidades de: (a) 0,50 metro e (b) 1,0 metro.....	214
Figura 6.28 – Seções de eletrorresistividade, obtidas sobre a Linha 1 (Arqueologia). (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade elétrica obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos.....	217
Figura 6.29 – Seções de cargabilidade, obtidas sobre a Linha 1 (Arqueologia). (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos.....	218

Figura 6.30 – Seções de eletrorresistividade, obtidas sobre a Linha 2 (Tubos de PAD). (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade elétrica obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos. 219

Figura 6.31 – Seções de cargabilidade, obtidas sobre a Linha 2 (Tubos de PAD). (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos. 220

Figura 6.32 – Seções de eletrorresistividade, obtidas sobre a Linha 3 (Manilhas de concreto). (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade elétrica obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos. 221

Figura 6.33 – Seções de cargabilidade, obtidas sobre a Linha 3 (manilhas de concreto). (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos. 222

Figura 6.34 – Seções de eletrorresistividade, obtidas sobre a Linha 4 (tambores de aço). (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade elétrica obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos. 223

Figura 6.35 – Seções de cargabilidade, obtidas sobre a Linha 4 (tambores de aço). (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos. 224

Figura 6.36 – Seções de eletrorresistividade obtidas sobre a Linha 5 (tambores de plástico). (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade elétrica obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos. 225

Figura 6.37 – Seções de cargabilidade, obtidas sobre a Linha 5 (tambores de plástico). (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos. 226

Figura 6.38 – Seções de eletrorresistividade, obtidas sobre a Linha 6 (tubos de ferro). (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade elétrica obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos. 228

Figura 6.39 – Seções de cargabilidade, obtidas sobre a Linha 6 (tubos de ferro). (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos. 229

Figura 6.40 – Seções de eletrorresistividade, obtidas sobre a Linha 7 (Cabos Elétricos, Hidráulicos e Conduítes de plástico e de PVC, para passagem de cabos de Fibra Ótica). (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do

ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade elétrica obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos. 230

Figura 6.41 – Seções de eletrorresistividade, obtidas sobre a Linha 7 (Cabos Elétricos, Hidráulicos e Conduítes de plástico e de PVC, para passagem de cabos de Fibra Ótica). (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade elétrica obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos. 231

Figura 6.42 – (a) Vista em planta da Faixa 1 (arqueologia), com os alvos e o contorno das cavas identificadas. Mapas de condutividade elétrica aparente obtidos nos modos DMH (b) e DMV (c), com as respectivas anomalias identificadas. 235

Figura 6.43 – (a) Vista em planta da Faixa 2 (tubos de PAD), com os alvos e o contorno das cavas identificadas. Mapas de condutividade elétrica aparente obtidos nos modos DMH (b) e DMV (c), com as respectivas anomalias identificadas. 236

Figura 6.44 – (a) Vista em planta da Faixa 3 (manilhas de concreto), com os alvos e o contorno das cavas identificadas. Mapas de condutividade elétrica aparente obtidos nos modos DMH (b) e DMV (c), com as respectivas anomalias identificadas. 237

Figura 6.45 – (a) Vista em planta da Faixa 4 (tambores de aço), com os alvos e o contorno das cavas identificadas. Mapas de condutividade elétrica aparente obtidos nos modos DMH (b) e DMV (c), com as respectivas anomalias identificadas. 238

Figura 6.46 – (a) Vista em planta da Faixa 5 (tambores plásticos), com os alvos e o contorno das cavas identificadas. Mapas de condutividade elétrica aparente obtidos nos modos DMH (b) e DMV (c), com as respectivas anomalias identificadas. 240

Figura 6.47 – (a) Vista em planta da Faixa 6 (tubos metálicos), com os alvos e o contorno das cavas identificadas. Mapas de condutividade elétrica aparente obtidos nos modos DMH (b) e DMV (c), com as respectivas anomalias identificadas. 241

Figura 6.48 – (a) Vista em planta da Faixa 7 (tubos metálicos), com os alvos e o contorno das cavas identificadas. Mapas de condutividade elétrica aparente obtidos nos modos DMH (b) e DMV (c), com as respectivas anomalias identificadas 244

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Intervalo de valores de constante dielétrica (ε_r') e condutividade elétrica (σ_0) observadas em alguns materiais (ANNAN, 1992; PORSANI, 1999; PRADO, 2000).....	74
Tabela 3.2 – Avaliação de alguns arranjos eletródicos utilizados em tomografia elétrica (modificada de WARD, 1990)	108
Tabela 3.3 – Profundidades efetivas para vários arranjos eletródicos (EDWARDS, 1977).....	109
Tabela 3.4 – Frequências de operação e profundidades teóricas de investigação de alguns condutímetro de solo e seus espaçamentos entre as bobinas.....	119
Tabela 4.1 – Tempo gasto para compor 1 traço com 512 amostras, com o equipamento Ramac, modificando-se o empilhamento	123

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Coeficiente de reflexão para alguns materiais dispostos na área do SCGR do IAG/USP.....	77
Quadro 3.2 – Frequência central da antena versus Profundidade máxima de penetração do GPR obtidos na área do SCGR do IAG/USP	78
Quadro 3.3 – Intervalo de amostragem espacial ótimo (espaçamento entre os traços) para aquisições 3D na área do SCGR de acordo com a frequência de Nyquist	86
Quadro 4.1 – Parâmetros utilizados durante a aquisição dos dados de imageamento elétrico realizados na área de implantação do SCGR do IAG/USP	129
Quadro 4.2 – Número de perfis adquiridos com os equipamentos GPR após a implantação dos alvos dentro do SCGR do IAG/USP	134
Quadro 5.1 – Valores de resistividade aparente (pa), cargabilidade (M) e espessura (h) das camadas dos modelos de ajuste das SEVs executadas dentro da área do SCGR do IAG/USP antes da instalação dos alvos.....	155
Quadro 5.2 – Tempos de trânsito e velocidades dos eventos hiperbólicos, identificados e calculados para os radargramas, obtidos com diversas antenas sobre o par de tambores metálicos da Linha 4 do SCGR do IAG/USP	169
Quadro 6.1 – Profundidade real e tempo de trânsito de cada alvo presente nas seções GPR da Linha 1 (Arqueologia) do SCGR do IAG/USP.....	189
Quadro 6.2 – Profundidade real e tempo de trânsito de cada alvo presente nas seções GPR da Linha 2 (Tubulação hidráulica) do SCGR do IAG/USP.....	190
Quadro 6.3 – Profundidade real e tempo de trânsito de cada alvo presente nas seções GPR da Linha 3 (Manilhas de concreto) do SCGR do IAG/USP	192
Quadro 6.4 – Profundidade real e tempo de trânsito de cada alvo presente nas seções GPR da Linha 4 (Tambores de Aço) do SCGR do IAG/USP	196
Quadro 6.5 – Profundidade real e tempo de trânsito de cada alvo presente nas seções GPR da Linha 5 (Tambores de plástico) do SCGR do IAG/USP	198
Quadro 6.6 – Profundidade real e tempo de trânsito de cada alvo presente nas seções GPR da Linha 6 (Tubos de aço) do SCGR do IAG/USP	200
Quadro 6.7 – Profundidade real e tempo de trânsito de cada alvo presente nas seções GPR da Linha 7 (Cabos Elétricos, Hidráulicos e Conduítes de plástico e de PVC para passagem de cabos de Fibra Ótica) do SCGR do IAG/USP.....	201
Quadro 6.8 – Síntese comparativa da aplicabilidade dos métodos GPR, eletrorresistividade/cargabilidade (ER) e eletromagnético indutivo – EM-38 (EM) na identificação dos alvos enterrados na área do SCGR do IAG/USP.	245

LISTA DE ABREVIACÕES

AGC	– <i>Automatic Gain Control</i>
ALGTS	– <i>Asylum Lake Geophysical Test Site</i>
A/m ²	– Ampère por metro quadrado
CATS	– <i>Controlled Archaeological Test Site</i>
CMP	– <i>Common Mid Point</i>
C/m ²	– Coulomb por metro quadrado
dB/m	– Decibéis por metro
DIC	– <i>Depth of Investigation Characteristic</i>
DMH	– Dipolo Magnético Horizontal
DMV	– Dipolo Magnético Vertical
EGTS	– <i>Engineering Geophysics Test Site</i>
EIGG	– <i>Environmental and Industrial Geophysics Group</i>
ELETROPAULO	– Eletricidade de São Paulo SA.
EM	– Eletromagnético
Eq.	– Equação
E-W	– Leste – Oeste
F/m	– Faraday por metro
GHz	– Gigahertz (10 ⁹ Hz)
GSSI	– <i>Geophysical Survey Systems Incorporated</i>
GPR	– <i>Ground Penetrating Radar</i>
GPS	– <i>Global Positioning System</i>
H/m	– Henry por metro
IAG	– Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
IGc	– Instituto de Geociências
IP	– Polarização Induzida
IPT	– Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LCPC	– <i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LIGA	– Laboratório de Instrumentação Geofísica
m	– metro
m ²	– metro quadrado
mA	– miliampère
Mm _a	– Cargabilidade Média Aparente
MHz	– megahertz (10 ⁶ Hz)
mS/m	– milisiemens por metro
N-S	– Norte – Sul
ns	– nanosegundo (10 ⁻⁹ segundos)

ON	– Observatório Nacional
PAD	– Polietileno de Alta Densidade
PEP	– Perfilagem Elétrica de Poços
PVC	– Poli Cloreto de Vinila
RMS	– <i>Root Mean Square</i> (média quadrática)
SABESP	– Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SCGR	– Sítio Controlado de Geofísica Rasa
SEV	– Sondagem Elétrica Vertical
SI	– Sistema Internacional
SP	– <i>Spontaneous Potential</i> (Potencial Espontâneo)
SUETS	– <i>Stanford University Environmental Test Site</i>
TE	– Tomografia Elétrica
UFBA	– Universidade Federal da Bahia
UFC	– Universidade Federal do Ceará
UFMG	– Universidade Federal de Minas Gerais
UFMT	– Universidade Federal do Mato Grosso
UFPA	– Universidade Federal do Pará
UFRGS	– Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRJ	– Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFRN	– Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Unesp	– Universidade Estadual Paulista
UnB	– Universidade de Brasília
USP	– Universidade de São Paulo
V	– Volt
VLF	– <i>Very Low Frequency</i>
VRP	– <i>Vertical Radar Profiling</i>
WARR	– <i>Wide Angle Reflection and Refraction</i>
WMU	– <i>Western Michigan University</i>
W/m ²	– Weber por metro quadrado
YES	– <i>York Environmental Site</i>
1D	– Uma dimensão
2D	– Duas dimensões
3D	– Três dimensões

LISTA DE SÍMBOLOS

α	– atenuação (dB/m)
β	– propagação (dB/m)
δV	– diferença de potencial (mV)
$\vec{B}$	– indução magnética em (W/m ²)
$\vec{D}$	– densidade de corrente de deslocamento (C/m ²)
ε	– permissividade dielétrica
ε_r'	– permissividade dielétrica relativa
$\vec{E}$	– intensidade do campo elétrico (V/m)
f	– frequência (para o GPR em MHz)
$\vec{H}$	– intensidade do campo magnético (A/m ²)
H_p	– intensidade do campo magnético primário (A/m ²)
H_s	– intensidade do campo magnético secundário (A/m ²)
I	– corrente elétrica (mA)
I_p	– corrente elétrica primária (mA)
I_s	– corrente elétrica secundária (mA)
i	– número complexo ($i = \sqrt{-1}$)
$\vec{J}$	– densidade de corrente de condução (A/m ²)
k	– número de onda
K	– fator geométrico que depende da configuração de eletrodos
δ	– <i>skin depth</i>
λ	– comprimento de onda (m)
μ	– permeabilidade magnética (H/m)
r_{gpr}	– coeficiente de reflexão GPR
ρ	– resistividade elétrica ($\Omega \cdot m$)
ρ_a	– resistividade elétrica aparente ($\Omega \cdot m$)
σ	– condutividade elétrica (S/m)
σ_a	– condutividade elétrica aparente (S/m)
v	– velocidade de propagação da onda eletromagnética (m/ns)
ω	– frequência angular ($\omega = 2\pi f$)
Δt	– intervalo de amostragem temporal
Δx	– intervalo de amostragem espacial
∇	– operador nabla
$\nabla \times \vec{E}$	– rotacional do campo elétrico
$\nabla \times \vec{H}$	– rotacional do campo magnético
Z	– impedância elétrica
Ω	– Ohm

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO	41
1.1 OBJETIVOS	49

CAPÍTULO 2

2. O SÍTIO CONTROLADO DE GEOFÍSICA RASA DO IAG/USP	51
2.1. INSTALAÇÃO DO SCGR	51
2.2 GEOLOGIA DA ÁREA DO SCGR DO IAG/USP	65

CAPÍTULO 3

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	69
3.1 GROUND PENETRATING RADAR	69
3.1.1 Técnicas de Aquisição de Dados	78
3.2 ELETORRESISTIVIDADE	91
3.2.1 Propriedades elétricas dos materiais terrestres	92
3.2.2 Fluxo de corrente em meios homogêneos	96
3.2.3 Técnicas de aquisição de dados	99
3.2.4 Tipos de interpretação de dados elétricos 2D	109
3.3 ELETROMAGNÉTICO INDUTIVO	112
3.3.1 Técnicas de Aquisição de Dados	116

CAPÍTULO 4

4 AQUISIÇÕES DOS DADOS	121
4.1 ANTES DA INSTALAÇÃO DOS ALVOS NA ÁREA DO SCGR	121
4.1.1 <i>Ground Penetrating Radar</i>	121
4.1.2 Eletorresistividade	126
4.1.3 Eletromagnético Indutivo	130
4.2 DEPOIS DA INSTALAÇÃO DOS ALVOS NA ÁREA DO SCGR	133
4.2.1 <i>Ground Penetrating Radar</i>	133
4.2.2 Eletorresistividade	137
4.1.3 Eletromagnético Indutivo	144

CAPÍTULO 5

5 PROCESSAMENTO E MODELAGEM DOS DADOS	147
5.1 ANTES DA INSTALAÇÃO DOS ALVOS NA ÁREA DO SCGR.....	147
5.1.1 <i>Ground Penetrating Radar</i>	147
5.1.2 Eletorresistividade	154
5.1.3 Eletromagnético Indutivo	166
5.2 DEPOIS DA INSTALAÇÃO DOS ALVOS NA ÁREA DO SCGR.....	167
5.2.1 <i>Ground Penetrating Radar</i>	167
5.2.2 Eletorresistividade	172
5.2.3 Eletromagnético Indutivo	174

CAPÍTULO 6

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	175
6.1 ANTES DA INSTALAÇÃO DOS ALVOS NA ÁREA DO SCGR.....	175
6.1.1 <i>Ground Penetrating Radar</i>	175
6.1.2 Eletorresistividade	179
6.1.3 Eletromagnético Indutivo	184
6.2 DEPOIS DA INSTALAÇÃO DOS ALVOS NA ÁREA DO SCGR.....	187
6.2.1 <i>Ground Penetrating Radar</i>	187
6.2.2 Eletorresistividade	216
6.2.3 Eletromagnético Indutivo	232

CAPÍTULO 7

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	247
7.1 BACKGROUND	247
7.2 ALVOS DO SCGR.....	248
7.2.1 Arqueologia	248
7.2.2 Geotecnia e Planejamento Urbano	249
7.2.3 Meio Ambiente	250
7.3 RECOMENDAÇÕES.....	251

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	253
---	------------

APÊNDICE	265
-----------------------	------------

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

O aprimoramento dos processos tecnológicos utilizados na implantação de infra-estrutura de centros urbanos evoluiu abruptamente, no final da década de 1990. A preocupação com a segurança da população influenciou na implantação de redes subterrâneas de distribuição (hidráulicas, energéticas e de comunicação).

O crescimento da população urbana e o aumento da demanda por estrutura física básica contribuíram para o adensamento dessas redes. Processo este ainda em curso nos dias de hoje. Entretanto, alguns acidentes ocorrem durante a implantação de novas redes, provocados principalmente por erro humano e pela falta de comunicação entre as empresas de distribuição. Esses acidentes, algumas vezes, aborrecem a população e oneram ainda mais os cofres públicos.

Para amenizar os problemas causados pelo processo de implantação de redes de distribuição, a maioria das empresas fornecedoras de serviços básicos faz o mapeamento das redes existentes. Tal mapeamento é realizado por verificação direta no campo ou através de investigações indiretas no subsolo.

Os métodos diretos de investigação são caracterizados pela ação de invasão no solo, ou seja, o subsolo é escavado para localização do alvo. Exemplos de métodos diretos são: poços de investigação, furos de sondagem e trincheiras.

Os métodos indiretos de investigação utilizam-se de propriedades físicas, químicas e biológicas a fim de identificar estruturas e objetos presentes no meio. Dentre tais métodos podemos citar a geofísica e a geoquímica.

As investigações indiretas, baseadas exclusivamente em parâmetros físicos captados em superfície, possibilitam muitas aplicações em locais onde se têm restrições a perfurações e a escavações do solo.

Existem diversos métodos geofísicos que permitem a detecção de estruturas no subsolo (PARASNIS, 1970; ORELLANA, 1972; PATRA; MALLICK, 1980; SHARMA, 1986; KELLER, 1987; TELFORD et al., 1990). Dentre os métodos que apresentam melhores resultados em investigações geotécnicas e ambientais, destacam-se os geoeletricos.

Os métodos geoeletricos baseiam-se nas propriedades elétricas intrínsecas dos materiais geológicos. A condutividade, a permeabilidade magnética e a permissividade dielétrica são características mensuráveis através desta metodologia. Os métodos que compõem este grupo são: a eletrorresistividade, a polarização induzida, o potencial espontâneo e os eletromagnéticos (BRAGA, 1997).

No método da eletrorresistividade, uma corrente elétrica é introduzida no terreno, através de contato direto. A diferença de potencial gerada no solo é medida com o uso de eletrodos (TELFORD et al., op. cit.). A relação entre as duas magnitudes proporciona uma resistividade elétrica aparente dos materiais.

A eletrorresistividade destaca-se pelo baixo preço relativo dos equipamentos e por ser um procedimento de fácil aplicação. Seu conjunto de técnicas é muito utilizado na identificação de plumas de contaminação (ELIS, 1999; GALLAS, 2000; MOURA, 2002; LAGO, 2004; PORSANI et al., 2004a), de água subterrânea (CUTRIM, 1999), de variações litológicas (BORGES, 2002) e em geotecnia (GALLAS, 2000; SILVA, 2004). Porém, sua logística é composta por um árduo procedimento de campo (deslocamento de eletrodos e cabos).

A polarização induzida é um fenômeno elétrico estimulado pela injeção de corrente elétrica no meio. O objetivo é o de medir o potencial elétrico, gerado pelo meio, após a interrupção da corrente, em diferentes intervalos de tempo (SUMNER, 1976). É amplamente difundida por seus excelentes resultados na localização de depósitos minerais, principalmente jazidas de sulfetos (WEST et al., 1983).

Atualmente, o método da polarização induzida é também utilizado na identificação de plumas de contaminação de resíduos inorgânicos (ELIS, 1999; GALLAS, 2000). Apesar dos bons resultados, em investigações de depósitos minerais, o seu uso requer certo cuidado, já que durante os procedimentos de campo, é necessária a injeção de elevadas correntes elétricas para a obtenção de uma boa razão sinal/ruído. Deste modo, é um método que exige bastante atenção da equipe, pois qualquer descuido, com relação às descargas elétricas, pode provocar acidentes fatais.

O método de potencial espontâneo se baseia em que certos potenciais naturais ou espontâneos são produzidos no subsolo devido a uma atividade eletroquímica ou mecânica, ou seja, fluxos de fluídos, de calor e de íons (REYNOLDS, 1997).

O método de potencial espontâneo é comumente utilizado na identificação de depósitos minerais (CORRY, 1985) e do sentido do fluxo da água subterrânea (BOGOSLOVSKY; OGILVY, 1973; GALLAS, 2005). Em meio urbano, sua utilização nem sempre é indicada por sua susceptibilidade às interferências e aos ruídos causados por correntes elétricas, geradas por equipamentos eletro-eletrônicos. Em relação a custos e procedimentos de campo, trata-se do método mais barato, uma vez que o levantamento de campo exige apenas um operador, dois eletrodos não polarizáveis e um voltímetro.

Os métodos eletromagnéticos (EM) estão baseados na propagação de campos eletromagnéticos (contínuos ou transitórios) no subsolo. Podem ser classificados em sistemas no domínio do tempo ou da frequência, passivos ou ativos. Os métodos eletromagnéticos são considerados passivos, quando utilizam campos magnéticos e elétricos da Terra (ex., magnetotélúrico), ou ativos, quando um transmissor artificial é utilizado próximo ao campo (ex., condutivímetro de solo) ou distante do campo, utilizando transmissores militares de alta potência como no caso do mapeamento *Very Low Frequency* (VLF) (REYNOLDS, op. cit.).

Uma das principais vantagens dos métodos EM é que o processo de indução não necessita de contato direto com o solo, como no caso dos métodos elétricos (TELFORD et al., op. cit.). Outras vantagens sobre os métodos elétricos são: velocidade na aquisição dos dados e portabilidade dos equipamentos. Entre os métodos

eletromagnéticos, utilizados para detectar alvos em profundidades pequenas (< 10 metros), destaca-se o *Ground Penetrating Radar* (GPR) ou radar de penetração no solo.

Entre as desvantagens dos métodos eletromagnéticos, está a calibração dos equipamentos, da qual depende uma boa aquisição de dados. A interpretação do processamento dos dados deve ser realizada de forma minuciosa, conhecendo-se a teoria matemática envolvida, caso contrário, pode haver discrepância nos resultados obtidos.

Dentre os métodos geofísicos elencados anteriormente, pode-se dizer que não há um que tenha supremacia em relação aos demais. Todos apresentam peculiaridades que os tornam mais ou menos interessantes ao trabalho de campo. É justamente a análise do local e as suas especificidades, bem como o objetivo final do trabalho, que fornecem os parâmetros de escolha da melhor metodologia a ser aplicada. A utilização de diferentes métodos para extrair o máximo de informação possível é desejável e necessária para a obtenção de resultados mais confiáveis. Porém, devido a restrições financeiras e de tempo, a escolha de mais de um método nem sempre se torna possível.

A sociedade moderna, cada vez mais exigente, requer estudos que quantifiquem e qualifiquem os alvos em subsuperfície com uma elevada precisão. Os métodos geofísicos de investigação rasa frequentemente são utilizados visando uma caracterização detalhada da subsuperfície, o que nem sempre é possível devido às pequenas variações nas propriedades físicas do meio.

Deste modo, pode-se dizer que as respostas obtidas com os métodos geofísicos normalmente apresentam ambigüidades, devido às soluções não serem únicas. Uma maneira usual de eliminar a ambigüidade, presente nos dados geofísicos de investigação rasa, pode ser feita através de informações diretas das propriedades físicas e geométricas dos alvos que serão investigados.

A criação de áreas para testes controlados de geofísica rasa mostra que as ambigüidades presentes nas interpretações dos dados geofísicos podem ser amenizadas e, em certos casos, até eliminadas (GRANDJEAN et al., 2000). Nessas áreas, as geometrias dos alvos, os seus conteúdos, as propriedades físicas e as profundidades são conhecidas, auxiliando o profissional a definir os melhores parâmetros para a interpretação por meio de resultados obtidos.

Atualmente, as áreas de testes controlados de geofísica rasa das quais se tem registros são poucas e em condições bastante distintas. Um breve resumo sobre tais áreas é descrito a seguir.

Em 1996, pesquisadores do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) em Nantes, França, construíram uma área de testes geotécnicos e geofísicos (GRANDJEAN et al., op. cit.). Esta área corresponde a uma trincheira, com as paredes impermeabilizadas com cimento, de dimensões de 26 m x 20 m x 4 m, dividida em cinco compartimentos preenchidos com diferentes materiais geológicos (silte, areia e brita) e inúmeros objetos (tubos de ferro e de PVC, blocos de calcário, de concreto e de rochas). Além dos diversos objetos presentes no local de testes, foi executado um poço horizontal que atravessou todos os compartimentos, possibilitando, assim, a realização de ensaios de tomografia sísmica e GPR, entre o poço e a superfície. O principal objetivo da criação desta área de testes é simular heterogeneidades subterrâneas, presentes no ambiente urbano de uma grande metrópole, além de verificar a aplicabilidade dos métodos geofísicos na identificação de tais objetos.

Também em 1996, a Área Controlada de Testes Arqueológicos (*Controlled Archaeological Test Site – CATS*) foi construída em Champaign, Illinois, USA, pelo *Cultural Resources Research Center*, do Laboratório de Pesquisa de Engenharia de Construção da Companhia Armada de Engenheiros dos Estados Unidos (*U.S. Army Corps of Engineers Construction Engineering Research Laboratory – USACERL*). A área compreende 2500 m² (50 m x 50 m) e está situada na área da USACERL. A área possui dois tipos de solo (argilo-siltoso e siltoso), topografia plana e ausência de obstáculos (ISAACSON et al., 1999)

No CATS, foram enterrados, na profundidade máxima de 3 metros, objetos comumente encontrados em sítios arqueológicos pré-históricos, tais como: tijolos, restos de muros e construções, fundações de casas e sepultamentos (esqueletos de animais – porcos e cachorros). Outros objetos não arqueológicos enterrados são blocos de concreto e objetos metálicos. Houve ainda a preocupação em enterrar materiais restritos a áreas militarizadas. Entre esses materiais estão: cápsulas de artefatos balísticos, minas explosivas e outros materiais bélicos. O CATS foi construído com o propósito de treinar militares em técnicas geofísicas e testar novos equipamentos desenvolvidos pelo Departamento de Defesa de Illinois (ISAACSON et al., 1999).

O Prof. Dr. Ian Hill, do Departamento de Geologia da Universidade de Leicester (*Department of Geology of University of Leicester*), Inglaterra, em conjunto com pesquisadores do Grupo de Geofísica Industrial e Ambiental (*Environmental and Industrial Geophysics Group – EIGG*), implantou duas áreas de testes controlados com o objetivo de facilitar os treinamentos, as demonstrações, as calibrações de equipamentos e as pesquisas com métodos de investigação em geofísica rasa. A área 1 – Estrada de Southmeads (*Southmeads Road*) tem 70 m x 40 m (2800 m²). Nessa área, a profundidade máxima dos objetos enterrados não excedeu 2 metros. Foram enterrados canos plásticos, canos de barro e de metal, paredes de tijolos, trincheiras com concreto, calhaus de rocha, areia, brita, tambores metálicos e plásticos, trilhos de trem e blocos de concreto ocos e com placas metálicas. A área 2 – Estrada de Stoughton (*Stoughton Road*) tem 40 m x 30 m (1200 m²). Nessa área foram enterrados esferas de cobre, placas de concreto, muros de tijolos, placas de metais (aço e alumínio) horizontais, inclinadas e verticais, os quais foram dispostos até a profundidade de 1,5 metro (<http://www.le.ac.uk/geology/iah/iah.html>, acessado em 04/02/2004).

A partir do ano de 1996, o Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Nevada (*Department of Civil Engineering of University of Nevada*), Las Vegas, USA, perfurou três poços de investigação geológica em uma área dentro do campus. Ela ficou conhecida como Área de Testes de Geofísica de Engenharia (*Engineering Geophysics Test Site – EGTS*) (<http://www.ce.unlv.edu/egl/test-site/>, acessado em 27/11/2002). Os poços foram utilizados para realização de ensaios de tomografia sísmica (*crosshole*). Posteriormente, nesta mesma área, foram enterrados dois tambores (um de metal e outro de plástico), a uma profundidade máxima de 1,5 metro para a aplicação de novos métodos geofísicos (eletromagnético indutivo e eletrorresistividade) no ensino teórico-prático de estudantes dos alunos dos cursos de engenharia.

Em 1996, o Departamento de Ciências Atmosféricas e da Terra, da Universidade de York (*Department of Earth and Space Science and Engineering of University of York*), Toronto, Canadá, instalou o Área de Testes Ambientais de York (*York Environmental Site – YES*), dentro do campus Keele-Steeles. Antes e durante a implantação do YES várias empresas de fabricação de equipamentos geofísicos foram consultadas, com o intuito de auxiliar no planejamento dos materiais a serem enterrados, bem como na disposição dos mesmos no campo de provas. A área do YES é de 100 m x

90 m (9000 m²) e serve como área de treinamento de futebol pela Faculdade de Educação Física. Esta área é dividida em 36 células de 15,2 m² cada, contendo cada célula objetos distintos, tais como: minério de calcopirita, canos metálicos, solo misturado com petróleo, minas explosivas de composição plástica e metálica, cápsulas de artilharia militar, placas de alumínio e aço, tambores plásticos e metálicos, cacos cerâmicos, linhaça metálica e blocos de concreto (<http://www.yorku.ca/esse/Yes.html>, acessado em 21/10/2002).

Reynolds (1997) e Salem et al (2002) mostram resultados de levantamentos magnéticos realizados na Área Testes Ambientais da Universidade de Stanford (*Stanford University Environmental Test Site* – SUETS). Este sítio, implantado dentro da Universidade de Stanford, USA, tem uma área de 1000 m², onde foram enterrados tambores metálicos, canos de ferro, placas de metal, tambores plásticos e tampas de tambores. No local, uma rede subterrânea de fornecimento de serviços telefônicos atravessa a área em duas direções, noroeste e nordeste, sendo bem evidenciada, juntamente com os demais objetos metálicos, no mapa de anomalias magnéticas (SALEM et al., op. cit.).

O Prof. Dr. Willian A. Sauck, do Departamento de Geociências da *Western Michigan University* (WMU), da cidade de Kalamazoo, USA, implantou um sítio controlado de geofísica rasa na área de um manicômio desativado, localizado na fazenda da universidade. O local é conhecido como Área de Testes Geofísicos do Asilo do Lago (*Asylum Lake Geophysical Test Site* – ALGTS). A área tem atualmente 40 m x 200 m (8000 m²). Nele, foram enterrados barris metálicos, tambores plásticos e canos de ferro com diâmetro de 2” (duas polegadas). Estes objetos foram dispostos em intervalos de 20 metros ao longo de três linhas, em várias profundidades e orientações, sozinhos e em combinações. Além do ALGTS, foram perfurados, nas proximidades, vários poços para investigação geológica e injeção de contaminantes no solo para simulação de plumas de contaminação. O ALGTS foi criado para auxiliar no aprimoramento dos conhecimentos de estudantes de geologia, geofísica e hidrogeologia, interessados em aplicações geofísicas, geotécnicas e ambientais (<http://www.geology.wmich.edu/fhydro/Gptest1.html>, acessado em 15/10/2002).

Panigua et al (2004) construíram uma área de testes nos fundos da Escola Politécnica da Universidade de Extremadura (*Escuela Politécnica de la Universidad de Extremadura*) da cidade de Cáceres, Espanha. A área de testes possui 135 m² (9 m x 15 m), onde foram enterrados canos de PVC, de aço e de concreto, tambores de aço, cabos de transmissão elétrica e lixo doméstico, até a profundidade máxima de 3 metros. Os objetos foram cobertos por brita, material argiloso e areia. A área descrita tem como finalidade verificar as respostas do GPR, em áreas controladas.

No Brasil, a partir de 1997, a área localizada em frente ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP), passou a ser utilizada como laboratório prático das disciplinas da área de geofísica aplicada, do Departamento de Geofísica (MENDONÇA et al., 1999). Nesta área, foram realizadas inúmeras aquisições com os métodos magnético, elétrico, sísmico e eletromagnético de baixa (indutivo) e alta frequência (GPR).

O primeiro projeto relacionado à instalação de uma área de testes controlados de geofísica rasa no Brasil foi iniciado, a partir do ano de 2000, com a perfuração de três poços de investigação geológica-geofísica, em frente ao IAG/USP (PORSANI, 2002). A finalidade da implantação dos poços foi a de auxiliar no conhecimento da estratigrafia da Bacia de São Paulo, dentro do Campus da Universidade de São Paulo, além de proporcionar estudos de perfilagem geofísica e de hidrogeologia para os alunos do curso de graduação e pós-graduação do curso de geofísica do IAG/USP. Os poços serviram como fonte de informações geológicas para diversos trabalhos acadêmicos realizados na área (BORGES, 2002; BOLINELLI JR., 2004; PORSANI et al., 2004b).

Em 2002, sob a coordenação do Prof. Dr. Jorge Luís Porsani, iniciou-se o projeto de implantação do Sítio Controlado de Geofísica Rasa (SCGR) do IAG/USP (PORSANI et al., 2006). Nesta área, foram enterrados alvos visando simular estudos geológicos, geotécnicos, arqueológicos, ambientais e de planejamento urbano, dentro de um contexto geológico-urbano diferente de outros sítios controlados instalados em outros países.

1.1 OBJETIVOS

Esta pesquisa de doutorado tem como objetivo a caracterização geofísica de alvos rasos, por meio da utilização de diferentes métodos geofísicos sobre o Sítio Controlado de Geofísica Rasa (SCGR) do IAG/USP. Os principais métodos geofísicos utilizados foram o *Ground Penetrating Radar*, a eletrorresistividade e o eletromagnético indutivo. Esta caracterização consiste em avaliar o desempenho e a confiabilidade desses métodos, com ênfase no método GPR, quando aplicados sobre alvos cujas propriedades físicas, tipos de materiais, geometrias e profundidades são conhecidas.

Um sítio controlado é caracterizado por vários tipos de objetos enterrados em diferentes profundidades e geometrias. Os alvos foram escolhidos para fornecerem respostas eletromagnéticas, condutivas ou reflexões nos perfis de GPR. Os principais objetos enterrados foram: canos e tambores metálicos, canos de polietileno de alta densidade (PAD) e de poli cloreto de vinila (PVC), tambores plásticos, manilhas de concreto, cabos elétricos, bem como tijolos cozidos, seixos de sílex e potes de cerâmica. Todos os materiais foram escolhidos, visando reproduzir uma pequena amostra dos principais objetos que são encontrados no ambiente urbano.

Tal caracterização serve para testar, em condições controladas de campo, os diversos métodos geofísicos que são usados rotineiramente em estudos geológicos, geotécnicos e ambientais, permitindo uma calibração das respostas geofísicas para os diferentes alvos em subsuperfície. Os padrões de respostas encontrados poderão ser extrapolados para áreas onde não se têm informações da subsuperfície.

Numa área onde são conhecidas as propriedades dos alvos enterrados, os resultados buscados, com a aplicação dos vários métodos geofísicos de investigação rasa, contribuirão na interpretação de dados geofísicos. Além disso, auxiliará na escolha dos melhores métodos e parâmetros de campo, aplicados em geofísica rasa nas situações cotidianas reais.

Para alcançar tais objetivos, os levantamentos geofísicos foram realizados “antes” e “depois” da instalação do Sítio Controlado de Geofísica Rasa (SCGR) do IAG/USP.

CAPÍTULO 2

2. O SÍTIO CONTROLADO DE GEOFÍSICA RASA DO IAG/USP

2.1. INSTALAÇÃO DO SCGR

O Sítio Controlado de Geofísica Rasa (SCGR) do IAG/USP possui uma área de 1500 m² (50 m x 30 m) e foi implantado em um terreno do Instituto de Física, localizado em frente ao IAG, dentro do campus da USP “Armando Salles de Oliveira”, em São Paulo (**Figura 2.1**).

A primeira atitude tomada, com relação à instalação do sítio, foi a disposição espacial do sítio controlado no terreno. A área foi orientada na direção norte-sul magnético (**Figura 2.1**) para facilitar as futuras aquisições de magnetometria^{2.1}. Além disso, ele foi posicionado o mais distante possível de interferências físicas (prédios, ruas e estacionamentos) e eletromagnéticas (redes de distribuição de energia elétrica e geradores), para não comprometer a qualidade dos dados geofísicos adquiridos posteriormente à instalação dos alvos na área.

O solo foi escavado utilizando-se uma retroescavadeira (**Figura 2.2a**) e equipamentos manuais como enxadas e pás (**Figura 2.2b**) com o intuito de perturbar o mínimo possível o subsolo. A cobertura vegetal (grama) foi retirada com cuidado, antes das escavações (**Figura 2.3**), para posterior recuperação da paisagem. Durante as escavações houve aquisição de dados topográficos, com uma estação total de topografia Leica TPS-300 (LEICA, 1999), para delimitar o contorno do topo e da base dos

^{2.1} Em levantamentos magnéticos, as bobinas dos magnetômetros devem ficar preferencialmente alinhadas na direção E-W e os perfis realizados na direção N-S magnética, deste modo corpos magnéticos são melhores identificados (TELFORD et al., 1990).

buracos, visando detalhar o solo perturbado (**Figura 2.4**). Os alvos foram instalados com orientações N-S ou E-W, nas posições verticais, horizontais e inclinados. Os alvos foram dispostos na horizontal e vertical, com o auxílio de níveis de pedreiro. Durante a disposição dos alvos dentro dos buracos, foi realizado outro levantamento topográfico visando determinar com precisão o posicionamento e a profundidade do topo dos alvos em relação à superfície do terreno (**Figura 2.5**).

Figura 2.1 – Mapa de localização do Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP, mostrando as possíveis fontes de interferências superficiais e o comportamento da topografia.

Após o levantamento topográfico sistemático, os alvos foram definitivamente enterrados. Este procedimento foi repetido individualmente para cada alvo instalado no SCGR do IAG/USP. Após o soterramento dos objetos, os locais escavados eram

compactados manualmente (**Figura 2.6a**) ou mecanicamente com o auxílio de uma retroescavadeira e, às vezes, com água (**Figura 2.6b**) para acelerar a acomodação do solo.

Os alvos foram agrupados por tipos de materiais e distribuídos ao longo de sete linhas, com profundidades, ao topo, variando de 0,5 metro até 2 metros. Os alvos simulam objetos freqüentemente encontrados em estudos arqueológicos, geotécnicos, ambientais e de planejamento urbano. Além dos objetos nas linhas, foi enterrado um tubo metálico de 3,8 cm (1,5” – uma polegada e meia) de diâmetro e 52 metros de comprimento, cortando todo o sítio na direção E-W, posição Y=15 metros e a 0,5 metro de profundidade, servindo como alvo-guia (**Figura 2.7**).

Figura 2.2 – Fotos mostram a escavação das trincheiras na área do SCGR do IAG/USP. a) Escavação mecânica; b) Escavação manual.

Figura 2.3 – Foto mostra a retirada manual da grama para posterior recuperação da paisagem, na área do SCGR do IAG/USP.

Figura 2.4 – Mapa evidenciando o contorno do topo dos buracos, obtido com a utilização da estação total, onde foram implantados os alvos dentro do SCGR do IAG/USP.

Figura 2.5 – Fotos da aquisição de dados topográficos dos alvos enterrados na área do SCGR do IAG/USP. (a) Posicionamento com o prisma sobre o centro de um tambor metálico. (b) Registro da posição do prisma com a estação total.

Figura 2.6 – Fotos mostram a compactação do solo durante a implantação dos alvos no SCGR do IAG/USP. Compactação (a) manual e (b) com o auxílio de água.

Figura 2.7 – Foto do tubo metálico guia enterrado a 0,5 metro de profundidade ao longo da posição Y=15 metros na área do SCGR do IAG/USP.

Na Linha 1 de Arqueologia (posição X = 1 metro, **Figura 2.8**), os alvos enterrados simulam variações entre estratos geológicos distintos (areia x argila e cascalho x argila), perturbações no solo, urnas funerárias, material lítico e paleofogueiras (seixos de sílex^{2.2}). Os potes de cerâmica foram colocados com a abertura para baixo com o intuito de evitar a quebra das tampas durante a recompactação do solo na trincheira. Os tijolos de barro foram cimentados com argila umedecida para a construção de uma pequena parede.

Na Linha 2 de Tubulação Hidráulica (posição X = 8 metros, **Figura 2.9**) foram enterrados canos de polietileno de alta densidade (PAD) fornecidos pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), visando a simulação de tubulações de transporte de água. Os canos possuem 2 metros de comprimento, o diâmetro de 13,6 cm e estão vazios, totalmente e parcialmente preenchidos com água de torneira. Para evitar a saída da água dos canos, os mesmos foram lacrados com CAPs (tampões) e com cola adesiva para plástico.

Na Linha 3 (posição X = 15 metros) foram enterradas manilhas de concreto com diâmetro externo de 26 cm, 48 cm e 70 cm (**Figura 2.10**). Elas estão dispostas na horizontal (direção E-W) e na vertical. Para evitar a entrada de solo nas manilhas, as mesmas foram lacradas com tampas de concreto e cimento. As manilhas simulam galerias para captação de águas pluviais e de esgoto de áreas urbanas.

Para simular problemas ambientais referentes à disposição de resíduos tóxicos, acondicionados em recipientes metálicos, foi instalada uma linha de tambores de aço (posição X = 27 m, **Figura 2.11**). Estes tambores são constituídos de aço carbono, e possuem dimensões de 86 cm de altura e 59 cm de diâmetro, resultando em um volume de 200 litros. Foram enterrados vazios e dispostos na horizontal e na vertical, individualmente e aos pares.

A Linha 5 do SCGR (posição X = 36 metros, **Figura 2.12**), contém tambores plásticos de poli cloreto de vinila (PVC) com as dimensões de 69 cm de altura e 47 cm de diâmetro, resultando em um volume de aproximadamente 100 litros. Os tambores foram enterrados vazios, preenchidos totalmente e parcialmente com água doce e água salgada. Estes tambores foram colocados na vertical para suportar o peso do solo e

^{2.2} Sílex, neste trabalho, refere-se a seixos (granulometria entre 6 mm e 64 mm) e calhaus (granulometria entre 64 mm e 256 mm) de rocha composta principalmente por quartzo microcristalino ou criptocristalino (SUGUIO, 1980).

evitar possíveis perdas de água através da tampa do mesmo. Estes alvos simulam estudos de contaminação do meio ambiente com materiais condutores e resistores, além de simular áreas de dissolução cárstica (vazios no solo).

Na Linha 6 (posição X = 42 metros) foram enterrados tubos de ferro com diâmetro externo de 4" (quatro polegadas), nas direções E-W e N-S magnético, dispostos na horizontal, na vertical e inclinados (25° N). A intenção da implantação destes alvos foi a simulação de corpos geológicos magnéticos (mineralizações e diques) e de redes para transporte de água e gás (**Figura 2.13**).

A Linha 7, implantada no SCGR, é constituída por cabos elétricos, hidráulicos e conduítes plásticos e de PVC para passagem de cabos de fibra ótica (posição X = 49 metros, **Figura 2.14**). Os alvos utilizados foram fornecidos pela Sabesp e pela Companhia de Eletricidade de São Paulo SA. (Eletropaulo), consistindo de tubos de ferro, conduítes para passagem de cabos de fibra ótica, cabos elétricos de média e baixa tensão (não energizados) e dutos elétricos envelopados em caixas de concreto.

Os tubos de ferro possuem o comprimento de 2 metros, diâmetro externo de 8" (oito polegadas), foram enterrados na horizontal e na direção E-W (**Figura 2.14**). Estes alvos foram enterrados para simular redes de distribuição de gás e água. Atualmente, a utilização de dutos metálicos em redes de distribuição só é feita, em São Paulo, pela Companhia de Gás de São Paulo (Comgás), entretanto ainda existem antigas tubulações metálicas enterradas no subsolo da cidade que servem para abastecimento de água potável para a população.

As caixas de concreto com dutos envelopados da Linha 7 foram construídas no tamanho padrão da Eletropaulo (**Figura 2.15a**). Cada caixa criada possui seis dutos de PVC com diâmetro de 10 cm, sendo que em alguns destes dutos foram colocados cabos de alta tensão (**Figuras 2.15b e 2.15c**).

