UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Geofísica

***Caracterização GPR de Tambores Metálicos e Plásticos:
Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP***

Selma Isabel Rodrigues

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo para a obtenção do Título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Porsani

São Paulo

2004

*Há homens que lutam um dia, e são bons;
há outros que lutam um ano e são melhores;
há aqueles que lutam muitos anos, e são muito bons;
mas há aqueles que lutam toda a vida,
e esses são os imprescindíveis. (Bertolt Brecht)*

À minha querida mãe!

AGRADECIMENTOS

Ao Deus Eterno, que nos guia, nos ampara e nos ilumina. Agradeço-te Amigo, Pai... Agradeço-te por teu infinito amor, o qual me fortificou nos momentos mais difíceis desta caminhada.

Ao Professor Doutor Jorge Luís Porsani, pela orientação incessante, apoio, valiosas críticas construtivas, conhecimentos transmitidos e pelo exemplo de seriedade e competência. *Obrigada pelo voto de confiança.*

Ao Paulinho, *meu amor*, que sempre me encorajou a prosseguir, mesmo frente às dificuldades. Por ser compreensivo nos momentos em que a minha ausência foi necessária e nas crises as quais passei. Pelas palavras de amor, carinho e estímulos. Por ser mais que um namorado, me consolando com sua energia espiritual e transmitindo-me segurança. *Você é muito importante e essencial em minha vida!*

À minha amada mãe, por tudo que me ensinou e ainda me ensina, pela harmonia, fé, esperança e simplicidade... A esta pessoa que me mostrou que a sabedoria vai além das cadeiras da universidade... Obrigada mãe, por seu amor incondicional, você é a razão da minha persistência e luta.

Ao meu pai e meus irmãos: Íris, Gordo, Celo, Beto e Iza, essenciais em minha vida, pelo amor e apoio irrestrito... *Amo vocês!*

Aos meus familiares pelo carinho e afeto.

A Elizete (Emas) pela grande amizade a mim ofertada, por seus sábios conselhos, disposição e constantes auxílios, e claro, pela lembrança de todos os momentos que passamos juntas....Valeu amiga!

A grande amiga Manuelle pelo apoio, paciência, autenticidade, conselhos, discussões relevantes ao trabalho e por tudo que me ensinou em tão pouco tempo (Obrigada cara – baixa). A Ana pela amizade e apoio. A Alanna pelo carinho e atenção. Ainda, agradeço a Manuelle, Ana e Alanna, pessoas tão especiais por me hospedarem no CRUSP e por terem sido excelentes anfitriãs.

Ao amigo Welitom pela paciência, benevolência, auxílio no desenvolvimento de toda a pesquisa e leitura crítica da dissertação.

Ao Alexandre pela amizade, atenção, auxílio e magia.

A Aline, Érika, Fábio e Rodinei pela amizade, respeito e momentos de descontração.

Ao técnico Ernande, pela amizade e pelos constantes auxílios nos trabalhos de campos.

Aos alunos da Pós-Graduação pelos momentos felizes os quais compartilhamos dia-a-dia, durante a minha trajetória no IAG: Cláudia, Danillo, Eduardo, Gelvan, Leandro, Lucieth, Marcelo, Nilton, Oleg, Robson e Soraya.

As minhas amigas de muitos anos: Bá, Luciana, Maristela, Mônica, Tati e Vivian, pelo incentivo e por acreditarem em meu potencial.

Aos meus futuros sogros (Neuza e Jorge) pelo carinho e apoio.

Ao Professor Doutor Francisco Yukio Hiodo por desenvolver equipamentos de forma a otimizar os trabalhos de campo e pelas proveitosas discussões.

Aos Professores do Departamento de Geofísica pelos preciosos conhecimentos mediados, em especial a: Carlos Alberto Mendonça, Eder Cassola Molina, Jesus Antonio Berrocal Gómez, Leila Soares Marques, Liliana Alcazar Diogo, Naomi Ussami, Renato Luiz Prado, Vagner Roberto Elis, Wladimir Shukowsky e Yára Regina Marangoni.

Aos Professores do CEFAM, SENAI e FATEC-SP pelos conhecimentos básicos essenciais à minha formação.

Aos membros da Banca Examinadora.

A CAPES pela bolsa de mestrado concedida e à FAPESP pelo apoio financeiro (Processo No. 02/07509-1).

Aos funcionários do IAG pela atenção e dedicação, em especial a: Aparecida de Fátima, Daniely Leite, Maria Perpétua, Rosemary Feijó e Virgínia Macedo.