Figura 2.8 – Disposição espacial e fotos dos alvos enterrados na Linha de Arqueologia implantada na área do SCGR do IAG/USP.

Figura 2.9 – Disposição espacial e fotos de alguns dos alvos instalados na Linha de Canos de PAD implantada na área do SCGR do IAG/USP.

Linha de Manilhas de concreto de 26, 48 e 70 cm de diâmetro externo

Figura 2.10 – Disposição espacial e fotos de alguns dos alvos instalados na Linha de Manilhas de concreto implantada na área do SCGR do IAG/USP.

Figura 2.11 – Disposição espacial e fotos de alguns dos alvos instalados na Linha de Tambores de aço de 200 litros implantada na área do SCGR do IAG/USP.

Figura 2.12 – Disposição espacial e fotos de alguns dos alvos instalados na Linha de Tambores plásticos implantada na área do SCGR do IAG/USP.

Figura 2.13 – Disposição espacial e fotos de alguns dos alvos instalados na Linha de Tubos de ferro implantada na área do SCGR do IAG/USP.

Linha de Cabos Elétricos, Hidráulicos e Conduítes para passagem de cabos de Fibra Ótica

Figura 2.14 – Disposição espacial e fotos de alguns dos alvos instalados na Linha de Tubos da Sabesp, Eletropaulo e comunicações, implantada na área do SCGR do IAG/USP.

Figura 2.15 – (a) Dimensões das caixas de concreto, com dutos envelopados, enterradas na Linha de Tubos da Sabesp, Eletropaulo e comunicações, implantada na área do SCGR do IAG/USP. Representação gráfica das caixas de concreto, e respectivos alvos, construídas nas distâncias de 13 metros (b) e 17 metros (c).

2.2 GEOLOGIA DA ÁREA DO SCGR DO IAG/USP

A área do SCGR do IAG/USP está situada na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, sendo constituída, predominantemente, por sedimentos areno-argilosos de idade terciária (formações Resende e São Paulo), sobrepostos ao embasamento granito-gnáissico de idade pré-cambriana, com diferentes graus de intemperização (IRITANI, 1993; PORSANI et al., 2004b). Dados dos poços próximos à área mostram que a espessura dos sedimentos na área da pesquisa não ultrapassa 53 metros (BORGES, 2002; PORSANI et al., op. cit.).

Borges (op. cit.) através da perfuração de 10 furos de sondagem a trado manual, que atingiram a profundidade máxima de 5 metros, verificou que há uma cobertura antrópica (aterro) sobre os sedimentos neoceno-zóicos^{2,3}. Esta cobertura foi inserida na área para aterrar uma antiga área pantanosa e nivelar o terreno.

^{2,3} Neoceno-zóico – parte mais recente da Era Cenozóica (0 a 65 milhões de anos). O Neoceno-zóico compreende o período Quaternário (0 a 1,6 milhões de anos, SALGADO-LABOURIAU, 1994).

Durante a implantação dos alvos dentro do SCGR foram descritos os perfis litológicos das trincheiras, visando o detalhamento litológico estratigráfico e identificação do limite entre o aterro e os sedimentos neoceno-zóicos.

O aterro foi dividido em dois horizontes distintos: o primeiro, ocorre na parte superior de todas as linhas, de 0,4 metro a 1,1 metro de profundidade, sendo caracterizado por sedimentos argilo-arenosos de cor rósea, com raízes de grama e de árvores, presença de fragmentos de quartzo e rochas alteradas. O segundo horizonte é caracterizado por um sedimento argiloso de cor vermelha e violeta, com raros níveis arenosos. É comum encontrar blocos de rochas alteradas, até limonitizadas^{2,4} (**Figura 2.16a**) e seixos de quartzo dentro do aterro. Durante a escavação das trincheiras foi encontrado um bloco de concreto usado na construção de guias de ruas dentro do aterro (**Figura 2.16b**).

Figura 2.16 – Fotos de blocos (a) de rocha e (b) de concreto, encontrados dentro do aterro do SCGR do IAG/USP.

Os sedimentos da planície de inundação do rio Pinheiros são caracterizados por um solo argilo-arenoso de cor preta e presença de muita matéria orgânica.

Após a descrição litológica de todas as trincheiras onde foram instalados os alvos e correlação entre as mesmas foi elaborado um mapa de isolinhas de espessura da zona aerada (**Figura 2.17a**) e do aterro (**Figura 2.17b**) dentro da área do SCGR do IAG/USP. No mapa da zona aerada, ocorrem as maiores espessuras no centro e na parte leste da área, ao passo que o aterro fica mais espesso na parte norte da área do sítio,

^{2,4} Limonitizadas – proveniente de limonitização. Processo de intemperização de minerais de ferro. Neste processo o Fe^{2+} absorve a molécula de oxigênio e oxida para Fe^{3+} . A rocha ou mineral assume uma cor vermelha-escura a marrom (SUGUIO, 1980).

chegando até a espessura máxima, de 2,8 metros, próximo ao vértice nordeste do sítio (P3).

Figura 2.17 – Mapa de isolinhas de espessura da cobertura antrópica dentro da área do SCGR do IAG/USP, elaborado a partir das trincheiras escavadas para a implantação dos alvos. (a) Mapa do aterro argilo-arenoso. (b) Mapa do aterro argiloso.

CAPÍTULO 3

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 GROUND PENETRATING RADAR

O GPR é um método eletromagnético que emprega ondas de rádio em altas frequências (normalmente entre 10 MHz a 2500 MHz) para identificar estruturas e feições geológicas rasas de subsuperfície ou localizar objetos enterrados pelo homem (PORSANI, 1999). O princípio físico e a metodologia de aquisição de dados GPR são semelhantes à técnica de reflexão sísmica e a técnica de sonar, com exceção de que o GPR é baseado na reflexão de ondas eletromagnéticas (ANNAN, 1992; DANIELS, 1989; 1996; PORSANI, op. cit.; PRADO, 2000; dentre outros).

Esse método consiste na transmissão de ondas eletromagnéticas (EM), repetidamente radiadas para dentro do subsolo, por uma antena transmissora, colocada na superfície. A propagação do sinal EM depende da frequência do sinal transmitido e das propriedades elétricas dos materiais, as quais são principalmente dependentes do conteúdo de água presente no solo (TOPP et al., 1980). As mudanças das propriedades elétricas, em subsuperfície, fazem com que parte do sinal seja refletido. As ondas de radar refletidas e difratadas, em subsuperfície, e são recebidas através de outra antena denominada de antena receptora, também colocada na superfície da Terra (**Figura 3.1**). A energia refletida é então registrada em função do tempo de chegada, amplificada, digitalizada e gravada no disco rígido de um computador *notebook* (DANIELS, op. cit.). Após o processamento dos dados, o resultado obtido é uma imagem de alta resolução da subsuperfície.

O método GPR destaca-se em investigações rasas, devido a sua elevada resolução e aquisição de um grande volume de dados tomados em um pequeno intervalo de tempo (ANNAN, 2002). É um método relativamente novo, quando comparado com as demais metodologias geofísicas. Suas primeiras aplicações foram feitas para identificar e mapear fissuras e espessuras de geleiras na Groenlândia (WAITE; SCHMIDT, 1961 apud ANNAN, op. cit.). Em 1967, um sistema de sondagem glacial, desenvolvido por Stern, foi utilizado no programa “Experimento das Propriedades Elétricas da Superfície Lunar da Apollo 17”, dando início a um grande número de publicações (SIMMONS et al., 1972, apud OLHOEFT, 1998). Um dos primeiros trabalhos envolvendo investigações do subsolo foi o de Cook (1973, apud DANIELS, 1996) que explorou o uso do GPR para detectar depósitos de carvão.

Até a década de 1970, os equipamentos GPR eram construídos pelos próprios usuários. No entanto, a partir de 1972, Rex Morey e Art Drake criaram a *Geophysical Survey System Inc.* (GSSI) e iniciaram a venda do sistema comercial do radar de penetração do solo (MOREY, 1974 apud ANNAN, op. cit.).

Com o desenvolvimento tecnológico, a partir da década de 1980, vários equipamentos com modo de aquisição de registro digital foram construídos, minimizando o custo, otimizando sua portabilidade e tornando-se mais fácil a sua aquisição e, portanto, sua utilização. Como consequência, um grande número de trabalhos científicos, utilizando o método GPR, vem sendo publicado nas mais diversas áreas, tais como: arqueologia (CONYERS; GOODMAN, 1997; RODRIGUES et al., 2006), geotecnia (ULRIKSEN, 1982; DAVIS; ANNAN, 1988; RODRIGUES; PORSANI, 2006), meio ambiente (DAVIS; ANNAN, 1988; BENSON, 1995; DANIELS et al., 1995; PORSANI et al., 2004a), geologia (DAVIS; ANNAN, 1989; JOL; SMITH, 1995; VAN DAM, 2001), pedologia (DAVIS; ANNAN, 1989; TOPP et al., 1980); água subterrânea (TOPP et al., 1980; ANNAN et al., 1991; BERES; HAENI, 1995), aplicações militares (YOUNG; LEON, 1996), investigação forense (STRONGMAN, 1992; HAMMON III et al., 2000), dentre outras.

No Brasil, os primeiros trabalhos de GPR foram realizados na década de 1990 pelo Prof. William Sauck na UFPA. Entretanto, não há registros na literatura. Os estudos sistemáticos com o GPR foram realizados pelo Centro de Pesquisas da Petrobrás (PORSANI et al., 1994a, 1994b, 1995; PORSANI; RODRIGUES, 1995a, 1995b; RODRIGUES; PORSANI, 1995, 1997), seguidos pelas Universidades Federais

da Bahia (ULRYCH et al., 1994) e do Pará (SAUCK et al., 1995a, 1995b). Atualmente, o GPR é estudado e empregado por várias Instituições de Pesquisa e universidades brasileiras, dentre as quais podemos citar: IAG/USP (BORGES, 2002; SOUZA JR, 2002; MOUTINHO, 2003; RODRIGUES, 2004; OLIVEIRA, 2006; LIMA, 2006; ORTEGA, 2007), Unesp (PORSANI, 1999; GANDOLFO, 1999; PRADO, 2000), IGc/USP (DEHAINE, 2001; AQUINO, 2000), IPT (SOUZA, et al., 2001), ON (FRANCO, 2001), UnB (NASCIMENTO, 1998), UFRJ (ANJOS et al., 2001), UFRGS (HIRAKATA; STRIEDER, 2001), UFBA (PESTANA; BOTELHO, 1997), UFC (CASTRO et al., 2001), UFPA (LUIS et al., 2001), UFMT (SHIRAIWA et al., 2001), UFRN (XAVIER NETO et al., 2001), UFMG (ARANHA; BOTELHO, 2001) entre outras. Além das instituições de pesquisa, já existem no mercado várias empresas que fornecem serviços especializados em GPR.

Os fundamentos do GPR encontram-se na teoria de propagação de ondas eletromagnéticas (ANNAN, op. cit.; DANIELS, op. cit.). Para as baixas frequências (< 1 MHz) utilizadas na maioria dos métodos eletromagnéticos, os estudos de indução de correntes elétricas na Terra são adequadamente descritos por um processo de difusão do campo eletromagnético, em que as correntes de deslocamento podem ser desprezadas e somente as correntes de condução são consideradas. Entretanto, para as altas frequências do radar, tanto as correntes de condução, quanto as correntes de deslocamento devem ser consideradas (WARD; HOHMANN, 1987; DANIELS, op. cit.).

Figura 3.1 – (a) Diagrama de antenas GPR (modo biestático) ilustrando o comportamento das frentes de onda. (b) Traço esquemático mostrando as chegadas das principais frentes de onda do GPR.

As equações de Maxwell são as bases para toda a teoria do GPR (ANNAN, op. cit.; DANIELS, op. cit.). Um bom detalhamento algébrico das equações de Maxwell, com ênfase no método GPR, pode ser encontrado em Porsani (1999). Na primeira equação de Maxwell (**Eq. 3.1**), conhecida como **Lei de Ampère**, o campo magnético ($\vec{H}$) é produzido por correntes elétricas:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

sendo, $\vec{J}$ a densidade de corrente de condução em ampère / metro quadrado (A/m²), e $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ a corrente de deslocamento.

Na segunda equação de Maxwell (**Eq. 3.2**), conhecida como **Lei de Faraday**, o campo elétrico ($\vec{E}$) é produzido pela variação do campo indução magnética ($\vec{B}$) em relação ao tempo:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

A introdução das relações constitutivas do meio nas equações de Maxwell faz-se necessária para a obtenção de informações sobre as propriedades elétricas dos materiais por onde atuam os campos elétricos e magnéticos. A primeira relação constitutiva do meio, conhecida como **Lei de Ohm (Eq. 3.3)**, relaciona a densidade de corrente de condução ($\vec{J}$) ao campo elétrico ($\vec{E}$). Nos materiais geológicos simples essa relação é aproximadamente linear e a constante de proporcionalidade é a condutividade elétrica (σ), expressa em Siemens por metro (S/m). A condutividade elétrica de um material é uma medida de sua habilidade em conduzir corrente elétrica (KELLER, 1987),

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

A segunda relação constitutiva do meio (**Eq. 3.4**) relaciona diretamente o campo elétrico ($\vec{E}$) à corrente de deslocamento, ou à polarização ($\vec{D}$), e a constante de proporcionalidade é a permissividade dielétrica do material (ϵ). O deslocamento é caracterizado pela movimentação dos elétrons, núcleos e moléculas polares da posição

de equilíbrio neutro para outra (polarizada), devido à influência de um campo elétrico externo (KELLER, op. cit.).

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

No GPR, tanto a condutividade elétrica, quanto a permissividade dielétrica são importantes, porque afetam diretamente a atenuação e a propagação das ondas de radar (ANNAN, 1996). Em geral, a condutividade é dominante para ondas EM de baixas frequências (< 1 MHz) enquanto que, para altas frequências (≥ 1 MHz), a permissividade dielétrica é dominante (WARD; HOHMANN, op. cit.).

Normalmente, em estudos de GPR, utiliza-se a permissividade dielétrica relativa (**Eq. 3.5**),

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

sendo, ϵ é a permissividade dielétrica do material (F/m), e ϵ_0 é a permissividade dielétrica no vácuo ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m)

A terceira relação constitutiva do meio (**Eq. 3.6**) relaciona diretamente o campo magnético ($\vec{H}$) com o campo indução magnética ($\vec{B}$) e a constante de proporcionalidade é a permeabilidade magnética do material (μ).

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

O efeito da variação da permeabilidade magnética não é considerado quando são feitas medidas eletromagnéticas na Terra, por admitir-se que não há variação significativa em relação a permeabilidade magnética do espaço livre (OLHOEFT, 1998; KELLER, 1987). Contudo, os efeitos de uma forte permeabilidade magnética não podem ser totalmente ignorados no GPR (ANNAN, 1992), principalmente quando os alvos são metálicos, e a permeabilidade magnética relativa pode chegar a 100, no Sistema Internacional (SI).

A **Tabela 3.1** mostra os intervalos dos valores encontrados na literatura para a condutividade elétrica e constante dielétrica de alguns materiais.

Para estudos de radiação de ondas EM na Terra é suposto que: (i) a terra é um meio isotrópico, horizontalmente estratificado, com extensão lateral infinita; (ii) ϵ e μ

são constantes e independentes do tempo, sendo $\mu = \mu_0$ para a maioria das rochas, e $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m é a permeabilidade magnética do espaço livre (ANNAN, 1996).

Substituindo-se as relações constitutivas nas equações de Maxwell e supondo que os campos $\vec{E}$ e $\vec{H}$ variam harmonicamente com o tempo na forma $e^{i\omega t}$, e que $\partial/\partial t = i\omega$, sendo $\omega = 2\pi f$, obtém-se a equação da onda plana para o campo elétrico (Eq. 3.7).

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (\text{Eq. 3.7})$$

sendo k definido como *número de onda*, que é o termo que agrupa as propriedades das rochas e a frequência (Eq. 3.8), ou seja:

$$k^2 = \omega^2 \mu \varepsilon - i\omega \mu \sigma \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Tabela 3.1 – Intervalo de valores de constante dielétrica (ε_r') e condutividade elétrica (σ_0) observadas em alguns materiais (ANNAN, 1992; PORSANI, 1999; PRADO, 2000).

Materiais Secos	ε_r'	σ_0 (mS/m)	Materiais Saturados	ε_r'	σ_0 (mS/m)
Ar	1	0	Água destilada	81	0,01
Areia e cascalho	3 – 6	0,01	Água fresca	81	0,5
Argila	5	2	Água do mar	81	3000
Folhelho e siltito	5	1	Areia	10 – 30	0,1 – 1
Calcário	4	0,5	Silte	10	1 – 10
Solo arenoso	4 – 6	0,14	Argila	40	1000
Solo argiloso	4 – 6	0,27	Solo arenoso	15 – 30	6,9
Sal	5 – 6	0,01 – 1	Solo argiloso	10 – 15	50
Granito	4 – 6	0,01	Arenito	20 – 30	40
Basalto	6	1	Siltito	30	100
Diabásio	7	10	Folhelho	7	100
Ferro	1	10^9	Calcário	8	2
Aço	1	10^9	Granito	7	1
PVC	3 – 4	0	Basalto	8	10
Asfalto	3 – 5	0	Diabásio	8	100
Concreto	6 – 8	0	Concreto	10 – 30	0

Para as altas frequências utilizadas no método GPR (≥ 1 MHz), os dois termos de k^2 devem ser considerados, sendo que a corrente de deslocamento predomina sobre a corrente de condução (Eq. 3.9), isto é:

$$\omega^2 \mu \varepsilon \gg |i \omega \mu \sigma| \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Tal meio é denominado de meio dielétrico de baixa perda (*lossy dielectric medium*). Essa é a condição mais favorável do funcionamento do método GPR: um meio de baixa perda (ANNAN, 1996; PORSANI, 1999).

Nas altas frequências, é usual reescrever o número de onda k (Eq. 3.10) como:

$$k = \alpha + i \beta \quad (\text{Eq. 3.10})$$

sendo α a constante de atenuação e β a constante de propagação, definidos originalmente em Stratton (1941).

Nas frequências do GPR, a constante de atenuação (Eq. 3.11) e de propagação (Eq. 3.12) são obtidas através da expansão em séries de potências de $\frac{\sigma^2}{\omega^2 \varepsilon^2}$, expressas por:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \varepsilon} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

Os fatores mais importantes que governam a propagação da onda EM, num determinado meio, são a velocidade (v) e a atenuação (α). Para materiais geológicos com baixa perda, o campo EM propaga-se com uma velocidade que depende, essencialmente, da constante dielétrica dos materiais (Eq. 3.13).

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

Dentro da frequência de operação do GPR, normalmente, a velocidade permanece em um patamar essencialmente constante para condutividades menores que 100 mS/m e o campo EM propaga-se sem apresentar dispersão (DAVIS; ANNAN, 1989).

Em estudos de GPR, supõe-se que as ondas EM se propagam com uma incidência normal às interfaces das camadas (ANNAN, 1992). Estas camadas possuem diferentes propriedades elétricas que podem causar uma forte impedância nas interfaces,

determinando assim a quantidade do sinal que deverá ser refletida, expressa pelo coeficiente de reflexão (WARD; HOHMANN, op. cit.; PORSANI, op. cit.).

A amplitude do coeficiente de reflexão pode ser escrita, em termos da impedância elétrica, Z . Uma onda se propagando através de um meio, atenua-se com a profundidade até encontrar uma interface em que ocorra um contraste na impedância elétrica, na qual parte dessa onda é refletida. A impedância Z é definida pela relação entre o campo elétrico ($\vec{E}$) e o campo magnético ($\vec{H}$), ortogonais entre si (**Eq. 3.14**).

$$Z = \left| \frac{\vec{E}}{\vec{H} \perp} \right| \quad (\text{Eq. 3.14})$$

Na superfície, a impedância é expressa por (**Eq. 3.15**):

$$Z = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\epsilon}} \quad (\text{Eq. 3.15})$$

Para uma incidência normal (ângulo de incidência da onda EM perpendicular à superfície), a amplitude do coeficiente de reflexão GPR (r_{GPR} , **Eq. 3.16**) pode ser expressa por:

$$r_{\text{GPR}} = \frac{\sqrt{\sigma_1 + i\omega\epsilon_1} - \sqrt{\sigma_2 + i\omega\epsilon_2}}{\sqrt{\sigma_1 + i\omega\epsilon_1} + \sqrt{\sigma_2 + i\omega\epsilon_2}} \quad (\text{Eq. 3.16})$$

Note que o coeficiente de reflexão (**Eq. 3.16**) depende principalmente da condutividade elétrica e da permissividade dielétrica. Entretanto, nas frequências de operação do GPR ($\omega \rightarrow \infty$), não há dependência de k^2 em σ . Podemos negligenciar as correntes de condução (STRATTON, 1941; ANNAN; DAVIS, 1997). Portanto, para os propósitos práticos, a **Eq. 3.16** se reduz para a **Eq. 3.17**.

$$r_{\text{gpr}} = \frac{\sqrt{\epsilon_1'} - \sqrt{\epsilon_2'}}{\sqrt{\epsilon_1'} + \sqrt{\epsilon_2'}} \quad (\text{Eq. 3.17})$$

O **Quadro 3.1** mostra os coeficientes de reflexão teóricos entre alguns materiais implantados na área do SCGR.

Quadro 3.1 – Coeficiente de reflexão para alguns materiais dispostos dentro da área do SCGR do IAG/USP.

De	Para	Coeficiente de Reflexão
Solo argilo-arenoso*	Tambor de Aço**	0,99
Solo argilo-arenoso*	Tubo de PVC**	0,20
Solo argilo-arenoso*	Manilha de concreto**	0,20
Solo argilo-arenoso*	Tambor de Plástico**	0,20
Solo argilo-arenoso*	Água doce**	-0,35
Solo argilo-arenoso*	Água salgada**	-0,35
Solo argilo-arenoso*	Ar**	0,61
Solo argilo-arenoso*	Tubo de Ferro**	0,99
Ar**	Solo argilo-arenoso*	-0,61
Tubo de PVC**	Ar**	0,47
Concreto**	Ar**	0,47

* foi adotado um valor de permissividade dielétrica relativa (ϵ_r') de 18 para o solo argilo-arenoso presente na área do SCGR do IAG/USP (BORGES, 2002). **demais valores extraídos da Tabela 3.1.

Os valores teóricos calculados de coeficiente de reflexão auxiliam na identificação da polaridade do pulso do radar, possibilitando, deste modo, uma melhor identificação dos objetos no meio.

Para delinear objetos, com precisão, faz-se necessário a identificação do topo e base, quando possível. Deste modo, é necessário que a resolução vertical seja suficientemente alta para identificar, com clareza, as reflexões do topo e da base de um determinado alvo de espessura “h” no meio (ANNAN, 1996; PRADO, 2000).

O comprimento de onda (Eq. 3.18) no meio é dependente da frequência utilizada e da permissividade dielétrica, sendo expresso por:

$$\lambda = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon_r'}} \quad (\text{Eq. 3.18})$$

sendo c a velocidade da luz no vácuo ($\approx 0,3$ m/ns).

Os sistemas GPR são projetados de tal forma que a largura da banda do espectro no domínio da frequência (Δf) é, aproximadamente, igual ao valor da frequência central (f_c) da antena utilizada, ou seja, a razão entre a largura da banda e a frequência central da antena é, quase, uma unidade (1). Isto significa que o pulso irradiado contém energia variando de $0,5 f_c$ até $1,5 f_c$ e, portanto, a frequência máxima será de aproximadamente uma vez e meia o valor nominal da frequência central da antena utilizada (ANNAN, 1992).

Pelo critério de amostragem de Nyquist, a frequência de amostragem deve ser, pelo menos, duas vezes o valor da maior frequência do sinal a ser amostrado e, por segurança, este valor é dobrado. Assim, a frequência de amostragem deve ser no mínimo, seis vezes o valor nominal da antena utilizada e, no máximo, vinte vezes (MALÃ, 1997).

Um pulso típico GPR é uma forma de onda de curta duração com largura igual ao intervalo de amostragem (Δt). O espectro de energia deste pulso tem a maior amplitude na frequência central ($f_c = 1/\Delta t$) que é bastante próxima do valor nominal da frequência da antena utilizada (ANNAN, 1992).

Os principais fatores que influenciam a profundidade de penetração do sinal GPR são: o espalhamento geométrico, a atenuação pelo terreno e a partição da energia nas interfaces, todos relacionados à perda de energia durante a propagação da onda EM.

A profundidade de investigação e a resolução do GPR variam de acordo com a frequência da antena. Quanto maior a frequência, maior a resolução vertical e menor a profundidade de investigação, e vice-versa. Para dar uma idéia, o **Quadro 3.2** serve como um guia prático para planejar trabalhos de GPR.

Quadro 3.2 – Frequência central da antena *versus* Profundidade máxima de penetração do GPR obtidos na área do SCGR do IAG/USP.

Frequência Central (MHz)	1000	500	400	250	200	100
Profundidade Máxima de Penetração (m)	0,8	1,5	1,6	2,3	3,4	4,5

3.1.1 Técnicas de Aquisição de Dados

Existem três técnicas de aquisição de dados de GPR: perfis de reflexão (usando antenas monoestáticas ou biestáticas), sondagens de velocidade (*common mid point* – CMP e *wide angle reflection and refraction* – WARR) e transiluminação ou tomografia de radar (REYNOLDS, 1997; BOOTH et al., 2004).

Nos perfis de reflexão, uma ou mais antenas de radar são movidas simultaneamente na superfície do solo, e os traços são adquiridos em intervalos de distância ou tempo contínuos. O resultado é uma seção *common offset* ou *constant offset* sendo que o tempo de trânsito duplo está no eixo vertical e no eixo horizontal o número de traços, i.e., distância (**Figura 3.2**).

Figura 3.2 – (a) Esquema de aquisição de dados no modo *common offset* (S = espaçamento entre as antenas, e nx = espaçamento entre os traços). (b) três traços de GPR mostrando a chegada da onda aérea, da *groundwave* e da onda refletida no nível d'água.

Nas sondagens de velocidade, um mesmo ponto ou área é registrado, redundantemente, com diferentes distâncias, transmissor – receptor (*multiple coverage*) (DUARTE, 2003). Na técnica CMP, a abertura entre as antenas (transmissora e receptora) é crescente em sentidos opostos, partindo-se de um ponto central fixo (**Figura 3.3a**). Na técnica WARR, uma das antenas é mantida fixa, enquanto a outra é sucessivamente afastada da primeira (**Figura 3.3b**).

No modo de transiluminação, existem quatro modos diferentes de aquisição: *common offset*, direta, *vertical radar profiling* – VRP e variável. Na primeira, as antenas são dispostas dentro de um mesmo poço e o registro é feito semelhante à técnica da reflexão, com exceção de que agora a antena está registrando toda a seção radial do poço (**Figura 3.4a**). Na tomografia direta, as antenas, transmissora e a receptora, são dispostas em lados opostos do meio investigado, gerando deste modo uma seção de tempo de trânsito direto, e não mais de tempo duplo (**Figura 3.4b**). É comumente utilizada na determinação de minérios entre cavas de minas subterrâneas, na qualidade de estruturas de concreto (pilares) e de parâmetros físicos do meio entre poços. Na técnica VRP, a antena transmissora fica na superfície, e a receptora é deslocada

continuamente dentro do poço (**Figura 3.4c**). A transiluminação variável consiste em dispor as antenas dentro de poços e permanecer com uma das antenas parada, enquanto a outra é deslocada; este procedimento é realizado inúmeras vezes, até todo o poço (ou área desejada) ser totalmente investigado (**Figura 3.4d**). A vantagem deste método é que a distância entre as antenas é conhecida e as velocidades médias de cada trajetória do raio podem ser determinadas (REYNOLDS, 1997).

Figura 3.3 – Esquema da sondagem de velocidade do tipo (a) CMP e do tipo (b) WARR. (c) Exemplo de CMP adquirida próxima ao Monumento a Ramos de Azevedo (projeto de Galileu Emendabili^{3.1}), em frente ao Instituto de Pesquisas e Tecnologias – IPT do Estado de São Paulo. (d) Principais frentes de onda identificadas na CMP.

^{3.1} Marco da história paulista, o Monumento Ramos de Azevedo, inaugurado a 25 de janeiro de 1934, localizado então na Avenida Tiradentes, foi posteriormente transferido para a Cidade Universitária onde hoje se encontra em destaque em frente a atual sede da Escola Politécnica e do IPT, da Universidade de São Paulo (http://www.poli.usp.br/Organizacao/Historia/Diretores/Ramos_Azevedo.asp acessado no dia 18/04/2006).

Figura 3.4 – Esquemas de: (a) transiluminação *common offset*. (b) tomografia direta. (c) *Vertical Radar Profiling* – VRP. (d) transiluminação variável.

De acordo com Daniels (2000), Slob, et al. (2003); Lualdi, et al. (2003), Grasmueck et al (2004), Grasmueck, et al. (2005), para se obter dados GPR 3D sem erros de amostragem espacial, o espaçamento entre os traços deve ser pequeno o suficiente para amostrar totalmente os pontos de difração^{3.2}. No entanto, para delinear corpos lineares, com orientação preferencial, presentes no subsolo (ex: tubulações metálicas), uma aquisição GPR não muito densa, realizada perpendicular ao corpo, é o suficiente.

Para exemplificar a perda de resolução lateral, foi elaborado um modelo sintético com duas tubulações se cruzando (**Figura 3.5a**). O espaçamento entre os perfis variou de 0,1 metro a 2 metros. Os resultados da modelagem, obtidos com o espaçamento de 0,1 metro (**Figura 3.5b**), mostra que ambos os tubos são bem resolvidos, entretanto com o aumento do espaçamento fica difícil a reconstrução do tubo não transversal aos perfis (**Figura 3.5f**).

^{3.2} A difração é um evento que ocorre nos registros sísmicos e de GPR, de traçado aproximadamente hiperbólico, causado por uma descontinuidade do meio (DUARTE, 2003).

Figura 3.5 – (a) Modelo geotécnico utilizado para gerar o conjunto de dados GPR 3D. Cortes, na profundidade de 0,5 metro, mostrando a perda de resolução com o aumento do espaçamento entre os perfis de: (b) 0,1 metro; (c) 0,2 metro; (d) 0,4 metro; (e) 1 metro; (f) 2 metros.

Conforme descrito anteriormente, corpos perpendiculares ao sentido das aquisições são melhores imageados com o GPR. Deste modo, bastaria uma aquisição de dados, não muito densa, em duas direções para a reconstrução destes alvos em subsuperfície. Para exemplificar a identificação de alvos lineares com o GPR, a equipe de processamento da empresa americana GSSI, realizou uma aquisição em duas direções e verificou que somente alvos lineares dispostos perpendicularmente à direção das investigações são bem resolvidos (**Figuras 3.6a e 3.6b**; GSSI, 2003). Entretanto agrupando-se os dados de ambas as direções, todos os alvos lineares podem ser resolvidos (**Figura 3.6c**). Este procedimento torna-se efetivo quando há o conhecimento prévio dos alvos enterrados na área investigada, todavia, existe um aumento considerável no tempo de aquisição dos dados.

Figura 3.6 – Cortes na mesma profundidade em cubos GPR, Quase-3D, com as aquisições realizadas em direções distintas (a) e (b); e composição dos dois [(a) e (b)] conjuntos de dados (c)(modificado de GSSI, 2003).

Refletores simples (objetos planos e lineares) podem ser imageados em aquisições GPR, Quase-3D, com baixa densidade de perfis (**Figura 3.6**). Entretanto, a dificuldade aumenta, quando há necessidade de imageamento de estruturas complexas (interfaces geológicas e plumas contaminantes).

Grasmueck et al. (2005) mostra o efeito da baixa resolução quando o objetivo é identificar alvos geológicos complexos. Para verificar este efeito eles realizaram investigações GPR em duas direções usando afastamento entre os perfis de 20 cm x 40 cm e de 10 cm x 100 cm em uma área de rochas calcáreas. Os resultados mostram que houve uma boa reconstrução dos refletores geológicos com o primeiro espaçamento utilizado (**Figura 3.7a**), e que, com o espaçamento de 1 metro a perda de resolução é muito grande (**Figura 3.7b**). Deste modo, a baixa resolução encontrada não permite interpretar com precisão os refletores em subsuperfície, o que pode levar a um desprestígio do método quando mal utilizado.

Figura 3.7 – Cortes em profundidade de aquisições GPR, Quase-3D, mostrando resultados com boa resolução (a) e com má resolução (b) (GRASMUECK et al., 2005).

Atualmente, existe uma confusão entre os pesquisadores e empresas de prestação de serviços na diferenciação de aquisições GPR 3D e GPR Quase-3D. A primeira necessita de uma fonte em comum e vários receptores espalhados ao longo da área estudada (**Figura 3.8**). Já a segunda é uma composição de imagens em 3D de vários perfis bidimensionais.

A aquisição GPR 3D real é inviável. São dois os principais motivos:

- O espaçamento entre transmissores e receptores é proporcional ao afastamento entre os traços, necessitando deste modo, de uma quantidade elevada de receptores, aumentando severamente o custo da aquisição; e
- A energia de transmissão da antena transmissora não será captada pelas antenas receptoras mais distantes se a área de investigação for grande (acima de 10 metros para as antenas com frequência abaixo de 100 MHz).

A utilização de aquisições GPR, Quase-3D, permite reconstruir aproximadamente os refletores em subsuperfície, porque a fonte de transmissão do sinal GPR (antena transmissora) emite um pulso eletromagnético com a mesma forma para cada ponto investigado, ou seja, a fonte tem a mesma assinatura em cada posição estudada.

Aquisições GPR, Quase-3D, com o espaçamento pequeno (menor que 0,5 metro) entre os perfis, aumentam consideravelmente o tempo e o custo da aquisição. Deste modo, a escolha dos parâmetros de campo é uma das etapas mais importantes no processo.

Em princípio, a necessidade de amostragem de Nyquist (**Eq. 3.19**) é:

$$\Delta x \leq \frac{\lambda}{2} \text{ a } \frac{\lambda}{4} \quad (\text{Eq. 3.19})$$

sendo Δx é a máxima distância entre dois pontos medidos (intervalo de amostragem espacial) e λ é o comprimento de onda da maior frequência de banda da antena.

Assumindo-se que a maior concentração de energia das antenas GPR fica abaixo da frequência central (porque o solo funciona como um filtro que atenua as altas frequências da onda eletromagnética), podem-se definir os intervalos de amostragem

para cada intervalo de frequência. No entanto, o comprimento da onda eletromagnética depende também da velocidade e, consequentemente, das propriedades elétricas do meio, principalmente da permissividade dielétrica.

Para exemplificar o efeito da mudança do comprimento de onda com as propriedades elétricas do meio, foi utilizada a velocidade de propagação da onda eletromagnética no vácuo para diversas frequências do GPR na **Eq. 3.18**. Os resultados confirmam que, com o aumento da permissividade dielétrica, o comprimento de onda diminui (**Figura 3.9**).

Figura 3.8 – Esquema de distribuição de antenas em uma aquisição GPR 3D real.

Figura 3.9 – Gráfico mostra a relação entre a permissividade dielétrica do meio versus o comprimento de onda para diferentes frequências do GPR (velocidade de propagação da onda eletromagnética no vácuo – 0,3 m/ns).

Com o aumento da permissividade dielétrica, o comprimento de onda diminui. Assim, em solos com elevada permissividade dielétrica (solos argilosos) uma aquisição GPR, Quase-3D, deve ser conduzida com uma densidade maior de perfis.

Para verificar o espaçamento ótimo a ser utilizado em investigações GPR, Quase-3D, na área do SCGR do IAG/USP, foi utilizada a velocidade de 0,07 m/ns, que é a média das velocidades obtidas para a área (BORGES, 2002; RODRIGUES, 2004). O **Quadro 3.3** mostra o intervalo de amostragem espacial ótimo para aquisições GPR, quase 3D, na área do SCGR, calculado a partir da frequência de Nyquist.

Quadro 3.3 – Intervalo de amostragem espacial ótimo (espaçamento entre os traços) para aquisições GPR, Quase-3D, na área do SCGR de acordo com a frequência de Nyquist.

Frequência (MHz)	Intervalo de Amostragem (m)	
	$\lambda/2$	$\lambda/4$
500	0,07	0,035
400	0,086	0,043
250	0,14	0,07
200	0,16	0,08
100	0,34	0,17

Analisando os resultados do **Quadro 3.3**, percebe-se que o intervalo de amostragem espacial é impraticável em aquisições convencionais de GPR. Grasmueck, et al. (2005) sugere que, para a reconstituição total do campo de ondas eletromagnéticas do GPR, as quais possibilitem uma real amostragem em 3D, seja realizado um perfil exploratório de GPR, com o afastamento entre traços de aproximadamente 1 centímetro, na área de pesquisa. Após a coleta deste perfil, recomenda-se que seja realizada uma análise do espectro f-k e, verificado todo o campo de número de onda, seja escolhido o espaçamento entre os traços e os perfis por meio do teorema de amostragem espacial, (Eq. 3.20).

$$\Delta x = \frac{1}{2K_x} \quad (\text{Eq. 3.20})$$

sendo K_x o mínimo comprimento de onda representativo no espectro f-k.

Além da amostragem espacial, os principais parâmetros que devem ser cuidadosamente definidos, durante uma aquisição tridimensional de GPR, são: o posicionamento correto dos pontos amostrados e o processo de migração^{3.3} dos difratores.

Os posicionamentos corretos dos traços vão refletir em uma melhor ou pior identificação espacial dos refletores. São realizados com o auxílio de trenas ou fitas, sistemas de posicionamento global (*global positioning system* – GPS) e estações de nivelamento, que utilizam raio laser ou infravermelhos (LUALDI et al., 2003). As fitas ou trenas são de baixo custo e fáceis de manuseio. No entanto, mostram problemas de curvatura da trena em áreas inclinadas, com cobertura vegetal ou com interferências superficiais. O posicionamento realizado com o auxílio do GPS depende do equipamento (1 canal ou multicanal), da cobertura dos satélites, do clima (nublado ou não) e da cobertura vegetal. Tanto o GPS, quanto os equipamentos de nível topográfico dependem da realização de correções de posicionamento, devido à inclinação das antenas ou níveis durante as aquisições (GROENEMBOON et al., 2001).

Para exemplificar as distorções de imagens de GPR com o aumento do erro no posicionamento dos dados são mostrados resultados sintéticos (**Figura 3.10**) e reais (**Figura 3.11**). Os dados sintéticos simulam duas tubulações se cruzando (**Figura 3.10a**). O erro no posicionamento dos traços variou de 0,1 metro a 1 metro. Os resultados da modelagem, obtidos com o espaçamento de 0,1 metro (**Figura 3.10b**), mostram que ambos os tubos ainda são bem resolvidos, entretanto com o aumento do espaçamento fica difícil a reconstrução destes alvos (**Figura 3.10e**). Os dados reais correspondem a resultados de aquisições GPR realizadas, com a antena de 200 MHz blindada da GSSI, dentro do campus da USP (próximo ao Instituto de Matemática, Estatística e Computação – IME/USP), sobre um cano de PVC de 0,1 metro de diâmetro, enterrado a 0,5 metro de profundidade (**Figura 3.11a**). Dois conjuntos de dados foram adquiridos, o primeiro com espaçamento entre os traços de 0,5 metro e com um erro de posicionamento dos traços de 0,1 metro, ao passo que, o segundo conjunto de dados foi adquirido com espaçamento entre os perfis de 0,25 metro, sem nenhum erro de posicionamento. A **Figura 3.11b** mostra um corte em profundidade (0,5

^{3.3} O propósito da migração é reconstruir o mapa de refletividade da terra pelo registro GPR obtido em superfície. O termo migração, refere-se ao movimento dos eventos observados para a sua posição espacial verdadeira. A migração é um processo inverso no qual as ondas registradas são propagadas de volta à localização correspondente ao difrator (GAZDAG; SGUAZZERO, 1984).

metro) onde o cano de PVC é sutilmente identificado, entretanto a sua espessura é maior. Esse efeito é provocado, principalmente, pelo erro de posicionamento e pela interpolação entre os perfis. Já o resultado obtido no segundo conjunto de dados, mostra claramente a posição e a espessura real do cano de PVC (**Figura 3.11c**). Conclui-se desta forma que, quanto maior é o erro de posicionamento dos traços, maior é a possibilidade de interpretações errôneas.

A aquisição, também, de perfis transversais não garante a reconstituição com perfeição do campo de propagação da onda eletromagnética, se não for realizado com acuidade. As orientações das antenas devem ser levadas em consideração, pois se a aquisição for realizada de modo diferente, isto pode interferir na reconstrução da imagem. A fim de confirmar a perda de resolução, quando se agrupa perfis GPR adquiridos transversalmente com o mesmo modo de iluminação da antena (transversal magnético), foram adquiridos perfis, com antenas blindadas de 200 MHz, e espaçamento entre perfis de 0,2 metro, em direções perpendiculares, sobre um tubo metálico de 0,1 metro de diâmetro, enterrado a 0,5 metro de profundidade. Ambos os resultados conseguiram identificar o tubo metálico (**Figura 3.12**). No entanto, há uma perda de resolução no imageamento do tubo quando a investigação é conduzida paralelamente ao tubo.

Figura 3.10 – (a) Modelo geotécnico utilizado para gerar o conjunto de dados GPR Quase-3D. Cortes, na profundidade de 0,5 metro, mostram as distorções das imagens com o aumento no erro de posicionamento dos traços de: (b) 0,1 metro; (c) 0,2 metro; (d) 0,4 metro; e (e) 1 metro.

Figura 3.11 – (a) representação esquemática de um cano de PVC enterrado no solo que ocorre na USP. Cortes em profundidade dos conjuntos de dados GPR, Quase-3D, adquiridos com (b) espaçamento entre os perfis de 0,5 metro, e erros de posicionamento dos traços de 0,1 metro; e com (b) espaçamento entre os perfis de 0,25 metro, e os pontos bem posicionados.

Figura 3.12 – (a) representação esquemática de um tubo metálico enterrado no solo que ocorre no SCGR do IAG/USP. Cortes, na profundidade de 0,5 metro, nos conjuntos de dados GPR, Quase-3D, adquiridos com antenas blindadas de 200 MHz (GSSI), usando espaçamento entre os perfis de 0,2 metro. (b) Perfis perpendiculares ao tubo. (c) Perfis paralelos ao tubo. (d) Todos os perfis. Todos migrados com velocidade constante de 0,07 m/ns.

A migração de dados GPR, quase 3D, é necessária para colapsar os pontos difratores e permitir, assim, a visualização dos refletores em sua posição, espessura e profundidades reais. Para exemplificar o efeito da migração em dados GPR, quase 3D, foi utilizado o conjunto de perfis adquiridos sobre o cano de PVC enterrado na USP. Os dados foram migrados em 2D através do método da migração de empilhamento de difrações (*diffraction stack migration*, GAZDAG; SGUAZZERO, 1984). A **Figura 3.13** mostra os resultados obtidos, na forma de cortes em profundidade, de cada conjunto de dados (não migrados, **Figura 3.13a**, e migrados, **Figura 3.13b**). Na imagem migrada, é mais perceptível a continuidade do refletor, bem como a verificação de sua espessura real.

Figura 3.13 – Cortes, na profundidade de 0,5 metro, nos conjuntos de dados GPR, Quase-3D, mostrando o efeito da migração. (a) Dado não migrado. (b) Dado migrado.

Na migração, as difrações colapsam e são focadas em seus ápices, permitindo identificar, com maior precisão, o posicionamento e a forma dos alvos em subsuperfície. Para ilustrar o efeito da migração em corpos difratores, foi utilizado um modelo geofísico de dois tubos metálicos se interceptando. O resultado da modelagem mostra que estes dois tubos se comportam como corpos difratores (**Figura 3.14a**). Percebe-se, no entanto que, após a migração dos dados, as difrações desaparecem e toda a energia fica focada na posição real dos tubos (**Figura 3.14b**).

Figura 3.14 – Visualização em 3D de eventos hiperbólicos provenientes de tubulações. (a) Dado não migrado. (b) Dado migrado.

3.2 ELETORRESISTIVIDADE

Os métodos elétricos possuem sua origem no século XVIII, com a descoberta sobre a resistividade das rochas por Gray e Wheeler (1720 apud ORELLANA, 1972) e sobre a condutividade do solo por Watson, em 1746 (apud ORELLANA, op. cit.). Os primeiros trabalhos de aplicação deste método, em prospecção mineral, datam do início do século XX. Entre os diversos pesquisadores que contribuíram para o desenvolvimento do método da eletrorresistividade, destacam-se Conrad Schlumberger, da "Escola Francesa" e Frank Wenner, da "Escola Americana". Eles foram responsáveis pela introdução do arranjo de quatro eletrodos para medidas de resistividade em superfície.

O método da eletrorresistividade é relativamente rápido, fácil de usar e normalmente, proporciona resultados satisfatórios. A medida da resistividade elétrica do solo, empregando diferentes arranjos de eletrodos, tem sido utilizada, geralmente, para identificar variações estratigráficas ou para localizar objetos cujas dimensões e profundidades oscilem entre metros até alguns quilômetros. O inconveniente deste método aparece quando se necessita de uma exploração detalhada, com grande resolução espacial. Em casos como este se faz necessária a aquisição de uma grande quantidade de dados que pode ser inviável, devido as restrições de tempo, mais do que às considerações técnicas. Recentemente, têm surgido sistemas automáticos de coleta de

dados que podem acelerar os processos de medida e interpretação. Paralelamente, uma maior capacidade de cálculos pelos computadores tem permitido, nos últimos anos, a obtenção de imagens em duas ou três dimensões da distribuição real de resistividade do subsolo.

Assim, os métodos resistivos tiveram um forte impulso a partir da década de 1990, tanto na instrumentação, como nos métodos de interpretação, o que aumenta ainda mais a utilização deste método. Há muito que se fazer ainda pela busca de novos e mais rápidos algoritmos de obtenção de imagens, na proposta de novos métodos de medidas e no estudo de novas configurações eletródicas.

Nesta pesquisa, são mostradas características de alguns arranjos eletródicos utilizados, no método da eletrorresistividade, para identificar estruturas implantadas no subsolo de áreas urbanas e áreas de disposição de rejeitos industriais.

3.2.1 Propriedades elétricas dos materiais terrestres

A prospecção elétrica envolve a detecção de efeitos em superfície produzidos pelo fluxo de corrente elétrica no solo. Por intermédio de métodos elétricos é possível medir potenciais, correntes, e campos eletromagnéticos que ocorrem naturalmente, ou são induzidos, na terra. Os principais fatores que influenciam o fluxo de corrente no subsolo são suas propriedades elétricas: condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética. Dentre elas, a condutividade elétrica é a mais importante para o método da eletrorresistividade (KELLER; FRISCHKNECHT, 1966).

A corrente elétrica pode ser propagada no meio de três modos: condução eletrônica, eletrolítica e dielétrica.

1. Eletrônica – ocorre principalmente em materiais com estrutura homogênea, com alta concentração de portadores de carga (elétrons livres) com elevada mobilidade. Ex.: cobre, grafita e alguns sulfetos.
2. Eletrolítica ou Iônica – principal tipo de condução elétrica nas rochas, tendo lugar nos espaços porosos e de maneira secundária entre grãos minerais. A concentração dos íons presentes, valência, mobilidade, e temperatura são as principais variáveis que controlam o fluxo de corrente, através da solução presente nos poros. No arcabouço sólido das rochas, a

condução tem lugar de acordo com as propriedades dos minerais que o formam (KELLER; FRISCHKNECHT, op. cit.).

3. Dielétrica – ocorre em meios isolantes ou fracos condutores, onde existam pouco ou nenhum elétron livre. Sobre a influência de um campo elétrico externo, os elétrons são deslocados rapidamente do núcleo; esta rápida separação de cargas positivas e negativas é conhecida como polarização dielétrica do material e ela produz uma corrente conhecida como corrente de deslocamento (TELFORD et al., 1990).

A resistividade dos materiais geológicos exhibe o maior intervalo de valores entre todas as propriedades físicas (**Figura 3.15**).

Figura 3.15 – Intervalos de resistividade/condutividade elétrica de algumas rochas e materiais.

A resistividade elétrica das rochas e minerais é uma propriedade que depende de vários fatores. Por exemplo, a resistividade elétrica das rochas cristalinas (pouco porosas) é, normalmente, alta. No entanto, se esta rocha estiver muito fraturada, a água que circula através das fraturas, contendo sais minerais dissolvidos, diminuirá bastante a resistividade da rocha.

Além da presença de água em fraturas e poros das rochas, a presença de minerais condutivos faz baixar o valor da resistividade. No entanto, tal mudança só se faz notar, quando a quantidade de minerais condutivos excede 10% do volume da rocha (FERNANDES, 1984).

Em geral, o fluxo de corrente elétrica no solo/rochas é eletrolítico e acontece ao longo da umidade e porosidade contidas dentro da matriz isolante (McNEIL, 1980). A resistividade é, então, influenciada em solos e rochas por:

1. Porosidade: forma e tamanho dos poros, número, tamanho e forma das passagens de interconexão;
2. Quantidade de poros preenchidos por água, isto é, quantidade de água;
3. Concentração de Sólidos Totais Dissolvidos – STD, na água: influencia nas características elétricas do meio, tornando-o mais ou menos condutivo;
4. Temperatura e estado físico da água nos poros;
5. Concentração e composição dos colóides^{3,4}.

Rein et al. (2004) por meio do monitoramento de medidas de resistividade elétrica, coletadas dentro de poços e em superfície, mostram que a quantidade de água no solo e a temperatura da parte superior do solo (zona aerada) são os principais fatores que influenciam nos dados rasos de resistividade elétrica obtidos em campo.

A quantidade de água no solo depende, principalmente, da razão entre a precipitação e a evaporação. No entanto, deve-se considerar que a maior parte da água pluviométrica é escoada superficialmente para as áreas de drenagem. Apenas uma pequena porcentagem se infiltra no solo através da porosidade ou fraturas. A ocupação dos fluidos em um meio poroso pode se dar de diferentes formas:

- (a) Saturação funicular – uma forma de saturação em que não existe uma fase úmida contínua ao longo dos interstícios (**Figura 3.16**). A fase não úmida é móvel sob a influência de um gradiente da pressão hidrodinâmica. A fase úmida pode ou não ter uma saturação irreduzível^{3,5}.
- (b) Saturação pendular – a fase úmida existe na forma pendular de saturação. Um filme fluido adesivo da fase úmida cobre as superfícies sólidas, contatos de grão a grão, e pequenos interstícios de conexões de

^{3,4} Colóides – partículas, com diâmetros médios entre 1 nm (10^{-9} m) a 1000 nm, que constituem as fronteiras gerais para uma classificação das misturas. Assim, partículas com diâmetro inferior a 1 nm encontram-se em solução e devem ser chamadas de soluto. Por outro lado, partículas com diâmetro superior a 1000 nm estariam dispersas em misturas denominadas suspensões.

^{3,5} Saturação irreduzível é a saturação mínima que um fluido atinge, quando o mesmo é deslocado de um meio poroso para outro, onde há um fluido imiscível.

grãos (**Figura 3.16**). A fase úmida pode ou não ter uma saturação irreduzível.

(c) Saturação insular – uma forma de saturação em que a fase não úmida existe como glóbulos insulares^{3.6} isolados dentro da fase úmida contínua, ocorrendo com maior frequência na chamada franja capilar (**Figura 3.16**).

Figura 3.16 – Ocorrência de fluidos no solo (modificado de MEYBOOM, 1967, apud McNEILL, 1980).

Existem áreas completamente saturadas com água (zona saturada) e áreas com quantidades variáveis de água (zona vadosa^{3.7}, **Figura 3.16**). As maiores oscilações na concentração de água ocorrem na zona vadosa e na interface com o lençol freático.

As temperaturas em superfície são controladas pela radiação solar e dependem da posição geográfica, topografia e cobertura vegetal (MILITZER; WEBER, 1985 apud REIN et al., 2004). As variações destas temperaturas diminuem rapidamente com a profundidade, mas são significantes na parte superior do subsolo. Rein et al. (op. cit.)

^{3.6} Glóbulos insulares – uma fase não úmida existe na forma de glóbulos insulares, quando eles são encontrados de forma discreta, pequenos glóbulos vazios suspensos na fase aquosa.

^{3.7} Zona Vadosa, zona não saturada ou zona de aeração situa-se entre a superfície freática e a superfície do terreno. Nela, os poros estão parcialmente preenchidos por gases (principalmente ar e vapor de água) e água (FEITOSA; MANOEL FILHO, 1997). Esta zona pode ser dividida em zona pendular, zona funcular e franja capilar.

verificou que a maior influência da temperatura nos dados de resistividade ocorre nos primeiros 0,5 metro a 0,6 metro de profundidade.

3.2.2 Fluxo de corrente em meios homogêneos

Para um simples eletrodo de corrente implantado na superfície de um meio homogêneo de resistividade ρ , a corrente flui radialmente (**Figura 3.17**). A voltagem entre dois pontos na superfície pode ser descrita como a diferença de potencial na direção do fluxo de corrente. As linhas de equipotenciais (igual voltagem) intersectam as linhas de igual corrente nos ângulos retos (90°). A densidade de corrente ($\vec{J}$) é a corrente (I) dividida pela área (A) em que a corrente está distribuída em uma semi-esfera ($A = 2\pi r^2$), e a densidade de corrente diminui com o aumento da distância da fonte de corrente. Deste modo, é possível calcular o potencial elétrico na distância (r) de um simples ponto de injeção de corrente.

Figura 3.17 – (a) Representação tridimensional de um potencial semi-esférico em volta de um eletrodo de corrente pontual em um meio homogêneo. (b) Decaimento do potencial nas proximidades do eletrodo de corrente pontual (adaptado de REYNOLDS, 1997).

A diferença de potencial (δV) ao longo de uma estrutura semi-esférica de incremento de espessura δr é dada pela **Eq. 3.21**:

$$\frac{\delta V}{\delta r} = -\rho J = -\rho \frac{I}{2\pi r^2} \quad (\text{Eq. 3.21})$$

Desse modo a voltagem V_r em um ponto r distante do ponto de corrente é dada pela **Eq. 3.22**:

$$V_r = \int \delta V = - \int \rho \frac{I}{2\pi r^2} \delta r = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad (\text{Eq. 3.22})$$

Se um novo eletrodo de corrente é adicionado no esquema, uma nova distribuição de potencial ocorre (**Figura 3.18**). Nesta nova configuração, o potencial V_P em algum ponto P no solo (**Figura 3.18**) é igual à soma das voltagens dos dois eletrodos, de modo que: $V_P = V_A + V_B$, sendo que V_A e V_B são as contribuições potenciais dos dois eletrodos, A (+I) e B (-I).

Os potenciais nos eletrodos M e N são fornecidos pelas equações **3.23** e **3.24**:

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] \quad (\text{Eq. 3.23})$$

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \quad (\text{Eq. 3.24})$$

Contudo, é mais fácil medir a diferença de potencial, δV_{MN} (**Eq. 3.25**).

$$\delta V_{MN} = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] - \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \right\} \quad (\text{Eq. 3.25})$$

Reescrevendo a **Eq. 3.25** para que fique em função da resistividade elétrica (**Eq. 3.26**), tem-se:

$$\rho = \frac{2\pi \delta V_{MN}}{I} \left\{ \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} \right] - \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{NB} \right] \right\}^{-1} \quad (\text{Eq. 3.26})$$

Quando se realiza uma investigação elétrica por injeção de corrente no solo, têm-se as seguintes variáveis: a) as dimensões do material, por onde passa a corrente, varia com a localização dos pontos de injeção; e b) o meio não é homogêneo, pois

engloba o solo, a rocha subjacente, a influência do nível freático e de outras rochas intercaladas (no caso de um pacote de rochas estratificadas).

Figura 3.18 – Linhas, de fluxos de correntes e equipotenciais, para duas fontes pontuais (eletrodos) de corrente em um meio homogêneo (modificado de DOBRIN, 1960). (a) Vista no plano. (b) Seção vertical. (c) Variação do potencial na superfície.

Num meio heterogêneo, os valores de área e comprimento já não podem ser definidos *a priori* porque dependem da geometria, do arranjo dos eletrodos no terreno e são, portanto, substituídos na fórmula da resistividade por uma constante K , que será diferente para cada arranjo eletródico. A resistividade medida desta forma não será mais a resistividade de uma rocha ou de uma camada e sim uma resistividade média do pacote de rochas (incluindo o solo) abaixo dos pontos de medidas e, por isso, denomina-se *resistividade aparente* (ρ_a), que é uma expressão da resistividade que o meio teria se fosse homogêneo e não guarda nenhuma relação quantitativa absoluta com o valor da resistividade verdadeira. Ela reflete apenas as propriedades médias do meio pelo qual a corrente passou. Deste modo, rearrumando a **Eq. 3.26**, tem-se a **Eq. 3.27**:

$$\rho_a = \frac{\delta V_{MN}}{I} \cdot K \quad (\text{Eq. 3.27})$$

sendo o fator geométrico (K) dado pela **Eq. 3.28**:

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM}\right) - \left(\frac{1}{MB}\right) - \left(\frac{1}{AN}\right) + \left(\frac{1}{NB}\right)} \quad (\text{Eq. 3.28})$$

A resistividade aparente depende do tipo de arranjo usado na investigação, da natureza do solo e do subsolo atravessado pela corrente injetada no terreno e das condições do corpo rochoso (pouco, muito ou não fraturado).

3.2.3 Técnicas de aquisição de dados

No método da eletrorresistividade, existem várias técnicas de aquisições de dados de campo e uma grande variedade de configurações de eletrodos, o que confere ao método grande versatilidade. As técnicas mais comuns são: a Sondagem Elétrica Vertical (SEV), a Tomografia Elétrica (TE) e a Perfilagem Elétrica de Poços (PEP) (**Figura 3.19**). A SEV é aplicada quando se deseja uma informação pontual, com observação da variação vertical da resistividade. Quando o interesse do estudo é investigar estruturas em 2D, ou seja, identificar variações laterais da resistividade, utiliza-se a técnica da TE, amplamente conhecida no Brasil como Caminhamento Elétrico. Já a perfilagem elétrica de poço, como o próprio nome diz, é utilizada, tradicionalmente, em investigações dentro de poços, onde há presença de fluido e necessidade de verificação da resistividade elétrica real do meio.

Figura 3.19 – Principais técnicas de aquisição de dados de eletrorresistividade. (a) Sondagem Elétrica Vertical – SEV. (b) Tomografia Elétrica – TE. (c) Perfilagem elétrica de poço – PEP.

Nessas técnicas, inúmeras configurações eletródicas, i.e., arranjos de eletrodos, são utilizadas, já que, a medida de resistividade aparente do meio, depende da disposição dos pontos de injeção de corrente e dos de medida de potencial no solo. Os dois arranjos mais conhecidos são o Schlumberger^{3.8} e o Wenner^{3.9}, os demais são derivados dos anteriores, desenvolvidos com o intuito de aprimorar os resultados,

^{3.8} Schlumberger – nome dado pelo Engenheiro de Minas Conrad Schlumberger em 1915, na França. Este engenheiro foi o responsável pela descoberta, em 1913, por meio do método da polarização espontânea, do primeiro jazimento de um mineral não magnético. Considerado, assim, pela comunidade acadêmica, como o pai da prospecção elétrica (ORELLANA, 1972).

^{3.9} Wenner – arranjo tetraeletródico que leva o nome de seu criador (Frank Wenner). Idealizado no mesmo ano do que o Schlumberger, este arranjo foi inicialmente utilizado, nos Estados Unidos, Canadá e Inglaterra. Apesar da sua inferioridade prática, em relação ao Schlumberger, possuía uma sólida base físico-matemática, quando da sua criação (ORELLANA, op cit.).

diminuindo, em alguns casos, o ruído nos dados e o tempo em campo. Entre estes se destacam os arranjos dipolo-dipolo, pólo-dipolo, pólo-pólo, Wenner-Schlumberger e gradiente. A **Figura 3.20** ilustra alguns arranjos eletródicos comumente utilizados em campo e seu fator geométrico.

Figura 3.20 – Principais arranjos eletródicos utilizados em ensaios de campo e seus fatores geométricos (adaptado de LOKE, 2004).

Investigações elétricas 2D

As sondagens elétricas verticais (SEV's) são limitadas a investigações 1D, impossibilitando investigar variações laterais de resistividade, sendo, deste modo, necessário a realização de tomografia elétrica (TE) para identificar variações em 2D de resistividade. Pela teoria, uma investigação 3D permite obter uma maior precisão na identificação de heterogeneidades elétricas. No entanto, atualmente, a investigação 2D

possibilita um resultado prático, com um baixo custo financeiro, quando comparado com a investigação 3D.

Para se obter uma boa imagem 2D da subsuperfície, deve-se ter uma boa cobertura de medidas. A **Figura 3.21** ilustra um sistema de 20 eletrodos em sequência, com um espaçamento “a” entre si. A sequência de operação para se obter uma pseudoseção geoeletrica é: na investigação da medida do primeiro nível (1a) são utilizados os eletrodos 1, 2, 3 e 4. Note que o eletrodo 1 é usado como o primeiro eletrodo de corrente A, o eletrodo 2 é utilizado como o primeiro eletrodo de potencial M, o eletrodo 3 como o segundo eletrodo de potencial N e o eletrodo 4 como o segundo eletrodo de corrente B (**Figura 3.21**). Para a segunda medida, os eletrodos 2, 3, 4 e 5 são usados como A, M, N e B, respectivamente. Este processo é repetido até os eletrodos 17, 18, 19 e 20 sejam utilizados para a última medida com o espaçamento “1a”. Para um sistema com 20 eletrodos, note que existem $17 = (20 - 3)$ medidas possíveis com o espaçamento “1a” para o arranjo Wenner.

No segundo nível de investigação, ou seja, quando o espaçamento entre os eletrodos é “2a”, os primeiros eletrodos a serem utilizados são: 1, 3, 5 e 7 (**Figura 3.21**). Para a segunda medida, serão usados os eletrodos 2, 4, 6 e 8. Este processo é repetido até o final da linha com a utilização dos eletrodos 14, 16, 18 e 20. Para este sistema de 20 eletrodos, note que existem $14 = [20 - (2 \times 3)]$ medidas possíveis com o espaçamento “2a”. O mesmo processo é repetido para as medidas com os espaçamentos “3a”, “4a”, “5a” e “6a”.

Figura 3.21 – Arranjo de eletrodos para uma investigação 2D e a sequência de medidas utilizadas para construir uma pseudoseção (adaptada de LOKE, 2004).

Note que, com o aumento do espaçamento dos eletrodos, o número de medidas diminui. O número de medidas que pode ser obtido para cada espaçamento entre os eletrodos, para um dado número de eletrodos, depende do tipo de arranjo utilizado (**Figura 3.22**). O arranjo Wenner fornece o menor número de medidas possíveis, comparado aos outros tipos de arranjos eletródicos.

Arranjo Wenner

É um arranjo robusto e foi popularizado pelos seus trabalhos pioneiros na técnica da tomografia elétrica por Frank Wenner da Escola Francesa. Neste arranjo, a distância “a” entre os eletrodos de potencial e de corrente é a mesma. Após realizar-se a medida em um ponto, os eletrodos são deslocados para uma distância “n” fator de “a”. Deste modo, obtém-se medidas em um mesmo nível de investigação. Para aumentar a profundidade, aumenta-se o espaçamento entre os eletrodos (**Figura 3.21**).

Este arranjo é muito utilizado em áreas com níveis de ruídos mais elevados porque, entre os arranjos atuais, consegue-se captar o sinal com maior intensidade. Em geral, o Wenner é bom para identificar estruturas horizontais (camadas), mas relativamente fraco para localizar estruturas verticais (diques, falhas).

Arranjo Dipolo-Dipolo

Neste arranjo, o espaçamento “a”, entre o par de eletrodos de corrente (AB), é o mesmo entre do par de eletrodos de potencial (MN) e a distância entre estes dois pares é um fator “n” de “a” (**Figura 3.23**). Depois de realizada a primeira medida, um par de eletrodos é deslocado adiante a uma distância “n” fator de “a”, aumentando-se, desta maneira, a profundidade de investigação.

Este arranjo apresenta uma boa sensibilidade em mudanças horizontais de resistividade, mas relativamente insensível a variações verticais. Uma desvantagem deste arranjo é a perda de sinal recebido com o aumento do fator “n”, ou seja, quanto mais afastado estiverem os pares de eletrodos, menor será o sinal. A voltagem é inversamente proporcional ao cubo do fator “n” (LOKE, 2004).

Figura 3.22 – Distribuição de pontos investigados em uma pseudoseção com diferentes arranjos. (a) Wenner e gradiente. (b) Dipolo-dipolo e pólo-dipolo. (c) Wenner-Schlumberger. (d) Pólo-pólo.

Figura 3.23 – Arranjo de eletrodos dipolo-dipolo axial e a seqüência de medidas utilizadas para construir uma pseudoseção.

Arranjo Wenner-Schlumberger

Resultado da combinação entre os arranjos Wenner e Schlumberger, este arranjo apresenta a configuração de uma SEV, ou seja, com o par de eletrodos de potencial no centro e os de corrente nas extremidades. O espaçamento entre os eletrodos $AM=BN$ é um fator “n” do espaçamento “a” entre os eletrodos MN (**Figura 3.24**). Depois de realizadas as leituras no primeiro nível de investigação ($n=1$), para se investigar níveis mais inferiores, aumenta-se o fator “n”.

O sinal obtido, com auxílio deste arranjo, é menor do que o arranjo Wenner, mas superior ao do arranjo dipolo-dipolo.

Figura 3.24 – Arranjo de eletrodos Wenner-Schlumberger e a sequência de medidas utilizadas para construir uma pseudoseção.

Arranjo Pólo-Pólo

Neste arranjo, os pares de eletrodos de corrente e de potencial ficam a uma distância “a” e os eletrodos mais externos de cada par ficam a uma distância tendendo a infinito (**Figura 3.25**). Na prática, a distância dos eletrodos mais externos é superior a vinte vezes a distância “a” (LOKE, 2004).

Este arranjo é pouco utilizado, devido a necessidade de grandes injeções de corrente elétrica no solo para compensar o afastamento dos eletrodos mais externos. O pólo-pólo é muito utilizado em pesquisas arqueológicas, onde o espaçamento entre os eletrodos é sempre bem pequeno (menor que 0,5 metro).

Figura 3.25 – Arranjo de eletrodos pólo-pólo e a sequência de medidas utilizadas para construir uma pseudoseção.

Arranjo Pólo-Dipolo

O arranjo pólo-dipolo apresenta uma boa resolução horizontal e consegue captar um sinal maior, quando comparado com o arranjo dipolo-dipolo. Os pares de eletrodos de corrente e potencial ficam situados na extremidade do arranjo (**Figura 3.26**). A distância entre os eletrodos de potencial MN é de " a "; a distância entre este par de eletrodos e o eletrodo de corrente B é " n " fator de " a "; e o eletrodo de corrente A tende a infinito (**Figura 3.26**).

Figura 3.26 – Arranjo de eletrodos pólo-dipolo e a sequência de medidas utilizadas para construir uma pseudoseção.

Sendo o pólo-dipolo um arranjo assimétrico, em investigações sobre estruturas simétricas, a resposta será assimétrica, podendo, neste caso, influenciar nos modelos interpretativos.

Arranjo Gradiente

Neste arranjo, também conhecido como quadrado (*square*), os eletrodos de corrente são mantidos nas extremidades da área da pseudoseção (**Figura 3.27**) e somente os eletrodos de potencial são movimentados (LOKE, 2004). Muito utilizado em investigações arqueológicas, onde há necessidade em investigar profundidades inferiores a 2 metros, com elevada resolução de amostragem.

Gallas (2000) define que para ter valores de potencial que possam ser medidos nos equipamentos, a razão L/a (**Figura 3.27**) deve permanecer entre 10 e 50.

Figura 3.27 – Arranjo de eletrodos gradiente/quadrado e a sequência de medidas utilizadas para construir uma pseudoseção.

Ward (1990) discute os principais fatores utilizados para a escolha do melhor arranjo eletródico a ser utilizado em campo, bem como, apresenta uma avaliação destes fatores para alguns dos principais arranjos (**Tabela 3.2**).

Profundidade de exploração – a profundidade de exploração pode ser definida como a profundidade máxima, com que um dado corpo pode ser detectado, com um determinado arranjo (WARD, 1990). Este fator dificilmente é determinado, com

precisão, sem conhecimento preciso das características do meio. Para se, efetivamente, investigar uma determinada profundidade, é necessário, em geral, que o espaçamento entre os eletrodos de corrente seja maior do que essa profundidade (TELFORD et al., 1990). Além da configuração dos eletrodos, a profundidade de investigação nos métodos elétricos é influenciada por diversos fatores, tais como: ruídos naturais e artificiais, heterogeneidades geológicas laterais, topografia da superfície e do substrato geológico, presença de camadas finas de resistividades distintas, entre outros. Deste modo, a profundidade de investigação teórica, freqüentemente, não expressa a profundidade observada. Inúmeros autores, por meio de experimentos em laboratório e de campo, identificaram relações de profundidade de investigação versus configuração eletródica. Dentre eles, destacam-se Evjen (1938), Roy e Apparao (1971), Edwards (1977) e Barker (1989).

Tabela 3.2 – Avaliação de alguns arranjos eletródicos utilizados em tomografia elétrica (modificada de WARD, 1990).

	Arranjo				
	G	DD	PD	S	W
Razão sinal/ruído	3	5	4	2	1
Sensibilidade a efeitos laterais	1	2	3	4	5
Resolução de estruturas inclinadas/verticais	1	4	5	2*	3*
Resolução de estruturas horizontais	5	2	2	1	1
Profundidade de exploração	+	+	+	+	+
Sensibilidade a profundidade do alvo	5	2	3	1	1
Sensibilidade a heterogeneidades superficiais	5	2	1	3	3
Sensibilidade ao topo rochoso	5	1	2	3*	3*
Sensibilidade a efeitos laterais	+	+	+	+	+
Sensibilidade a efeitos topográficos	+	+	+	+	+

G = gradiente, DD = dipolo-dipolo, PD = pólo-dipolo, S = Schlumberger, W = Wenner. 1 = ótimo, 2 = bom, 3 = regular, 4 = ruim, 5 = péssimo, (3*) = incerteza em estimar, + = total incerteza em estimar.

Roy e Apparao (op. cit.) definem a profundidade de investigação característica (*Depth of Investigation Characteristic* – DIC) como: a profundidade em que uma fina camada, horizontal, contribui com a participação máxima ao sinal total, medido na superfície de um terreno homogêneo. Os autores indicam que, a posição dos eletrodos de potencial, também influencia na profundidade de investigação. Edwards (op. cit.), utilizando a DIC sugere que a profundidade efetiva de investigação está relacionada com 50% do sinal medido em superfície. Barker (1989) mostra, com exemplos, a maior utilidade da profundidade efetiva de investigação de Edwards (op. cit.).

Edwards (1977) determina uma profundidade média de investigação para o arranjo pólo-pólo superior a dos arranjos pólo-dipolo, Wenner e dipolo-dipolo (**Tabela 3.3**).

Tabela 3.3 – Profundidades efetivas para vários arranjos eletródicos (EDWARDS, 1977).

Arranjo eletródico	Ze/a	Ze/L	Arranjo Eletródico	Ze/a	Ze/L
Dipolo-Dipolo			Wenner	0.519	0.173
N = 1	0.416	0.139	Schlumberger		
N = 2	0.697	0.174	Ideal, $a \rightarrow 0$	-	0.192
N = 3	0.962	0.192	L = 40a	7.66	0.192
N = 4	1.220	0.203	L = 20a	3.82	0.191
N = 5	1.476	0.211	L = 10a	1.90	0.190
N = 6	1.730	0.216	Gradiente		
N = 7	1.983	0.220	L = 40a, $x^* = 20a$	7.66	0.192
N = ∞	-	0.250	L = 40a, $x^* = 15a$	6.52	0.163
Polo Dipolo (AB=20a)			L = 40a, $x^* = 10a$	4.14	0.103
N = 1	0.517	0.023	Pólo-Pólo (A e N $\rightarrow \infty$)	0.867	-
N = 2	0.915	0.040	L = 40a, $y^{**} = 20a$	0.777	0.019
N = 3	1.293	0.054	L = 20a, $y^{**} = 10a$	0.724	0.036
N = 4	1.658	0.066	L = 10a, $y^{**} = 5a$	0.627	0.063
N = 5	2.013	0.077	L = 40a, $y^{**} = 10a$	0.758	0.019
N = 6	2.359	0.087			

Ze = profundidade efetiva; “a” = espaçamento entre os dipolos, e L = espaçamento entre os eletrodos mais externos (modo de aquisição *in-line*). * no arranjo gradiente “x” corresponde ao ponto médio entre os eletrodos de corrente, devendo estar no intervalo $L/3 < x < L/2$. ** a medida “y” é referente a distância entre o centro do arranjo aos eletrodos externos (tendendo a infinito).

3.2.4 Tipos de interpretação de dados elétricos 2D

Dados geofísicos podem ser interpretados de duas maneiras: análise qualitativa e análise quantitativa.

Análise qualitativa – tem como objetivo identificar zonas anômalas nas pseudoseções dos dados elétricos, permitindo ao intérprete realizar uma análise inicial da qualidade dos dados^{3.10}, verificar o comportamento estratigráfico do subsolo e amplitude dos valores de resistividade aparente do meio.

Uma feição que merece atenção na interpretação qualitativa de pseudoseções de tomografia elétrica é o efeito da passagem dos eletrodos pela zona causadora de anomalia. Esse efeito ocorre em função da disposição dos eletrodos em superfície,

^{3.10} A qualidade dos dados deve ser verificada em campo, quando da aquisição deles, evitando assim, a realização de novas campanhas de campo, introdução de dados errados nos *softwares* de modelagem e interpretações erradas. Quando, nos trabalhos de campo, o operador estiver em dúvida com o valor de um dado obtido em um ponto, uma nova leitura deve ser realizada, ou seja, quanto maior o número de amostras coletadas em um ponto, menor será o erro de leitura.

sendo mais intenso em estruturas verticais e subverticais (zonas de falha, diques) e outros corpos com extensão lateral definida. Para ilustrar este efeito, em pseudoseções de tomografia elétrica, foi criado um modelo geológico/geofísico de um dique intrusivo (**Figura 3.28a**).

Figura 3.28 – Formas de anomalias geolétricas em resposta às simulações de aquisições de dados de tomografia elétrica, realizadas sobre um dique intrusivo. Modelos gerados no programa Res2Dmod, versão 3.01 (GEOTOMO, 2002). (a) Modelo geológico. Respostas de um dique condutivo com os arranjos, (b) dipolo-dipolo, (c) Wenner, (d) pólo-pólo, (e) polo-dipolo, (f) Wenner-Schlumberger e (g) gradiente. Respostas de um dique resistivo com os arranjos, (h) dipolo-dipolo, (i) Wenner, (j) pólo-pólo, (k) polo-dipolo, (l) Wenner-Schlumberger, e (m) gradiente.

O modelo foi gerado no software RES2Dmod, versão 3.0 (GEOTOMO, 2002), tendo o deslocamento entre os eletrodos de 5 metros e 16 níveis de investigação. Foram simuladas respostas de resistividade elétrica para os arranjos dipolo-dipolo, Wenner, pólo-pólo, polo-dipolo, Wenner-Schlumberger e gradiente (**Figura 3.28**). Os resultados evidenciam zonas anômalas sobre o dique intrusivo, cada qual com sua característica comum. Os arranjos tetraeletródicos (dipolo-dipolo, Wenner, Wenner-Schlumberger e gradiente) mostram anomalias em forma de arco invertido, ao passo que o modelo obtido para o arranjo pólo-dipolo indica uma assimetria de resistividade elétrica (**Figura 3.28**).

Análise quantitativa – possibilita pela inversão matemática dos dados de campo, a elaboração de seções/mapas de resistividade elétrica real do meio, além da delimitação das interfaces entre meios de resistividade distintas, geometria e profundidade das estruturas.

Atualmente existem dois principais tipos de modelagem utilizados em dados elétricos: a modelagem por suavização e a poligonal (OLAYINKA; YARAMANCI, 2000). Somente a primeira será discutida devido ao software utilizado neste trabalho (Res2dinv versão 3.53, GEOTOMO, 2003a).

A modelagem por suavização utiliza-se de uma inversão baseada em células. Uma subrotina de modelagem direta é utilizada para calcular os valores de resistividade aparente, e a técnica de otimização não-linear por mínimos quadrados é utilizada para a rotina da inversão (OLAYINKA; YARAMANCI, 2000).

O modelo 2D utilizado no programa de inversão consiste em um número de blocos retangulares, cujo arranjo é vinculado à distribuição de pontos na pseudoseção (**Figura 3.29**). A rotina de inversão utiliza-se do método Gauss-Newton para a suavização da inversão por mínimos quadrados, segundo a qual, por rotina, o contraste de suavização vertical e horizontal é o mesmo (OLAYINKA; YARAMANCI, op. cit.). O contraste de suavização aumenta 10% por camada. Na medida em que há um aumento de espessura a resolução é reduzida com a profundidade (**Figura 3.29**). A inversão é baseada no cálculo analítico da matriz de sensibilidade (matriz jacobiana) para um semi-espço homogêneo; e a matriz é recalculada, usando o método dos Elementos Finitos (EF), em cada passo da iteração. A equação de otimização (**Eq. 3.29**) pode ser representada como:

$$(J_i^T J_i + \lambda_i C^T C) p_i = J_i^T g_i - \lambda_i C^T C_{r_{i-1}} \quad (\text{Eq. 3.29})$$

sendo, J_i a Matriz Jacobiana da derivada parcial dos dados de campo, J_i^T a transposta de J_i , g_i o vetor discrepância que contém a diferença entre os logaritmos dos valores de resistividade aparente calculados e os observados, p_i o vetor perturbação nos parâmetros do modelo, λ_i o multiplicador de Lagrange (utilizado para diminuir a amplitude de p_i) e C a matriz de nivelamento, utilizada para minimizar o rigor de p_i

O segundo termo da **Equação 3.29** aplica o contraste de suavização diretamente no vetor do modelo de resistividade (r_{i-1}). Isto garante que o modelo seja suavizado para o fator utilizado, reduzindo também a oscilação nos valores de resistividade modelados.

Figura 3.29 – Diagrama esquemático de malha de elementos finitos, utilizada pelo programa Res2dinv (versão 3.53, GEOTOMO, 2003a).

3.3 ELETROMAGNÉTICO INDUTIVO

O método eletromagnético indutivo envolve a medida de uma ou mais componentes induzidos dos campos, magnético ou elétrico, na superfície, por um campo magnético artificial de corrente alternada. Quando uma bobina transmissora (Tx) energizada com uma corrente alternada em uma frequência de áudio é colocada em um meio uniforme e uma bobina receptora (Rx) está localizada a uma distância curta (s), o

campo magnético variante, no tempo proveniente da corrente alternada da bobina transmissora, induz fracas correntes no solo (*eddy currents* - I_s , **Figura 3.30**). Essas correntes geram um campo magnético secundário ($\vec{H}_s$) que é sentido junto com o campo magnético primário ($\vec{H}_p$) pela bobina receptora. O campo magnético secundário tem a mesma frequência do transmissor, mas está fora de fase. O campo na bobina receptora é uma resultante, ou uma soma de vetores de dois componentes. Considerações elementares da teoria eletromagnética requerem que o atraso do campo magnético secundário com o primário seja menos do que 90° , entretanto, se o campo magnético for proveniente de um excelente condutor (materiais metálicos), o atraso será quase 180° .

Figura 3.30 – Esquema de um sistema de prospecção eletromagnética. A bobina transmissora, energizada com uma corrente alternada (I_p), produz um campo magnético primário ($\vec{H}_p$), que induz correntes secundárias (I_s) no condutor em subsuperfície. A bobina receptora mede a resultante entre $\vec{H}_p$ e $\vec{H}_s$.

Os vários vetores mencionados são representados na **Figura 3.31**. Nota-se que, quando a bobina transmissora e a receptora estão do mesmo lado do condutor, os vetores $\vec{H}_p$ e $\vec{H}_s$ serão somados, e o campo resultante é maior do que o medido na

ausência de um condutor, entretanto, quando eles estão em lados opostos, o vetor $\vec{H}_s$ se opõe a $\vec{H}_p$, e o resultado é uma anomalias “negativa” (MACLEAN et al., 1991).

A magnitude de $\vec{H}_s$ pode ser descrita como uma porcentagem de $\vec{H}_p$ proveniente da bobina transmissora. O ângulo de fase (φ , **Figura 3.31**) é obtido entre $\vec{H}_p$ e $\vec{H}_r$ (vetor resultante de $\vec{H}_p$ com $\vec{H}_s$).

A parte real, ou em fase de $\vec{H}_s$, é representada pela projeção de $\vec{H}_s$ no eixo horizontal da **Figura 3.31** ($\vec{H}_s \cos \theta$), e que está 180° fora de fase com $\vec{H}_p$. Já a projeção de $\vec{H}_s$ no eixo Y da **Figura 3.31** ($\vec{H}_s \sin \theta$), representa um vetor componente de $\vec{H}_s$ que está 90° fora de fase com $\vec{H}_p$. Essa é a componente quadratura (imaginária) ou fora de fase.

Figura 3.31 – Diagrama de vetores de respostas eletromagnéticas (modificado de MACLEAN et al., 1991).

A amplitude dos campos eletromagnéticos diminui, exponencialmente, com o aumento da profundidade. A profundidade em que a amplitude do campo é reduzida a e^{-1} é conhecida como *skin depth* (δ). O δ é definido na **Eq. 3.30**:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}} \quad (\text{Eq. 3.30})$$

A razão do espaçamento entre as bobinas (s), dividido pelo *skin depth* (δ) é conhecido como o “número de indução” (B). Esta importante razão é dada por B (**Eq. 3.31**).

$$B = \frac{s}{\delta} \quad (\text{Eq. 3.31})$$

Os sistemas de dupla bobina possuem inúmeras combinações de orientação de bobinas (FRISCHKNECHT et al., 1991, **Figura 3.32**), entretanto somente duas configurações serão estudadas neste trabalho: a vertical coplanar (dipolo magnético horizontal – DMH) e a horizontal coplanar (dipolo magnético vertical – DMV).

Figura 3.32 – Seis configurações comuns de antenas dipolares: (a) horizontal coplanar, (b) vertical coplanar, (c) perpendicular, (d) vertical coaxial, (e) nula, e (f) paralela.

Keller e Frischknecht (1966, pág. 335) mostram que a razão do campo magnético secundário com o primário, medidos pelas bobinas no modo dipolo magnético vertical, é dada pela **Eq. 3.32**:

$$\frac{\vec{H}_s}{\vec{H}_p} = \frac{2}{(\gamma s)^2} \left\{ 9 - \left[9 + 9\gamma s + 4(\gamma s)^2 + (\gamma s)^3 \right] e^{-\gamma s} \right\} \quad (\text{Eq. 3.32})$$

sendo $\gamma = \sqrt{i\omega\mu_0\sigma}$; $i = \sqrt{-1}$; $\omega = 2\pi f$; f é a frequência em Hz; μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo; σ é a condutividade elétrica e s é a separação entre as bobinas em metros.

O valor de γs é dado pela **Eq. 3.33**:

$$\gamma s = \sqrt{2i} \frac{s}{\delta} = \sqrt{2i} B \quad (\text{Eq. 3.33})$$

Quando o número de indução é muito menor do que 1, então, a razão de $\vec{H}_s / \vec{H}_p$ pode ser definida pela **Eq. 3.34**:

$$\left(\frac{\vec{H}_s}{\vec{H}_p} \right)_q = \frac{i B^2}{2} = \frac{i\omega\mu_0\sigma s^2}{4} \quad (\text{Eq. 3.34})$$

A magnitude de $\vec{H}_s$ é, agora, diretamente proporcional à condutividade aparente do meio e a fase de $\vec{H}_s$ é deslocada 90° graus da fase de $\vec{H}_p$, isto é, está em quadratura ou fora de fase.

Sob as mesmas condições de baixo número de indução, Kaufman e Keller (1983) mostram que existe também uma pequena componente *inphase* do campo magnético secundário, dada pela **Eq. 3.35**:

$$\left(\frac{\vec{H}_s}{\vec{H}_p} \right)_I = \frac{8B^3}{15} = \frac{2\sqrt{2}}{15} s^3 (\omega \mu_0 \sigma)^{3/2} \quad (\text{Eq. 3.35})$$

Nota-se que a componente *inphase* do campo magnético secundário será menor do que a componente em quadratura.

Outra configuração que interessa, neste estudo, é o dipolo magnético horizontal, onde os dipolos estão paralelos ao meio. Keller e Frischknecht (op. cit., pág. 335) mostram que para esta configuração, a razão de $\vec{H}_s / \vec{H}_p$ é dada pela **Eq. 3.36**:

$$\frac{\vec{H}_s}{\vec{H}_p} = 2 \left\{ 1 - \frac{3}{(\gamma s)^2} + \left[3 + 3\gamma s + (\gamma s)^2 \right] \frac{e^{-\gamma s}}{(\gamma s)^2} \right\} \quad (\text{Eq. 3.36})$$

Uma vez, sobre a condição de $|\gamma s| > 1$, esta expressão é simplificada para a **Eq. 3.34**.

3.3.1 Técnicas de Aquisição de Dados

O mais comum sistema eletromagnético, utilizado em investigações geofísicas de engenharia e ambiental, é o método de bobina dupla de fonte móvel (*moving-source dual-coil method*, McNEILL, 1990). Duas bobinas separadas, conectadas por um cabo de referência, fornecem a base do sistema. Uma bobina serve como um transmissor, para gerar um campo magnético primário e outra atua como um receptor que mede tanto o campo primário, quanto o campo secundário. A separação entre as bobinas é mantida fixa e o par de bobinas é movido ao longo de um perfil, em intervalos discretos. O ponto de referência para a medida é, freqüentemente, o centro entre as bobinas (REYNOLDS, 1997). Os sistemas medem a componente em quadratura e a em fase (*inphase*), ou somente a primeira. As medidas são, comumente, realizadas com as bobinas no modo

dipolo magnético horizontal e no modo dipolo magnético vertical, (**figuras 3.32a e 3.32b**).

No caso do condutímetro de solo (*ground conductivity meters*), como fabricado pela Geonics Ltd., por exemplo, o instrumento fornece uma leitura direta da componente em quadratura, como a condutividade aparente (σ_a) em milisiemens por metro (mS/m); e a componente, em fase, é medida em partes por milhão (*parts per thousand – ppt*). A Geonics Ltd., atualmente, fabrica três tipos principais de condutímetros de solo, sendo individualizados pela frequência de operação:

EM-34 – consiste em duas bobinas (transmissora e receptora) separadas por um cabo (10 m, 20 m ou 40 m). O tamanho do cabo vai depender da frequência utilizada e da profundidade teórica em que se deseja medir o parâmetro da condutividade aparente (**Tabela 3.4**). Amplamente utilizado em prospecção de água subterrânea (McNEILL, 1990), contaminação ambiental (GOLDSTEIN et al., 1990; MONIER-WILLIAMS et al., 1990; ELIS, 1999; AQUINO, 2000; SHIRAIWA et al., 2001).