À equipe de segurança do IAG.

À Prefeitura da Cidade Universitária por disponibilizar equipamentos e funcionários, auxiliando as escavações das trincheiras.

Ao Instituto de Física da USP por permitir o uso de parte do seu terreno para a implantação do SCGR-IAG.

"Aprender para nós é construir, reconstruir, constatar para mudar, o que não se faz sem abertura ao risco e à aventura do espírito." (Paulo Freire)

Carpiem Diem

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABELAS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	01
1.1 Objetivos da pesquisa	02
1.2 Organização da Dissertação	02

CAPÍTULO 2

O SÍTIO CONTROLADO DE GEOFÍSICA RASA DO IAG	04
2.1 Revisão Bibliográfica	04
2.2 Localização da Área de Estudos	09
2.3 Descrição das Linhas de Estudos	11

CAPÍTULO 3

O MÉTODO GPR	20
3.1 Histórico do Método	20
3.2 Princípios e Fundamentação Teórica	21

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÕES NUMÉRICAS GPR 2D	30
4.1 Revisão Bibliográfica	30
4.2 O Método das Diferenças Finitas	33
4.3 Resultados das Simulações GPR 2D	38

CAPÍTULO 5

AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS	50
5.1 Sistema de Aquisição dos Dados GPR	50
5.2 Testes Práticos com o Rebocador de Antenas “trenó”	51
5.3 Aquisição dos Dados GPR “antes” da Instalação do SCGR	55
5.3.1 Processamento e Interpretação dos Dados	58
5.4 Aquisição dos Dados GPR “depois” da Instalação do SCGR	68
5.4.1 Processamento e Interpretação dos Dados	69

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	81
---	-----------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
---	-----------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Localização da área de estudos	10
Figura 2.2. Mapa do SCGR com a disposição das linhas	15
Figura 2.3. Disposição espacial dos tambores metálicos na Linha 4 do SCGR	16
Figura 2.4. Disposição espacial dos tambores plásticos na Linha 5 do SCGR	16
Figura 2.5. Escavação das trincheiras para a instalação dos alvos no SCGR	18
Figura 2.6. Tambor Metálico	18
Figura 2.7. Tambor de Plástico (PVC)	18
Figura 2.8. Área do SCGR-IAG após a recuperação da paisagem	19
Figura 3.1. Ilustração da reflexão do sinal EM em subsuperfície	22
Figura 3.2. Perdas de energia da propagação das ondas eletromagnéticas (modificada de Reynolds, 1997)	29
Figura 4.1. Malha geométrica 2D utilizada na discretização do modelo	34
Figura 4.2. Simulação GPR 2D da Linha 4, utilizando antenas de 100 MHz	38
Figura 4.3. Simulação GPR 2D da Linha 4, utilizando antenas de 200 MHz	39
Figura 4.4. Simulação GPR 2D da Linha 4, utilizando antenas de 300 MHz	40
Figura 4.5. Simulação GPR 2D da Linha 4, utilizando antenas de 500 MHz	40
Figura 4.6. Simulação GPR 2D da Linha 5, utilizando antenas de 100 MHz	41
Figura 4.7. Disposição espacial de uma tubulação de PVC vazia	42
Figura 4.8. Simulação GPR 2D de uma tubulação de PVC vazia com antenas de 100 MHz	42
Figura 4.9. Disposição espacial de um tambor de plástico preenchido com água doce	44
Figura 4.10. Simulação GPR 2D para o tambor preenchido com água doce, utilizando antenas de 100 MHz	44