- **EM-31** – condutímetro de solo, com as duas bobinas (transmissora e receptora), inseridas em uma única unidade móvel (**Figura 3.33**). A distância entre as bobinas é de 3,66 metros, operando em uma frequência de 9,8 kHz, podendo investigar nas profundidades teóricas de 2,75 metros (DMH) e de 5,5 metros (DMV, McNEILL, 1990). O EM31 possibilita a investigação das componentes real (susceptibilidade magnética) e imaginária (condutividade elétrica) do campo magnético primário e secundário. Suas principais aplicações são: arqueologia, detecção de cavidades (DOOLITTLE; COLLINS, 1998), estudos de contaminação ambiental (AQUINO, 2000), mapeamento de estruturas geológicas, detecção de tubulações e identificar variações pedológicas.

Figura 3.33 – configuração esquemática do equipamento EM31, durante a aquisição em campo, nos modos DMH e DMV.

EM-38 – condutímetro de solo mais portátil, produzido pela Geonics Ltd. Possui o espaçamento fixo entre as bobinas de 1 metro e a frequência de operação de 14,6 kHz (**Figura 3.34**). Possibilita obter a condutividade elétrica e a susceptibilidade magnética do meio nas profundidades teóricas de 0,75 metro (DMH) e 1,5 metro (DMV, McNEILL, 1990). Suas principais aplicações são: agricultura (CORWIN; LESCH, 2003; OLIVEIRA, 2006), mapeamento do solo (KITCHEN et al., 1996; SUDDUTH et al., 2001; CORWIN; LESCH, 2003; SUDDUTH et al., 2003), salinidade de solos (RHOADES et al., 1989; BENNETT; GEORGE, 1995; TRIANTAFILIS et al., 2000), arqueologia (TABBAGH, 1986; DALAN, 1991; GOMES, 2003) e mapeamento de tubulações metálicas (McNEILL, 1980).

Figura 3.34 – Disposição do equipamento EM-38 nos modos de aquisição. (a) Dipolo Magnético Vertical. (b) Dipolo Magnético Horizontal.

Tabela 3.4 – Frequências de operação e profundidades teóricas de investigação de alguns condutivímetros de solo e seus espaçamentos entre as bobinas.

Equipamento	Modo de Operação	Frequência (kHz)	Espaçamento entre as bobinas (m)	Profundidade Teórica de Investigação (m)
EM-34	DMH	6,4	40,0	30,0
EM-34	DMH	1,6	20,0	15,0
EM-34	DMH	0,4	10,0	7,5
EM-34	DMV	6,4	40,0	60,0
EM-34	DMV	1,6	20,0	30,0
EM-34	DMV	0,4	10,0	15,0
EM-31	DMH	9,8	3,6	2,75
EM-31	DMV	9,8	3,6	5,5
EM-38	DMH	14,6	1,0	0,75
EM-38	DMV	14,6	1,0	1,0

Considerando uma camada horizontal fina, localizada em uma profundidade normalizada z (onde “ z ” é a profundidade dividida pelo espaçamento entre as bobinas “ s ”), então, a contribuição relativa desta camada no campo magnético secundário, obtido na bobina receptora é indicada pela função resposta impulsiva (ϕ) (McNEILL, 1980; REYNOLDS, 1997). No caso do DMV existe uma contribuição desta função muito pequena próxima à superfície (**Figura 3.35**). Deste modo, esta configuração de bobinas é, relativamente, insensível às estruturas muito próximas a superfície. A máxima contribuição relativa desta configuração é proveniente da profundidade normalizada de 0,4 metro. Ao contrário, a resposta relativa para a configuração DMH diminui com o aumento da profundidade, sendo máxima próxima à superfície. Essa

diferença de sensibilidade determina se o material próximo da superfície é mais ou menos condutivo do que o material mais profundo.

Figura 3.35 – Função resposta impulsiva (ϕ) para os dipolos magnético horizontal, $\phi_H(z)$, e vertical, $\phi_v(z)$, em função da profundidade (McNEILL, 1980).

Os ensaios de campo podem ser executados na forma de sondagens ou caminhamentos, que devido à praticidade de operação e transporte dos equipamentos, são realizados com muita rapidez. As sondagens necessitam de variação de frequência e espaçamento entre as bobinas transmissora e receptora, ao passo que, no caminhamento, estes parâmetros são constantes, variando-se, somente, o ponto de amostragem espacial. Um outro modo de realizar sondagens é variando a altura do equipamento ao solo, entretanto só é realizada com os equipamentos de maior frequência (EM-31 e EM-38).

Como as profundidades de investigação são pré-determinadas, os equipamentos são bastante limitados para a execução de sondagens. Os dados de condutividade podem ser plotados em perfis, em função da distância, e um conjunto de perfis permite a confecção de mapas. A interpretação desses dados é qualitativa, porém existem em desenvolvimento softwares para quantificação desses dados.

CAPÍTULO 4

4 AQUISIÇÕES DOS DADOS

4.1 ANTES DA INSTALAÇÃO DOS ALVOS NA ÁREA DO SCGR

4.1.1 Ground Penetrating Radar

Na primeira etapa da pesquisa, foram realizadas aquisições GPR com o equipamento sueco RAMAC I (*Mala Geoscience*) de propriedade do Departamento de Geofísica do IAG/USP. Foram utilizadas antenas não-blindadas de 100 MHz e 200 MHz; e antenas blindadas de 100 MHz, 500 MHz e 1000 MHz. Além das antenas de propriedade do IAG, foi utilizado um par de antenas blindadas de 250 MHz, emprestado pelo Grupo de Geofísica da Divisão de Geologia, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (DIGEO/IPT) do Estado de São Paulo.

Todas as aquisições de GPR, nesta etapa, foram realizadas por meio de perfis de reflexão, com afastamento constante (*common offset*). Os perfis foram realizados no modo contínuo e passo-a-passo. O primeiro refere-se a casos em que as antenas são arrastadas sobre o solo, já no segundo, as antenas são deslocadas a cada intervalo de aquisição de traço.

Com o intuito de auxiliar na aquisição de dados de GPR com antenas não-blindadas no modo contínuo, o Prof. Dr. Francisco Hiodo desenvolveu, no Laboratório de Instrumentação Geofísica (LIGA), do Departamento de Geofísica do IAG/USP, um rebocador de antenas denominado de trenó GPR (**Figura 4.1**). Para testar o trenó, foram adquiridos quatro perfis GPR, com o comprimento de, aproximadamente, 50 metros cada, utilizando-se de antenas de 100 MHz e 200 MHz (não-blindadas). A aquisição dos

perfis teve o objetivo de verificar a estabilidade das antenas sobre o trenó, a qualidade dos dados, bem como, a velocidade ótima para seu deslocamento, levando-se em conta resolução espacial e empilhamento de traços (*stack*). Os parâmetros utilizados em campo foram: 512 amostras por traço e *stacks* de 64 e 32, sempre se variando a velocidade de deslocamento do trenó. Os traços foram adquiridos em intervalos de 0,2 metro e 0,05 metro, sendo que estas distâncias foram controladas por um disparador (*hip chain trigger*, **Figura 4.2**), fixado no rebocador durante a aquisição dos dados. Esse disparador é conectado ao módulo de controle do GPR e os dados são adquiridos no modo contínuo de acordo com o deslocamento do trenó.

Figura 4.1 - Trenó GPR desenvolvido para aquisição de dados de GPR. a) Trenó sem as antenas. b) Trenó com as antenas de 100 MHz.

Figura 4.2 - *Hip chain trigger* fixado na parte traseira do trenó, para a aquisição dos dados GPR.

A **Figura 4.3** mostra as seções GPR adquiridas com as antenas de 100 MHz e 200 MHz, acopladas no rebocador de antenas, i.e., trenó, sem nenhum processamento.

As seções 1 e 2 (**Figura 4.3a** e **4.3b**), adquiridas com antenas de 100 MHz, *stack* de 64, distância entre os traços de 0,2 metro e velocidades de deslocamento de aquisição distintas (velocidade na seção 1 > velocidade na seção 2) mostram que não

houve uma boa correlação entre os traços. Na seção 2 (**Figura 4.3b**), os resultados são de qualidade, um pouco, melhor devido à menor velocidade de deslocamento do trenó. O aumento na velocidade de deslocamento das antenas, tornou o trenó instável, e provocou oscilações na posição vertical dos traços. Durante a aquisição, as antenas se deslocavam verticalmente, afetando o acoplamento com o solo, e interferindo no nível de referência dos traços. Na seção 3 (**Figura 4.3c**), adquirida com as antenas de 100 MHz, o *stack* foi diminuído para 32 e a velocidade de deslocamento das antenas foi reduzida à metade. O resultado mostra que houve uma ótima correlação entre os traços, pois o trenó ficou estável e as antenas ficaram bem acopladas ao solo.

A seção 4 (**Figura 4.3d**) foi adquirida com as antenas de 200 MHz, distância entre os traços de 0,05 metro, *stack* de 32 e a velocidade de deslocamento das antenas foi semelhante à da seção 3. Os resultados mostram também que houve uma boa coerência com os resultados obtidos com a antena de 100 MHz.

Os testes verificaram qual a melhor razão entre a velocidade de deslocamento das antenas e a relação sinal/ruído. A razão sinal/ruído melhora com o aumento do *stack* (empilhamento por traço), como na sísmica; supõe-se que os dados GPR são caracterizados pelos sinais que permanecem, essencialmente, constantes e por ruídos que são, basicamente, aleatórios (YILMAZ, 1987). No entanto, quanto maior o empilhamento de traços maior o tempo de aquisição do traço médio (**Tabela 4.1**).

Tabela 4.1 – Tempo de Empilhamento por número de traços utilizados no empilhamento de um traço médio do equipamento RAMAC, levando-se em conta um traço de 512 amostras.

Número de traços utilizados no empilhamento	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512
Tempo de Empilhamento (segundos)	0,005	0,010	0,020	0,040	0,081	0,163	0,327	0,655	1,310	2,612

Na área de pesquisa, os traços em cada perfil de GPR foram adquiridos em intervalos de 0,05 metro (modo contínuo) e 0,2 metro (modo passo-a-passo). Cada perfil teve um comprimento, máximo, de 34 metros, adquiridos na direção norte-sul, sentido norte, e o início do perfil correspondem a 2 metros fora da área do sítio (**Figura 4.4**). Ao todo foram adquiridos 52 perfis GPR com cada antena, com exceção da antena de 1 GHz. Com ela foram realizados somente oito perfis, correspondendo um total de 268

perfis no modo contínuo e 104 perfis no modo passo-a-passo. A **Figura 4.5** mostra a foto de algumas aquisições realizadas com o GPR na área do SCGR do IAG/USP.

Figura 4.3 – Radargamas adquiridos com antenas não-blindadas de 100 MHz e 200 MHz acopladas no trenó. st = *stack*. IT= intervalo entre traços. VD= velocidade de deslocamento do rebocador. Radargamas com os parâmetros de aquisição: a) 100 MHz, st = 64 traços, IT = 0,2 m, VD = 1,0 m/s; b) 100 MHz, st = 64 traços, IT = 0,2 m, VD = 0,5 m/s; c) 100 MHz, st = 32 traços, IT = 0,2 m, VD = 0,2 m/s. d) 200 MHz, st = 32 traços, IT = 0,05 m, VD = 0,2 m/s.

Figura 4.4 – Esquema de como foram adquiridos os perfis GPR ao longo da área do SCGR.

Conhecendo-se o empilhamento por traço e o intervalo de cada traço por seção, pode-se estimar o tempo mínimo de aquisição para cada linha de GPR. O valor de tempo mínimo de aquisição de cada perfil, no modo contínuo, com o espaçamento entre os traços de 0,05 metro e um empilhamento de 32 traços, foi de, aproximadamente, 111 segundos. Para o modo passo-a-passo, com um intervalo de traços de 0,2 metro e empilhamento de 256 traços, foi de, quase, 223 segundos. Os tempos das aquisições dos perfis de GPR não foram superiores aos valores mínimos exigidos, mostrando que há um bom posicionamento espacial dos traços (**Apêndice A**).

Figura 4.5 – Fotos de algumas aquisições realizadas com o GPR na área do SCGR do IAG/USP, antes da implantação dos alvos. a) Aquisição com antenas GPR de 100 MHz blindadas. b) Antenas de 200 MHz no trenó. c) Antenas de 200 MHz no modo passo-a-passo. d) Antenas blindadas de 250 MHz. e) Antenas blindadas de 500 MHz. f) Antenas blindadas de 1GHz.

4.1.2 Eletrorresistividade

As técnicas de eletrorresistividade aplicadas neste trabalho consistem na sondagem elétrica vertical – SEV, e a tomografia elétrica – TE (LOKE, 2004).

Nas SEVs realizadas foi utilizado o arranjo Schlumberger, com a máxima abertura de $AB/2$ de 20 metros, possibilitando, deste modo, investigar até a profundidade máxima de, aproximadamente, 7,6 metros (EDWARDS, 1977). No total, foram executadas dezoito SEVs, sendo sete sondagens sobre os locais planejados para a implantação das linhas de objetos (**Figura 4.6**). Estas sete SEVs tiveram a abertura dos eletrodos nas direções N-S e E-W magnético, ou seja, coincidindo com as direções das laterais do SCGR. Em todas as sondagens foram utilizados eletrodos porosos não-polarizáveis (**Figura 4.7**), preenchidos com solução de água com sulfato de cobre, com o objetivo de melhorar a razão sinal/ruído.

O equipamento utilizado foi o Syscal R2, fabricado pela empresa francesa IRIS, de propriedade do Departamento de Geofísica do IAG/USP (**Figura 4.8**). A tensão máxima utilizada foi de 100 Volts, sendo o suficiente para a abertura das SEVs. Além dos valores de resistividade aparente (ρ_a), adquiriu-se em campo, valores de cargabilidade aparente (Ma), potencial espontâneo (SP) e a resistência de contato entre os eletrodos e o solo. Os valores de SP não serão utilizados, pois os mesmos foram coletados através de injeção de corrente no solo^{5.1}. Os valores de resistência de contato entre eletrodo/solo somente foram verificados em campo, não ultrapassando 3 k Ω . Elevados valores de resistência de contato mostram que a corrente sofrerá uma maior dificuldade em fluir pelo meio. Em locais de resistência de contato superior a 20 k Ω , sugere-se que as medidas não sejam realizadas, pois há uma grande interferência no fluxo da corrente injetada no solo e um aumento no nível de ruído nos dados (IRIS, 1993).

^{5.1} Valores de potencial espontâneo (SP) são, comumente, medidos por meio da diferença de potencial entre dois eletrodos não-polarizáveis, sem injeção de corrente. Um resumo dos métodos de potencial espontâneo encontra-se em Reynolds (1997).

Figura 4.7 – (a) Eletrodo não-polarizável utilizado nas aquisições de dados elétricos. (b) Umedecimento do solo onde foi instalado o eletrodo poroso, com solução de sulfato de cobre.

Figura 4.8 – Equipamento Syscal R2, fabricado pela IRIS. Do lado esquerdo, a unidade conversora e, do direito, a unidade de controle e armazenamento de dados.

Os dados de tomografia elétrica 2D foram adquiridos com o arranjo dipolo-dipolo, devido ao melhor acoplamento eletromagnético, possibilitando, assim, correlacionar, com maior precisão, dados de cargabilidade e dados de resistividade aparente (WARD, 1990). Apesar da diminuição do potencial medido com o distanciamento dos dipolos, uma tensão de 200 Volts utilizada foi o suficiente para se obter bons resultados. Foram adquiridos 51 perfis de tomografia elétrica na área do SCGR. Os perfis foram realizados na direção N-S magnético, com espaçamento entre os dipolos de um metro e sete níveis de investigação. A **Figura 4.9** ilustra a disposição dos pontos de investigação, obtidos com a tomografia elétrica ao longo das linhas do SCGR.

Os dados foram adquiridos no domínio do tempo; isto foi necessário, pois havia necessidade de adquirir os valores médios de cargabilidade do meio. A discussão sobre o método da polarização induzida encontra-se em Sumner (1976) e Ward (1990). Os parâmetros utilizados em campo constam no **Quadro 4.1**. A **Figura 4.10** ilustra esses parâmetros na curva de decaimento de voltagem.

Devido o espaçamento reduzido entre os dipolos, o tempo de aquisição de cada perfil era de, aproximadamente, cinco horas, inviabilizando a aquisição de mais de uma linha de tomografia elétrica por dia. Para diminuir o tempo de aquisição, utilizou-se um comutador eletrônico de eletrodos, desenvolvido no LIGA do IAG/USP (HIO DO et al., 2001). Com a utilização deste comutador (**Figura 4.11a**) e de um sistema de conexão entre o eletrodo e o cabo de potencial (**Figura 4.11b**), o tempo de aquisição de cada perfil elétrico, diminuiu para duas horas e meia, em média, possibilitando, assim, a aquisição de três seções de imageamento elétrico a cada dia de trabalho.

Quadro 4.1 – Parâmetros utilizados durante a aquisição dos dados de imageamento elétrico realizados na área de implantação do SCGR do IAG/USP.

	Simbologia utilizada no SYSCAL R2	Tempo (ms)
Tempo de Relaxação e Injeção de Corrente	TIME	1000
Tempo de medida da primeira amostra de voltagem	V_DLY	580
Tempo de atraso para a primeira amostra de polarização induzida	M_DLY	160
Primeira janela de IP	T_M1	120
Segunda janela de IP	T_M2	220
Terceira janela de IP	T_M3	420

Figura 4.9 – Disposição dos pontos de investigação obtidos com o imageamento elétrico. (a) Na área do SCGR. (b) Ao longo das linhas.

Figura 4.10 – Curva de tensão no domínio do tempo, ilustrando as janelas dos parâmetros utilizados em campo, durante a aquisição dos dados de TE no SCGR do IAG/USP.

Figura 4.11 – (a) Comutador eletrônico de eletrodos utilizados na TE. (b) Sistema de conexão entre o eletrodo e o cabo de potencial, utilizado para diminuir o tempo de aquisição de dados.

4.1.3 Eletromagnético Indutivo

A etapa de aquisições de dados de condutividade elétrica aparente (σ_a) foi realizada com o equipamento EM-38, produzido pela *Geonics Limited*, de propriedade do Departamento de Geofísica do IAG/USP.

O EM-38 permite a investigação da condutividade elétrica e da susceptibilidade magnética do solo graças à obtenção das componentes do campo magnético. O equipamento é extremamente portátil e possibilita uma aquisição de dados relativamente rápida, quando comparada com os métodos elétricos. Com o EM-38, os dados foram adquiridos no modo DMV e DMH (**Figura 3.34**), com os sensores na

direção NS magnética. Os pontos de medida dos dados ficaram distanciados de 1 metro e as leituras, em cada ponto, correspondem à média entre 10 medidas.

Antes do início de cada aquisição, o EM-38 permaneceu ligado cerca de 30 minutos para que o equipamento ficasse na temperatura ambiente. Tal procedimento evita ruídos instrumentais (McNEILL, 1980). Antes da aquisição dos dados com o EM-38, foi feita uma calibração do equipamento, colocando-o a um metro e meio de altura da superfície, para evitar campos magnéticos provenientes do solo.

Durante a aquisição dos dados de EM-38, foi estabelecido um ponto base (fora da área do sítio) para posteriormente corrigir o *drift* do equipamento. O *drift* é uma variação nos valores de leitura, influenciado pela variação do campo magnético terrestre e pelo aquecimento diferenciado do equipamento com a variação da radiação solar (SUDDUTH et al., 2001; ROBINSON et al., 2004). Sudduth et al. (2001) mostram que há um aumento nos valores de condutividade aparente do meio, com a diminuição da temperatura e vice-versa (**Figura 4.12**).

Figura 4.12 – Medidas de condutividade aparente, obtidas com o EM-38, sobre o mesmo perfil mostrando o *drift* instrumental provocado pela variação da temperatura ambiente (adaptada de SUDDUTH et al., 2001).

Robinson *et al.* (*op. cit.*), após inúmeros testes de laboratório e campo, perceberam uma instabilidade nas medidas de σ_a obtidas com o EM-38, quando há um aquecimento diferencial do mesmo, ou seja, quando o painel de controle está mais aquecido do que as bobinas (**Figura 4.13**). Com o equipamento enrolado em um cobertor elétrico (visando simular o aquecimento pela radiação solar), foi registrado um

aumento nos valores de σ_a quando o equipamento atinge a temperatura de 40° até 46° C (Celsius). Quando a temperatura atinge 53° C os valores tendem a diminuir (**Figura 4.14**). Este gráfico mostra a compensação das medidas de σ_a até a temperatura de 40° C; a partir daí há um aumento de σ_a até a temperatura de 46°C, diminuindo posteriormente. Em seguida, com a diminuição da temperatura do equipamento, percebeu-se que houve uma defasagem nos valores de σ_a .

Figura 4.13 – (a) Resposta da temperatura do painel de controle (PC) e bobina receptora do EM-38 com o centro do equipamento (painel de controle) coberto com um cobertor elétrico ligado até 130 minutos e desligado de 130 a 250 minutos. (b) Resposta da σ , que diminui quando o PC está coberto e aumenta quando o cobertor elétrico é desligado (adaptado de ROBINSON et al., 2004).

Figura 4.14 – (a) Resposta da temperatura do painel de controle (CP) e bobina receptora do EM-38 com o centro do equipamento (painel de controle) coberto com um cobertor elétrico ligado. (b) Resposta da σ_a (adaptado de ROBINSON et al., 2004).

Para minimizar erros nos levantamentos com o EM-38, a calibração do equipamento foi realizada a cada 1 hora, em um ponto fixo (fora da área do SCGR). As leituras neste ponto foram realizadas antes e após a aquisição de cada perfil; deste modo, foi possível verificar a variação temporal do *drift* do equipamento e realizar as correções necessárias.

As medidas foram coletadas a cada 1 metro, com o equipamento encostado no chão. Os perfis foram distanciados de 1 metro cada, possibilitando a elaboração de um mapa de pontos com distribuição homogênea dentro do sítio (**Figura 4.15**).

Figura 4.15 – Localização dos pontos de investigação com o equipamento EM-38 na área do SCGR do IAG/USP.

4.2 DEPOIS DA INSTALAÇÃO DOS ALVOS NA ÁREA DO SCGR

4.2.1 Ground Penetrating Radar

Aquisições 2D

A aquisição de dados com o GPR 2D foi realizada após quatro meses da instalação dos alvos na área do SCGR. No total, foram adquiridos 436 perfis de reflexão GPR de 30 metros cada, na direção NS (**Quadro 4.2**). Todas as aquisições de GPR

foram perfis de afastamento constante (*common offset*). Os modos de aquisição foram: i) modo contínuo com antenas blindadas (100 MHz, 200 MHz, 250 MHz, 400 MHz e 500 MHz) e não-blindadas (100 MHz e 200 MHz); e ii) modo passo-a-passo com antenas não-blindadas (100 MHz e 200 MHz). No modo contínuo, houve a aquisição de 53 perfis para cada conjunto de antenas, ao passo que no modo passo-a-passo, houve a aquisição de somente uma seção para cada conjunto de alvos enterrados no SCGR, exceto para a linha de tubos de PAD.

Os dados foram obtidos utilizando-se o equipamento sueco RAMAC I do IAG/USP e o equipamento americano SIR 3000, fabricado pela GSSI (*Geophysical Survey System, Inc.*), de propriedade da empresa Petróleo Brasileiro S/A (PETROBRÁS) e do IAG/USP.

Quadro 4.2 – Número de perfis adquiridos com os equipamentos GPR após a implantação dos alvos dentro do SCGR do IAG/USP.

Antena	Frequência (MHz)	Modo de Aquisição	Equipamento	Número de Perfis
Não-blindada	100	passo-a-passo	RAMAC I	6
Não-blindada	100	contínuo – trenó	RAMAC I	53
Blindada	100	contínuo	RAMAC I	53
Blindada	100	contínuo	SIR 3000	53
Não-blindada	200	passo-a-passo	RAMAC I	6
Não-blindada	200	contínuo – trenó	RAMAC I	53
Blindada	200	contínuo	SIR 3000	53
Blindada	250	contínuo	RAMAC I	53
Blindada	400	contínuo	SIR 3000	53
Blindada	500	contínuo	RAMAC I	53

Os traços, com ambos os equipamentos, foram adquiridos a cada 0,05 metro. O empilhamento (*stack*), com o equipamento RAMAC I, foi de 32 traços nos dados adquiridos no modo contínuo e de 256 traços nos dados adquiridos no modo passo-a-passo. Com o equipamento SIR3000, o RATE (número de scans armazenados por segundo no equipamento) foi de 120 traços. Durante a aquisição de dados com o SIR 3000, foram dados ganhos lineares, em intervalos regulares, para melhorar a visualização dos resultados em campo.

A **Figura 4.16** ilustra algumas aquisições geofísicas realizadas na área do SCGR do IAG/USP após a implantação dos alvos.

Figura 4.16 – Fotos de algumas aquisições realizadas com o GPR na área do SCGR do IAG/USP. a) Aquisição com antenas blindadas de 500 MHz (RAMAC I). b) Antena blindada de 100 MHz (SIR 3000). c) Aquisição com antena blindada de 200 MHz (SIR 3000). d) Antena blindada de 400 MHz (SIR 3000).

Aquisições Quase 3D

Empregando-se a metodologia de Grasmueck et al. (2005), um perfil GPR foi adquirido com a antena blindada (GSSI) de 200 MHz sobre a linha 27NS (tambores de aço) e realizada uma análise do espectro f-k para verificar a melhor amostragem espacial entre os perfis (**Figura 4.17**). Verificou-se que o mínimo comprimento de onda representativo no espectro f-k (K_x) tem a maior energia dentro do intervalo de, aproximadamente, $\pm 2,5$ (1/m). Valendo-se da **Equação 3.19**, tem-se que o espaçamento mínimo entre traços e linhas a ser utilizado para recompor todo o campo de ondas eletromagnéticas do GPR, com a antena de 200 MHz, é de 0,2 metro. Deste modo, foi realizada a aquisição de 21 perfis sobre cada faixa, contendo os alvos arqueológicos, as manilhas de concreto, os tambores de aço, os tambores de plástico e os tubos de ferro,

com espaçamento entre linhas de 0,2 metro, sendo a posição central correspondente à linha, contendo os objetos instalados no SCGR. Os perfis de GPR foram executados na direção Norte-Sul magnético, com espaçamento entre os traços de 0,05 metro.

Figura 4.17 – (a) Perfil adquirido sobre a Linha 27NS (tambores de aço) com espaçamento entre os traços de 0,025 metro (Dado bruto). (b) Espectro f-k do perfil GPR adquirido na Linha 27NS. O tracejado indica que Kx tem a maior energia no intervalo $\cong \pm 2,5(1/m)$.

Com o objetivo de comparar resultados, sobre algumas faixas de alvos enterrados no SCGR do IAG/USP, as aquisições GPR quase 3D, foram conduzidas com as antenas blindadas de 400 MHz e de 200 MHz, com o mesmo espaçamento entre os traços e perfis.

O tempo de aquisição de cada faixa onde estão enterrados os alvos (21 perfis de 30 metros cada) foi inferior a 40 minutos, mostrando que o tempo não é um fator limitante em investigações GPR, quase 3D.

4.2.2 Eletrorresistividade

Antes de iniciar as aquisições de tomografia elétrica 2D, foi conveniente planejar os parâmetros de campo. Este planejamento foi realizado com auxílio da analogia de casos descritos na literatura ou modelagens diretas. No caso das modelagens diretas, fez-se necessário o conhecimento da geometria, disposição espacial e dos valores de resistividade elétrica dos alvos em estudo. Os dois primeiros, mais os valores de resistividade elétrica do meio, são conhecidos na área do SCGR, faltando somente os valores de resistividade elétrica dos alvos. No entanto, o dimensionamento do espaçamento mínimo a ser utilizado para identificar os alvos não pode ser realizado no software de modelagem elétrica disponível (Res2dmod, GEOTOMO, 2002), devido ao tamanho dos alvos (principalmente do tubo metálico de 3,8 cm) serem muito inferiores ao tamanho mínimo de célula/espaçamento de eletrodos. O software Res2dmod possui um limite de 101 eletrodos, o que permite criar uma malha regular de no máximo, 400 blocos; portanto, na simulação de alvos grandes (manilhas), com alvos pequenos, o tamanho do alvo menor não corresponderia com a realidade.

Assim, com a finalidade de verificar qual a melhor configuração de eletrodos para identificar objetos presentes no subsolo, principalmente tubulações, foram realizados testes com diferentes arranjos eletródicos sobre a Linha de manilhas de concreto, instalada no SCGR do IAG/USP. Esta linha foi escolhida porque engloba alvos com resistivos de diâmetros distintos (manilhas com diâmetro externo de 70 cm, 48 cm e 26 cm).

Inicialmente, em todos os arranjos foi fixada a distância mínima entre os eletrodos de um metro e sete níveis de investigação. Foram realizados perfis de tomografia elétrica 2D com os arranjos dipolo-dipolo (DD), pólo-dipolo (PD), pólo-pólo (PP), Wenner-Schlumberger (WS), Wenner alpha (WA), Wenner beta (WB) e Wenner gamma (WG) (LOKE, 2004). Durante as aquisições foram observados e anotados os valores de potencial espontâneo, bem como, os valores de resistência de contato. Esse procedimento teve como finalidade verificar problemas de acoplamento entre o eletrodo e o solo, evitando, dessa maneira, a aquisição de dados incoerentes. Os dados foram armazenados na memória do equipamento (Syscal R2) durante as aquisições e, posteriormente, descarregados para um PC no formato ASCII. Em seguida, os dados foram modelados no software Res2dinv, sendo o número de iterações

menor do que 5, pois o erro médio quadrático (RMS) em todas as seções ficou menor do que 5%, com exceção com o pólo-dipolo que teve um erro de 13%.

As **Figuras 4.18 e 4.19** mostram as seções geoeletricas obtidas sob a linha de manilhas de concreto. Os resistores que aparecem nas posições 21 metros, 23 metros e 25 metros, em quase todas as seções, estão relacionados com a má compactação do aterro neste local, ou seja, vazios no solo, confirmados com furos a trado realizados no mês de janeiro de 2005. Conforme notado, em todos os perfis elétricos, o tubo metálico (posição 15 metros e a 0,5 metros de profundidade) provoca uma redução na resistividade elétrica. Vickery e Hobbs (2002) mostram que o efeito de um tubo metálico próximo à superfície em dados de eletrorresistividade provoca uma zona anômala que atrapalha a interpretação e identificação de alvos próximos do mesmo.

Analisando os dados, nota-se que o arranjo que mostrou os melhores resultados foi o arranjo dipolo-dipolo, uma vez que conseguiu definir melhor as cavas onde foram enterradas as manilhas de concreto. Os demais arranjos indicam variações de resistividade elétrica associadas à escavação da área e a variações do solo. No entanto, essas mudanças de resistividade não coincidem com os objetos artificiais inseridos no meio.

Um dos fatores que atrapalhou na identificação dos alvos foi a disposição dos eletrodos no solo que, devido ao pequeno espaçamento entre as manilhas, provocou distorções do fluxo de corrente e do potencial, contribuindo para o obscurecimento dos alvos. Com o intuito de averiguar esta hipótese foi realizado um perfil com o arranjo dipolo-dipolo, utilizando-se um espaçamento entre os dipolos de 0,5 metro, com 14 níveis de investigação. A **Figura 4.20a** mostra o resultado deste teste. Além deste teste, realizou-se, em uma data diferente, uma nova aquisição de dados de eletrorresistividade, com dipolos de 0,25 metro e 10 níveis de investigação, na parte final da Linha 15 para verificar a resolução espacial superficial.

Na **Figura 4.20a** se percebe que o tubo metálico disposto na posição 15 metros foi mapeado, assim como, os buracos que foram escavados para enterrar as manilhas. Estes buracos apresentam o comportamento de resistores devido a má compactação do solo, aumentando assim a porosidade do meio.

Na **Figura 4.20b**, devido a pequena profundidade de investigação, não há nenhuma correlação precisa entre o modelo geolétrico obtido e as interfaces geológicas e alvos do SCGR do IAG/USP.

A seguir são feitas algumas considerações a respeito dos resultados dos testes dos arranjos eletródicos:

- Pelos resultados obtidos com o espaçamento entre eletrodos de 1 metro, os arranjos que mostraram melhores resultados foram: o dipolo-dipolo e o Wenner gamma;
- A proximidade dos alvos entre si atrapalhou a elaboração de modelos geoelétricos, por meio do processo de inversão realizado no software *res2dinv*, mais consistente com a realidade;
- Modelagens bidimensionais podem ser realizadas para verificar os melhores parâmetros de campo; no entanto, para tais modelagens, faz-se necessário o conhecimento das propriedades físicas reais do meio, já que a resistividade elétrica é influenciada por diversos fatores (porosidade, teor de água, temperatura, sólidos totais dissolvidos, dentre outros);
- Aquisições geoelétricas tridimensionais mostram excelentes resultados em áreas com muitas interferências subterrâneas (tubulações); embora, o tempo e o custo destas investigações tornem-se inviáveis, quando comparadas com outras técnicas geofísicas (GPR, eletromagnético indutivo e magnetometria);
- Um levantamento com maior resolução, ou seja, com um menor espaçamento entre os eletrodos pode auxiliar no imageamento dos objetos, contudo, o Departamento de Geofísica não possui um equipamento multieletródico disponível para a realização de um teste deste tipo. A utilização do Syscal R2 em um levantamento, com espaçamento entre os eletrodos menor do que 0,5 metro, é inviável, pois na aquisição com dipolo de 0,5 metro o tempo de duração foi de 6,5 horas.

- O arranjo utilizado, nas demais linhas do sítio, foi o dipolo-dipolo, com espaçamento entre os dipolos de 0,5 metro e vinte níveis de investigação.

Nas aquisições das demais linhas do SCGR, foi utilizado o equipamento SYSCAL PRO, fabricado pela empresa francesa *IRIS Instruments* (**Figura 4.21**), de propriedade do Departamento de Geotecnia da USP, campus de São Carlos – SP. Durante as aquisições, foi utilizado um cabo com 10 canais, o que nos possibilitou a aquisição de dez níveis por deslocamento; desse modo, foram realizados dois deslocamentos sobre cada perfil (**Figura 4.22**).

Os dados foram armazenados na memória do equipamento e transferidos, posteriormente, para um microcomputador utilizando-se o software *Prosys II*, que é o software específico para os eletrorresistivímetros fabricados pela *Íris Instruments*. Os dados armazenados correspondem a posição dos eletrodos, resistência de contato entre os eletrodos e o solo, tensão, corrente elétrica, resistividade aparente, polarização induzida média e em cada janela escolhida, temperatura do equipamento, potencial espontâneo, arranjo eletródico utilizado e hora da aquisição dos dados. Estes parâmetros possibilitam verificar se há inconsistência nos valores de medida, um exemplo é, se a resistência de contato está muito alta (acima de 30 k Ω), os dados de resistividade não corresponderão aos valores reais do meio.

Figura 4.18 – Seções geolétricas da Linha 15 (manilhas de concreto), modeladas no software Res2dinv, com os alvos sobrepostos e interfaces geológicas. Arranjos: (a) dipolo-dipolo. (b) pólo-dipolo. (c) pólo-pólo. (d) Wenner Schlumberger.

Figura 4.19 – Seções geoeletricas da Linha 15 (manilhas de concreto), modeladas no software Res2dinv, com os alvos sobrepostos e interfaces geológicas. Arranjos: (a) Wenner alpha. (b) Wenner beta. (c) Wenner gamma.

Figura 4.20 – Seções geoeletricas da Linha 15 (manilhas de concreto), modeladas no software Res2dinv, com os alvos sobrepostos e interfaces geológicas. Seções adquiridas com o arranjo dipolo-dipolo e espaçamento entre os dipolos de (a) 0,5 metro e de (b) 0,25 metro.

Os valores de resistência de contato entre os eletrodos e o solo, em todos os dados adquiridos, foram inferiores a 7 k Ω , não influenciando nos resultados. Os dados espúrios (acima de duas vezes o desvio padrão dos dados) foram excluídos no software *Prosys II* e, posteriormente, padronizados no formato de entrada do software Res2dinv.

Figura 4.21 – (a) Foto do eletroresistivímetro SYSCAL PRO, utilizado nas aquisições multieletródos na área do SCGR. (b) Foto evidencia uma aquisição elétrica multieletródos sobre a linha de tambores metálicos.

Figura 4.22 – Esquema da aquisição e disposição de dados de eletroresistividade com o equipamento SYSCAL PRO, utilizando o modo manual, com 10 canais em cada deslocamento.

4.1.3 Eletromagnético Indutivo

As aquisições dos dados com o EM-38 foram divididas em 2 etapas de campo. A primeira consistiu em adquirir dados com o equipamento a, aproximadamente, 0,10 metro do solo, no modo DMV, em intervalos de tempo de 1 segundo. Os dados foram adquiridos caminhando-se normalmente, sendo que a velocidade de deslocamento do equipamento permitiu a coleta de pontos a cada 0,5 metro. Quanto mais próximo o equipamento estiver do solo, maior será a resposta da condutividade elétrica aparente observada no EM-38 (McNEILL, 1980). No entanto, analisando os dados de σ_a da Linha 27NS, observou-se que os valores não variaram consideravelmente, não interferindo nos resultados (**Figura 4.23**). Os locais de maior interferência são os relacionados a alvos metálicos, dentro da área de máxima resposta impulsiva do EM-38, diminuindo a amplitude das anomalias observadas nos levantamentos realizados com o equipamento erguido a 0,10 metro do solo.

Figura 4.23 – Medidas de condutividade elétrica aparente, obtidas com o EM-38, sobre a linha 27NS do SCGR do IAG/USP. O gráfico mostra a variação nos valores medidos conforme há mudança na altura do equipamento.

Foram adquiridos 108 perfis, de 30 metros cada, perfazendo-se uma área de 54 m x 30 m (1620 m²). Os perfis foram adquiridos em conjuntos de 10 linhas, sendo intercalados com uma re-ocupação da linha base. Tal procedimento foi realizado para facilitar na correção do *drift* instrumental. Os dados foram corrigidos em cada perfil, admitindo-se uma variação linear entre cada linha base, ou seja, a diferença entre a média da Linha 21 adquirida entre horários diferentes (**Figura 4.24**).

Figura 4.24 – Medidas de condutividade elétrica aparente, obtidas com o EM-38, sobre a linha 21NS do SCGR do IAG/USP. O gráfico mostra a variação nos valores medidos de acordo com o horário diurno.

Na segunda etapa de aquisição dos dados, foram utilizados os modos DMH e DMV com o equipamento EM-38 acoplado ao solo. Ambas as aquisições foram executadas no mesmo ponto sequencialmente, com o objetivo de comparar os resultados e verificar se havia variação representativa de condutividade elétrica entre os modos de aquisição. A coleta dos pontos foi realizada a cada 0,5 metro.

Os perfis foram adquiridos em conjuntos de nove linhas (**Figura 4.25**), sendo intercalados com uma re-ocupação da linha base. Após esta correção, os perfis possibilitaram a elaboração de mapas de condutividade elétrica aparente para cada conjunto de alvos do SCGR.

Figura 4.25 – Croqui ilustrando as aquisições realizadas com o EM-38 sobre cada faixa de alvos instalados no SCGR do IAG/USP.

CAPÍTULO 5

5 PROCESSAMENTO E MODELAGEM DOS DADOS

5.1 ANTES DA INSTALAÇÃO DOS ALVOS NA ÁREA DO SCGR

5.1.1 Ground Penetrating Radar

As principais etapas utilizadas no processamento dos perfis GPR, adotadas nesta pesquisa, estão brevemente descritas a seguir:

Edição do Header^{5.1} – esta etapa consistiu na inserção e/ou modificação de alguns parâmetros de aquisição de campo e do solo, tais como: posição^{5.2} (ns), metros por marco, traços por metro, constante dielétrica do solo, intervalo (tamanho da janela temporal), frequência central da antena e qualquer outra informação que o usuário achar necessária.

Ajuste do tempo zero – definição da disposição do tempo zero do radargrama.

Background Remove (Remoção do Ruído de Fundo) – este filtro 2D permite remover os ruídos horizontais. Quando um valor, diferente de zero, é utilizado, a filtragem passa alta ocorre na direção horizontal. Estruturas de baixa frequência nos dados foram removidas, tal como a reverberações da onda EM.

^{5.1} O *header* é um arquivo criado durante a aquisição do dado em campo. Ele contém todas as informações sobre os parâmetros de aquisição do dado GPR, tais como: amostras por traço, janela temporal, espaçamento entre os traços, frequência de amostragem, posição do sinal, entre outros. Sem este arquivo, o dado não pode ser observado nos softwares comerciais.

^{5.2} A opção “posição” possibilita corrigir os valores da escala temporal, após o ajuste do tempo zero. Por exemplo: se após o ajuste do tempo zero, o valor inicial da escala temporal for negativo, este valor pode ser alterado modificando na opção posição no *header*.

Ganhos – aplicação de ganhos nos dados, com o intuito de melhorar a visualização de refletores fracos. Os ganhos aplicados foram: Linear e Constante.

Filtros temporais 1D – remoção de frequências não desejadas (ruídos). Após a análise do espectro de amplitude dos dados, definem-se as frequências máximas e mínimas que serão utilizadas nos filtros. O filtro utilizado no processamento corresponde a um filtro FIR^{5.3} (Filtro de Resposta Impulsiva) do tipo caixa (*boxcar filter*^{5.4}).

As etapas de processamento são aplicadas de acordo com as características dos dados e dependem, fundamentalmente, do intérprete. Uma vez escolhido o fluxograma de processamento para uma seção GPR, um programa MACRO^{5.5} foi criado para processar inúmeros perfis ao mesmo tempo. Para o processamento dos dados, foi utilizado o software RADAN 5.0 (GSSI, 2002). Este software é utilizado principalmente para processamento 2D e visualização 2D e 3D de dados de georadar.

As **Figuras 5.1, 5.2 e 5.3** ilustram resultados do processamento sobre seções GPR adquiridas com as frequências de 100 MHz, 200 MHz, 250 MHz, 500 MHz e 1 GHz, em diferentes modos de aquisição. Correlacionando os resultados GPR aos perfis geológicos de cada linha (**figuras 2.8 a 2.14**), pôde-se definir que o aterro é caracterizado por uma zona de forte reflexão que ocorre até 80 ns. Nas seções, nota-se que a zona de forte reflexão é contínua e aumenta de espessura em direção ao norte da área. Os sedimentos da planície de inundação do rio Pinheiros (solo argiloso) atenuam o sinal do GPR. Assim, são caracterizados como uma zona de ausência de reflexão localizada logo abaixo do aterro.

Além do processamento bidimensional, cada conjunto de dados GPR realizado com a mesma antena foi georreferenciado e interpolado, possibilitando a geração de retângulos tridimensionais do subsolo na área. Esse agrupamento de dados, edição da

^{5.3} Os filtros FIR têm uma resposta impulsiva de curta duração. Quando encontram uma estrutura indesejável nos dados, garantem sua saída em uma versão filtrada. Esta propriedade torna-se possível porque os filtros são perfeitamente simétricos e tem características de fase linear. Desta maneira, os filtros FIR produzem resultados simétricos, e as reflexões não estarão atrasadas no tempo ou deslocadas no espaço. Note que, devido a natureza simétrica dos filtros FIR, o comprimento deles será sempre um número ímpar.

^{5.4} O *boxcar filter* é uma função de forma retangular que executa uma simples média contínua nos dados. Uma porção dos dados determinada pelo comprimento do filtro é calculada, e a média sai como um ponto no centro da porção ativa da janela do filtro. O filtro é movido para a próxima amostra e o processo é repetido. O peso é igual para todos os dados ao longo do tamanho do filtro.

^{5.5} O programa Macro corresponde a uma ação ou um conjunto de ações que se utiliza para automatizar tarefas.

geometria, processamento e visualização foram realizados com o software ReflexW 4.0 (SANDMEIER, 2006).

Figura 5.1 – Seções GPR realizadas sobre a Linha 17NS, com antenas de 100 MHz. a) antenas não-blindadas, no modo passo-a-passo; b) antenas não-blindadas no modo contínuo; e c) antenas blindadas no modo contínuo.

Figura 5.2 – Seções GPR realizadas sobre a Linha 17NS. a) seção obtida com antenas não-blindadas de 200 MHz no modo passo-a-passo e b) no modo contínuo. c) seção obtida com antenas blindadas de 250 MHz.

A **Figura 5.4** mostra blocos de dados GPR, Quase-3D, elaborados com os dados obtidos com as antenas de frequências de 100 MHz, 200 MHz e 250 MHz. O conjunto de dados que define, com maior clareza, a interface aterro/paleossolo argiloso, são os obtidos com as antenas não-blindadas de 100 MHz no modo contínuo (**Figura 5.5a**). Deste modo, neste bloco GPR, os contatos aterro/paleossolo foram delimitados em cada perfil (**Figuras 5.5b e 5.5c**). Esses dados foram interpolados e suavizados, possibilitando a reconstrução do relevo antes da inserção do aterro na área (**Figuras 5.6a e 5.6b**).

Figura 5.3 – Seções GPR realizadas sobre a Linha 17NS. a) seção obtida com antenas blindadas de 500 MHz e b) blindadas de 1 GHz.

Após a seleção de uma superfície que reconstruiu o relevo dos sedimentos argilosos do rio Pinheiros, ela mesma foi comparada com o mapa da espessura do aterro obtido por meio dos dados das trincheiras abertas, quando da instalação dos alvos no SCGR (**Figura 5.7**). Foi realizada uma subtração entre estas duas superfícies e calculado o erro de ajuste entre as mesmas; as diferenças entre as duas ficaram, em média, 0,3 metro (entre -0,3 metro e 0,7 metro), convertendo-se, os perfis de tempo para profundidade, com uma velocidade constante de 0,07 m/ns.

Figura 5.4 – Blocos retangulares elaborados com os dados de GPR, Quase-3D, adquiridos, na área do SCGR antes da implantação dos alvos, com as antenas de: 100 MHz não-blindadas (a) no modo passo-a-passo e (b) no modo contínuo; (c) 100 MHz blindadas no modo contínuo; 200 MHz não-blindadas (d) no modo passo-a-passo e (e) no modo contínuo; e (f) 250 MHz blindadas no modo contínuo.

Figura 5.5 – (a) Bloco retangular mostrando a interpolação entre as linhas de GPR, Quase-3D, obtidas com as antenas não-blindadas de 100 MHz no modo contínuo. (b) e (c) Limite entre o aterro e os sedimentos argilosos da planície de inundação do rio Pinheiros gerados no software ReflexW.

Figura 5.6 – (a) Mapa de espessura do aterro na área do SCGR, obtido pela interpretação de dados de GPR adquiridos com antenas não-blindadas de 100 MHz. (b) Mesmo mapa suavizado (média móvel entre cinco pontos).

Figura 5.7 - Mapas de espessura do aterro dentro da área do SCGR. (a) obtido pela interpretação de dados de GPR, Quase-3D, com antenas não-blindadas de 100 MHz e suavizado e (b) obtido com a escavação das trincheiras. (c) Diferença entre o mapa de espessura (b) e (a).

5.1.2 Eletrorresistividade

Os dados de aquisições elétricas, obtidos antes da implantação dos alvos na área do SCGR do IAG/USP, serão comentados de acordo com o tipo de investigação geofísica realizada (1D, 2D e Quase-3D).

Sondagens Elétricas Verticais

Os dados das SEVs foram modelados no software ResixIP V2, fabricado pela *Interpex Limited* (INTERPEX, 1997). As curvas de resistividade aparente e cargabilidade (**Figura 5.8a e 5.8b**) foram ajustadas em conjunto, ficando o erro de ajuste entre a curva de campo e a sintética, no intervalo de 3,2 a 10,6% (erro mediano de 6,1%). Os modelos geoeletricos para os dados de campo mostram os melhores ajustes com 4 e 5 camadas (**Figura 5.8c e 5.8d**). Os gráficos de dados de campo, sintético e o modelo geoeletrico para cada SEV são mostrados no **Apêndice B**.

O **Quadro 5.1** mostra os valores de resistividade e cargabilidade obtidos após a modelagem dos dados de eletrorresistividade das SEVs realizadas dentro da área do SCGR do IAG/USP. Os modelos obtidos mostram que há uma diminuição nos valores de resistividade elétrica na parte leste da área.

Os valores modelados de resistividade e cargabilidade foram individualizados por camadas, interpolados no software Surfer 6.0 (GOLDEN SOFTWARE, 1997), permitindo a elaboração de mapas de isoespessura dos horizontes geoeletricos presentes na área do SCGR (**Figura 5.9 e 5.10**). Somente houve a confecção de mapas para as três primeiras camadas, pois as duas primeiras representam o aterro e a última os sedimentos argilosos da planície de inundação do rio Pinheiros.

Quadro 5.1 – Valores de resistividade aparente (ρ_a), cargabilidade (M) e espessura (h) das camadas dos modelos de ajuste das SEVs executadas dentro da área do SCGR do IAG/USP, antes da instalação dos alvos.

SEV	Camada 1			Camada 2			Camada 3			Camada 4			Camada 5		
	ρ_a	M	h	ρ_a	M	h	ρ_a	M	h	ρ_a	M	h	ρ_a	M	h
SEV1A	1140	9.9	1.2	595	6.4	1.2	54	0.1	1.1	387	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0
SEV1B	1179	7.3	0.9	468	4.8	2.0	51	0.1	0.9	353	6.6	0.0	0.0	0.0	0.0
SEV2A	1439	13.1	1.1	782	8.5	1.2	40	0.1	1.4	513	8.1	0.0	0.0	0.0	0.0
SEV2B	1259	12.1	1.5	356	10.3	0.8	32	0.1	0.8	519	9.8	0.0	0.0	0.0	0.0
SEV3A	804	12.6	1.2	453	19.6	0.7	54	1.0	1.0	2288	3.0	1.5	32	3.2	0.0
SEV3B	864	7.2	1.1	529	8.7	1.1	26	0.1	0.8	687	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0
SEV4A	615	12.1	1.1	582	23.7	0.8	46	0.1	0.9	1512	11.8	0.9	280	2.7	0.0
SEV4B	723	12.5	1.0	400	12.2	1.8	38	0.1	1.1	731	14.4	0.0	0.0	0.0	0.0
SEV5A	1076	9.1	0.9	452	8.9	2.1	42	1.0	1.5	712	15.8	0.0	0.0	0.0	0.0
SEV5B	845	12.8	1.1	401	8.6	1.5	23	0.1	0.8	520	13.8	0.0	0.0	0.0	0.0
SEV6A	191	4.7	1.2	230	13.9	0.9	30	0.0	1.3	970	1.8	2.5	742	23.1	0.0
SEV6B	201	2.5	0.9	406	6.4	1.0	73	0.1	2.5	888	0.1	1.8	342	57.3	0.0
SEV7A	189	5.2	0.5	2284	7.5	0.4	13	0.1	0.6	101	5.4	0.6	459	7.2	2.3
SEV7B	209	5.1	1.1	650	7.6	0.8	190	4.0	2.6	53	10.6	2.2	653	138	0.0
SEV8	1467	12.2	1.1	665	8.7	1.5	66	4.3	3.7	655	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0
SEV9	1244	8.9	1.2	3363	7.4	1.5	2052	10.2	0.5	209	0.0	3.2	621	12.2	0.0
SEV10	931	5.5	1.3	870	3.3	3.8	106	3.2	2.8	772	7.4	0.0	0.0	0.0	0.0
SEV11	1411	10.5	0.6	3229	8.0	0.6	39	6.5	0.7	383	10.3	0.0	0.0	0.0	0.0

Aterro
 Aterro mais condutivo
 Sedimentos argilosos da planície de inundação do rio Pinheiros

ρ_a = resistividade elétrica aparente ($\Omega.m$), M = cargabilidade (mV/V), h = espessura da camada (metros)

Tomografia Elétrica 2D

Os dados de eletrorresistividade 2D foram modelados no software Res2dinv (GEOTOMO, 2003a), que determina, automaticamente, um modelo de resistividade bidimensional para o meio, por meio dos dados elétricos de campo. O modelo 2D usado pelo programa de inversão consiste de um número de blocos retangulares, distribuídos de acordo com o espaçamento entre os pontos coletados. O arranjo dos blocos é estabelecido de acordo com a distribuição dos pontos na pseudoseção, sendo nulo quando da inexistência de pontos. A distribuição e tamanho dos blocos são, automaticamente, gerados pelo programa, usando o posicionamento dos pontos medidos como guia.

Figura 5.8 – Curvas de campo e modelos 1D das SEVs realizadas no SCGR do IAG/USP, antes da instalação dos alvos. Curvas de (a) Resistividade elétrica aparente e (b) Cargabilidade média aparente. Modelos 1D de (c) Resistividade elétrica. (d) Cargabilidade.

A profundidade da base das linhas de blocos é ajustada de acordo com a profundidade equivalente de investigação dos pontos com o maior espaçamento de eletrodos e segue o critério adotado por Edwards (1977). Uma subrotina de modelagem direta é usada para calcular os valores de resistividade elétrica aparente, e uma técnica de otimização não-linear por mínimos quadrados é usada na rotina da inversão (LOKE; BARKER, 1996). O propósito é determinar a resistividade dos blocos retangulares que irão produzir uma pseudoseção de resistividade aparente a qual coincida ou se aproxime das medidas de campo. O método de otimização, basicamente, tenta reduzir a diferença entre os dados de resistividade medidos em campo, dos calculados, ajustando a resistividade nos blocos do modelo. A medida desta diferença é dada pelo erro médio quadrático (*Root Mean Square* – $RMS^{5,6}$).

^{5,6} O erro médio quadrático (*RMS – Root Means Square Error*) é uma medida do desvio dos valores calculados em relação aos valores originais. O erro RMS é estimado, tomando-se uma amostra dos valores calculados e comparando-a com seus valores reais. As diferenças entre elas são, elevadas ao quadrado e somadas. A soma é, então, dividida pelo número de medidas, para que se obtenha a média cuja raiz quadrada fornece uma medida característica de erro na mesma unidade das medidas originais. O erro RMS é, diretamente, comparável ao conceito de desvio padrão.

Figura 5.9 – Mapas de resistividade elétrica e isoespessura dos horizontes geolétricos elaborados com os resultados das SEVs obtidas na área do SCGR do IAG/USP, antes da instalação dos alvos. Horizonte 1 (a) SEVs NS e (b) SEVs EW. Horizonte 2 (c) SEVs NS e (d) SEVs EW. Horizonte 3 (e) SEVs NS e (f) SEVs EW.

Figura 5.10 – Mapas de cargabilidade e isoespessura dos horizontes geolétricos elaborados com os resultados das SEVs obtidas na área do SCGR do IAG/USP, antes da instalação dos alvos. Horizonte 1 (a) SEVs NS e (b) SEVs EW. Horizonte 2 (c) SEVs NS e (d) SEVs EW. Horizonte 3 (e) SEVs NS e (f) SEVs EW.

O resultado das inversões obtidas, com o software Res2Dinv (GEOTOMO, 2003a) para os dados de resistividade elétrica aparente, tiveram um erro RMS máximo de 10%, com apenas 3 iterações. A **Figura 5.11** mostra o resultado da modelagem inversa dos dados de resistividade para a linha 1NS do SCGR.

Figura 5.11 – Resultados da modelagem inversa dos dados de resistividade aparente (ρ_a) da linha 1NS do SCGR do IAG/USP. (a) Pseudo-seção de ρ_a dos dados de campo. (b) Pseudo-seção de ρ_a calculada. (c) Seção de resistividade elétrica, obtida por meio da modelagem inversa.

As inversões dos dados de cargabilidade média aparente ($Mm_a^{5.7}$) apresentaram um máximo erro médio quadrático de 1,5%, com apenas 3 iterações. A **Figura 5.12** ilustra um resultado da modelagem inversa dos dados de cargabilidade para a linha 1NS do SCGR.

^{5.7} A Cargabilidade Média Aparente é a média das cargabilidades aparentes parciais. A cargabilidade aparente parcial corresponde a cargabilidade média em cada janela temporal de IP definido pelo usuário. Aumentando-se a janela temporal, aumenta-se também o valor de cargabilidade.

Figura 5.12 – Resultados da modelagem inversa dos dados de cargabilidade média aparente (Mm_a) da linha 1NS do SCGR do IAG/USP. (a) Pseudo-seção de Mm_a dos dados de campo. (b) Pseudo-seção de Mm_a calculada. (c) Seção de cargabilidade, obtida por meio da modelagem inversa.

Investigações Elétricas Quase-3D

As investigações elétricas Quase-3D, na prática, são resultados de aquisições elétricas realizadas em 2D. Nesta técnica, os perfis 2D são adquiridos paralelos e, posteriormente, agrupados como dados 3D (dados volumétricos).

Em todo o sítio, foram realizados 51 perfis de tomografia elétrica. Os dados foram divididos em nível de investigação e agrupados para elaboração de mapas de profundidade de resistividade elétrica aparente. Os dados obtidos foram analisados por nível. Observando-se os pontos de cada nível investigado, notou-se que alguns pontos possuíam valores muito acima da variância. Tais pontos podem estar relacionados a erros de leituras do equipamento, provocados pelo mau acoplamento entre os eletrodos e o solo, ou, pela má conexão entre os cabos elétricos e os eletrodos. Para excluir estes

pontos, foi realizada uma filtragem inicial que constou em análises estatísticas de todos os dados, sendo verificadas sua distribuição, média ($\bar{X}$) e desvio padrão (SD). Notou-se que, devido a estes pontos com valores anômalos, o histograma de distribuição de frequência apresenta uma tendência a ter assimetria positiva (grande quantidade de valores baixos e poucos valores altos). No entanto, verificando-se a diferença entre a média e a mediana, percebeu-se que a mesma não ultrapassava 20% da média (**Figura 5.13**). Devido a esta assimetria e a heterogeneidade dos dados, a variância dos dados é maior.

Figura 5.13 – Histograma de distribuição de frequência dos dados de resistividade elétrica aparente do primeiro nível de investigação elétrica.

Para extrair os pontos anômalos provocados por erro instrumental, foram definidos limites de corte para os dados de acordo com o desvio padrão de cada distribuição. Utilizando-se um intervalo de corte de $\bar{X} \pm 2SD$, percebeu-se que os pontos anômalos foram excluídos (**Figura 5.14**). Ao analisar a quantidade de dados que foram excluídos por nível, verificou-se que a porcentagem não ultrapassa 8% dos dados originais.

Após a retirada dos pontos anômalos, aplicou-se uma matriz de suavização nos dados do intervalo $\bar{X} \pm 2SD$, para observar tendências preferenciais de resistividade. O software utilizado para esta suavização foi o Surfer 6.0; o método Average (média) foi o escolhido. Este método usa uma simples média de todos os valores da malha, escolhidos na matriz e utilizados para cada nó da malha. Com este método, um nó da malha na borda da matriz tem um peso igual ao nó localizado no centro da matriz. Para a

suavização dos dados, foi utilizada uma matriz de 3 x 3, com igual peso a todos os nós. Com a aplicação, nota-se com clareza a suavização dos dados (**Figura 5.15**).

Figura 5.14 – Mapa de isovalores de resistividade do Nível 1 da área do SCGR do IAG/USP, obtido por meio da técnica da tomografia elétrica, com o arranjo dipolo-dipolo. (a) Mapa com os dados brutos. (b) Mapa dos dados entre o intervalo $\bar{X} \pm 2SD$. (c) Mapa residual (a – b) mostrando os pontos que foram excluídos dos dados originais.

Figura 5.15 – Mapa de isovalores de resistividade do Nível 1 da área do SCGR do IAG/USP obtido por meio da técnica da tomografia elétrica, com o arranjo dipolo-dipolo. (a) Dados sem suavização. (b) Dados suavizados.

A mesma rotina de filtragem de dados foi utilizada para os demais níveis de resistividade elétrica e de cargabilidade.

A **Figura 5.16** mostra os sete níveis de resistividade elétrica obtidos. No nível 1 de investigação, nota-se uma anomalia condutiva ($< 300 \Omega.m$) na parte leste da área ($x = 40, y = 15$). Nos níveis 2 a 4, esta anomalia condutiva aumenta e avança para oeste. A partir do quinto nível, esta anomalia condutiva perfaz quase a totalidade da área investigada.

Os dados de cargabilidade aparente mostram uma zona de maiores valores (8 mV/V a 16 mV/V) na parte oeste da área, no primeiro nível de investigação (**Figura 5.17**). A partir do segundo nível até o sexto nível, esta anomalia diminui gradualmente sua amplitude e tamanho. No sétimo nível, os valores de cargabilidade ficam entre 0 mV/V e 6 mV/V.

Para verificar se os baixos valores de resistividade aparente estavam relacionados com os sedimentos mais argilosos presentes no aterro e aos sedimentos argilosos da planície de inundação do rio Pinheiros, foi realizada uma inversão 3D, com os dados das 51 seções elétricas adquiridas. Estes dados foram concatenados em um arquivo de entrada do software Res3dinv (LOKE, 2003b). Este software utiliza o mesmo princípio de divisão de blocos que o Res2dinv, mas agora nas 3 direções (x,y e z).

A inversão 3D, utilizando-se o software Res3dinv, foi realizada em um PC (*personal computer*), com processador Pentium IV de 3 GHz, e 1 GB (gigabyte) de memória RAM (*Random Access Memory*). Os dados compreendem 10353 pontos de investigação, formando uma malha de 51 x 29 x 7 nós. O tempo total gasto nos processos de iteração (3 iterações), foi de, aproximadamente, uma hora e trinta e sete minutos. O tempo de iteração foi grande devido ao cálculo da resistividade aparente (dados sintéticos) ter sido realizado pelo método dos elementos finitos.

Os valores dos erros RMS para os modelos da terceira iteração foram de 16,2 % para os dados de resistividade elétrica e de 1,92 % para os dados de cargabilidade.

As **figuras 5.18 e 5.19** mostram os resultados de modelagens 3D dos dados de resistividade elétrica e cargabilidade, para toda a área do SCGR do IAG/USP.

Figura 5.16 – Mapas de isovalores de resistividade aparente dos níveis de investigação, com as respectivas profundidades teóricas, da área do SCGR do IAG/USP, obtido por meio da técnica da tomografia elétrica com o arranjo dipolo-dipolo. Nota-se uma zona condutiva na parte leste da área, do primeiro ao quarto níveis.

Figura 5.17 – Mapas de isovalores de cargabilidade aparente (M_a), dos níveis de investigação, com as respectivas profundidades teóricas, da área do SCGR do IAG/USP, obtido por meio da técnica da tomografia elétrica com o arranjo dipolo-dipolo. Notam-se os maiores valores de M_a na parte leste da área, do primeiro ao quarto níveis. Do quinto nível em diante os valores de M_a correspondem ao paleossolo (mais argiloso).

Figura 5.18 – Cortes, em profundidade, do bloco de inversão 3D dos dados de resistividade elétrica, adquiridos na área do SCGR do IAG/USP. (a) 0,0 m a 0,35 m. (b) 0,35 m a 0,75 m. (c) 0,75 m a 1,22 m. (d) 1,22 m a 1,75 m. (e) 1,75 m a 2,36 m. (f) 2,36 m a 3,06 m.

Figura 5.19 – Cortes, em profundidade, do bloco de inversão 3D dos dados de cargabilidade adquiridos na área do SCGR do IAG/USP. (a) 0,0 m a 0,35 m. (b) 0,35 m a 0,75 m. (c) 0,75 m a 1,22 m. (d) 1,22 m a 1,75 m. (e) 1,75 m a 2,36 m. (f) 2,36 m a 3,06 m.

5.1.3 Eletromagnético Indutivo

O mesmo procedimento de filtragem de dados espúrios e suavização, aplicado aos dados de eletrorresistividade, foi utilizado para os dados de condutividade elétrica (**Figura 5.20**) e susceptibilidade magnética (**Figura 5.21**) obtidos com o equipamento EM-38. Os dados de susceptibilidade magnética no modo DMH não foram adquiridos porque havia a necessidade de realizar uma calibração do equipamento em cada ponto de leitura (zerando o *inphase*) ou realizar as aquisições duas vezes (uma no modo DMV e outra no modo DMH, GEONICS, 1999). Além disso, nota-se uma homogeneidade nos valores de susceptibilidade para o solo da região (média de $1,2 \times 10^{-3}$ SI).

Após a filtragem, os dados foram interpolados no software Surfer, versão 6 da Golden Software Inc. O método de interpolação utilizado foi o da krigagem linear entre pontos, que consiste num processo de estimativa, por médias móveis, de valores de variáveis distribuídas, adjacientemente, no espaço, a partir de valores amostrados; ou seja, estima-se os valores médios nos locais não-amostrados, a partir dos pontos amostrados.

Figura 5.20 – Mapas de isovalores, de condutividade elétrica aparente, obtidos com o EM-38 na área do SCGR do IAG/USP. Dados com o equipamento nos modos DMH (a) dados brutos e (b) dados suavizados, e DMV (c) dados brutos e (d) dados suavizados.

Figura 5.21 – Mapas de isovalores, de susceptibilidade magnética, obtidos com o EM-38 na área do SCGR do IAG/USP. Dados com o equipamento no modo DMV (a) dados brutos e (b) dados suavizados.

5.2 DEPOIS DA INSTALAÇÃO DOS ALVOS NA ÁREA DO SCGR

5.2.1 Ground Penetrating Radar

Dados 2D

Os dados de GPR 2D foram processados no software ReflexW, versão 4.0 (SANDMEIER, 2006). A rotina de processamento dos dados consistiu em: conversão de formato dos arquivos, ajuste do tempo zero, filtros 1D (*dewow* e passa-banda) e 2D (remoção de *background*), ganhos (linear e exponencial) e conversão de tempo em profundidade. A mesma rotina de processamento foi aplicada a todos os radargramas, com o intuito de comparação das amplitudes dos sinais. Somente os parâmetros dos filtros foram distintos, devido à frequência central de cada antena.

Para o ajuste do tempo zero e da identificação do refletor correspondente aos alvos, os tempos de trânsito da onda eletromagnética foram ajustados, conforme o pico positivo da *wavelet* refletida (YELF, 2004). De acordo com a frequência da antena, a posição do pico é modificada. Frequências menores possuem um maior comprimento de onda, aumentando assim o erro de posicionamento dos refletores. A **Figura 5.22** mostra radargramas obtidos, com frequências e antenas distintas, sobre parte da Linha 4 no SCGR do IAG/USP. Percebe-se que há uma pequena variação no posicionamento vertical (tempo de trânsito) com a variação da frequência (**Quadro 5.2**).

Conhecendo-se a profundidade real dos alvos enterrados dentro da área do SCGR e cada evento hiperbólico relacionado aos alvos, obteve-se as velocidades médias de propagação da onda eletromagnética no meio usando-se a **Equação 5.1**.

$$v = \frac{2h}{t} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

sendo h a profundidade do alvo, e t o tempo duplo de trânsito da onda eletromagnética no meio. Tais velocidades obtidas foram interpoladas (krigagem) e possibilitaram a criação de modelos bidimensionais da velocidade de propagação da onda eletromagnética no solo. Esses modelos foram, posteriormente, colocados no formato de entrada do software ReflexW para a conversão dos perfis de tempo para profundidade. A **Figura 5.23** mostra os modelos de velocidades obtidos, com diversas frequências, para a linha de tambores metálicos implantada na área do SCGR do IAG/USP.

Figura 5.22 – Radargramas obtidos com antenas de diferentes frequências sobre parte da Linha 4 do SCGR do IAG/USP. Os refletores hiperbólicos representam um par de tambores metálicos. (B = blindada, NB = não-blindada).

Quadro 5.2 – Tempos de trânsito e velocidades dos eventos hiperbólicos, identificados e calculados para os radargramas, obtidos com diversas antenas sobre o par de tambores metálicos da Linha 4 do SCGR do IAG/USP.

Antenas	ALVO 1		ALVO 2	
	Tempo de Trânsito (ns)	Velocidade (m/ns)	Tempo de Trânsito (ns)	Velocidade (m/ns)
100 MHz não-blindada (RAMAC)	33,76	0,053	34,73	0,058
100 MHz blindada (RAMAC)	28,54	0,063	30,17	0,066
100 MHz blindada (GSSI)	38,12	0,047	38,5	0,052
200 MHz não-blindada (RAMAC)	32,43	0,056	32,98	0,061
200 MHz blindada (GSSI)	29,04	0,062	29,85	0,067
250 MHz blindada (RAMAC)	28,21	0,064	29,13	0,069
400 MHz blindada (GSSI)	28,73	0,063	30,47	0,066
500 MHz blindada (RAMAC)	26,48	0,068	27,12	0,074

OBS: alvos enterrados na profundidade de 0,9 metro (alvo 1) e a 1,0 metro (alvo 2).

Dados GPR, Quase-3D

Os dados de GPR 2D que compõem um conjunto de dados GPR, Quase-3D, foram processados no módulo *2D data analysis* do ReflexW, versão 4.0 (SANDMEIER, 2006), e interpolados e visualizados no módulo *3D data interpretation*, do mesmo software. A rotina de processamento dos dados consistiu em: conversão de formato dos arquivos, ajuste do tempo zero, correção do posicionamento dos traços, filtros 1D (*dewow* e *passa-banda*) e 2D (remoção de *background*), ganho (decaimento de energia^{5.8}) e migração de difrações em 2D, conversão em profundidade. A mesma rotina de processamento 2D foi aplicada a todos os radargramas, com o intuito de comparação das amplitudes dos sinais e agrupamento dos dados. A correção de posicionamento dos traços foi realizada porque se notou que houve um pequeno deslocamento dos alvos (**Figura 5.24a**), provocado durante as aquisições (erro de posicionamento das antenas ou *hip chain trigger*). Conhecendo-se a localização do tubo metálico de 3,8 cm de diâmetro ($Y = 15$ metros), as correções foram efetuadas. Nessas correções, a posição inicial do perfil é modificada no *header* de cada arquivo. Se o evento hiperbólico, proveniente do tubo metálico guia, estiver além dos 15 metros, a posição inicial será menor do que zero, ao passo que, se o evento estiver, antes da posição de 15 metros, o início do perfil será maior do que zero. O valor a ser

^{5.8} EnergyDecay – ativando-se esta opção, um ganho é aplicado na direção do eixo do tempo em cada traço. Este ganho é baseado na curva de decaimento médio de amplitude. Primeiro uma curva de decaimento médio é determinada de todos os traços existentes do perfil. Depois da aplicação de um filtro de mediana nesta curva, cada amostra do traço é dividida pelo valor da curva de decaimento. Frequentemente é necessário aplicar um fator de escala (parâmetro de multiplicação) menor do que um porque após a aplicação deste ganho, alguns valores de amplitude excederão a amplitude máxima do perfil original (SANDMEIER, 2006).

acrescentado ou subtraído é obtido através da seleção do ápice do evento hiperbólico, referente ao tubo guia (posição medida $\pm$ a posição real). A **Figura 5.24b** mostra um exemplo do resultado de uma dessas correções.

A migração das difrações (*diffraction stack migration*, GAZDAG; SGUAZZERO, 1984) foi efetuada para melhorar o posicionamento dos alvos nas seções. Esta rotina foi aplicada porque a área permite o estabelecimento da velocidade do meio devido a profundidade conhecida dos alvos. As **Figuras 5.25 e 5.26** mostram exemplos dos resultados migrados e não migrados, obtidos sobre uma faixa de tubos metálicos, enterrados na área do SCGR do IAG/USP.

Figura 5.23 – Modelos de velocidade, da onda eletromagnética, obtidos sobre a Linha de tambores metálicos do SCGR do IAG/USP, com diferentes frequências: (a) 100 MHz blindada, RAMAC; (b) 200 MHz blindada, SIR 3000; (c) 250 MHz blindada, RAMAC; (d) 400 MHz blindada, SIR 3000; e (e) 500 MHz blindada, RAMAC.

Figura 5.24 – Cortes, em profundidade, dos dados GPR, Quase-3D, adquiridos sobre parte do tubo metálico de 3,8 cm de diâmetro enterrado na área do SCGR/IAG. Mapas mostrando o efeito do erro de posicionamento dos traços (a) e após as correções (b).

Após a migração, percebe-se, claramente, que os refletores lineares dispostos nas posições de 15 metros e 20 metros (eixo Y) são focados, permitindo assim um dimensionamento do objeto (**Figura 5.26**).

Figura 5.25 – Visualização em volume dos resultados da interpolação de dados GPR, Quase-3D, adquiridos sobre tubos metálicos, na área do SCGR do IAG/USP. (a) Cubo não migrado. (b) Cubo migrado.

Figura 5.26 – Visualização da amplitude verdadeira de cortes no tempo (15,47 ns) dos resultados da interpolação de dados GPR, Quase-3D, adquiridos sobre tubos metálicos, na área do SCGR do IAG/USP. (a) Seção não migrada. (b) Seção migrada.

Apesar do modo de visualização normal (amplitude verdadeira – positivo e negativo) permitir a identificação dos alvos nos cortes no tempo, a visualização da amplitude instantânea^{5.9} ou envoltória (envelope) dos traços possibilita uma melhor reconstrução da imagem (**Figura 5.27**).

Na **Figura 5.27**, percebe-se com maior nitidez os alvos nas posições 15 e 20 metros, bem como, o efeito da migração. Deste modo, a envoltória do sinal foi aplicada a todos os cortes em profundidade dos conjuntos de dados GPR, Quase-3D.

Figura 5.27 – Visualização da amplitude instantânea de cortes no tempo (15,47 ns) dos resultados da interpolação de dados GPR, Quase-3D, adquiridos sobre tubos metálicos, na área do SCGR do IAG/USP. (a) Seção não migrada. (b) Seção migrada.

5.2.2 Eletrorresistividade

A inversão dos dados de resistividade elétrica e polarização induzida obtidos sobre as linhas onde foram enterrados os alvos no SCGR do IAG/USP, foram realizadas em conjunto no software Res2dinv, versão 3.4. A rotina de inversão utilizada foi a de contraste de suavização por mínimos quadrados (SASAKI, 1989), implementada no software Res2dinv.

O método de otimização utilizado foi o Gauss-Newton que recalcula as derivadas parciais da matriz jacobiana para todas as iterações. Este método aumenta o tempo de processamento, entretanto, apresenta melhores resultados quando há

^{5.9} A amplitude instantânea (ou o envelope do traço) é um atributo calculado pela transformada de Hilbert (YILMAZ, 1987). Ela é uma medida da intensidade da refletividade, que é proporcional à raiz quadrada da energia completa do sinal em um determinado instante do tempo. O envelope permite uma avaliação da distribuição da energia ao longo do traço e auxilia na determinação do início do refletor (SANDMEIER, 2006).

contrastes elevados de resistividade, ou seja, é melhor para detectar alvos pontuais com resistividades distintas (LOKE; DAHLIN, 2002).

Foi realizada uma análise entre a variação do erro RMS e o modelo obtido com o objetivo de verificar a quantidade ótima de iterações. A realização de sete iterações foi o suficiente para a análise, já que os erros não diminuíram significativamente, após a terceira iteração (**Figura 5.28**). Deste modo, o resultado das inversões para os dados de resistividade elétrica tiveram um erro RMS máximo de 11%, com apenas 3 iterações. Já para os dados de cargabilidade, o valor máximo do erro RMS foi de 2,8% para a terceira iteração.

Figura 5.28 – Gráficos mostrando os erros RMS de resistividade elétrica (a) e cargabilidade (b) após cada iteração no software Res2dinv.

Nos modelos geolétricos de cada Linha de resistividade elétrica e cargabilidade, foram plotadas as interfaces geológicas (aterro e sedimentos da planície de inundação do rio Pinheiros), as áreas escavadas, bem como os alvos em suas dimensões reais. A **Figura 5.29** mostra o modelo geolétrico da Linha 3 com as interfaces e os alvos sobrepostos.

Figura 5.29 – Modelo geolétrico da Linha 3, com as interfaces e as interferências (alvos) sobrepostas.

5.2.3 Eletromagnético Indutivo

Após a correção do *drift* instrumental, os conjuntos de dados de σ_a obtidos com o equipamento EM-38 foram interpolados no software Surfer 6.0 e possibilitaram a elaboração de mapas. Nenhum tipo de filtragem ou suavização dos dados foi realizado para não comprometer as anomalias geofísicas dos alvos.

A **Figura 5.30** mostra o mapa de condutividade elétrica aparente, obtido com o equipamento EM-38 no modo DMV, após a interpolação dos dados. Para a discussão posterior dos resultados sobre as linhas e os alvos estudados, as figuras foram criadas em pequenas faixas (30 metros por 4 metros) que recobrem cada conjunto de alvos.

Figura 5.30 – Mapa de condutividade elétrica aparente do SCGR/IAG, adquirido no modo DMV, após a implantação dos alvos.

CAPÍTULO 6

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 ANTES DA INSTALAÇÃO DOS ALVOS NA ÁREA DO SCGR

6.1.1 Ground Penetrating Radar

Conforme discutido no item 5.1.1, os dados de GPR obtidos, antes da instalação dos alvos no SCGR, permitiram a identificação de duas zonas de reflexão distintas: uma relacionada ao aterro (zona de forte reflexão) e outra correspondente aos sedimentos argilosos da planície de inundação do rio Pinheiros (zona de ausência de reflexão). Nas seções de GPR, os sedimentos que constituem o aterro são representados por refletores, horizontais e inclinados, que aumentam de espessura para o norte da área (**Figuras 5.1 e 5.2**). O aumento na amplitude dos refletores está relacionado à constituição do aterro (solo argilo arenoso). A zona de ausência de reflexão, logo abaixo do aterro, está relacionada, de acordo com as observações diretas realizadas por meio das trincheiras escavadas para implantação dos alvos dentro da área do SCGR, à uma argila de coloração cinza escura com presença de muita matéria orgânica (sedimentos da planície de inundação do Rio Pinheiros).

Comparando os dados obtidos com as antenas de 100 MHz não-blindada no modo passo-a-passo (NBPP) e não-blindada no modo contínuo (NBMC, **Figura 5.1**), observa-se um maior detalhamento dos refletores na seção NBMC (**Figura 5.1b**). Este fato relaciona-se à maior resolução horizontal desta última (no modo NBPP, foi utilizado um espaçamento entre os traços de 0,2 metro, ao passo que no modo NBMC foi de 0,05 metro). A seção GPR resultante da aquisição realizada com a antena blindada de 100 MHz, no modo contínuo (BCT, **Figura 5.1c**), mostra um melhor

detalhamento dos refletores, devido à irradiação da antena ser direcionada para o solo; no entanto, a profundidade foi menor do que nos resultados dados pelas antenas de 100 MHz.

Com as antenas de 200 MHz, em ambos os modos de aquisição NBPP e NBMC, foram possíveis identificar, nas seções de GPR (**Figura 5.2a e 5.2b**), os mesmos refletores observados com as antenas de 100 MHz. No entanto, com uma maior resolução vertical, devido ao menor comprimento de onda das antenas de 200 MHz.

Na **Figura 5.2c**, é mostrada a seção de GPR realizada com as antenas de 250MHz emprestadas pelo IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo). Nesta seção, a profundidade máxima conseguida foi de 1,5 metro, não conseguindo identificar o limite entre o aterro e os sedimentos argilosos da planície de inundação do rio Pinheiros. Mesmo assim, foi possível identificar os refletores superficiais, com maior resolução vertical. Todavia, o refletor contínuo que aparece no perfil, em torno de 0,5 metro, mostra o contraste entre o aterro mais aerado (a penetração das raízes da grama e de algumas árvores, assim como, análises tácteis visuais, indicam que há uma diferenciação de porosidade e coesão entre os grãos nesta camada) e o aterro mais compacto, conforme verificado nas trincheiras.

Na seção de GPR adquirida com as antenas blindadas de 500 MHz sobre a linha 17NS (**Figura 5.3a**), observa-se um refletor contínuo, com profundidade entre 0,5 metro e 0,8 metro, sendo interpretado como um contraste de porosidade do aterro, o que também verificou-se nos dados adquiridos com a antena de 250 MHz.

Com as antenas de 1000 MHz, foram executados somente oito perfis sobre parte da faixa de alvos arqueológicos. A **Figura 5.3b** mostra a seção GPR adquirida sobre a linha 1NS identificando os mesmos refletores que os verificados com as antenas de 500 MHz; embora se verifique pequenas variações na amplitude do sinal, causadas por variações granulométricas (sinais de alta amplitude indicam partes arenosas, e sinais fracos, partes argilosas do aterro). Vale ressaltar que as antenas de 1000 MHz são mais adequadas aos estudos feitos sobre estruturas de concreto ou asfalto. Neste caso, já era esperada uma baixa penetração, quando empregada sobre o solo da área do sítio controlado.

Em perfis extraídos do cubo 3D (**Figura 5.5**), elaborado a partir do conjunto de dados 2D (antenas não-blindadas de 100 MHz), é nítido o contato entre o aterro e os

sedimentos argilosos (**Figura 6.1**). No perfil 26-x, o aterro é marcado por refletores aproximadamente contínuos, horizontalizados ou com pouca inclinação. Já o contato entre os dois horizontes geoeletricos, mostra um mergulho na parte inicial do perfil (mergulho para o norte), e fica horizontal no final.

Nos perfis elaborados na direção y (leste-oeste), o aterro mantém uma espessura, aproximadamente, constante ao longo de cada perfil (**Figuras 6.1b, 6.1c e 6.1d**). No perfil L08-y, o aterro possui, aproximadamente, 1,8 metros de espessura; no perfil L20-y o aterro tem 2,8 metros, e no perfil L32-y, ele possui 3,0 metros. Estes resultados estão de acordo com as informações litológicas extraídas da descrição do aterro, durante a instalação dos alvos apresentadas no capítulo 2.

Figura 6.1 – Perfis extraídos do cubo GPR, Quase-3D (100 MHz, **Figura 5.5**) da área do SCGR do IAG/USP, mostram a interface entre aterro e solo argiloso. (a) L26-x. (b) L08-y. (c) L20-y. (d) L32-y.

A **Figura 6.2** mostra cortes, em profundidade, do cubo de dados GPR (envelope dos traços) da **Figura 5.5**. As profundidades de 0,5 metro, 1,0 metro, 1,5 metro e 3,5 metros foram escolhidas para comparação com os resultados dos métodos elétricos e eletromagnéticos indutivos (EM-38), a qual será discutida posteriormente. No envelope do traço, as áreas com maior amplitude (pretas) indicam alta refletividade, ao passo que as áreas claras indicam elevada absorção da onda eletromagnética. Na **Figura 6.2a** (corte a 0,5 metro), a maior parte do sinal está próxima à zona de sombra do pulso (local onde predominam os sinais das ondas: direta no ar e da direta no solo) de 100 MHz. Dessa maneira, ela não reflete as características reais do meio. Já nas **figuras 6.2b e 6.2c** (cortes em 1 metro e 1,5 metro, respectivamente), notam-se áreas de forte reflexão nas partes norte, sul e oeste. Nas mesmas figuras (**6.2b e 6.2c**), a parte centro-leste aparece como uma área de forte absorção de sinal.

No corte realizado, na profundidade de 3,5 metros (**Figura 6.2d**), é evidente a elevada absorção do sinal eletromagnético, provocada pelo solo argiloso da planície de inundação do rio Pinheiros.

De uma maneira geral, os dados de GPR do background, principalmente com as frequências de 100 MHz, 200 MHz e 250 MHz, possibilitaram identificar o limite entre o pacote de material antrópico (aterro) e o topo do paleossolo (solo argiloso da planície de inundação do rio Pinheiros), conforme evidenciado nas trincheiras. Além deste limite, alguns refletores podem ser correlacionados às variações sedimentológicas dentro do aterro, como o limite entre o material argilo-arenoso aerado e o material argiloso, evidenciado nas seções GPR adquiridas com a antena blindada de 500 MHz. O conhecimento da profundidade dos refletores (pela correlação com as trincheiras) possibilitou também definir uma velocidade média de, aproximadamente, 0,07 m/ns para o aterro, sendo esta uma velocidade característica de solos argilosos da Bacia Sedimentar de São Paulo (BORGES, 2002; PORSANI et al., 2004b).

Figura 6.2 – Cortes, em profundidade, do conjunto de dados GPR, Quase-3D (100 MHz) adquiridos, antes da implantação dos alvos no SCGR do IAG/USP (t = tempo; d =profundidade). Cortes nas profundidades de (a) 0,5 metro, (b) 1,02 metro, (c) 1,50 metro e (d) 3,51 metros. As partes mais escuras indicam áreas de alta refletividade e as claras de elevada absorção.

6.1.2 Eletrorresistividade

Sondagens Elétricas Verticais

Realizou-se a análise dos dados das investigações elétricas com base na interpretação quantitativa. Esta interpretação permite caracterizar os materiais de subsuperfície, determinando-se as espessuras e as resistividades das camadas. Foram adotados modelos de camadas horizontais para a interpretação dos dados, ajustando os dados de resistividade aparente, por meio do algoritmo de inversão 1D do programa RESIXIP (INTERPEX, 1997).

É importante ressaltar que os modelos de inversão 1D dos dados elétricos ajustados não são únicos. No entanto, para validar a interpretação dos resultados, todos os modelos de inversão, apresentados neste trabalho, foram elaborados com base em

dados geológicos das trincheiras, com o intuito de minimizar a ambigüidade na interpretação dos resultados.

O modelo geológico e geolétrico elaborado a partir das 11 SEVs realizadas, antes da implantação dos alvos na área do SCGR DO IAG/USP, é mostrado na **Figura 6.3**. O modelo é composto por 4 horizontes geolétricos distintos:

- O horizonte 1 possui resistividade elétrica mediana de 890 $\Omega\cdot\text{m}$ e cargabilidade de 9,5 mV/V. A espessura média é de 1,05 metro, sendo correlacionada com a parte mais aerada do aterro, composta por sedimentos argilo-arenosos, com presença de raízes e fragmentos de rochas.

Figura 6.3 – Modelo geológico-geolétrico elaborado a partir das SEVs executadas, na área do SCGR do IAG/USP, antes da implantação dos alvos.

- O segundo horizonte mostra uma espessura média de 1,30 metro, resistividade elétrica por volta de 550 $\Omega\cdot\text{m}$ e cargabilidade mediana de 8,55 mV/V. Esta camada reflete a parte do aterro com uma maior concentração de argila em sua composição e a ausência da perturbação biótica. O aterro torna-se mais compacto e de difícil escavação.
- A terceira camada geolétrica, com 1 metro de espessura, mostra um expressivo decaimento dos valores de resistividade (44 $\Omega\cdot\text{m}$) e de cargabilidade (0,1 mV/V). De acordo com Draskovits et al. (1990), os

baixos valores de resistividade e cargabilidade indicam solos argilosos (**Figura 6.4**). Deste modo, este horizonte relaciona-se com a camada de solo argiloso, com presença de muita matéria orgânica; além disso, esta característica argilosa foi observada nas trincheiras.

- A última camada investigada pelas SEVs, mostra uma resistividade elétrica mediana de $580 \Omega.m$ e cargabilidade de, aproximadamente, 7,7 mV/V. Apesar das trincheiras não terem ultrapassado 3 metros de profundidade, os poços perfurados, próximos à área do SCGR do IAG/USP (BORGES, 2002; PORSANI et al., 2004b), indicam a presença de uma argila siltosa com intercalações de areia fina abaixo do aterro. Deste modo, podemos sugerir que a quarta camada reflete um aumento no conteúdo de areia, nos sedimentos argilosos da planície de inundação do rio Pinheiros.