Figura 4.11. Simulação GPR 2D da Linha 5, utilizando antenas de 200 MHz	46
Figura 4.12. Simulação GPR 2D da Linha 5, utilizando antenas de 300 MHz	46
Figura 4.13. Simulação GPR 2D da Linha 5, utilizando antenas de 500 MHz	47
Figura 4.14. Simulação GPR 2D da Linha 4, utilizando antenas de 100 MHz, $\Delta x = 0.10$ m	48
Figura 4.15. Simulação GPR 2D da Linha 4, utilizando antenas de 100 MHz, $\Delta x = 0.20$ m	48
Figura 4.16. Simulação GPR 2D da Linha 5, utilizando antenas de 100 MHz, $\Delta x = 0.10$ m	49
Figura 4.17. Simulação GPR 2D da Linha 5, utilizando antenas de 100 MHz, $\Delta x = 0.20$ m	49
Figura 5.1. Módulos do sistema GPR	51
Figura 5.2. Trenó utilizado para rebocar as antenas não blindadas de 100 MHz	52
Figura 5.3. Aquisição de dados com antenas não blindadas de 200 MHz acopladas ao trenó ...	53
Figura 5.4. Perfil GPR “A” obtido com antenas de 100 MHz, <i>stack</i> de 64, $\Delta x = 0.20$ m	54
Figura 5.5. Perfil GPR “B” obtido com antenas de 100 MHz, <i>stack</i> de 32, $\Delta x = 0.20$ m	54
Figura 5.6. Perfil GPR “C” obtido com antenas de 100 MHz, <i>stack</i> de 32, $\Delta x = 0.05$ m	55
Figura 5.7. Perfil GPR “D” obtido com antenas de 200 MHz, <i>stack</i> de 32, $\Delta x = 0.05$ m	55
Figura 5.8. Arranjos de campo utilizados para as várias antenas do GPR	57
Figura 5.9. Fluxograma do processamento dos dados GPR.....	58
Figura 5.10. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 100 MHz não blindadas, modo passo-a-passo, Δx de 0.2 m	60
Figura 5.11. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 100 MHz não blindadas, modo contínuo – trenó, Δx de 0.05 m	60
Figura 5.12. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 100 MHz blindadas, modo contínuo, Δx de 0.05 m	61
Figura 5.13. Descrição litológica das trincheiras na Linha 4 (modificado de Borges, 2004)	62
Figura 5.14. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 200 MHz não blindadas, modo passo-a-passo, Δx de 0.2 m	63

Figura 5.15. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 200 MHz não blindadas, modo contínuo – trenó, Δx de 0.05 m	63
Figura 5.16. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 500 MHz blindadas, modo contínuo, Δx de 0.05 m	64
Figura 5.17. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 100 MHz não blindadas, modo passo-a-passo, Δx de 0.2 m	64
Figura 5.18. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 100 MHz não blindadas, modo contínuo – trenó, Δx de 0.05 m	65
Figura 5.19. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 100 MHz blindadas, modo contínuo, Δx de 0.05 m	65
Figura 5.20. Descrição litológica das trincheiras na Linha 5 (modificado de Borges, 2004)	66
Figura 5.21. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 200 MHz não blindadas, modo passo-a-passo, Δx de 0.2 m	67
Figura 5.22. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 200 MHz não blindadas, modo contínuo – trenó, Δx de 0.05 m	67
Figura 5.23. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 500 MHz blindadas, modo contínuo, Δx de 0.05 m	68
Figura 5.24. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 100 MHz não blindadas, modo passo-a-passo, Δx de 0.2 m	70
Figura 5.25. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 100 MHz não blindadas, modo contínuo - trenó, Δx de 0.05 m	71
Figura 5.26. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 100 MHz blindadas, Δx de 0.05 m	72
Figura 5.27. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 200 MHz não blindadas, modo passo-a-passo, Δx de 0.2 m	73
Figura 5.28. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 200 MHz não blindadas, modo contínuo - trenó, Δx de 0.05 m	73

Figura 5.29. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 500 MHz blindadas, Δx de 0.05 m	74
Figura 5.30. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 100 MHz não blindadas, modo passo-a-passo, Δx de 0.2 m	77
Figura 5.31. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 100 MHz não blindadas, modo contínuo – trenó, Δx de 0.05 m	77
Figura 5.32. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 100 MHz blindadas, Δx de 0.05 m	78
Figura 5.33. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 200 MHz não blindadas, modo passo-a-passo, Δx de 0.2 m	79
Figura 5.34. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 200 MHz não blindadas, modo contínuo, Δx de 0.05 m	79
Figura 5.35. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 500 MHz blindadas, Δx de 0.05 m	80