Figura 6.4 – Relação entre resistividade elétrica aparente, polarizabilidade aparente e litologia (modificado de DRASKOVITS et al., 1990).

Tomografia Elétrica 2D

Para verificar a correlação entre os dados de resistividade elétrica e cargabilidade, obtidos por meio da tomografia elétrica 2D, com os dados geológicos resultantes da escavação de trincheiras, elaborou-se uma figura de correlação entre as seções executadas sobre as linhas onde estão os alvos no SCGR do IAG/USP.

Nesta correlação (**Figura 6.5**), pode-se observar que a profundidade máxima alcançada pelos dados, após a inversão, foi de 2,2 metros (EDWARDS, 1977), correspondendo a um fator de investigação de profundidade equivalente a $0,244L$ (L = distância entre os eletrodos externos do arranjo). Nos modelos 2D, observa-se que há

um aumento nos valores de resistividade na parte superior, indicando uma camada resistiva. Esta camada resistiva mergulha suavemente na direção norte, ou seja, ela apresenta um espessamento de sul para norte. Utilizando o limite de resistividade de 250 $\Omega.m$ para camadas argilo-arenosas (TELFORD et al., 1990), pode-se determinar, graças ao modelo geolétrico conseguido, que a camada de aterro possui uma espessura, variando entre 1,2 metro a 2,0 metros, corroborando com os dados geológicos obtidos pela escavação das trincheiras na área.

Além disso, nos modelos geolétricos das linhas 36NS, 42NS e 49NS (**Figura 6.5**), é evidente uma zona condutiva anômala (resistividade elétrica entre 50 $\Omega.m$ e 250 $\Omega.m$) entre as distâncias de 8 metros e 16 metros. Esta zona condutiva é interpretada como um aumento na concentração de argila nos sedimentos que compõem o aterro.

As seções de cargabilidade realizadas sobre as linhas, onde estão implantados os alvos dentro do SCGR do IAG/USP, foram dispostas em conjunto, possibilitando uma melhor correlação entre elas. Nesta correlação (**Figura 6.6**), observa-se que os maiores valores de cargabilidade (> 10 mV/V) indicam materiais mais argilo-arenosos presentes na área; e os menores valores indicam materiais mais argilosos. Conforme aumenta o conteúdo de argila no solo, os valores de cargabilidade tendem a diminuir. Esta queda é provocada, principalmente, pelo efeito da polarização de membrana (SUMNER, 1976).

Investigações Elétricas Quase-3D

As figuras correspondentes às investigações elétricas Quase-3D já foram apresentadas no Capítulo 5. A **Figura 5.18** mostra o resultado da inversão 3D das 52 linhas de tomografia elétrica, realizadas na área do SCGR. Os resultados mostram uma zona mais condutiva (resistividade elétrica entre 50 $\Omega.m$ e 250 $\Omega.m$) na parte leste da área até a profundidade de 1,22 metro (**figuras 5.18a, 5.18b e 5.18c**), sendo interpretada como uma área mais condutiva dentro do aterro.

Os valores de resistividade elétrica, inferiores a 250 $\Omega.m$, são relacionados aos sedimentos argilosos da planície de inundação do Rio Pinheiros (paleossolo). Deste modo, a partir do quinto nível de investigação (1,75 metro de profundidade, **Figura 5.18e**) ocorrem estes sedimentos. Fato confirmado durante a perfuração das trincheiras para a implantação dos alvos.

Além da distinção entre o aterro e o paleossolo, duas zonas mais resistivas são observadas na área, a partir de 1,75 metro (**figuras 5.18d e 5.18e**). Um delas a nordeste e outra a sudoeste; a primeira relaciona-se ao aterro, e a segunda a um paleossolo mais arenoso ou mais compacto.

O modelo 3D dos dados de cargabilidade mostra, nos quatro primeiros níveis de investigação (**figuras 5.19a, 5.19b, 5.19c e 5.19d**), um comportamento semelhante aos de resistividade. Elevados valores de cargabilidade (> 8 mV/V) na parte oeste da área e valores menores ($< 5,0$ mV/V) na parte leste. Tal comportamento, sugere um aumento na quantidade de argila para a parte superior do aterro em direção a leste. Os demais cortes em profundidade no modelo geológico (**figuras 5.19e e 5.19f**) possuem valores de cargabilidade, predominantemente, inferiores a 4 mV/V, indicando a presença do solo argiloso da planície de inundação do rio Pinheiros.

Figura 6.5 – Seções de resistividade elétrica das linhas onde foram implantados os alvos dentro da área do SCGR do IAG/USP. Os maiores valores de resistividade indicam o aterro presente na área e os menores valores ($< 250 \Omega.m$) definem os sedimentos argilosos da planície de inundação do rio Pinheiros.

Figura 6.6 – Seções de cargabilidade das linhas onde foram implantados os alvos dentro da área do SCGR do IAG/USP. Os valores elevados indicam materiais mais argilo-arenosos e os menores valores indicam materiais mais argilosos. Observa-se também que na parte leste da área os valores de cargabilidade são menores, indicando a maior concentração de argila nesta região.

6.1.3 Eletromagnético Indutivo

As aquisições de dados, com o sistema EM-38, permitiram investigar o comportamento da condutividade elétrica aparente (σ_a) e da susceptibilidade magnética do meio, até a profundidade máxima de 1,5 metro.

As **figuras 6.7a** e **6.7b** mostram os mapas de σ_a obtidos nas profundidades de 0,75 metro (DMH) e 1,5 metro (DMV). O valor-médio de condutividade, em cada mapa, é respectivamente, 1,5 mS/m (DMH) e 4 mS/m (DMV). Na **Figura 6.7b**, são identificadas seis anomalias pontuais e uma região anômala. Somente três destas anomalias de condutividade se repetem na **Figura 6.7a**.

A zona anômala AA mostra valores acima de 6 mS/m (uma resistividade de aproximadamente 166 Ω .m), ocorre na parte leste da área e aumenta de tamanho com a profundidade. A região anômala AA é interpretada com um solo mais argiloso comumente encontrado na área (BORGES, 2002; PORSANI et al, 2004b).

As anomalias condutivas V1, V2, V3 e V4 possuem as maiores amplitudes (10 mS/m) e ocorrem nos vértices do SCGR do IAG/USP. Estas anomalias são relacionadas aos marcos de concreto que delimitam os vértices da área. Sobre os marcos de concreto, esperavam-se valores baixos de condutividade elétrica, entretanto, dentro dos marcos existem quatro barras metálicas. Deste modo, o ferro foi o responsável pelo aumento da condutividade nestes pontos.

A anomalia BB mostra valor positivo (9 mS/m) de condutividade elétrica na **Figura 6.7a** e negativo (-2 mS/m) na **Figura 6.7b**. Esta anomalia é também bastante evidente (3×10^{-3} SI) no mapa de susceptibilidade magnética (**Figura 6.7c**). De acordo com os registros obtidos durante as escavações, inúmeros blocos de rochas ígneas e metamórficas, com intensa laterização, foram encontrados. Deste modo, esta anomalia é interpretada como um bloco de rocha ou um objeto metálico enterrado no aterro. A anomalia pontual CC possui as mesmas características da anomalia BB, também sendo interpretada como um bloco de rocha presente no aterro. Como o SCGR do IAG/USP foi instalado em uma área de aterro, era de se esperar pedaços de blocos de concreto e fragmentos de rochas alteradas misturadas ao solo (**Figura 2.16**).

Além da anomalia BB que apresenta um valor alto de susceptibilidade magnética, não há outras anomalias representativas na área do SCGR. Os valores médios de susceptibilidade magnética, obtidos no modo dipolo magnético vertical, na área do SCGR (**Figura 6.7c**), foram de $1,2 \times 10^{-3}$ SI a $1,5 \times 10^{-3}$ SI, que representam valores típicos para solos argilosos (TELFORD, 1990).

Figura 6.7 – Mapas de condutividade elétrica aparente no modo DMH (a) e DMV (b), e mapa de susceptibilidade magnética no modo DMV, obtidos na área do SCGR do IAG/USP, antes da instalação dos alvos. Os círculos indicam áreas anômalas.

6.2 DEPOIS DA INSTALAÇÃO DOS ALVOS NA ÁREA DO SCGR

6.2.1 Ground Penetrating Radar

Dados 2D

A **Figura 6.8** mostra seções GPR adquiridas sobre a Linha 1 (Arqueologia) utilizando-se antenas blindadas dos equipamentos RAMAC I (100 MHz, 250 MHz e 500 MHz) e SIR3000 (200 MHz e 400 MHz), com suas respectivas anomalias identificadas.

A anomalia Arq1, identificada em todas as seções, representa uma caixa de areia. Os refletores possuem alta amplitude e mostram-se horizontalizados. De acordo com os dados de topografia, a espessura do pacote de areia não ultrapassa 0,98 metro. O topo e base desta camada de areia são bem identificados em todas as seções, principalmente, nas de alta frequência (400 MHz e 500 MHz). Além dos refletores que indicam o topo e a base da caixa de areia, são evidenciados refletores abaixo da caixa, nas seções de baixa frequência (100 MHz, 200 MHz e 250 MHz, **figuras 6.8a, 6.8b e 6.8c**), que representam reflexões múltiplas (reverberação da onda eletromagnética na interface areia e solo argiloso do aterro). Yu Fen (2006) mostra resultados de simulações numéricas GPR2D para os alvos arqueológicos da Linha 1 do SCGR do IAG/USP, evidenciando a reverberação da onda eletromagnética nas caixas de areia e de brita.

A caixa de brita (Arq2, **Figura 6.8**) mostra um padrão de reflexão semelhante à caixa de areia. Novamente, o topo e a base da caixa de brita são bem evidentes em todas as seções GPR, resultado do forte contraste da impedância elétrica (aterro x brita). Conforme já descrito, a reverberação da onda eletromagnética acontece na interface do solo argiloso com a brita, provocando reverberações múltiplas.

O muro de tijolos (Arq3) somente é notado com nitidez na seção GPR obtida com a antena de 500 MHz (fortes refletores paralelos na posição X entre 8,8 metros e 10,8 metros – **Figura 6.8e**). A difícil identificação deste alvo nos perfis é causada pelo pouco contraste elétrico entre o solo e os tijolos.

A anomalia Arq4, que representa uma cava com solo revirado, se comporta como uma zona de ausência de reflexão (**Figura 6.8**), sendo bem marcada nas seções GPR de alta frequência (250 MHz, 400 MHz e 500 MHz). Esta ausência de reflexão ocorre porque o solo é, aproximadamente, homogêneo em sua constituição física, ou seja, não há contraste suficiente para provocar uma reflexão representativa da onda eletromagnética.

As anomalias Arq5 e Arq6 são resultantes de vasos cerâmicos enterrados nas profundidades de 0,48 metro e 0,98 metro, respectivamente. Comportam-se como anomalias hiperbólicas (comum para objetos pontuais, YILMAZ, 1987) em todas as seções (**Figura 6.8**).

A camada de sílex (anomalia Arq7, **Figura 6.8**), identificada somente com as antenas de 400 MHz e 500 MHz, mostra uma forte reflexão nas seções GPR. Este forte contraste é provocado pela variação abrupta de propriedades físicas (porosidade, condutividade elétrica e constante dielétrica) entre o solo e os seixos.

Como era esperado, o tubo metálico guia ocorre como uma pequena anomalia hiperbólica em todos os perfis na posição de 15 metros e na profundidade de 0,5 metro (**Figura 6.8**).

Conforme verificado na linha de alvos arqueológicos, nas seções GPR, obtidas com as antenas de baixa frequência (100 MHz e 200 MHz), somente as caixas de areia e de brita, o tubo metálico guia e os potes cerâmicos provocam reflexões representativas. Já os resultados GPR, obtidos com as antenas de alta frequência, permitiram identificar todos os alvos arqueológicos e o tubo guia. Esse resultado confirma a melhor aplicabilidade de antenas de alta frequência em investigações arqueológicas (CONYERS; GOODMAN, 1997).

O **Quadro 6.1** mostra os tempos de trânsito identificados para cada alvo da Linha 1, com diferentes frequências. Este quadro mostra que em cada seção GPR, adquirida com antenas de frequências distintas, o tempo de trânsito dos refletores muda. Este fato relaciona-se com a resolução temporal de cada frequência da antena. Quanto maior a frequência de operação, menor será o comprimento de onda irradiado e melhor será a identificação do objeto em profundidade. Analisando-se o **Quadro 6.1**, nota-se que não há relação linear entre a frequência e o tempo de cada refletor. Isso ocorre porque as seções GPR não foram adquiridas no mesmo período do ano, ou seja,

algumas seções foram adquiridas durante o período de chuvas e outras, durante o período de estiagem, o que influenciou nas propriedades físicas do meio.

Além da variação das propriedades físicas do solo devido à umidade, foram utilizados dois tipos de equipamentos (RAMAC I e SIR3000), com diferentes potências de transmissão. Deste modo, não se realizou uma análise da estimativa do erro no cálculo da profundidade dos alvos.

Quadro 6.1 – Profundidade real e tempo de trânsito de cada alvo presente nas seções GPR da Linha 1 (Arqueologia) do SCGR do IAG/USP.

Descrição	Profundidade (m)	Tempo de trânsito (ns) para cada frequência de antena				
		100	200	250	400	500
Arq1 (caixa de areia)	0,53	12,16	18,10	16,59	14,18	15,91
Arq2 (caixa de brita)	0,51	11,57	17,18	16,21	13,67	14,10
Arq3 (muro de tijolos)	0,48	NI	NI	NI	NI	15,29
Arq4 (solo revirado)	0	NI	NI	0	0	0
Tg (tubo guia)	0,5	13,69	13,90	11,31	10,24	13,02
Arq5 (vaso cerâmico)	0,48	18,43	18,83	15,46	15,05	15,19
Arq6 (vaso cerâmico)	0,98	30,59	31,44	29,04	28,45	28,57
Arq7 (camada de sílex)	0,63	NI	NI	20,36	17,77	19,89

NI = Não Identificado.

A **Figura 6.9** mostra perfis GPR da Linha 2 (Tubulação hidráulica), para as antenas de 100 MHz, 200 MHz, 250 MHz e 500 MHz, e os alvos identificados. Os canos de 136 mm de diâmetro aparecem como fracas reflexões hiperbólicas, devido ao baixo contraste nas propriedades físicas dos materiais (solo e tubo de PAD). O tubo metálico guia (posição de 15 metros) aparece com um forte refletor hiperbólico em todas as seções GPR da Linha 2.

As antenas de 200 MHz e 250 MHz mostraram os melhores resultados na identificação de canos de PAD enterrados na área do SCGR do IAG/USP (**figuras 6.9b e 6.9c**), conseguindo imagear os dutos até a profundidade máxima de 2 metros.

Lima (2006) mostra que, com o aumento do empilhamento de traços e da amostragem espacial (menor espaçamento entre os traços), há uma melhoria no imageamento dos canos de PAD enterrados na área do SCGR do IAG/USP. O mesmo autor mostra, por meio de simulações numéricas de dados de GPR, que somente os canos de PAD, enterrados até a profundidade máxima de 1,5 metro, mostram boas respostas nas seções GPR, e que os tubos preenchidos com água mostram inversão de

polaridade do pulso eletromagnético (mudança de um meio de alta velocidade – solo, para um meio de baixa velocidade – água).

Os resultados obtidos nas seções GPR mostram este fenômeno. Entretanto, não é perceptível, devido à escala de cores utilizada (*grayscale*). Para melhor visualização, foi elaborada a **Figura 6.10** na escala *red-white-blue*. Nessa figura, criada a partir das seções GPR adquiridas com as frequências de 200 MHz (**figuras 6.10a, 6.10b e 6.10c**) e 250 MHz (**figuras 6.10d, 6.10e e 6.10f**), os canos de PAD, preenchidos totalmente e parcialmente com água, mostram inversão de polaridade, ao passo que o cano de PAD vazio mostra polaridade normal.

O **Quadro 6.2** mostra os principais refletores hiperbólicos identificados na **Figura 6.10**, bem como, o tempo em que ocorrem.

Quadro 6.2 – Profundidade real e tempo de trânsito de cada alvo presente nas seções GPR da Linha 2 (Tubulação hidráulica) do SCGR do IAG/USP.

Descrição	Profundidade (m)	Tempo de trânsito (ns) para cada frequência de antena			
		100	200	250	500
Cn1 (Cano * preenchido com água)	0,52	16,8	20,5	20,8	20,4
Cn2 (Cano * preenchido com água)	0,98	NI	37,0	34,0	NI
Cn3 (Cano * preenchido com água)	1,50	44,9	48,0	46,7	NI
Cn4 (Cano * preenchido com água)	1,97	NI	58,5	NI	NI
Cn5 (Cano * parcialmente preenchido com água)	2,00	NI	NI	NI	NI
Tg (tubo guia)	0,50	13,3	13,4	12,5	12,7
Cn6 (Cano * parcialmente preenchido com água)	1,50	NI	NI	NI	NI
Cn7 (Cano * parcialmente preenchido com água)	0,99	33,5	32,0	28,5	NI
Cn8 (Cano * parcialmente preenchido com água)	0,50	15,4	19,3	16,3	19,6
Cn9 (Cano * vazio)	0,48	16,2	19,3	16,6	16,5
Cn10 (Cano * vazio)	0,97	NI	37,4	30,5	NI
Cn11 (Cano * vazio)	1,49	47,4	53,4	46,9	NI
Cn12 (Cano * vazio)	1,99	NI	72,8	NI	NI

* Cano de PAD com 136 mm de diâmetro. NI = Não Identificado.

A **Figura 6.11** mostra as seções de GPR realizadas sobre a Linha 3, onde estão enterradas manilhas de concreto. Devido ao tamanho e ao contraste entre propriedades elétricas entre o meio e os alvos, identificou-se a maioria das manilhas, com exceção de duas manilhas de concreto, que foram enterradas em torno de dois metros de profundidade. As hipérboles maiores (anomalias Mn1, Mn2 e Mn3) representam as manilhas grandes (0,7 metro de diâmetro externo), as hipérboles de menor dimensão (Mn9, Mn10 e Mn11) representam as manilhas menores (0,26 metro de diâmetro externo) e as hipérboles de tamanho intermediário (Mn4, Mn5 e Mn6) são provenientes das manilhas de 0,48 metro de diâmetro externo.

Figura 6.8 – Seções GPR da Linha 1 (arqueologia) do SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. (a) 100 MHz, blindada, RAMAC; (b) 200 MHz blindada, SIR3000; (c) 250 MHz blindada, RAMAC; (d) 400 MHz blindada, SIR 3000; e (e) 500 MHz blindada, RAMAC.

Lima (2006) conseguiu identificar todas as manilhas de concreto instaladas no SCGR do IAG/USP, usando o arranjo de antenas transversal elétrico (antenas transmissora e receptora paralelas ao sentido do perfil).

Em todas as seções, aparecem dois refletores hiperbólicos (anomalias In1 e In2, **Figura 6.11**) que não representam manilhas (posições 23 metros e 25,5 metros a 40 centímetros de profundidade). Estas anomalias foram provocadas pelo aumento na porosidade do solo. Constatou-se tal fato com a perfuração de furos a trado, e verificou-se que pequenas cavidades surgiram neste local, após a implantação dos alvos no SCGR, causados pela má compactação do solo.

O **Quadro 6.3** foi elaborado para comparação dos tempos de trânsito, da onda eletromagnética, obtidos nas seções GPR com frequências distintas.

Quadro 6.3 – Profundidade real e tempo de trânsito de cada alvo presente nas seções GPR da Linha 3 (Manilhas de concreto) do SCGR do IAG/USP.

Descrição	Profundidade (m)	Tempo de trânsito (ns) para cada frequência de antena				
		100	200	250	400	500
Mn1 (manilha com 0,7 m de Ø externo – horizontal)	0,75	20,3	22,9	24,1	22,1	20,3
Mn2 (manilha com 0,7 m de Ø externo – horizontal)	1,62	46,7	46,0	51,8	36	
Mn3 (manilha com 0,7 m de Ø externo – vertical)	0,93	23,8	25,3	29,9	25,2	27,8
Mn4 (manilha com 0,48 m de Ø externo – horizontal)	0,45	13,7	11,4	12,6	11,2	14,7
Tg (tubo guia)	0,50	14,2	13,2	14,9	12,5	15,9
Mn5 (manilha com 0,48 m de Ø externo – horizontal)	1,03	32,2	31,4	32,0	32,4	NI
Mn6 (manilha com 0,48 m de Ø externo – horizontal)	1,48	48,7	48,5	55	NI	NI
Mn7 (manilha com 0,48 m de Ø externo – horizontal)	1,95	NI	NI	NI	NI	NI
Mn8 (manilha com 0,26 m de Ø externo – horizontal)	1,98	NI	NI	NI	NI	NI
Mn9 (manilha com 0,26 m de Ø externo – horizontal)	1,43	48,3	44,3	45,2	NI	NI
Mn10 (manilha com 0,26 m de Ø externo – horizontal)	0,97	32,8	27,6	27,5	30,5	32,0
Mn11 (manilha com 0,26 m de Ø externo – horizontal)	0,47	12,8	12,1	13,8	11,9	15,6

NI = Não Identificado. Ø = diâmetro.

Figura 6.9 – Seções GPR da Linha 2 (Tubulação hidráulica) do SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. (a) 100 MHz, blindada, RAMAC; (b) 200 MHz blindada, SIR3000; (c) 250 MHz blindada, RAMAC; e (d) 500 MHz blindada, RAMAC.

Figura 6.10 – Parte das seções GPR, obtidas sobre um cano de PAD enterrado na profundidade de 0,5 metro, expondo uma inversão de polaridade, do pulso eletromagnético, sobre os canos com água e uma polaridade normal sobre o cano vazio. Seções adquiridas com as frequências de 200 MHz (a, b, c) e 250 MHz (d, e, f).

A **Figura 6.12** mostra seções GPR adquiridas sobre a Linha 4 (Tambores de Aço), utilizando-se antenas blindadas dos equipamentos RAMAC I (100 MHz, 250 MHz e 500 MHz) e SIR3000 (200 MHz e 400 MHz), com suas respectivas anomalias identificadas. Devido ao elevado coeficiente de reflexão entre o solo e os tambores de aço, todos os alvos desta linha são identificados, com nitidez, com as antenas de baixa frequência (100 MHz, 200 MHz e 250 MHz). Os refletores hiperbólicos representam os tambores metálicos, de 200 litros, enterrados no solo. As hipérboles mais abertas representam tambores dispostos, individualmente (anomalias Tb1, Tb2 e Tb3) e em pares (anomalia Tb4/Tb5), nas posições horizontais (anomalias Tb1, Tb2, Tb3 e Tb4/Tb5) e verticais (anomalias Tb6 e Tb7), e a hipérbole menor representa o tubo metálico (posição 15 metros, anomalia Tg).

Figura 6.11 – Seções GPR da Linha 3 (manilhas de concreto) do SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. (a) 100 MHz, blindada, RAMAC; (b) 200 MHz blindada, SIR3000; (c) 250 MHz blindada, RAMAC; (d) 400 MHz blindada, SIR 3000; e (e) 500 MHz blindada, RAMAC.

Nestas seções, pode-se perceber a diferença marcada entre resolução e frequência da antena. Na **Figura 6.12a** (seção adquirida com a antena de 100 MHz), todos os refletores se comportam como eventos hiperbólicos (tambores horizontais e os verticais) e o par de tambores, localizado na posição de 19 metros a 21 metros, não é facilmente distinguido. Entretanto, na seção adquirida com a antena de 250 MHz (**Figura 6.12c**), o par de tambores é mais facilmente identificado, e também se podem distinguir os tambores metálicos dispostos na horizontal (hipérboles), dos dispostos na vertical (refletores retilíneos com difrações nos cantos oriundos do topo do tambor).

Rodrigues (2004), por meio de simulações numéricas de dados GPR2D, mostra que o alto contraste elétrico, entre os tambores metálicos e o solo da área do SCGR do IAG/USP, possibilita a identificação de todos os tambores de aço instalados na Linha 4, coincidindo com os resultados obtidos neste trabalho. Os tempos de trânsito identificados, para cada alvo da Linha 4, com diferentes frequências são mostrados no **Quadro 6.4**.

Quadro 6.4 – Profundidade real e tempo de trânsito de cada alvo presente nas seções GPR da Linha 4 (Tambores de Aço) do SCGR do IAG/USP.

Descrição	Profundidade (m)	Tempo de trânsito (ns) para cada frequência de antena				
		100	200	250	400	500
Tb1 (tambor de aço de 200 litros, na horizontal)	1,97	58,4	53,2	55,7	NI	NI
Tb2 (tambor de aço de 200 litros, na horizontal)	0,50	18,3	16,5	16,8	16,4	14,3
Tb3 (tambor de aço de 200 litros, na horizontal)	0,98	33,1	31,4	31,8	31,8	32,2
Tg (tubo guia)	0,50	16,4	15,1	15,0	15,5	12,5
Tb4 (tambor de aço de 200 litros, na horizontal)	0,90	28,4	28,0	28,0	29,8	25,7
Tb5 (tambor de aço de 200 litros, na horizontal)	0,97	30,0	29,8	29,1	30,7	26,4
Tb6 (tambor de aço de 200 litros, na vertical)	1,00	29,8	28,6	29,3	28,8	27,1
Tb7 (tambor de aço de 200 litros, na vertical)	1,98	60,6	57,3	57,9	NI	NI

NI = Não Identificado.

Figura 6.12 – Seções GPR da Linha 4 (tambores metálicos) do SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. (a) 100 MHz, blindada, RAMAC; (b) 200 MHz blindada, SIR3000; (c) 250 MHz blindada, RAMAC; (d) 400 MHz blindada, SIR 3000; e (e) 500 MHz blindada, RAMAC.

Os tambores plásticos da Linha 5 também foram identificados com as antenas blindadas de 100 MHz, 200 MHz, 250 MHz, 400 MHz e 500 MHz (**Figura 6.13**). Todos os topos dos tambores plásticos foram detectados; com maior dificuldade, os preenchidos com água doce (Anomalias Tp2, Tp6 e Tp8). Nestes últimos, a onda eletromagnética permite localizar a base dos tambores (Anomalias Bt2, Bt6 e Bt8, **Figura 6.13**), ou seja, a onda percorre seu interior com uma velocidade menor que a do meio (velocidade da água $\approx 0,03$ m/ns) e aparece em um tempo maior que o esperado. Além disso, quando a onda eletromagnética passa, de um meio de alta velocidade (solo), para um meio de baixa velocidade (água), a polaridade do sinal do GPR é invertida. Esta discussão pode ser encontrada em detalhe em Rodrigues (2004) e Rodrigues e Porsani (2006).

A onda eletromagnética não consegue propagar-se dentro dos tambores de plástico preenchidos com água salgada (Anomalias Tp4, Tp5 e Tp10, **Figura 6.13**), devido à elevada condutividade elétrica da água de $1000 \text{ mS/m}^{6.2}$. Nos tambores parcialmente preenchidos com água salgada (Anomalias Tp3 e Tp9, **Figura 6.13**), as reflexões de suas bases não são notadas, porque a velocidade da onda EM no ar é tão alta ($0,3 \text{ m/ns}$), que o tempo de reflexão é muito pequeno e os refletores do topo e base do tambor se superpõem.

O **Quadro 6.5** lista os tempos de trânsito da onda eletromagnética, para cada alvo da Linha 5, obtidos em diferentes frequências.

Quadro 6.5 – Profundidade real e tempo de trânsito de cada alvo presente nas seções GPR da Linha 5 (Tambores de plástico) do SCGR do IAG/USP.

Descrição	Profundidade (m)	Tempo de trânsito (ns) para cada frequência de antena				
		100	200	250	400	500
Tb1 (tambor de plástico de 100 litros vazio)	0,95	33,5	28,5	31,1	28,5	27,7
Tb2 (tambor de plástico de 100 litros cheio de água doce)	0,98	NI	31,9	32,9	NI	NI
Tb3 (tambor de plástico de 100 litros parcialmente preenchido com água salgada)	0,46	18,6	17,7	17,0	14,3	13,4
Tb4 (tambor de plástico de 100 litros cheio de água salgada)	0,48	21,6	19,5	18,6	17,2	15,0
Tb5 (tambor de plástico de 100 litros cheio de água salgada)	1,49	52,7	51,3	51,2	NI	NI
Tg (tubo guia)	0,5	16,1	14,9	14,8	15,1	14,2
Tb6 (tambor de plástico de 100 litros cheio de água doce)	1,48	NI	48,0	NI	NI	NI
Tb7 (tambor de plástico de 100 litros vazio)	0,48	20,8	19,4	19,6	16,4	16,3
Tb8 (tambor de plástico de 100 litros cheio de água doce)	0,51	21,2	17,0	18,5	16,1	14,3
Tb9 (tambor de plástico de 100 litros parcialmente preenchido com água salgada)	0,51	20,1	19,3	18,3	15,9	15,4
Tb10 (tambor de plástico de 100 litros cheio de água salgada)	0,51	19,2	18,9	18,5	15,4	13,7

NI = Não Identificado.

^{6.2} As amostras de água salgada foram analisadas no Laboratório de Salinidade do Instituto Oceanográfico da USP (PORSANI, 2004).

Figura 6.13 – Seções GPR da Linha 5 (tambores de plástico) do SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. (a) 100 MHz, blindada, RAMAC; (b) 200 MHz blindada, SIR3000; (c) 250 MHz blindada, RAMAC; (d) 400 MHz blindada, SIR 3000; e (e) 500 MHz blindada, RAMAC.

A **Figura 6.14** mostra seções GPR adquiridas sobre a Linha 6 (Tubos de Aço), utilizando-se de antenas blindadas dos equipamentos RAMAC I (100 MHz, 250 MHz e 500 MHz) e SIR3000 (200 MHz e 400 MHz), com suas respectivas anomalias identificadas. Devido a composição dos alvos (aço), esperavam-se fortes refletores; entretanto, os alvos foram caracterizados por fracos refletores. Provavelmente, este fato ocorreu devido a linha estar localizada na região onde o solo argiloso é bastante condutivo (ver **Figura 5.20**), favorecendo, assim, a atenuação do sinal GPR. Deste modo, tubo enterrado abaixo de 1,5 metro (Ta3) não é identificado em nenhuma das seções GPR. Além deste alvo, o tubo disposto na vertical (Ta8) e o tubo inclinado (Ta2) não foram identificados nas seções GPR. Esse fato pode estar relacionado ao posicionamento dos perfis GPR, com relação a localização dos tubos, ou seja, os perfis não foram realizados sobre estes alvos.

Nas seções GPR (**Figura 6.14**) os tubos são distinguidos pelo formato da anomalia: refletores hiperbólicos correlacionam-se a tubos enterrados na direção E-W (Ta1 e Ta2), e refletores horizontais relacionados aos tubos N-S (Ta4, Ta5 e Ta6). O refletor hiperbólico (anomalia Ta7), situado na posição de 23 metros, nas seções GPR de 250 MHz, 400 MHz e 500 MHz (**figuras 5.14c, 5.14d e 5.14e**, respectivamente), aparece como uma anomalia de alta amplitude, representando somente o topo do tubo vertical.

Os tempos de trânsito e as profundidades reais dos alvos instalados na linha de tubos de aço do SCGR do IAG/USP, encontram-se no **Quadro 6.6**.

Quadro 6.6 – Profundidade real e tempo de trânsito de cada alvo, presentes, nas seções GPR da Linha 6 (Tubos de aço) do SCGR do IAG/USP.

Descrição	Profundidade (m)	Tempo de trânsito (ns) para cada frequência de antena				
		100	200	250	400	500
Ta1 (tubo de aço de 2", paralelo N-S, horizontal)	0,45	21,4	18,6	15,8	15,2	15,6
Ta2 (tubo de aço de 2", paralelo N-S, horizontal)	1,00	38,1	28,5	27,6	31,1	30,3
Ta3 (tubo de aço de 2", paralelo E-W, horizontal)	1,97	NI	NI	NI	NI	NI
Ta4 (tubo de aço de 2", paralelo E-W, horizontal)	1,46	50,5	NI	47,4	NI	NI
Tg (tubo guia)	0,50	16,1	16,0	15,0	15,6	15,1
Ta5 (tubo de aço de 2", paralelo E-W, horizontal)	0,99	35,5	33,6	33,3	33,9	NI
Ta6 (tubo de aço de 2", paralelo E-W, horizontal)	0,48	18,3	14,8	16,1	14,6	16,8
Ta7 (tubo de aço de 2", vertical)	0,47	NI	NI	17,2	13,1	13,4
Ta8 (tubo de aço de 2", vertical)	0,99	NI	NI	NI	NI	NI
Ta2 (tubo de aço de 2", paralelo N-S, inclinado)	1,15 a 2,02	NI	NI	NI	NI	NI

NI = Não Identificado.

As seções de GPR adquiridas, com antenas blindadas de 100 MHz, 200 MHz, 250 MHz e 500 MHz, sobre a Linha 7 (Tubos da Sabesp, Eletropaulo e Telecomunicações) mostram que os tubos metálicos de 8” (oito polegadas) de diâmetro, até a profundidade de 1,5 metro (anomalias Dt1, Dt2 e Dt3), o conduíte de PVC com 1,5” (uma polegada e meia), os cabos elétricos de alta tensão (não energizados, anomalias Dt8, Dt9 e Dt10) e os conduítes para passagem de fibra ótica (anomalias Dt11, Dt12, Dt13, Dt14 e Dt15) foram identificados com clareza através de refletores hiperbólicos (**Figura 6.15**).

As caixas de concreto, com os dutos envelopados, não são identificadas em nenhuma seção GPR. Este fato deve-se aos seguintes fatores: pequeno contraste de propriedades elétricas entre o solo e o concreto (coeficiente de reflexão de $\approx 0,2$) e a elevada atenuação da onda EM, provocada pela alta condutividade elétrica (acima de 10 mS/m) do solo na região onde foi instalada a Linha 7.

Os conduítes de PVC são caracterizados por fracos refletores hiperbólicos identificados nas seções GPR, obtidas com as antenas de 200 MHz, 250 MHz e 500 MHz. O **Quadro 6.7** apresenta os tempos de trânsito da onda eletromagnética, para cada alvo da Linha 7, conseguidos em diferentes frequências.

Quadro 6.7 – Profundidade real e tempo de trânsito de cada alvo presente nas seções GPR da Linha 7 (Cabos Elétricos, Hidráulicos e Conduítes de plástico e de PVC para passagem de cabos de Fibra Ótica) do SCGR do IAG/USP.

Descrição	Profundidade (m)	Tempo de trânsito (ns) para cada frequência de antena			
		100	200	250	500
Dt1 (Tubo de aço, Ø de 8”)	0,50	16,3	18,6	15,5	16,0
Dt2 (Tubo de aço, Ø de 8”)	1,02	30,4	34,7	30,9	29,8
Dt3 (Tubo de aço, Ø de 8”)	1,48	44,1	46,4	42,8	NI
Dt4 (Tubo de aço, Ø de 8”)	1,96	NI	NI	NI	NI
Dt5 (Caixa de concreto com dutos envelopados)	1,50	NI	NI	NI	NI
Tg (tubo guia)	0,50	16,6	20,8	16,6	15,6
Dt6 (Caixa de concreto com dutos envelopados)	1,00	NI	NI	NI	NI
Dt7 (Conduíte de PVC, Ø de 1,5”)	0,48	14,6	17,1	13,3	14,3
Dt8 (Cabo elétrico – 3 x 10 mm ²)	0,46	13,9	17,5	13,9	13,8
Dt9 (Cabo elétrico – 4 x 35 mm ²)	0,51	15,7	19,0	15,0	13,7
Dt10 (Cabo elétrico – 4 x 120 mm ²)	0,51	14,8	18,2	14,8	14,9
Dt11 (Duto de PVC, Ø de 4”)	0,48	NI	19,5	15,5	15,7
Dt12 (Dutos de PVC, Ø de 1”)	0,51	NI	18,6	15,0	NI
Dt13 (Conduíte rugoso de PAD, Ø de 4”)	0,46	NI	17,3	13,7	13,8
Dt14 (4 Dutos, Ø de ¾”)	0,50	NI	17,2	NI	NI
Dt15 (Conduíte rugoso de PAD, Ø de 2”)	0,48	NI	17,1	NI	NI

NI = Não Identificado.

Os resultados GPR 2D, obtidos na área do SCGR do IAG/USP, mostraram que o método GPR é bastante viável para a detecção de interfaces geológicas e materiais artificiais enterrados no meio, podendo localizar objetos de metal, de plástico e de concreto. As antenas blindadas, com frequência central de 100 MHz, 200 MHz e 250 MHz, conseguiram imagear a maioria dos alvos enterrados na área do SCGR do IAG/USP, até a profundidade máxima de 2 metros; entretanto, os alvos de pequenas dimensões e de baixo contraste dielétrico (coeficiente de reflexão menor do que 20%, ANNAN, 1992), enterrados abaixo de 1,5 metro de profundidade, não são perceptíveis pelo GPR.

Seções GPR, obtidas com antenas blindadas de frequência central de 400 MHz e 500 MHz, mostram uma ótima resolução, permitindo individualizar objetos próximos (par de tambores enterrados a 1 metro de profundidade), bem como, identificar topo e base de alvos pequenos. Contudo, o sinal do GPR é rapidamente atenuado, não possibilitando imagear alvos enterrados abaixo de 1,5 metro de profundidade, na área do SCGR do IAG/USP.

Antenas com frequência central mais alta (400 MHz e 500 MHz) proporcionam melhor resolução vertical; enquanto que as frequências mais baixas (100 MHz, 200 MHz e 250 MHz) permitem maiores profundidades de penetração. As antenas de 200 MHz, fabricadas pela GSSI, e as antenas de 250 MHz, fabricadas pela Mala Geoscience, foram as mais adequadas para a detecção dos alvos instalados no SCGR do IAG/USP, devido a sua melhor portabilidade e maior profundidade de investigação.

O principal fator limitante do GPR, neste trabalho, é a atenuação do sinal eletromagnético, provocada pela presença de solos com alta condutividade elétrica (acima de 10 mS/m) na área. Estes solos são o aterro argiloso (parte leste do SCGR) e os sedimentos argilosos da planície de inundação do rio Pinheiros, conforme verificado durante as escavações das trincheiras e a implantação dos alvos.

A precisão do método GPR é muito dependente da constante dielétrica (ou da velocidade de propagação da onda de radar no subsolo). Para trabalhos práticos, em situações geológicas onde o meio pode ser considerado homogêneo, ou seja, com poucas variações litológicas, a conversão do perfil de tempo para profundidade pode ser realizada por meio do uso de apenas um valor de constante dielétrica. Entretanto, para terrenos heterogêneos com variações litológicas laterais e verticais, a conversão tempo/profundidade é mais complexa e exige cautela por parte do intérprete.

Figura 6.14 – Seções GPR da Linha 6 (tubos de aço) do SCGR DO IAG/USP, com os alvos identificados. (a) 100 MHz, blindada, RAMAC; (b) 200 MHz blindada, SIR3000; (c) 250 MHz blindada, RAMAC; (d) 400 MHz blindada, SIR 3000; e (e) 500 MHz blindada, RAMAC.

Figura 6.15 – Seções GPR da Linha 7 (Cabos Elétricos, Hidráulicos e Conduítes de plástico e de PVC para passagem de cabos de Fibras Ópticas) do SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. (a) 100 MHz, blindada, RAMAC; (b) 200 MHz blindada, SIR3000; (c) 250 MHz blindada, RAMAC; e (d) 500 MHz blindada, RAMAC.

Dados Quase-3D

Os dados GPR, Quase-3D, foram adquiridos somente sobre os alvos das linhas de arqueologia, manilhas de concreto, tambores metálicos, tambores plásticos e tubos de aço. Estes alvos foram escolhidos porque mostram os maiores contrastes de propriedades elétricas entre os alvos implantados na área do SCGR.

Todas as seções foram migradas em 2D para melhor visualização da geometria e localização espacial dos alvos imageados, e também, para colapsar as hipérboles de difração presentes nos dados, permitindo um melhor imageamento dos refletores (YILMAZ, 1987).

Para melhor visualização das anomalias relacionadas aos objetos enterrados na área do SCGR do IAG/USP, foram criados cortes em profundidade para cada bloco GPR, Quase-3D. Os cortes mostram os valores de amplitude instantânea (envelope) para as profundidades reais dos alvos.

A **Figura 6.16** mostra cortes, em profundidades, realizados no bloco GPR, Quase-3D adquirido, sobre a área onde foram instalados os alvos arqueológicos no SCGR do IAG/USP, utilizando-se de antenas blindadas do equipamento SIR3000 (400 MHz), com suas respectivas anomalias identificadas.

Na **Figura 6.16a** (corte em 0,5 metro), somente o muro de tijolos e o tubo metálico são identificados. O tubo metálico mostra-se como um refletor retilíneo contínuo, na posição de $Y = 15$ metros e X entre -0,5 metro e 3 metros, sendo caracterizado com uma alta amplitude de reflexão. O muro de tijolos (posição Y entre 9 metros e 11 metros, e $X = 1$ metro) aparece como um refletor de amplitude baixa, sendo pouco perceptível na figura. Para melhor visualização deste alvo, aplicou-se um ganho constante aos dados. A **Figura 6.17** mostra o corte, em profundidade (0,5 metro), sobre o refletor, relacionado ao muro de tijolos (a – ganho aplicado a todos os dados, e b – ganho constante). A visualização dos dados na escala de amplitude de 0,0625 foi utilizada para comparação dos refletores. Nota-se que após este procedimento, o muro de tijolos é claramente perceptível.

Na **Figura 6.16b** (corte em 0,52 metro de profundidade), os alvos Arq1, Arq2, Arq4 e Arq5 são identificados. O buraco, que representa o solo escavado, é evidenciado por uma área de ausência de reflexão de difícil detecção. Este alvo é somente perceptível, devido ao formato retangular da cava. Os demais alvos mostram amplitudes

altas (refletores pretos). Neste corte, o muro de tijolos não é perceptível, contudo o contorno do buraco escavado para a implantação deste alvo pode ser identificado.

No corte realizado na profundidade de 0,63 metro (**Figura 6.16c**), os alvos relacionados à caixa de areia (anomalia Arq1), à caixa de brita (anomalia Arq2), ao muro de tijolos (anomalia Arq3) e a camada de sílex (anomalia Arq7) são identificados. As caixas de areia e de brita se comportam como áreas de fraca amplitude, devido a homogeneidade do material, ou seja, não há nenhuma interface dentro do material que permita a ocorrência de reflexão. Já a camada de sílex acontece como uma área de forte reflexão, porque o corte foi realizado próximo do contato do aterro com alvo (anomalia Arq7).

O refletor relacionado ao pote de cerâmica enterrado a 1 metro de profundidade, na posição de, aproximadamente, 20 metros da Linha 1 (arqueologia), somente é visualizado no corte de 0,99 metro (**Figura 6.16d**). As caixas de concreto e de brita possuem elevada reflexão nesta profundidade, resultado do alto contraste elétrico entre a base das caixas e o aterro.

O tubo metálico guia (anomalia Tg) ocorre na distância de 15 metros (eixo Y) e na profundidade de 0,5 metro, comportando-se com uma anomalia linear. Sua extremidade oeste tem início a partir de 0,5 metro (eixo X).