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Posição dos alvos enterrados na Linha 4: Leste, Norte e Profundidade do alvo	13
Tabela 2.2. Posição dos alvos enterrados na Linha 5: Leste, Norte e Profundidade do alvo	14
Tabela 3.1. Condutividade elétrica (σ), constante dielétrica (ϵ_r), velocidade de propagação (v) e atenuação (α) observadas em materiais comuns para as frequências utilizadas no GPR (Daniels, 1996; Powers & Olhoeft, 1996b; Zeng & McMechan, 1997; Porsani, 1999a)	26
Tabela 3.2. Frequência central das antenas versus resolução vertical teórica	28
Tabela 3.3. Frequência central das antenas e as profundidades observadas nos perfis GPR na área do SCGR do IAG	29
Tabela 4.1. Dimensão dos alvos das Linhas 4 e 5 do SCGR	36
Tabela 4.2. Propriedades físicas dos materiais utilizados nas simulações GPR 2D	36
Tabela 4.3. Descrição dos alvos instalados na Linha 4 do SCGR	37
Tabela 4.4. Descrição dos alvos instalados na Linha 5 do SCGR	37
Tabela 5.1. Parâmetros utilizados na aquisição dos dados GPR com as antenas não blindadas acopladas ao trenó	54
Tabela 5.2. Parâmetros utilizados na aquisição dos dados GPR antes da instalação do SCGR ..	56
Tabela 5.3. Frequências de amostragem utilizadas na aquisição dos dados GPR depois da instalação do SCGR	68

RESUMO

RODRIGUES, S.I., 2004. *Caracterização GPR de Tambores Metálicos e Plásticos: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP*. Dissertação de Mestrado, IAG/USP, São Paulo, 89p.

Nesta pesquisa, o método geofísico GPR – *Ground Penetrating Radar* foi utilizado para caracterizar tambores metálicos e plásticos enterrados numa área de testes controlados, denominada de “Sítio Controlado de Geofísica Rasa – SCGR do IAG” instalado no campus da Universidade de São Paulo, em São Paulo. Os alvos foram escolhidos visando simular estudos de contaminação ambiental e obras de engenharia dentro do contexto urbano. Os tambores metálicos (vazios) foram dispostos na vertical e horizontal e os tambores plásticos (vazios, preenchidos com água salgada e com água doce) foram dispostos na vertical. Foram realizadas simulações numéricas GPR 2D para auxiliar na escolha dos parâmetros ótimos referentes à aquisição dos dados e verificar se os contrastes existentes entre os alvos (tambores metálicos e plásticos) e o *background* poderiam produzir reflexões significativas. As aquisições foram realizadas “antes” e “depois” da instalação dos alvos no SCGR-IAG utilizando as antenas de 100 MHz, 200 MHz e 500 MHz. Após as aquisições, os dados GPR foram processados e em seguida analisados visando estabelecer respostas típicas para cada alvo, considerando o tipo de material, a sua composição e/ou preenchimento. Os resultados foram comparados com as informações das profundidades reais dos alvos enterrados e as simulações numéricas, os quais apresentaram uma excelente concordância. Além disso, permitiram identificar com clareza todos os alvos e diferenciá-los quanto ao padrão de reflexão. Nos tambores plásticos foi possível distinguir os que estavam vazios e os preenchidos com água doce ou com água salgada. Essas respostas obtidas em uma área de testes controlados podem ser consideradas como típicas para os alvos, podendo ser extrapoladas para áreas onde não se tem nenhuma informação da subsuperfície.

Palavras-chave: GPR-Ground Penetrating Radar, simulações numéricas GPR 2D, Sítio Controlado de Geofísica Rasa, tambores metálicos e plásticos, contaminação ambiental.

ABSTRACT

RODRIGUES, S.I., 2004. *Caracterização GPR de Tambores Metálicos e Plásticos: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP*. Dissertação de Mestrado, IAG/USP, São Paulo, 89p.

In this research, geophysical method GPR - Ground Penetrating Radar was used to characterize metallic and plastic drums buried in an area of controlled tests, called "Controlled Site of Shallow Geophysics" (SCGR-IAG – *Sítio Controlado de Geofísica Rasa*) installed in the campus of the University of São Paulo, in São Paulo. The targets were chosen aiming to simulate studies of environmental contamination and works of engineering inside the urban context. The metallic drums (empty) were disposed in the vertical and the horizontal position, and the plastic tubes (empty, filled with salty water and cool water) were disposed in the vertical position. 2D GPR numerical simulations were carried through to assist in the choice of the excellent parameters referring to the acquisition of the data, and to verify if the contrasts between the targets (metallic and plastic tubes) and the background could produce significant reflections. The acquisitions were carried through "before" and "after" the installation of the targets at the SCGR-IAG using 100 MHz, 200 MHz and 500 MHz antennas. After the acquisitions, GPR data were processed and then analyzed to establish typical answers to each target, considering the type of material, its composition and/or fulfilling. The results were compared with the information of the real depths of the buried targets and the numerical simulations, which matched in an excellent agreement. Moreover, the results allowed to identify with clarity all the targets and differentiate them according to the reflection standard. In the plastic drums it was possible to distinguish the ones that were empty and the filled ones with cool water or salty water. These answers gotten in an area of controlled tests can be considered as typical for the targets, being able to be surpassed for areas where no information of the subsurface is had.

Keywords: GPR-Ground Penetrating Radar, 2D GPR numerical simulations, Controlled site of Shallow Geophysics, metallic and plastic drums, environmental contamination.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A sustentabilidade dos seres humanos está relacionada a dois conceitos fundamentais: desenvolvimento e conservação. Assim, o desenvolvimento sócio-econômico e tecnológico nas áreas urbanas torna-se indispensável para que haja qualidade de vida, o qual deve ocorrer por meio de ações toleráveis de modo que garanta a sobrevivência das gerações futuras e a preservação dos recursos naturais.

Nessas áreas, a busca por soluções racionais para os problemas sócio-ambientais causados pela elevada concentração populacional e o acelerado desenvolvimento industrial, torna-se visível através da intensa ocupação da subsuperfície (presença de galerias pluviais, tubulações de gás, água, luz, linha metroviária, estacionamentos subterrâneos etc). Em contrapartida, observa-se também a presença de várias áreas contaminadas, as quais, segundo Sánchez (1998), provoca graves problemas à sociedade, tais como, riscos à segurança e saúde pública, limitações ao desenvolvimento urbano, entre outros.

Assim como as outras ciências, a geofísica vem pesquisando novas formas que possam auxiliar na resolução dos problemas pertinentes ao meio ambiente antrópico, tendo em seus métodos de investigações uma importante ferramenta, pois se baseiam em medições indiretas das propriedades físicas da subsuperfície.

Todavia, a aplicação dos métodos geofísicos em áreas urbanas ainda necessita de adequações e inovações tecnológicas. Desse modo, testes geofísicos rasos vêm sendo desenvolvidos desde 1993 (Mendonça *et al.*, 1999) no Campus da Universidade de São Paulo (USP) visando estudar a sua estruturação geológica. Os estudos mostraram complexidades nas interpretações dos resultados. Esse fato motivou a instalação de uma área de testes controlados em geofísica rasa com o intuito de diminuir as ambigüidades encontradas nos resultados geofísicos (Porsani, 1999b).

Com base nesse contexto, foi elaborado um projeto de pesquisa para a instalação de uma área de testes controlados de geofísica rasa no Campus da USP, consistindo em duas etapas: perfuração de 3 poços para pesquisas geológicas e geofísicas, de forma a elaborar um modelo geológico para a borda da Bacia Sedimentar de São Paulo (Porsani, *op.cit.*); e instalação do “Sítio Controlado de Geofísica Rasa - SCGR do Instituto de Astronomia,

Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG” da Universidade de São Paulo (Porsani, 2002), na qual diversas metodologias serão calibradas através dos levantamentos geofísicos sobre alvos conhecidos enterrados no SCGR, os quais simulam situações reais encontradas no contexto urbano.

A presente pesquisa faz parte do projeto citado e visa avaliar a potencialidade do método geofísico GPR – *Ground Penetrating Radar*, através da caracterização de alvos rasos (tambores metálicos e plásticos) enterrados na área de testes controlados instalada no Campus da USP, denominada de SCGR do IAG. A caracterização com o método GPR foi realizada “antes” e “depois” da implementação dos alvos utilizando as antenas de 100 MHz, 200 MHz e 500 MHz.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo principal deste estudo é caracterizar por meio do método GPR os tambores metálicos e plásticos enterrados no SCGR do IAG/USP e testar o seu desempenho em condições controladas de campo. Assim, modelagens numéricas 2D serão realizadas com o intuito de simular as respostas que possam ser obtidas com o método GPR, além de auxiliar na escolha adequada dos parâmetros ótimos a serem utilizados durante a aquisição dos dados.

Os estudos comparativos entre as modelagens numéricas, os dados de GPR e a profundidade real dos alvos, serviram para verificar o padrão de reflexão de cada alvo quanto à sua composição, preenchimento e profundidade.