Na área do sítio, onde foram enterradas as manilhas de concreto, são mostrados os resultados GPR, Quase-3D, obtidos com as antenas blindadas de 200 MHz e 400 MHz do equipamento SIR3000, com suas respectivas anomalias identificadas (**figuras 6.18 e 6.19**). Os resultados obtidos, com as antenas de 200 MHz, possibilitaram investigar as manilhas até a profundidade máxima de 1,7 metro, ao passo, que com as antenas de 400 MHz o limite de investigação foi de 1,05 metro. A pequena profundidade de investigação obtida com a antena de 400 MHz, é compensada pela maior resolução espacial dos alvos, quando comparada com as antenas de 200 MHz.

Com exceção da manilha de concreto enterrada na vertical (anomalia Mn3), todas as demais manilhas são identificadas como refletores retilíneos de alta amplitude (anomalias Mn1, Mn2, Mn4, Mn5, Mn6, Mn10 e Mn11, **figuras 6.18 e 6.19**).

Além das manilhas o tubo metálico guia que está enterrado na distância de 15 metros (eixo Y) ocorre no corte realizado na profundidade de 0,5 metro (**Figura 6.19b**). Esse tubo se comporta como um refletor retilíneo de alta amplitude.

Com o objetivo de comparar a capacidade de resolver (resolução espacial) as manilhas de concreto, foram realizados cortes, na profundidade de 0,5 metro, nos cubos GPR, Quase-3D, obtidos com antenas de 200 MHz e de 400 MHz (**Figura 6.20**). Os cortes mostram que não há diferença significativa na resolução espacial entre as antenas de 200 MHz e 400 MHz na parte superior dos dados.

Figura 6.16 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 400 MHz), da área onde foram instalados os alvos arqueológicos no SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. Cortes realizados nas profundidades de: (a) 0,50 metro, (b) 0,52 metro, (c) 0,63 metro, e (d) 0,99 metro.

Figura 6.17 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 400 MHz), da área onde foram instalados os alvos arqueológicos no SCGR do IAG/USP, e o refletor relacionado ao muro de tijolos. Dados com ganhos de (a) 0,0625 e (b) 0,3.

Os resultados GPR, Quase-3D, obtidos, com as antenas blindadas de 200 MHz e 400 MHz, do equipamento SIR3000, sobre a Linha 4 (tambores de aço), são mostrados com suas respectivas anomalias identificadas (**figuras 6.21 e 6.22**). Devido ao elevado coeficiente de reflexão entre o solo e os tambores de aço, todos os alvos desta linha são identificados com nitidez nos resultados obtidos com a antena de 200 MHz. Já nos resultados obtidos com a antena de 400 MHz, somente foram identificados os tambores enterrados até 1 metro de profundidade. Os refletores de alta amplitude e com forma retangular (anomalias Tb1, Tb2, Tb3 e Tb4/Tb5) são relacionados aos tambores dispostos na horizontal, ao passo que os de alta amplitude, de forma circular (anomalias Tb6 e Tb7), aos tambores dispostos na vertical.

As **Figura 6.23 e 6.24** mostram cortes, em profundidades, realizados no bloco GPR, Quase-3D, adquirido sobre a área onde foram enterrados os tambores de plástico, utilizando-se antenas blindadas do equipamento SIR3000 (200 MHz e 400 MHz), com suas respectivas anomalias identificadas. Os tambores mostram amplitude elevada, quando comparado ao solo da sua vizinhança (solo revirado durante a escavação dos buracos). Com exceção do tambor preenchido com água doce (Tp2), localizado na posição de 4 metros (eixo Y), todos os demais alvos foram localizados.

No corte, em profundidades, realizado no bloco GPR, Quase-3D, adquirido a antena de 200 MHz, os tambores são de difícil detecção. Este fato é relacionado com devido a alta condutividade elétrica do solo. Para melhorar a visualização desses tambores, aplicou-se, um ganho constante de amplitude (**Figura 6.25**).

Figura 6.18 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 200 MHz), da área onde foram instalados as manilhas de concreto no SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. Cortes realizados nas profundidades de: (a) 0,50 metro, (b) 0,75 metro, (c) 0,93 metro, (d) 0,97 metro, (e) 1,03 metro, e 1,62 metro.

Figura 6.19 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 400 MHz), da área onde foram instaladas as manilhas de concreto no IAG/USP, com os alvos identificados. Cortes realizados nas profundidades de: (a) 0,47 metro, (b) 0,50 metro, (c) 0,75 metro, (d) 0,93 metro, e (e) 1,03 metro.

Figura 6.20 – Cortes, em profundidade no cubo GPR, Quase-3D, da área onde foram instaladas as manilhas de concreto no SCGR do IAG/USP, com o refletor relacionado ao alvo Mn4 (manilha de concreto de 0,48 metro de diâmetro externo). Resultados obtidos com as antenas de (a) 200 MHz e (b) 400 MHz.

Figura 6.21 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 200 MHz), da área onde foram instalados os tambores de aço no SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. Cortes realizados nas profundidades de: (a) 0,50 metro, (b) 1,0 metro e (c) 1,97 metro.

Figura 6.22 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 400 MHz), da área onde foram instalados os tambores de aço no SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. Cortes realizados nas profundidades de: (a) 0,50 metro e (b) 1,0 metro.

Figura 6.23 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 200 MHz), da área onde foram instalados os tambores de plástico no SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. Cortes realizados nas profundidades de: (a) 0,50 metro, (b) 1,0 metro, e (c) 1,50 metro.

Figura 6.24 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 400 MHz), da área onde foram instalados os tambores de plástico no SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados. Cortes realizados nas profundidades de: (a) 0,50 metro e (b) 0,95 metro.

Figura 6.25 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 200 MHz), da área onde foram instalados alguns tambores de plástico no SCGR do IAG/USP, com os refletores relacionados aos tambores enterrados na profundidade de 1,5 metro. Dados com ganhos de (a) 0,0625 e de (b) 1,0.

Sobre a Linha 6 (tubos de aço), são mostrados os resultados GPR, Quase-3D, obtidos com as antenas blindadas de 200 MHz e 400 MHz do equipamento SIR3000, com suas respectivas anomalias identificadas (**figuras 6.26 e 6.27**). Conforme já descrito anteriormente, poucos alvos nesta linha foram identificados devido à alta condutividade do terreno ($> 8 \text{ mS/m}$), aumentando, dessa maneira, a atenuação da onda eletromagnética do GPR. Os resultados GPR conseguidos, com as antenas de 400 MHz, permitiram identificar mais refletores nos cortes em profundidade do bloco GPR, Quase-3D, do que os resultados obtidos com as antenas de 200 MHz. Provavelmente, o fato está relacionado à pequena dimensão dos tubos, o que exige para a sua detecção

maior resolução temporal (frequências mais altas) e isto foi alcançado com as antenas de 400MHz. Os tubos, que foram imageados com as antenas de 400 MHz, estão dispostos paralelos às aquisições dos perfis e os tubos verticais.

Figura 6.26 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 200 MHz), da área onde foram instalados os tubos de aço no SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados Cortes realizados nas profundidades de: (a) 0,50 metro, (b) 1,0 metro, e (c) 1,50 metro.

Figura 6.27 – Cortes em profundidade no cubo GPR, Quase-3D (frequência de 400 MHz), da área onde foram instalados os tubos de aço no SCGR do IAG/USP, com os alvos identificados Cortes realizados nas profundidades de: (a) 0,50 metro e (b) 1,0 metro.

Os resultados conseguidos, com as antenas de 200 MHz, permitiram imagear os tubos metálicos dispostos até 0,6 metro de profundidade (Ta1, Tg e Ta6). Entretanto, os contornos de alguns buracos, escavados para implantação de alvos mais profundos, são perceptíveis nos cortes em profundidade de 1 metro (**Figura 6.26**).

Já nos cortes, em profundidade, realizados no bloco GPR, Quase-3D, obtido com a antena de 400 MHz (**Figura 6.27**), foram identificados os tubos de aço, dispostos na horizontal e na direção N-S (Ta1 e Ta2), dispostos na horizontal e na direção E-W (Ta6), dispostos na vertical (Ta7 e Ta8), e o tubo metálico guia (Tg).

Os resultados mostram que o tubo metálico guia foi observado em todos os cortes, realizados, na profundidade de 0,5 metro, dos blocos GPR, Quase-3D, adquiridos na área do SCGR do IAG/USP.

As informações de GPR alcançadas, com as antenas de 200 MHz, permitiram identificar alvos enterrados na profundidade de até 2 metros, que possuem um alto contraste dielétrico. As antenas de 400 MHz mostraram maior resolução em resolver alvos enterrados até a profundidade máxima de 1 metro, definindo alvos dispostos na direção N-S e na direção E-W.

A aplicação de ganhos constantes em áreas de alta atenuação eletromagnética permitiu o imageamento de objetos com baixo contraste dielétrico, como foi o caso do muro de tijolos e dos tambores plásticos, enterrados na profundidade de 1,5 metro. A escolha da melhor escala de cores, que permita a individualização de refletores com amplitudes distintas, é muito importante na elaboração de cubos 3D GPR. Além da escala, o posicionamento dos traços deve ser realizado com acuidade, para evitar erros de georeferenciamento de anomalias.

O contorno das escavações é um indicativo da presença de alvos implantados no solo, auxiliando o intérprete na escolha dos melhores parâmetros de ganho a serem aplicados aos dados.

Os resultados de interpolações de dados de perfis GPR 2D mostram eficiência na determinação da geometria de interferências (objetos criados pelo homem) enterradas no subsolo. O principal fator limitante na obtenção de bons resultados é o conhecimento do campo de velocidade de propagação da onda eletromagnética, essencial para a realização da migração e para a conversão dos perfis de tempo para profundidade.

6.2.2 Eletrorresistividade

Os resultados de resistividade elétrica e de cargabilidade, obtidos em cada linha de alvos do SCGR, foram analisados, em conjunto, com o objetivo de verificar a correlação que mantêm entre si.

A **Figura 6.28** mostra os resultados da tomografia elétrica na área do SCGR sobre a Linha 1. Os resultados da inversão mostram que houve um bom ajuste (erro de 2,56%) entre a seção elétrica de campo (**Figura 6.28a**) e o dado sintético (**Figura 6.28b**). O modelo geoeletrico obtido (**Figura 6.28c**) mostra valores de log resistividade elétrica entre 2 (100 $\Omega.m$) e 3,18 (1500 $\Omega.m$). Analisando a **Figura 6.28c**, nota-se que somente os alvos Arq1 (caixa de areia), Arq2 (caixa de brita) e Tg (tubo metálico guia) provocaram mudanças representativas de resistividade elétrica no modelo obtido.

Como era esperado, as caixas de areia e a de brita possuem elevadas resistividades elétricas, sendo bastante evidentes no modelo obtido de resistividade elétrica (**Figura 6.28c**).

Percebe-se também que os contornos dos buracos, escavados para a implantação dos alvos, provocam um aumento da resistividade elétrica. Este fato pode ser resultado de um aumento na porosidade do solo e, conseqüentemente, um aumento da resistência elétrica.

Os resultados de cargabilidade, obtidos sobre a Linha 1, mostram que somente o tubo guia (metálico), é evidenciado tanto nos dados de campo (**Figura 6.29a**), quanto no modelo conseguido, após a inversão (**Figura 6.29c**). Este tubo causa um aumento de cargabilidade no modelo (acima de 10 mV/V).

Conforme já descrito na literatura (SASAKI, 1994; CHAMBERS et al., 2002; VICKERY; HOBBS, 2002), uma simples linha de investigação elétrica é considerada suficiente para resolver objetos metálicos. Este fato é ressaltado quando o levantamento é realizado perpendicular ao maior eixo do alvo. Quanto maior for o comprimento do alvo, mais fácil será a identificação do mesmo (VICKERY; HOBBS, 2002).

Tanto no modelo de resistividade (**Figura 6.28c**), quanto no de cargabilidade (**Figura 6.29c**), nota-se uma forte anomalia na posição de 15 metros provocada pelo tubo metálico guia.

Figura 6.28 – Seções de eletrorresistividade, obtidas sobre a Linha 1 (Arqueologia). (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade elétrica obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos.

A **Figura 6.30** mostra os resultados da tomografia elétrica na área do SCGR sobre a Linha 2 (Tubos de PAD). Os resultados da inversão mostram que houve um bom ajuste (erro de 3,96%) entre a seção elétrica de campo (**Figura 6.30a**) e o dado sintético (**Figura 6.30b**). O modelo geoeletrico obtido (**Figura 6.30c**) mostra valores de log resistividade elétrica entre 1,5 ($31 \Omega.m$) e 3,6 ($3981 \Omega.m$). Analisando a **Figura 6.30c**, nota-se que somente o tubo guia (Tg) provocou mudanças de resistividade elétrica no modelo obtido (diminuição da resistividade).

Figura 6.29 – Seções de cargabilidade, obtidas sobre a Linha 1 (Arqueologia). (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos.

De maneira semelhante, os resultados de cargabilidade da Linha 2 mostram que somente o tubo metálico guia é facilmente reconhecido (**Figura 6.31**).

A não identificação dos tubos de PAD já era esperada, devido, à sua pequena dimensão, ao pouco contraste elétrico entre os tubos e o solo da área, e a pouca resolução de pontos coletados.

Figura 6.30 – Seções de eletrorresistividade, obtidas sobre a Linha 2 (Tubos de PAD). (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade elétrica obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos.

A **Figura 6.32** mostra a pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo (**6.32a**), os dados sintéticos do ajuste do modelo (**6.32b**) e o modelo de resistividade obtido após inversão com os alvos sobrepostos (**6.32c**) da Linha 3 (manilhas de concreto). Foi utilizada a inversão robusta, com cinco iterações, ficando o erro absoluto de 6,06%.

Figura 6.31 – Seções de cargabilidade, obtidas sobre a Linha 2 (Tubos de PAD). (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos.

No modelo geoeletrico da Linha 3 (**Figura 6.32c**), percebe-se que o tubo metálico guia (Tg), disposto na posição 15 metros, foi sutilmente mapeado, bem como alguns buracos que foram escavados para enterrar as manilhas. Estes buracos apresentam o comportamento de resistores, devido à má compactação do solo, aumentando, assim, a porosidade do meio. Esperava-se que algumas manilhas comportassem-se como corpos condutores, devido à presença de uma malha de ferro em sua estrutura, e as demais, como alvos resistores (sem malha de ferro na estrutura de concreto). No entanto, por causa da falta de contraste elétrico entre as manilhas e o solo argiloso do aterro e dos sedimentos não é possível uma afirmação precisa.

Figura 6.32 – Seções de eletrorresistividade, obtidas sobre a Linha 3 (Manilhas de concreto). (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade elétrica obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos.

A **Figura 6.33** mostra os resultados da modelagem dos dados de cargabilidade da Linha 3. Os resultados da inversão mostram que houve um bom ajuste (erro de 0,76) entre a seção de campo (**Figura 6.33a**) e o dado sintético (**Figura 6.33b**). O modelo de cargabilidade obtido (**Figura 6.33c**) mostra valores de cargabilidade entre 0,5 mV/V e 20 mV/V. Analisando a **Figura 6.33c**, nota-se que somente o tubo metálico guia (Tg) provocou mudanças representativas de cargabilidade no modelo obtido. Nota-se ainda que, nas regiões escavadas, há um aumento de cargabilidade. Tal fato pode ser resultado de um solo mais poroso nas cavas.

Figura 6.33 – Seções de cargabilidade, obtidas sobre a Linha 3 (manilhas de concreto). (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos.

Os dados e resultados de resistividade elétrica e cargabilidade da Linha 4 (tambores de aço) são mostrados nas **figuras 6.34 e 6.35**. A **Figura 34a** mostra a pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo (**Figura 34a**), os dados sintéticos do ajuste do modelo (**Figura 34b**) e o modelo de resistividade elétrica (**Figura 34c**), obtido após a quinta iteração (erro absoluto de 3,52%).

A **Figura 34c** mostra o modelo de resistividade elétrica da linha de tambores de aço. Os resultados indicam novamente a presença do tubo metálico, na posição de 15 metros; mas não evidencia a presença dos tambores de aço.

O tubo metálico causa uma diminuição da resistividade bem abaixo de sua posição.

Figura 6.34 – Seções de eletrorresistividade, obtidas sobre a Linha 4 (tambores de aço). (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade elétrica obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos.

A **Figura 6.35** mostra os resultados da modelagem dos dados de cargabilidade da Linha 4. Os resultados da inversão mostram que houve um bom ajuste (erro de 0,97) entre a seção de campo (**Figura 6.35a**) e o dado sintético (**Figura 6.35b**). O modelo de cargabilidade obtido (**Figura 6.35c**) mostra valores de cargabilidade entre 1 mV/V e 28 mV/V. Analisando a **Figura 6.35c**, nota-se que somente o tubo guia (Tg) provocou mudanças representativas de cargabilidade no modelo obtido. A tinta anti-ferrugem, que

foi aplicada nos tambores, antes de seus soterramentos, pode estar blindando o fluxo de corrente nos tambores, o que pode explicar a falta de contraste elétrico nas seções de resistividade e cargabilidade.

Figura 6.35 – Seções de cargabilidade, obtidas sobre a Linha 4 (tambores de aço). (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos.

A **Figura 6.36** mostra os dados de resistividade elétrica obtidas no campo (6.36a), o dado sintético (6.36b) e o modelo obtido após a quinta iteração (6.36c) para a Linha 5. O erro de ajuste (erro absoluto) entre o dado de campo e o dado sintético foi de 2.68%.

O modelo de resistividade elétrica obtido para a Linha 5 (**Figura 6.36c**) mostra valores de log resistividade entre 1.8 ($63 \Omega.m$) e 3.15 ($1412 \Omega.m$). Analisando a **Figura 6.36c**, nota-se que além do tubo guia (Tg), que provoca uma diminuição da resistividade elétrica na posição de 15 metros, há uma zona condutiva no perfil entre a distância de 9 metros a 13 metros. Esta zona é relacionada ao solo mais condutivo encontrado na parte leste do SCGR do IAG/USP.

Figura 6.36 – Seções de eletrorresistividade obtidas sobre a Linha 5 (tambores de plástico). (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade elétrica obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos.

O modelo de cargabilidade, obtido para a Linha 5, mostra um bom ajuste entre os dados de campo e os dados sintéticos (erro absoluto de 1,12, **Figura 6.37**). Esperava-

se que, com os dados de cargabilidade, fosse possível distinguir entre tambores plásticos preenchidos com água doce e tambores preenchidos com água salgada, devido à quantidade de sais presentes (GRIFFITHS et al., 1981). Entretanto, este fato não foi verificado. Somente o tubo metálico guia (posição de 15 metros) e os solos mais argilosos, da parte leste do SCGR, mostram valores de cargabilidade que sugerem suas distinções.

Figura 6.37 – Seções de cargabilidade, obtidas sobre a Linha 5 (tambores de plástico). (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos.

A **Figura 6.38** mostra a pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo (**Figura 6.38a**), os dados sintéticos do ajuste do modelo (**Figura 6.38b**) e o

modelo de resistividade obtido após inversão com os alvos sobrepostos (**Figura 6.38c**) da Linha 6 (tubos de ferro). Foi utilizada a inversão robusta, com cinco iterações, ficando o erro absoluto de 3,03%.

No modelo geoeletrico da Linha 6 (**Figura 6.38c**), percebe-se que, além do tubo metálico guia (Tg) disposto na posição 15 metros, os tubos Ta1, Ta7 e Ta9 são, sutilmente identificados pelos padrões de anomalia de resistividade elétrica que ocorrem em suas posições. O tubo metálico (Ta1), orientado na direção N-S, é identificado no modelo elétrico da Linha 5 (**Figura 6.38c**), devido à diminuição da resistividade elétrica na posição de 2 metros e na profundidade de 0,5 metro. No modelo, nota-se uma anomalia vertical de resistividade elétrica na posição de 23 metros, coincidindo com a posição do tubo Ta7. Já na área onde foi enterrado o tubo Ta9, ocorre no modelo elétrico, uma anomalia condutiva mergulhando para norte (posição de 27 metros a 29 metros), correspondendo ao tubo metálico inclinado.

Além das anomalias relacionadas aos tubos de ferro, alguns buracos escavados para a implantação dos alvos (buracos dos alvos Ta3 e Ta9) são facilmente percebidos no modelo elétrico da Linha 6. Estes buracos mostram aumento da resistividade elétrica em função do aumento da porosidade do aterro.

A **Figura 6.39** mostra os resultados da modelagem dos dados de cargabilidade da Linha 6. Os resultados da inversão mostram que houve um bom ajuste (erro de 1,69) entre a seção de campo (**Figura 6.39a**) e o dado sintético (**Figura 6.39b**). O modelo de cargabilidade conseguido (**Figura 6.39c**), mostra valores de cargabilidade entre 1 mV/V e 19,5 mV/V. Analisando a **Figura 6.39c** nota-se que os tubos Ta1, Tg, Ta7 e Ta9 provocaram mudanças representativas de cargabilidade no modelo obtido. Já nos dados de campo, é visível a presença de duas anomalias condutivas em forma de uma cela (característica de alvos condutivos pontuais, ELIS, 1999) nas posições de 2 metros e de 15 metros. Nota-se ainda que, nas regiões escavadas para a implantação dos alvos, há um aumento nos valores de cargabilidade, correlacionado ao aumento da porosidade nas cavas.

Figura 6.38 – Seções de eletrorresistividade, obtidas sobre a Linha 6 (tubos de ferro). (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade elétrica obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos.

A **Figura 6.40** mostra a pseudo-seção de resistividade aparente (**Figura 6.40a**) dos dados de campo da Linha 6 (Cabos Elétricos, Hidráulicos e Conduítes de plástico e de PVC para passagem de cabos de Fibras Ópticas), os dados sintéticos do ajuste do modelo (**Figura 6.40b**) e o modelo de resistividade obtido após a inversão, com os alvos sobrepostos (**Figura 6.40c**). Foi utilizada a inversão robusta, com cinco iterações, ficando o erro absoluto de 2,83%.

Figura 6.39 – Seções de cargabilidade, obtidas sobre a Linha 6 (tubos de ferro). (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos.

No modelo de resistividade elétrica da Linha 7 (**Figura 6.40c**), percebe-se que o tubo metálico guia (Tg), disposto na posição 15 metros, foi sutilmente mapeado, bem como, alguns buracos que foram escavados para enterrar os alvos. No local onde foram enterrados os dutos envelopados na caixa de concreto (alvos Dt5 e Dt6, **Figura 6.40c**), há uma diminuição da resistividade elétrica, podendo ser resultado da alta condutividade do solo na parte leste do SCGR ou da contenção de umidade pelo concreto.

A **Figura 6.41** mostra os resultados da modelagem dos dados de cargabilidade da Linha 7. Os resultados da inversão mostram que houve um bom ajuste (erro de 1,41)

entre a seção de campo (**Figura 6.41a**) e o dado sintético (**Figura 6.41b**). O modelo de cargabilidade obtido (**Figura 6.41c**) mostra valores de cargabilidade entre 1 mV/V e 19,5 mV/V.

Figura 6.40 – Seções de eletrorresistividade, obtidas sobre a Linha 7 (Cabos Elétricos, Hidráulicos e Conduítes de plástico e de PVC, para passagem de cabos de Fibra Ótica). (a) Pseudo-seção de resistividade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de resistividade elétrica obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos.

Analisando a **Figura 6.41c**, nota-se que os alvos metálicos, Dt1 (tubo na posição de 1 metro e a 0,5 metro de profundidade) e o Tg (tubo na posição de 15 metros e a 0,5 metro de profundidade) coincidem com anomalias de alta cargabilidade. Neste mesmo modelo, há uma diminuição da cargabilidade entre 10,5 metros e 19 metros de distância, coincidindo com a área mais argilosa do SCGR.

Figura 6.41 – Seções de cargabilidade, obtidas sobre a Linha 3 (Cabos Elétricos, Hidráulicos e Conduítes de plástico e de PVC, para passagem de cabos de Fibra Ótica). (a) Pseudo-seção de cargabilidade aparente dos dados de campo. (b) Dados sintéticos do ajuste do modelo. (c) Modelo de cargabilidade obtido após a inversão, com os horizontes geológicos, os contornos das cavas e os alvos sobrepostos.

Após a discussão dos resultados, de resistividade elétrica e de cargabilidade obtidos nas linhas onde foram implantados alvos na área do SCGR do IAG/USP, uma breve análise é descrita a seguir:

- Com exceção do tubo metálico guia (tubo de ferro de 3,8 cm de diâmetro), somente as caixas de areia e de brita foram resolvidas pela resistividade elétrica. O tubo metálico guia é identificado em todas as seções, porque se comporta como um condutor infinito, já que a maior parte da corrente injetada nas suas proximidades é absorvida pelo mesmo, devido ao seu grande comprimento (52 metros);
- Os alvos metálicos dispostos até a profundidade de 0,5 metro provocam um aumento da cargabilidade. Entretanto, os tambores de aço não mostraram este contraste, porque foram pintados com tinta anti-corrosiva, antes de serem enterrados;
- Os buracos escavados para a implantação dos alvos mostram-se como anomalias resistivas e de cargabilidade alta, causadas, provavelmente, pelo aumento da porosidade no solo;
- Os resultados mostram que a resolução de pontos (0,5 metro) utilizada neste trabalho com o método da eletrorresistividade não é suficiente para resolver alvos não-metálicos, de dimensões centimétricas, enterrados em profundidades superiores a 1 metro.

6.2.3 Eletromagnético Indutivo

Os resultados de condutividade elétrica aparente, obtidos com o método eletromagnético indutivo, serão mostrados em faixas sobre cada linha de alvos instalada na área do SCGR do IAG/USP.

FAIXA 1 – Arqueologia

A Faixa 1 corresponde à área onde estão enterrados os alvos arqueológicos no SCGR do IAG/USP (**Figura 6.42a**).

As **figuras 6.42b e 6.42c** mostram os mapas de condutividade elétrica aparente (σ_a), conseguidos com o equipamento EM-38, nos modos dipolo magnético horizontal (DMH) e dipolo magnético vertical (DMV), respectivamente.

No mapa obtido no modo DMH (**Figura 6.42b**), o valor mediano de σ_a obtido para o solo superficial foi de 3,54 mS/m; ao passo que o obtido no modo DMV (**Figura 6.42c**) foi de 5,49 mS/m.

Na **Figura 6.42c**, duas anomalias positivas P1 (29 mS/m) e P2 (36,29 mS/m) correspondem a dois marcos de concreto que limitam a área do SCGR. Estes marcos possuem pequenas barras de ferro em sua estrutura para aumentar a resistência mecânica. Daí, as anomalias positivas de condutividade elétrica aparente.

Nos dois mapas, a caixa de brita (anomalia Arq2) foi identificada como um alvo condutivo. No modo DMH, o valor máximo obtido foi de 8 mS/m, ao passo que, no modo DMV, houve a inversão da polaridade da anomalia, com o pico máximo no valor de -0,3 mS/m. A caixa de brita ocorre como uma anomalia condutiva, talvez porque a brita é de rocha gnáissica e possua uma concentração elevada de minerais enriquecidos em ferro (biotita).

O tubo metálico guia (3,8 cm de diâmetro externo) enterrado, na profundidade de 0,5 metro e na posição de 15 metros, aparece como uma anomalia de alta condutividade elétrica, nos resultados obtidos, com o equipamento no modo DMH (**Figura 6.42b**); e como uma anomalia negativa no modo DMV (**Figura 6.42c**). Conforme descrito anteriormente no capítulo 3, corpos metálicos, que estão bem próximos às bobinas do equipamento (alta resposta impulsiva) ou metálicos de grande volume, provocam uma inversão de fase do campo medido, ou seja, o campo magnético secundário é maior do que o primário, fazendo com que o ângulo de fase seja maior do que 90 graus. Deste modo, as anomalias tornam-se negativas.

FAIXA 2 – Tubos de PAD

A Faixa 2 corresponde à área onde estão enterrados os tubos de PAD de 136 mm de diâmetro externo, com 2 metros de comprimento, vazios e preenchidos, totalmente e parcialmente com água de torneira, no SCGR do IAG/USP (**Figura 6.43a**). As **figuras 6.43b e 6.43c** mostram os mapas de condutividade elétrica aparente (σ_a), conseguidos com o equipamento EM-38 nos modos DMH e DMV, respectivamente. Nos mapas, somente o cano metálico guia (tubo de ferro galvanizado de 3,8 cm de diâmetro) foi percebido na posição de $Y = 15$ metros (anomalia Tg), como era o esperado, pois materiais não-metálicos, com dimensões muito pequenas, em ambientes urbanos, são quase imperceptíveis à resposta do EM-38.

No mapa obtido no modo DMH (**Figura 6.43b**), o valor mediano de σ_a obtido para o solo superficial, foi de 2,65 mS/m; ao passo que o obtido no modo DMV (**Figura 6.43c**) foi de 4,65 mS/m.

FAIXA 3 – Manilhas de Concreto

A Faixa 3 mostra os resultados obtidos com o equipamento EM-38 na área onde estão enterradas as manilhas de concreto, no SCGR do IAG/USP (**Figura 6.44a**).

No mapa obtido no modo DMH (**Figura 6.44b**), o valor mediano de σ_a calculado, para o solo superficial, foi de 4,3 mS/m, ao passo que o obtido no modo DMV (**Figura 6.44c**) foi de 7,8 mS/m. Nestes, mapas são percebidas 3 anomalias condutivas de σ_a (Mn1, Mn2 e Mn3). As anomalias positivas observadas no perfil estão relacionadas às manilhas de concreto de 70 cm de diâmetro externo, que possuem uma malha de ferro em suas estruturas de concreto. Quanto mais profunda está a manilha, menor será a amplitude da anomalia, porque a maior sensibilidade do equipamento é na profundidade de 0,4 metro, diminuindo com o aumento da profundidade. A anomalia Mn1 e Mn3, referentes às manilhas de concreto localizadas nas profundidades de 0,75 metro e 0,93 metro, são identificadas no mapa de σ_a no modo DMH (**Figura 6.44b**), mostrando que a profundidade de investigação, alcançada com o EM-38 foi superior àquela determinada por McNeill (1980); isto confirma que, o volume do alvo metálico, interfere na resposta do equipamento. O que leva a sugerir que alvos metálicos de maiores dimensões podem ser identificados com o EM-38, em profundidades superiores às definidas no manual do equipamento (0,75 metro para o modo DMH e de 1,5 metro para o modo DMV). Novamente, o cano metálico-guia (posição Y=15 metros) se comporta como uma anomalia de condutividade positiva (Tg) no mapa de condutividade aparente do modo DMH (**Figura 6.44b**) e como uma anomalia negativa no modo DMV (**Figura 6.44c**).

FAIXA 4 – Tambores de Aço

A **Figura 6.45a** mostra o mapa da localização dos tambores de aço e do contorno das cavas, na área do SCGR do IAG/USP. As **Figuras 4b e 4c** mostram os mapas de σ_a desta faixa, obtidos nos modos DMH e DMV, respectivamente. Em ambos os mapas são observadas 4 anomalias condutivas de σ_a (Tb2, Tb3, Tb4/Tb5 e Tb6); estas anomalias estão relacionadas aos tambores metálicos enterrados a profundidades

inferiores a 1,5 metro. Neste caso, devido à composição dos tambores e à espessura da placa de metal, a máxima profundidade de investigação foi inferior a 1,5 metro.

Novamente, o cano metálico-guia (posição Y=15 metros) se comporta como uma anomalia de condutividade positiva do modo DMH (**Figura 6.45b**) e como uma anomalia de condutividade negativa no modo DMV (**Figura 6.45c**).

Figura 6.42 – (a) Vista em planta da Faixa 1 (arqueologia), com os alvos e o contorno das cavas identificadas. Mapas de condutividade elétrica aparente obtidos nos modos DMH (b) e DMV (c), com as respectivas anomalias identificadas.

Figura 6.43 – (a) Vista em planta da Faixa 2 (tubos de PAD), com os alvos e o contorno das cavas identificadas. Mapas de condutividade elétrica aparente obtidos nos modos DMH (b) e DMV (c), com as respectivas anomalias identificadas.

Figura 6.44 – (a) Vista em planta da Faixa 3 (manilhas de concreto), com os alvos e o contorno das cavas identificadas. Mapas de condutividade elétrica aparente obtidos nos modos DMH (b) e DMV (c), com as respectivas anomalias identificadas.

Figura 6.45 – (a) Vista em planta da Faixa 4 (tambores de aço), com os alvos e o contorno das cavas identificadas. Mapas de condutividade elétrica aparente obtidos nos modos DMH (b) e DMV (c), com as respectivas anomalias identificadas.

FAIXA 5 – Tambores Plásticos

A Faixa 5 corresponde à área do SCGR do IAG/USP, onde estão enterrados os tambores plásticos de 100 litros, vazios, preenchidos, totalmente e parcialmente, com água doce e água salgada, visando simular áreas de dissolução cárstica (cavernas) e áreas contaminadas (**Figura 6.46a**).

No mapa obtido no modo DMH (**Figura 6.46b**), o valor mediano de σ_a , conseguido para o solo superficial foi de 3,3 mS/m; ao passo que o obtido no modo DMV (**Figura 6.46c**) foi de 6,0 mS/m.

Os mapas de σ_a obtidos nos modos DMH (**Figura 6.46b**) e DMV (**Figura 6.46c**) mostram a identificação do tubo metálico guia (anomalia Tg), enterrado na posição 15 metros, sendo uma anomalia positiva no modo DMH e negativa no modo DMV.

FAIXA 6 – Tubos Metálicos

A Faixa 6 corresponde ao local onde foram enterrados os tubos metálicos com 4” de diâmetro, horizontais nas direções E-W e N-S magnético, verticais e inclinados, visando simular tubulações de transporte de gás e alvos geológicos magnéticos (mineralizações e diques), na área do SCGR do IAG/USP (**Figura 6.47a**).

A **Figura 6.47b** mostra o mapa de σ_a , obtido no modo DMH. Neste mapa, são observadas sete anomalias de σ_a (Ta1, Ta2, Ta4, Tg, Ta5, Ta6 e Ta7); todas com polaridade positiva. As anomalias Ta1 e Ta2 são provenientes dos tubos metálicos, enterrados na direção N-S, nas profundidades de 0,5 metro e 1,0 metro respectivamente. As anomalias Ta4, Tg, Ta5 e Ta6 possuem direção E-W, coincidindo com a direção dos alvos. Já a anomalia de alta condutividade, nomeada de Ta7, possui a forma circular, coincidindo com o tubo metálico enterrado na vertical.

Na **Figura 6.47c**, são observadas sete anomalias de σ_a (Ta1, Ta2, Ta4, Tg, Ta5, Ta6, Ta7 e Ta9). As anomalias negativas (Ta1, Tg, Ta6 e Ta7) coincidem com tubos metálicos, dispostos na horizontal, nas direções N-S (Ta1) e E-W (Tg e Ta6) e na vertical (Ta7). Todas as anomalias verificadas no perfil coincidem com tubos metálicos; no entanto, as maiores amplitudes das anomalias ocorrem sobre alvos enterrados a profundidades inferiores a 1 metro. De acordo com os mapas, as anomalias alongadas correspondem aos tubos metálicos dispostos na horizontal, ficando os tubos paralelos a

esta direção; ao mesmo tempo, anomalias circulares definem os tubos metálicos dispostos na vertical.

Figura 6.46 – (a) Vista em planta da Faixa 5 (tambores plásticos), com os alvos e o contorno das cavas identificadas. Mapas de condutividade elétrica aparente obtidos nos modos DMH (b) e DMV (c), com as respectivas anomalias identificadas.

Figura 6.47 – (a) Vista em planta da Faixa 6 (tubos metálicos), com os alvos e o contorno das cavas identificadas. Mapas de condutividade elétrica aparente obtidos nos modos DMH (b) e DMV (c), com as respectivas anomalias identificadas.

FAIXA 6 – Cabos Elétricos, Hidráulicos e Conduítes para Passagem de Fibra Ótica

A Faixa 6 corresponde à linha do SCGR do IAG/USP, onde estão enterrados tubos de aço de 8” (tubos para passagem de água e gás), conduítes de PVC (passagem de cabos de fibra ótica), cabos elétricos (passagem de elevadas correntes elétricas) e dutos elétricos, envelopados, em caixas de concreto (**Figura 6.48a**).

O mapa de σ_a obtido, no modo DMH (**Figura 6.48b**), mostra 5 anomalias de alta condutividade elétrica (Dt1, Dt2, Dt3, Tg e Dt11). As anomalias Dt1 (σ_a de 88 mS/m), Dt2 (σ_a de 24,5 mS/m) e Dt3 (σ_a de 8,4 mS/m) são relacionadas aos dutos metálicos, com diâmetro de 8” enterrados, nas profundidades de 0,5 metro, 1,0 metro e 1,5 metro, respectivamente. Quanto menor a profundidade destes alvos, maior é a amplitude da anomalia.

A anomalia Dt11, que ocorre na posição de Y= 22 metros (**Figura 6.48b**), mostra σ_a de 11,1 mS/m e forma alongada na direção E-W, coincidindo com o cabo elétrico XLE de 4 x 120 mm², composto, principalmente, por cobre no seu interior.

Na **Figura 6.48c**, verifica-se a presença de 3 anomalias de σ_a negativas (Dt1, Tg e Dt11) e 4 positivas (Dt2, Dt3, Dt4 e P3). A primeira anomalia negativa é relacionada ao tubo metálico de oito polegadas enterrado a 0,5 metro de profundidade; pode-se notar que, devido ao maior volume de Dt1, com relação a Tg, a amplitude da anomalia é maior (mais negativa) no primeiro. As três anomalias positivas, localizadas nas posições 4 metros, 7 metros e 10 metros (Dt2, Dt3 e Dt4), são relacionadas a tubos metálicos, de oito polegadas, enterrados nas profundidades de 1 metro, 1,5 metro e 2 metros, respectivamente. E a anomalia positiva, localizada na posição de 30 metros (P3), está relacionada ao marco de concreto que marca um dos vértices do SCGR do IAG/USP.

Depois de verificar e relacionar as anomalias de condutividade elétrica aparente aos seus respectivos alvos, segue alguns comentários:

- As anomalias verificadas na área do SCGR do IAG/USP, com o equipamento EM-38, nos modos DMV e DMH, são relacionadas com alvos metálicos (tambores, tubos e canos metálicos) ou que possuam material metálico na sua composição (manilhas e marcos de concreto com armação de ferro);

- Alvos metálicos feitos de ferro galvanizado ou metais afins que estejam enterrados, em profundidades inferiores a 0,5 metro, aparecem como anomalias negativas nos perfis/mapas, de condutividade elétrica aparente, obtidos com o EM-38, no modo DMV. Estes valores negativos não correspondem à propriedade física do material, mas servem como um bom parâmetro para identificar materiais metálicos no meio;
- A utilização do EM-38 para investigar alvos metálicos, em profundidade, depende do volume do material e da composição do mesmo. A profundidade de investigação do EM-38 está limitada para 2 metros quando, o objeto de estudo são alvos metálicos com grandes volumes (tubos de ferro acima de oito polegadas);
- Os dados de σ_a obtidos com o EM-38 podem ajudar na obtenção da forma e disposição dos corpos metálicos no solo;
- A frequência de operação do EM-38 (14,6 kHz) é o principal fator limitante na profundidade de investigação. Outro equipamento eletromagnético com o mesmo princípio de operação, tal como o EM31, pode resolver o problema da profundidade de investigação e apresentar resultados satisfatórios na identificação de objetos metálicos enterrados no solo a profundidades de até 6 metros.
- O mapeamento de alvos resistivos, com o método eletromagnético indutivo, pode ser possível, quando existir um forte contraste elétrico entre o alvo e o meio estudado.

Apesar dos resultados obtidos com o EM-38 terem mapeado somente objetos metálicos ou com metal em sua estrutura, não se devem excluir os levantamentos eletromagnéticos em investigações de objetos não-metálicos. Tabbagh, 1986; Dalan, 1991; Gomes, 2003, conseguiram ótimos resultados na identificação de artefatos arqueológicos (restos de cerâmica, fogueiras, e sepultamentos) enterrados em solos, mostrando a eficiência na utilização do método eletromagnético na identificação de objetos não-metálicos.

Após a análise de todos os resultados, foi elaborado um quadro (**Quadro 6.8**), sintetizando a aplicabilidade dos métodos GPR, eletrorresistividade e eletromagnético indutivo (EM-38), na identificação dos alvos enterrados na área do SCGR do IAG/USP.

Figura 6.48 – (a) Vista em planta da Faixa 7 (tubos metálicos), com os alvos e o contorno das cavas identificadas. Mapas de condutividade elétrica aparente obtidos nos modos DMH (b) e DMV (c), com as respectivas anomalias identificadas.

Quadro 6.8 – Síntese comparativa da aplicabilidade dos métodos GPR, eletrorresistividade/cargabilidade (ER) e eletromagnético indutivo – EM-38 (EM) na identificação dos alvos enterrados na área do SCGR do IAG/USP.

DESCRIÇÃO DO ALVO	MÉTODO GEOFÍSICO		
	GPR	ER	EM
Caixa de areia enterrada a 0,5 metro	XX	XX	
Caixa de brita enterrada a 0,5 metro	XX	XX	
Muro de tijolos enterrado a 0,5 metro	X		
Solo escavado até a profundidade de 2 metros	X		
Vasos cerâmicos enterrados a 0,5 metro e 1,0 metro	XX		
Seixos de sílex enterrados a 0,63 metro	XX		
Tubo de PAD enterrado a 0,5 metro	X		
Tubo de PAD enterrado a 1,0 metro	X		
Tubo de PAD enterrado a 1,5 metro	X		
Tubo de PAD enterrado a 2,0 metros			
Manilha de concreto (diâmetro interno de 0,7 metro)	XX		X
Manilha de concreto (diâmetro interno de 0,4 metro)	XX		
Manilha de concreto (diâmetro interno de 0,2 metro)	XX		
Tambor de aço (200 litros) enterrado a 0,5 metro	XX		XX
Tambor de aço (200 litros) enterrado a 1,0 metro	XX		XX
Tambor de aço (200 litros) enterrado a 1,5 metro	XX		X
Tambor de aço (200 litros) enterrado a 2,0 metros	X		
Tambor plástico (100 litros) enterrado a 0,5 metro	X		
Tambor plástico (100 litros) enterrado a 0,5 metro	X		
Tambor plástico (100 litros) enterrado a 1,0 metro	X		
Tambor plástico (100 litros) enterrado a 1,5 metro	X		
Tubo de aço (diâmetro de 0,1 metro), enterrado a 0,5 metro e paralelo	XX	X	XX
Tubo de aço (diâmetro de 0,1 metro), enterrado a 1,0 metro e paralelo	XX		XX
Tubo de aço (diâmetro de 0,1 metro), enterrado a 0,5 metro e perpendicular	XX	X	XX
Tubo de aço (diâmetro de 0,1 metro), enterrado a 1,0 metro e perpendicular	XX		XX
Tubo de aço (diâmetro de 0,1 metro), enterrado a 1,5 metro e perpendicular	X		
Tubo de aço (diâmetro de 0,1 metro), enterrado a 2,0 metros e perpendicular			
Tubo de aço (diâmetro de 0,1 metro), enterrado a 0,5 metro e vertical	X	X	XX
Tubo de aço (diâmetro de 0,1 metro), enterrado a 1,0 metro e vertical			
Tubo de aço (diâmetro de 0,1 metro), enterrado inclinado (25°)		X	
Tubo de aço (diâmetro de 0,15 metro), enterrado a 0,5 metro e perpendicular	XX	X	XX
Tubo de aço (diâmetro de 0,15 metro), enterrado a 1,0 metro e perpendicular	XX	X	XX
Tubo de aço (diâmetro de 0,15 metro), enterrado a 1,5 metro e perpendicular	XX		XX
Tubo de aço (diâmetro de 0,15 metro), enterrado a 2,0 metros e perpendicular	X		
Caixa de concreto com dutos envelopados enterrada a 1,0 metro e a 1,5 metro			
Cabos elétricos enterrados a 0,5 metro	XX		X
Dutos de PVC para passagem de fibra ótica enterrados a 0,5 metro	XX		
Conduítes de PAD para passagem de fibra ótica enterrados a 0,5 metro	XX		
Tubo metálico de 3,8 cm de diâmetro e 52 metros de comprimento	XX	XX	XX

XX – Bom resultado e X – Resultado regular.

CAPÍTULO 7

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Vários levantamentos de campo foram realizados, na área do SCGR do IAG/USP, com o objetivo de avaliar as potencialidades dos métodos GPR, eletrorresistividade e eletromagnético indutivo, como metodologias viáveis em estudos de planejamento urbano, de arqueologia e de meio ambiente. As principais conclusões obtidas nesta pesquisa estão descritas a seguir:

7.1 BACKGROUND

A caracterização geofísica da área do SCGR do IAG/USP, realizada antes da instalação dos alvos, permitiu a determinação das propriedades físicas do subsolo e da sequência estratigráfica local. Tais resultados subsidiarão estudos sobre modelagens direta e inversa de dados geofísicos, permitindo a elaboração de modelos mais coerentes com a realidade local.

As trincheiras, as sondagens elétricas verticais, os perfis de tomografia elétrica e as seções de GPR permitiram a identificação dos principais horizontes geológicos da área do SCGR do IAG/USP, fornecendo um modelo confiável da estratigrafia local. As unidades geológicas que ocorrem na área possuem peculiaridades distintas. A camada superior, mais arenosa, tem alta resistividade elétrica, mostra altos valores de cargabilidade e comporta-se como uma zona de forte reflexão nos resultados de GPR. Já a unidade inferior, mais argilosa, é extremamente condutiva, tem baixos valores de cargabilidade e atenua a propagação da onda eletromagnética do GPR. A primeira é relacionada ao aterro e a segunda aos sedimentos argilosos da planície de inundação do rio Pinheiros.

A visualização dos resultados de elétrica e de GPR, em 3D, mostrou melhor desempenho na identificação de interfaces e variações geológicas na área. A elaboração de cubos GPR, Quase-3D, permitiu a identificação da geometria da base do aterro, com maior precisão do que a verificada nas trincheiras.

As seções GPR, realizadas com as antenas blindadas de 100 MHz e 250 MHz, mostraram os melhores resultados na identificação da espessura do aterro na área (mínima de 0,8 metro e máxima de 2,9 metros), garantindo boa resolução e maior profundidade de penetração.

Os mapas de condutividade elétrica aparente, obtidos com o EM-38, evidenciaram uma zona mais condutiva na porção leste da área, interpretada como uma concentração maior de argila dentro do aterro (até 1,5 metro de profundidade).

7.2 ALVOS DO SCGR

As conclusões obtidas para a área do SCGR do IAG/USP, depois da instalação dos alvos, são apresentadas de acordo com o conjunto de objetos peculiares para cada área de estudo: Arqueologia, Geotecnia, Planejamento Urbano e Meio Ambiente.

7.2.1 Arqueologia

Os melhores resultados das investigações geofísicas executadas sobre os alvos arqueológicos, implantados na área do SCGR do IAG/USP, foram obtidos com o método GPR.

Obteve-se a melhor resolução dos alvos com as antenas blindadas de 400 MHz e de 500 MHz. Com estas antenas, todos os alvos geológicos (caixa de areia e de brita) e arqueológicos enterrados, até à profundidade máxima de 1 metro, são bem resolvidos, permitindo a identificação, principalmente, da geometria do refletor. Os potes cerâmicos comportam-se como refletores hiperbólicos (difratores), o solo revirado como uma faixa de fraca reflexão e os demais alvos (caixa de areia e de brita, muro de tijolos e lente de sílex) como refletores lineares.

Os modelos geoelétricos, resultantes da tomografia elétrica, identificaram somente o tubo metálico guia, as caixas de areia e de brita. O tubo causa uma

diminuição da resistividade elétrica e um aumento da cargabilidade, abaixo de sua localização. Já as duas caixas mostram alta resistividade no modelo geoeletrico.

Nos resultados de condutividade elétrica, obtidos com o EM-38, foram evidenciados somente os alvos formados por minerais magnéticos (a caixa de brita e o tubo metálico guia).

7.2.2 Geotecnia e Planejamento Urbano

A maior parte dos alvos instalados na área do SCGR do IAG/USP representa fontes de estudos de geotecnia e de planejamento urbano.

Somente os tubos de PAD, enterrados na Linha 2 do SCGR, foram identificados com o método GPR. Os melhores resultados foram obtidos com as antenas blindadas de 200 MHz, da GSSI, resolvendo a maioria dos tubos.

O imageamento GPR 2D e o GPR Quase-3D mapearam todas as manilhas de concreto enterradas na Linha 3 do SCGR, até a profundidade máxima de 1,5 metro. Distinguiram-se com o GPR, o tamanho, a disposição e a profundidade das manilhas, sendo os melhores resultados alcançados com as antenas blindadas de 250 MHz, da MALÀ GEOSCIENCE.

Na Linha 6 foram obtidos os melhores resultados GPR com as antenas blindadas de 200 MHz e 400 MHz, da GSSI. Identificou-se, com clareza, somente os tubos metálicos horizontais, enterrados até a profundidade máxima de 1 metro. Os cortes, em profundidade, realizados no bloco GPR Quase-3D, de 400 MHz, apresentaram uma melhor resolução lateral do que a obtido com a antena de 200 MHz, permitindo a identificação da geometria dos alvos.

A aplicação do GPR, sobre a Linha 7, possibilitou o mapeamento dos tubos de aço (com diâmetro de 8 polegadas), enterrados até a profundidade de 1,5 metro, e dos cabos e conduítes, enterrados na profundidade de 0,5 metro. Obteve-se o melhor resultado com as antenas blindadas de 200 MHz, da GSSI.

A tomografia elétrica mostrou bons resultados no mapeamento de alguns alvos metálicos enterrados na profundidade máxima de 0,5 metro. As respostas de resistividade elétrica indicam uma anomalia de alta condutividade sobre o tubo metálico guia, a qual é provocada, principalmente, pela canalização da corrente elétrica pelo

tubo. Os tubos metálicos mais superficiais (0,5 metro de profundidade) foram identificados graças às anomalias de alta cargabilidade.

As respostas geofísicas de condutividade elétrica, conseguidas com o EM-38, mapearam somente alvos metálicos ou com metal em sua composição, enterrados no SCGR, até a profundidade máxima de 1,5 metro. Notou-se que, quanto maior é o volume de material metálico, maior é a amplitude da anomalia de condutividade. Verificou-se também uma inversão de polaridade (valores negativos) nas respostas obtidas com o equipamento no modo DMV, quando os alvos metálicos estão muito próximos da superfície (até 0,5 metro de profundidade). As anomalias de condutividade indicaram a forma aproximada do alvo, ou seja, tubos/tambores, colocados na horizontal, mostraram anomalias retangulares e tubos/tambores verticalizados apontaram anomalias circulares.

7.2.3 Meio Ambiente

Os tambores metálicos e plásticos, enterrados na área do SCGR do IAG/USP, representam fontes de estudos de meio ambiente, principalmente, da disposição de resíduos.

Com o GPR, todos os tambores de metal enterrados na Linha 4 do SCGR, foram mapeados. Os melhores resultados foram obtidos, mediante o uso das antenas blindadas de 200 MHz, da GSSI. Identificou-se, nos cortes em profundidades, no bloco GPR Quase-3D, de 200 MHz, a geometria e profundidade de todos os tambores metálicos.

O imageamento GPR 2D e o GPR Quase-3D mapearam todos os tambores plásticos enterrados, na Linha 5 do SCGR. Verificou-se o conteúdo dos tambores por meio da polaridade da onda eletromagnética e da amplitude. Percebeu-se uma inversão de polaridade sobre os tambores com água doce e com água salgada, além de uma alta atenuação, abaixo dos tambores preenchidos com água salgada. Notaram-se ainda reflexões de base abaixo dos tambores com água doce.

Foram percebidas as anomalias de condutividade elétrica, conseguidas com o EM-38, nos modos DMH e DMV, sobre os tambores metálicos, enterrados até 1,0 metro de profundidade. As anomalias mostraram maiores amplitudes nos resultados obtidos com o equipamento no modo DMV. Os tambores, enterrados a 1 metro de

profundidade, foram detectados com o EM-38, no modo DMH, devido ao volume de metal dos alvos.

Não foram observadas anomalias de resistividade elétrica, nas Linhas 4 e 5 do SCGR, que evidenciassem a presença de alvos enterrados no solo.

7.3 RECOMENDAÇÕES

A realização de aquisições GPR, do tipo multicobertura, sobre Linhas do SCGR, possibilitarão a obtenção de modelos de velocidade mais reais para a área do sítio.

Aquisições GPR Quase-3D, com antenas de alta e baixa frequências, sobre todo o SCGR, são necessárias para testar os parâmetros de aquisição e de processamento.

O estudo contínuo do SCGR do IAG/USP permitirá que as informações geofísicas, obtidas pela calibração dos alvos, possam ser utilizadas em áreas onde não se têm informações da subsuperfície. Além disso, o SCGR constitui-se numa ferramenta importante para o ensino, pesquisa e a extensão universitária em Geofísica, sendo de grande importância para a nossa comunidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANNAN, A.P., 1992. Ground penetration radar workshop notes. Sensors; Software, Inc., *Internal Report*, 130p.
- ANNAN, A.P., 1996. Transmission dispersion and GPR. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, Vol. 0(2): 125 – 136.
- ANNAN, A. P.; DAVIS, J. L. 1997. Ground penetrating radar - Coming of age at last. Mississauga: Sensors; Software, Inc., 13p. (*Internal Report PEMD#157*).
- ANNAN, A. P., COSWAY, S. W.; REDMAN, J. D., 1991. Water table detection with ground penetrating radar. International Congress of Society of Exploration Geophysical, Houston, USA. In. *Expanded Abstracts...*, p. 494 – 496.
- ANJOS, M.M. dos; ROCHA, P.L.F. da; SILVA, S.F. da; PEDROSO, A.; MARQUES, R.M., 2001. Aplicação de GPR (ground penetrating radar) como ferramenta no diagnóstico ambiental em área industrial. 7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Salvador, BA, In *Expanded Abstracts...*, CD-Rom, p. 293 – 295.
- ANNAN, A.P., 2002. GPR – History, Trends, and Future Developments. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*. Vol 3 (4): 253 – 270.
- AQUINO, V.F., 2000. Métodos geofísicos eletromagnéticos aplicados ao diagnóstico do solo e das águas subterrâneas em área de infiltração de resíduos industriais. *Dissertação de mestrado*, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 121p.
- ARANHA, P.R.A.; BOTELHO, M.A.B., 2001. Resultados da utilização de GPR na localização de cavidades (pockets) no pegmatito de Morro Redondo, Coronel Murta, MG. 7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Salvador, BA, In *Expanded Abstracts...*, p. 340-343.
- BARKER R. D. 1989. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*. Vol. 54: 1031 – 1037.
- BENNETT, D.L.; GEORGE, R.J. 1995. Using the EM38 to measure the effect of soil salinity on Eucalyptus globulus in south-western Australia. *Agriculture Water Management*, Vol. 27: 69 – 86.
- BENSON, A. K., 1995. Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: examples of groundwater contamination, faults, cavities. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 33: 177 – 193.
- BERES, M.B.; HAENI, F.P., 2001. Application of Ground-Penetrating-Radar Methods in Hydrogeologic Studies. *Groundwater*, Vol. 29 (3): 375-386.
- BOGOSLOVSKY VA; OGILVY AA. 1973. Deformations of natural field near drainage structures. *Geophysical Prospecting*, Vol. 21: 716-723.

BOLINELLI JR., H.L. 2004. Piezocone de Resistividade: Primeiros Resultados de Investigação Geoambiental em Solos Tropicais. *Dissertação de Mestrado* (Faculdade de Engenharia), UNESP, Bauru-SP, 168 p.

BOOTH, A.; MURRAY, T.; CLARK, R.; WEST, J.; LINFORD, N. 2004. Archaeological Prospecting using GPR over Electrically Conductive Soils. *EIGGP* poster. Disponível em : <http://www.medalus.leeds.ac.uk/people/a.booth/GlacioSeminar.ppt> (acessado em 20/03/2006)

BORGES, W.R., 2002. Investigações Geofísicas na Borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletrorresistividade. *Dissertação de Mestrado* (Departamento de Geofísica), IAG/USP, 153p.

BORGES, W. R. ; PORSANI, J.L.; SILVA, E.M.A. da; ELIS, V.R.; HODO, F.Y. 2004. Utilização de tomografia elétrica na identificação da interface entre uma cobertura antrópica e sedimentos fluviais na área do Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP. I Simpósio Brasileiro de Geofísica da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo, *In: Anais...*, CD-Rom, 4p.

BRAGA, A. C. de O., 1997. Métodos Geolétricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica – Formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro – SP, Rio Claro, SP. *Tese de Doutorado*, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 169p.

CASTRO, D.L. de; BRANCO, R.M.G.C.; CUNHA, L.S. da; SOUZA, R.C.V.P. de; AUGUSTO, V.A., 2001. Mapeamento de pluma contaminante de hidrocarbonetos a partir de seções GPR em um posto de abastecimento em Fortaleza – Ceará. 7th *International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. Salvador, BA, *In. Expanded Abstracts...*, CD-Rom, 7CISBGf/PS6, p.336-339.

CHAMBERS, J.E.; OGILVY, R.D.; KURAS, O.; KRIPPS, J.C.; MELDRUM, P.I. 2002. 3D electrical imaging of known targets at a controlled environmental test site. *Environmental Geology*, Vol. 41: 690 – 704.

CONYERS, L.B.; GOODMAN, D., 1997. **Ground-Penetrating Radar. An Introduction for Archaeologists**. Altamira Press, 232p.

CORRY, CE. 1985. Spontaneous polarization associated with porphyry sulfide mineralization. *Geophysics*, Vol. 50: 1020-1034.

CORWIN, D.L.; LESCH, S.M. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines. *Agronomy Journal*. Vol. 95:455–471.

CUTRIM, O. A. 1999. Hidrogeologia, Demanda e Consumo de Água em Rondonópolis-MT: Subsídios para o Desenvolvimento Urbano Sustentável. *Tese de Doutorado*, Instituto de Biociências, UFMT, 215p.

DALAN, R. A. 1991. Defining archaeological features with electromagnetic surveys at the Cahokia Mounds State Historic Site. *Geophysics*, Vol. 56(8):1280-1287.

- DANIELS, J. J., 1989. Fundamentals of ground penetrating radar. In: SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, 2, 1989, Golden. In: *Proceedings...*, Golden: SAGEEP'89, p.62 -142.
- DANIELS, J. J., 1996. **Surface Penetrating Radar**. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 300p.
- DANIELS, J.L.; ROBERTS, R.; VENDL, M., 1995. Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 33: 195-207.
- DANIELS, J. 2000. 3D GPR Interpretation: Step-by-Step. 16p. Disponível em : http://www.geology.ohio-state.edu/~jeff/Library/3d_example.pdf
- DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P., 1988. Applications of ground penetrating radar to mining, groundwater and geotechnical projects: Selected case histories. In: Workshop on Ground Probing Radar, Ontario: Geological Survey of Canada, *paper 90-4*, p.49-55.
- DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P., 1989. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, Vol. 37: 531 – 551.
- DEHAINE, J., 2001. Detecção de pluma de contaminação de hidrocarbonetos em subsuperfície pelo método de radar de penetração. *Tese de Doutorado*, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 157.
- DOBRIN, M.B. 1960. **Introduction to geophysical prospecting**. Mc Graw Hill, New York, 446p.
- DOOLITTLE, J.A.; M.E. COLLINS. 1998. A comparison of EM induction and GPR methods in areas of karst. *Geoderma*, Vol. 85: 83–102.
- DRASKOVITS, P.; HOBOT, J.; VERÖ, L.; SMITH, B. 1990. Induced-polarization surveys applied to evaluation of groundwater resources, Pannonian Basin, Hungary. USA. **Investigations in Geophysics, nº 4**. Induced Polarization Applications and Case Histories. Society of Exploration Geophysicists, Ed.Stanley H. Ward, p. 379 – 396.
- DUARTE, O. de O., 2003. **Dicionário Enciclopédico Inglês-Português de Geofísica e Geologia. 2.º ed.**, SBGf/Petrobrás, Rio de Janeiro, RJ, 352p.
- EDWARDS, L. S. 1977. A modified pseudo-section for resistivity and induced polarization. *Geophysics*, Vol. 42(3): 1020–1036.
- ELIS, V. R. 1999. Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos. *Tese de Doutorado*, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro – SP, 264p.
- EVJEN, H.M. 1938, Depth factor and resolving power of electrical measurements: *Geophysics*, Vol. 3: 78–95.
- FEITOSA, A.C.F.; MANOEL FILHO, J. (Coord.). 1997. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. CPRM/LABHID. Fortaleza. 2a. Edição. 389p.

- FERNANDES, C. E. de, 1984. **Fundamentos de Prospeção Geofísica**. Ed. Interciência, Rio de Janeiro – RJ, 190p.
- FRANCO, L. de S., 2001. Levantamento GPR em rochas Carbonáticas na Bacia Sergipe Alagoas. *Dissertação de Mestrado*, Observatório Nacional, Rio de Janeiro – RJ,
- FRISCHKNECHT, F.C.; LABSON, V.F.; SPIES, B.R.; ANDERSON, W.L. 1991. Profiling methods using small sources. In: NABIGHIAN, M.C. (ed.), **Eletrromagnetics Methods in Applied Geophysics. Vol.2: Applications, Part A**. Tulsa: Society of Exploration Geophysics, p. 105 – 270.
- GALLAS, J. D. F, 2000. Principais métodos geolétricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental. *Tese de Doutorado*, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro – SP, 258p.
- GALLAS, J. D. F. 2005. O método do potencial espontâneo (SP): uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, Vol. 23 (2): 133 – 144.
- GANDOLFO, O. C. B. 1999. Aplicação da sísmica de reflexão de alta resolução e do radar de penetração no solo (GPR): um estudo comparativo. *Dissertação de mestrado*, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro – SP, 110p.
- GAZDAG, J.; SGUAZZERO, P. 1984. Migration of Seismic Data. *Proceedings of the IEEE*, 72 (10): 1302 – 1315.
- GEONICS. 1999. *EM38 ground conductivity meter operating manual*. Geonics Ltd, Mississauga, Ont. Canada, 27p.
- GEOTOMO. 2002. RES2DMOD. Ver. 3.01. Rapid 2D resistivity forward modelling using the finite difference and finite-element methods. *User's Manual*. 15p.
- GEOTOMO. 2003a. RES2DINV Version 3.53. for Windows 98/ME/2000/NT/XP. Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. *User's Manual*, 129p.
- GEOTOMO. 2003b. RES3DINV Version 2.13. for Windows 98/ME/2000/NT/XP. Rapid 3D resistivity; IP inversion using the least-squares method. *User's Manual*, 66p.
- GOLDEN SOFTWARE, INC. 1997. Surfer 6.0 for Windows. *User guide*. 340p.
- GOLDSTEIN, N.E.; BENSON, S.M.; ALUMBOUGH, D. 1990. Saline groundwater plume mapping with electromagnetics. In: Ward, S.H. (ed.), **Geotechnical and Environmental Geophysics. Vol.2: Environmental and Groundwater**. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 17- 25.
- GOMES, M.J. da S., 2003. Utilização de métodos geofísicos em sambaquis fluviais, região do Vale do Ribeira de Iguape. *Dissertação de Mestrado* (Departamento de Arqueologia), FFLCH/USP, São Paulo, SP, 135p.

- GRANDJEAN, G.; GOURRY, J. C.; BITRI, A., 2000. Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications: study on a test site. *Journal of Applied Geophysics*, Elsevier, 45: 141-156.
- GRASMUECK, M.; WEGER, R.; HORSTMAYER, H. 2004. How dense is dense enough for a “real” GPR Survey?, 73rd Ann. Internat. Mtg: Soc. of Expl. Geophys, *In Expanded Abstracts...*, p. 1180-1183.
- GRASMUECK, M.; WEGER, R.; HORSTMAYER, H. 2005. Full-resolution 3D GPR imaging. *Geophysics*, Vol. 70 (1): K12-K19.
- GRIFFITHS, D.H.; BARKER, R.D.; FINCH, J.W. 1981. Recent Applications of electrical resistivity and induced polarization methods to hydrogeological problems. *A Survey of British Hydrogeology*, The Royal Society, London, p. 85-96.
- GROENEMBOON, J.; VAN DER KRUG, J.; ZEEMAN, J.H. 2001. 3D GPR data acquisition and the influence of positioning errors on image quality. *Extended Abstract EAGE*, 63rd Conference and Technical Exhibition, Amsterdam, 11-15 June, P141, 4p. Disponível em: http://www.aug.geophys.ethz.ch/people/personal_home/jan/pdf/eage2001_image_quality.pdf., acessado em 13/04/2005.
- GSSI. 2003. RADAN for Windows. *User's Manual*. Version 5.0. Geophysical Survey Systems, Inc., North Salem, NH, 135p.
- HAMMON III, W. S.; McMECHAN, G. A.; ZENG, X., 2000. Forensic GPR: finite-difference simulations of responses from buried human remains. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 45: 171 – 186.
- HIODO, F. Y.; SILVA, N.; ELIS, V. R.; GALHARDO FILHO, L.; SILVA, J. E. da. 2001. Projeto de um sistema semi-automatizado de medidas de potencial elétrico natural ou induzido do solo para aplicações geolétricas. 7.º International Congress of The Brazilian Geophysical Society, Salvador, BA, *In Expanded Abstracts...*, CD-Rom, p. 136-139.
- HIRAKATA, A.M.; STRIEDER, A.J., 2001. GPR technique applied to mineral exploration of geodes in basalts: agate geode deposits (RS, BRAZIL). 7.º International Congress of The Brazilian Geophysical Society, Salvador, BA, *In Expanded Abstracts...*, CD-Rom, p. 308-311.
- INTERPEX LIMITED. 1997. RESIX-IP Version 2.0 Resistivity and Induced Polarization Data Interpretation Software. *User's Manual*, Interpex Limited, Golden, Colorado, USA, “paginação irregular”.
- IRITANI, M. A., 1993. Potencial hidrológico da Cidade Universitária de São Paulo. *Dissertação de Mestrado*, IG/USP, 63p.
- IRIS INSTRUMENTS. 1993. *Syscal R2: Operating Manual*. Orleans, France. 72 p.
- ISAACSON, J.R.; HOLLINGER, E.; GUNDRUM, D.; BAIRD, J. 1999. A Controlled Archaeological Test Site Facility in Illinois: Training and Research in Archaeogeophysics. *Journal of Field Archaeology*, Vol. 26(2):227-236.

JOL, H. M.; SMITH, D. G., 1995. Ground penetrating radar: antenna frequencies and maximum probable depths of penetration in Quaternary sediments. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 33: 93 – 100.

KAUFMAN, A.A.; KELLER, G.A. 1983. **Frequency and Transient Sounding**. Amsterdam, Elsevier, 685 p.

KELLER, G.V., 1987. Rock and mineral properties. **Investigations in Geophysics, nº 3. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics**. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Misac N. Nabighian, Vol.1, p.13-51.

KELLER, V. G.; FRISCHKNECHT, F. C. 1966. **Electrical methods in geophysical prospecting**. Oxford, Pergamon Press. 517 p.

KITCHEN, N.R., SUDDUTH, K.A.; DRUMMOND, S.T. 1996. Mapping of sand deposition from 1993 midwest floods with electromagnetic induction measurements. *J. Soil and Water Cons*, Vol. 51: 336 – 340.

LAGO, A. L., 2004. Aplicação integrada de métodos geofísicos em área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP, *Dissertação de Mestrado*, IAG/USP, São Paulo/SP, 110 p.

LEICA, 1999. TPS 300 Basic Series. *Manual*. Versão 2.1. 128p.

LIMA, R.S. 2006. Otimização de Perfis de Reflexão GPR Sobre Manilhas de Concreto e Tubulações de PVC Instaladas no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP. *Dissertação de Mestrado*, IAG/USP, São Paulo/SP, 131p.

LOKE, M. H. 2004. A practical guide to 2-D and 3-D surveys. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. 136p. Disponível em: <http://www.geoelectrical.com/coursenotes.zip>, acessado em 20/05/2005.

LOKE M.H.; BARKER R.D. 1996. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, Vol. 44: 499-523.

LOKE, M.H.; DAHLIN, T. 2002. A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion, *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 49(3): 149-162.

LUALDI, M.; ZAUZI, L.; BINDA, L. 2003. Aquisition and Processing requirements for high quality 3D reconstructions from GPR investigations. *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering*. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v073/v073.htm>, acessado em 15/04/2005.

LUIS, J.G.; BARRADAS, J.A.; BOAVENTURA, C., 2001. Levantamento Geofísico para Arqueologia no Outeiro da Glória, Porto Seguro-BA. 7.º International Congress of The Brazilian Geophysical Society, Salvador, BA, *In Expanded Abstracts...*, CD-Rom, p. 719 – 722.

MALÅ GEOSCIENCE. 1997. RAMAC/GPR. Version 2.28. Software Manual, August, 66p.

- MACLEAN, H.D., DICKERSON, J.W., HASBROUCK, J.C. e COTTER, E.T. 1991. Geophysical Surveys for Underground Storage Tank Locations Hickam Air Force Base, Hawaii: A Case Study. In: *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Knoxville, USA, p. 323 – 341.
- McNEILL, J. D. 1980. Electromagnetics terrain conductivity measurement at low induction numbers. *Tech. Note TN-6*, Geonics Ltd, Mississauga, Ont., Canadá, 13p.
- McNEILL, J.D. 1990. Use of Electromagnetic Methods for Groundwater Studies. In: WARD, S.H. **Investigations in Geophysics No. 5, Geotechnical and Enviromental Geophysics, Vol. I: Review and Tutorial**. Tulsa, Society of Exploration Geophysicists. p.147-189.
- MENDONÇA, C. A.; DIOGO, L. A.; PORSANI, J. L.; HODO, F. Y., 1999. Ensino de Geofísica Aplicada. O campus universitário como laboratório de exploração. 6.º International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, RJ, In *Expanded Abstracts...*, SBGf, CD-Rom, 4p.
- MONIER-WILLIAMS, M.E., GREENHOUSE, J.P., MENDES J.M.,; ELLERT, N. 1990. Terrain conductivity mapping and topographic corrections at three waste disposal sites in Brazil: In: WARD, S.H. **Environmental and Groundwater, Geotechnical and Enviromental Geophysics, Vol. II: Review and Tutorial**. Tulsa, Society of Exploration Geophysicists. 41-45.
- MOURA, H.P., 2002. Emprego da eletrorresistividade e da polarização induzida na caracterização geolétrica de áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos. *Tese de Doutorado*, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro – SP, 231p.
- MOUTINHO, L., 2003. Processamento de dados GPR adquiridos no Rio Taquari - Pantanal Matogrossense, com ênfase em deconvolução. *Dissertação de Mestrado* (Departamento de Geofísica), Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, IAG/USP, 115p.
- NASCIMENTO, C.T.C. do, 1998. Comparação de dados de levantamentos geofísicos e de campanhas de amostragem em estudos de contaminação do subsolo. *Dissertação de Mestrado* (Departamento de Engenharia Civil), Faculdade de Tecnologia, UnB, 149p.
- OLAYINKA, A.I.; YARAMANCI, U. 2000. Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion. *Journal of Applied Geophysic*, Vol. 45: 63–81.
- OLHOEFT, G. R. 1998. Electrical, magnetic and geometric properties that determine ground penetrating radar performance. 7th International Conference on Ground Penetrating Radar, The Univ. of Kansas, Lawrence, USA, In: *Proceedings...*, p.177-182.
- OLIVEIRA, C., 2006. Caracterização geofísica de solo para uso em agricultura de precisão. *Dissertação de Mestrado* (Departamento de Geofísica), IAG/USP, 139p.
- ORELLANA, E., 1972. **Prospeccion geoelectrica en corriente continua**. Madrid, Ed. Paraninfo, Biblioteca Técnica Philips, 523p.

ORTEGA, R.A., 2007. Localização e delineamento de plumas de contaminação por hidrocarbonatos através dos métodos GPR e Eletorresistividade. Dissertação de Mestrado (Departamento de Geofísica), IAG/USP, 114p.

PARASNIS, D. S., 1970. **Princípios de Geofísica Aplicada**. Trad. E. Orellana (Original – 1962), Madrid, Ed. Paraninfo, 208p.

PANIAGUA, J.; DEL RÍO, M.; RUFO, M. 2004. Test site for the analysis of subsoil GPR signal propagation. 10th International Conference on Ground Penetrating Radar, Delft, The Netherlands, *In. Proceedings...*, p. 751-754.

PATRA, H.P.; MALLICK, K. ,1980. **Geosounding principles, 2: Time-varying geoelectric soundings**. Amsterdam: Elsevier.

PESTANA, R. C., BOTELHO M. A. B. 1997. Migração de dados de radar (GPR) com correção topográfica simultânea. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 15(1): 3 – 10.

PORSANI, J.L. ; RODRIGUES, A. R. ; CALLARI, R. ; ANTUNES, P. T. 1994a. O método GPR. *Comunicação Técnica Interna*, Petrobrás/Cenpes/Segef, Rio de Janeiro, RJ.

PORSANI, J.L.; RODRIGUES, A.R.; CALLARI, R.; ANTUNES, P.T.; ROSA FILHO, J. 1994b. Demonstração do GPR. *Relatório Técnico Interno*, Petrobrás/Cenpes/Segef, Rio de Janeiro, RJ.

PORSANI, J.L.; RODRIGUES, A.R.; CALLARI, R.; ANTUNES, P.T.; ROSA FILHO, J.; AIRES, J. 1995. GPR: uma nova ferramenta para aquisição de dados Geofísicos de muito alta resolução – Experimental na Bacia de São José de Itaboraí – RJ. *Comunicação Técnica Interna*, Petrobrás/Cenpes/Segef, Rio de Janeiro, RJ.

PORSANI, J. L., RODRIGUES, A. R., 1995a. GPR: uma nova ferramenta para aquisição de dados geofísicos de muito alta resolução - Levantamentos Experimentais. Rio de Janeiro: Petrobrás/Cenpes/Segef. (*Relatório Técnico Interno*, Fevereiro/95).

PORSANI, J. L., RODRIGUES, A. R, 1995b. O método GPR aplicado à caracterização de reservatórios: um exemplo na Bacia Potiguar - RN. Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 4, 1995, Rio de Janeiro. *In. Resumos Expandidos...*, Rio de Janeiro: SBGf, Vol. 2: 843 – 845.

PORSANI, J.L., 1999. Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado – SP. *Tese de Doutorado*, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 145p.

PORSANI, J.L., 2002. Investigações Geofísicas de Superfície e de Poço na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo. Processo 99/12215-2 Fapesp, *Relatório de Pesquisa*, São Paulo - SP.

PORSANI, J.L., FILHO, W.M., ELIS, V.R., SHIMELES, F., DOURADO, J.C.; MOURA, H.P., 2004a. The Use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, Vol. 55 (3-4):199-209.

- PORSANI, J.L.; BORGES, W.R.; ELIS, V.R.; DIOGO, L.A.; HODO, F.Y.; MARRANO, A.; BIRELLI, C.A. 2004b. Investigações Geofísicas de Superfície e de Poço no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG-USP. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 22 (3):245 – 258.
- PORSANI, J.L. Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano, Meio Ambiente e Arqueologia: Estudo Sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. Relatório de Pesquisa (Processo Fapesp n.º 99/12217-5), São Paulo, SP, 84p.
- PORSANI, J.L.; BORGES, W.R.; RODRIGUES, S.I.; RODRIGUES, S.I.; HODO, F.Y. 2006. O Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP: Instalação e Resultados GPR 2D-3D. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol. 24: 49 – 61.
- PRADO, R.L. 2000. A sísmica de reflexão e o radar de penetração no solo na investigação geológico-geotécnica em ambientes urbanos: Um estudo na cidade de São Paulo – SP, Brasil. *Tese de Doutorado*, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 174p.
- REIN, A.; HOFFMANN, R.; DIETRICH, P. 2004. Influence of natural time-dependent variations of electrical conductivity on DC resistivity measurements. *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 285:215-232.
- REYNOLDS, J.M., 1997. **An introduction to applied and environmental geophysics**. John Wiley; Sons Ltd., 806p.
- RHOADES, J.D.; MANTEGHI, N.A.; SHOUSE, P.J.; ALVES, W.J. 1989. Soil Electrical Conductivity and Soil Salinity: New Formulations and Calibrations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 53:433 – 439.
- ROBINSON D.A.; LEBRON I.; LESCH S.; SHOUSE P. 2004. Temperature effects on EM-38 instrument response used for bulk soil electrical conductivity mapping. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 68: 339 – 345.
- RODRIGUES, S.I., 2004. Caracterização GPR de tambores metálicos e plásticos: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. **Dissertação de Mestrado** (Departamento de Geofísica), IAG/USP, São Paulo, SP, 89p.
- RODRIGUES, S.I.; PORSANI, J.L. 2006. Utilização do GPR para Caracterizar Tambores Plásticos enterrados no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP. *Revista Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro, Vol. 24, p. 157 – 168.
- RODRIGUES, S.I.; PORSANI, J.L.; GIANNINI, P.C.F.; BLASIS, P.de. 2006. GPR Investigations in Coastal Sambaqui Archaeological Site in Santa Catarina, South Brazil: Preliminary Results. 12th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Helsinki, In: *Expanded Abstracts...*, CD-Rom, 4p.
- RODRIGUES, A.R.; PORSANI, J.L., 1995. Aplicações do método GPR na geofísica ambiental: localização de área com tanque desenterrado e dutos. 4th International Congress of The Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, RJ, In *Expanded Abstracts...*, Vol. 2:942 – 944.

- RODRIGUES, A.R.; PORSANI, J.L., 1997. Diferentes litologias, diferentes situações, diferentes respostas. A utilização do método GPR como ferramenta de suporte à geologia. 5th International Congress of The Brazilian Geophysical Society, São Paulo, SP, *In Expanded Abstracts...*, Vol. 1: 540 – 543.
- ROY, A.; APPARAO, A., 1971. Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, Vol. 36(5), 943-959.
- SALEM, A.; RAVAT, D.; GAMEY, T. J.; USHIJIMA, K. 2002. Analytic signal approach and its applicability in environmental magnetic investigations. *Journal of Applied Geophysics*, Elsevier, 49: 231-244.
- SALGADO-LABOURIAU, M. L. S. 1994. **História Ecológica da Terra**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, Versão 1, 307 p.
- SANDMEIER, K.J., 2006. REFLEXW Version 4.2, Windows 9x/2000/NT. Program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. *Manual do Software*, Karlsruhe, Germany, 209p.
- SASAKI, Y. 1989. Two-dimensional joint inversion of magnetotelluric and dipole-dipole resistivity data. *Geophysics*, Vol. 54(2): 254 – 262.
- SASAKI, Y. 1994. 3-D resistivity inversion using the finite element method. *Geophysics*, Vol. 59: 1839 – 1848.
- SAUCK, W.A.; ALVES, J.G.V.; LUIZ, J.G., 1995a. GPR in the middle Amazon Basin, Amazonas State, Brazil. 4th International Congress of The Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, RJ, *In Expanded Abstracts...*, Vol. 2: 972 – 973.
- SAUCK, W.A., ALVES, J.G.V.; LUIZ, J.G., 1995b. Successfull applications of GPR in the lower Amazon Region, Belém, Pará, Brazil. 4th International Congress of The Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, RJ, *In Expanded Abstracts...*, Vol. 2: 974 – 975.
- SHARMA, P.V., 1986. **Geophysical methods in geology**. 2^a ed. New York: Elsevier.
- SHIRAIWA, S.; LISOVSKY, S. P.; ELIS, V. R.; PORSANI, J. L.; BORGES, W. R., 2001. Estudos Geofísicos Integrados no Lixão de Cuiabá, MT, Brasil – Resultados Preliminares. 7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Salvador, BA, *In Expanded Abstracts...*, CD-rom.
- SILVA, E.M.A. da, 2004. Aplicação de Resistividade e Polarização Induzida na Investigação de objetos enterrados em Sítio Controlado do IAG/USP, *Dissertação de Mestrado* (Departamento de Geofísica), IAG/USP, São Paulo, SP, 79p.
- SLOB, E.C.; GROENEMBOOM, J.; FOKKEMA, J.T. 2003. Automated Acquisition and Processing of 3D GPR Data for Object Detection and Characterization. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, Vol. 4 (1): 5 – 18.
- SOUZA Jr., A.S. 2002. Investigações geofísicas em pedreira de granito ornamental no município de Capão Bonito-SP, utilizando-se os métodos GPR e eletrorresistividade. *Dissertação de Mestrado* (Departamento de Geofísica), IAG/USP, 132p.

- SOUZA, L.A.P. de; PORSANI, J.L.; SOUZA, O.C. de; MOUTINHO, L., 2001. Levantamento Experimental GPR no Rio Taquari, Bacia do Pantanal Matogrossense. 7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Salvador, BA, *In Expanded Abstracts*, CD-Rom, p. 320-323.
- STRATTON, J. A., 1941. **Electromagnetic Theory**. McGraw Hill Book Company, New York, 615p.
- STRONGMAN, K. B., 1992. Forensic applications of ground penetrating radar. *In*: Ground Penetrating Radar, ed. J. Pilon, Geological Survey of Canada, *Paper 90-4*, p. 203-211.
- SUDDUTH, K.A.; DRUMMOND, S.T.; KITCHEN, N.R. 2001. Accuracy issues in eletromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. Elsevier, *Computers and Eletronics in Agriculture*, Vol. 31: 239 – 264.
- SUDDUTH, K.A.; KITCHEN, N.R.; BOLLERO, G.A.; BULLOCK, D.G.; WIEBOLD, W.J. 2003. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. *Agronomy Journal*, Vol. 95:472–482.
- SUGUIO, K., 1980. **Rochas Sedimentares. Propriedades, Gênese, Importância Econômica**. Ed. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 500p.
- SUMNER, J.S. 1976. **Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration**. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 227p.
- TABBAGH, A. 1986. Applications and advantages of the Slingram electromagnetic method for archaeological prospecting. *Geophysics*, Vol. 51 (3):576-584.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E., 1990. **Applied Geophysics**. Second Edition, Cambridge University Press, United Kingdom, 770p.
- TOPP, G. C., DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, Vol. 16 (3): 574 – 582.
- TRIAANTAFILIS. J.; LASLETT, G.M.; MCBRATNEY, A.B. 2000. Calibrating an electromagnetic induction instrument to measure salinity in soil under irrigated cotton. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 64:1008 – 1017.
- ULRYCH, T. J., de LIMA, O. A. L.; SAMPAIO, E. E. S., 1994. In search of plumes: a GPR odyssey in Brazil. INTERNATIONAL CONGRESS OF SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICAL, Los Angeles, USA. *In Expanded Abstracts...*, p.569-572.
- ULRIKSEN, C. P. F., 1982. Application of impulse radar to civil engineering. *Doctoral Thesis* - Lund University of Technology, 179p.
- VAN DAM, R. L. 2001. Causes of ground-penetrating radar reflections in sediment. *Doctoral Thesis* – Faculty of Earth Sciences, Vrije Universiteit, The Netherlands, 110p.

VICKERY, A.C.; HOBBS, B.A. 2002. The effect of subsurface pipes on apparent-resistivity measurements. *Geophysical Prospecting*, Vol. 50: 1 – 13.

WARD, S. H., HOHMANN, G. W., 1987. Electromagnetic theory for geophysical applications: Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, ed. Misac N. Nabighian, Vol.1, p.131-311. (**Investigations in Geophysics, n.3**).

WARD, O. S. H. 1990. **Resistivity and Induced Polarization Methods. Geotechnical and Environmental Geophysics**, Volume 1: Review and Tutorial. Society of Exploration Geophysics, Tulsa, OK, p. 147-189.

WEST, R. E.; WIEDUWILT, W. G.; HALL, D. K. 1983. Discovery of a mineralized breccia pipe using gradient array induced polarization. *Geophysics*, Vol. 48 (10):1381-1388.

XAVIER NETO, P.; OLIVEIRA Jr., J.G. de; MEDEIROS, W.E. de., 2001. Processamento de dados de GPR como uma etapa imprescindível para obtenção de boas imagens sobre solos condutivos: um exemplo associado a localização de dutos. 7th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Salvador, BA, *In. Expanded Abstracts*, CD-Rom, p. 293-295.

YELF, R. 2004. Where is True Time Zero? 10th International Conference on Ground Penetrating Radar, Delft, The Netherlands, *In. Proceedings...*, p. 279-282.

YILMAZ, O., 1987. *Seismic Data Processing*. Tulsa: Society of Exploration Geophysics Press, 526p.

YOUNG, J. D.; LEON, P. J., 1996. A brief history of GPR fundamentals and applications. International Conference on Ground Penetrating Radar, Sendai, Japan, *In. Proceedings...*, p.5 – 14.

YU FENG, CHANG. 2006. GPR em estudos arqueológicos: Estudo no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG. *Trabalho de Graduação II* (Departamento de Geofísica), IAG/USP, 32p.

APÊNDICE A

A1 – Figura mostra os histogramas de distribuição dos tempos gastos para a aquisição dos perfis GPR nos modos contínuo [(a) perfis com antenas blindadas de 100 MHz, (b) perfis com antenas não-blindadas de 100 MHz acopladas no trenó, (c) perfis com antenas não-blindadas de 200 MHz acopladas ao trenó, (d) perfis com antenas blindadas de 250 MHz, (e) perfis com antenas blindadas de 500 MHz, (f) perfis com antenas blindadas de 1 GHz] e passo a passo [(g) perfis com antenas não-blindadas de 100 MHz e (h) perfis com antenas não-blindadas de 200 MHz].

APÊNDICE B

B1 – Gráficos mostram os dados originais, os dados sintéticos e os modelos ajustados para as SEV's adquiridas dentro da área do SCGR do IAG/USP antes da instalação dos alvos. (a) SEV1A-NS e SEV1B-EW. (b) SEV2A-NS e SEV2B-EW.

APÊNDICE B

(a)

SEV 3A e SEV 3B

(b)

SEV 4A e SEV 4B

B2 – Gráficos mostram os dados originais, os dados sintéticos e os modelos ajustados para as SEV's adquiridas dentro da área do SCGR do IAG/USP antes da instalação dos alvos. (a) SEV3A-NS e SEV3B-EW. (b) SEV4A-NS e SEV4B-EW.

APÊNDICE B

B3 – Gráficos mostram os dados originais, os dados sintéticos e os modelos ajustados para as SEV's adquiridas dentro da área do SCGR do IAG/USP antes da instalação dos alvos. (a) SEV5A-NS e SEV5B-EW. (b) SEV6A-NS e SEV6B-EW.

APÊNDICE B

(a)

SEV 7A e SEV 7B

(b)

SEV 8

B4 – Gráficos mostram os dados originais, os dados sintéticos e os modelos ajustados para as SEV's adquiridas dentro da área do SCGR do IAG/USP antes da instalação dos alvos. (a) SEV7A-NS e SEV7B-EW. (b) SEV8-EW.

APÊNDICE B

B5 – Gráficos mostram os dados originais, os dados sintéticos e os modelos ajustados para as SEV's adquiridas dentro da área do SCGR do IAG/USP antes da instalação dos alvos. (a) SEV9-EW. (b) SEV10-NS.

APÊNDICE B

(a)

SEV 11

B6 – Gráfico mostra os dados originais, os dados sintéticos e o modelo ajustado para a SEV11-NS adquirida dentro da área do SCGR do IAG/USP antes da instalação dos alvos.