Os resultados obtidos através da análise das reflexões de GPR e das profundidades reais dos alvos poderão ser utilizados como respostas padrões para cada tipo de material inserido no meio geológico, que por sua vez, simulam situações do contexto urbano, tais como: obras de engenharia, geotecnia e contaminação do meio ambiente. Baseada neste contexto, a análise integrada permitirá que o método GPR seja aplicado em locais onde não há informações disponíveis sobre a subsuperfície, auxiliando na resolução de problemas relativos ao desenvolvimento sustentável.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi estruturada de forma a transcrever as etapas referentes ao desenvolvimento da pesquisa e está organizada como se segue:

No Primeiro Capítulo é apresentada uma introdução do trabalho constituída pelos objetivos gerais da pesquisa e organização da dissertação. O Segundo Capítulo refere-se à pesquisa bibliográfica sobre os experimentos controlados, seguido pela localização da área de estudos, descrição e etapas de instalação do SCGR-IAG.

O histórico sobre o método GPR, seus princípios e fundamentação teórica são abordados no Terceiro Capítulo. No Quarto Capítulo é apresentada uma pesquisa bibliográfica específica sobre os trabalhos relacionados à modelagem numérica, as definições básicas do Método das Diferenças Finitas e os resultados das simulações numéricas GPR 2D.

O Quinto Capítulo aborda a aquisição e o processamento dos dados englobando as duas etapas de campo: “antes” e “depois” da instalação dos alvos no SCGR, seguidas pelas apresentações dos perfis GPR processados e uma análise comparativa com os valores de profundidades reais dos alvos em subsuperfície, proporcionando interpretações e discussões sobre a caracterização dos alvos.

No Sexto Capítulo são apresentadas as conclusões e as recomendações desta dissertação.

CAPÍTULO 2

O SITIO CONTROLADO DE GEOFISICA RASA DO IAG

Neste capítulo é apresentada uma breve pesquisa bibliográfica referente aos experimentos geofísicos controlados, seguida pela localização da área de estudos, a descrição das principais etapas envolvidas na instalação do SCGR – IAG e a caracterização das linhas.

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir serão apresentados alguns exemplos de estudos sobre testes controlados desenvolvidos pela comunidade científica mundial, uma vez que a revisão literária sobre o assunto é relevante na elaboração e execução deste projeto de pesquisa.

Durante as décadas de 30 e 40, Barret (1939, 1947 citado por Prado, 2000) desenvolveu experimentos voltados para a exploração de petróleo, utilizando-se uma técnica denominada *radoil*. Trabalhos posteriores demonstraram que as idéias de Barret (*op.cit.*) não poderiam ser aplicadas para ondas eletromagnéticas em altas frequências. Alguns exemplos que se contrapõem às idéias de Barret (*op. cit.*) podem ser observados através do trabalho de Haycock *et al.* (1949) e Pritchett (1952). Haycock *et al.* (1949) estudaram a atenuação e propagação da onda eletromagnética na Terra utilizando várias frequências, através de três procedimentos: linha transmissora enterrada; antenas dipolares enterradas e transmissão por meio do material geológico sobre o túnel de uma mina. Pritchett (1952) desenvolveu um experimento para medir a atenuação das ondas de rádio na Terra. Em ambos trabalhos, os testes mostraram que as utilizações de ondas eletromagnéticas em altas frequências para exploração do petróleo tornam-se impossíveis devido à atenuação do sinal.

Bowders Jr. *et al.* (1982) avaliaram as capacidades e limitações do GPR para detectar e localizar *containers* de diversos tamanhos, metálicos e não metálicos, a várias profundidades. Os *containers* foram dispostos em um solo arenoso com baixo conteúdo de água, próximo das condições ideais. Para os autores, os resultados mostraram que os tambores metálicos são detectados com mais facilidade. Já os tambores de plásticos não puderam ser localizados, porém, os preenchidos por líquidos foram detectados. A determinação do número

exato de tambores não foi possível devido ao pequeno espaçamento adotado entre alguns tambores.

Lord Jr. & Koerner (1988) desenvolveram um estudo sistemático para detectar *containers* com resíduos perigosos dispostos em subsuperfície utilizando métodos não destrutivos. Eles selecionaram quatro métodos: Indução Eletromagnética (EMI), Detecção de Metal (MD), Magnetometria (MAG) e *Ground Penetrating Radar* (GPR). Os *containers* (metálicos e plásticos) de vários tamanhos, foram enterrados em quatro tipos de solos e alguns foram submersos em água. De acordo com os autores, o GPR é o único método confiável para detectar os *containers* plásticos, porém apresenta algumas limitações. No solo arenoso seco, o EMI, GPR e o MAG, foram capazes de detectar tambores metálicos até 3 m de profundidade. O GPR, EMI e MD sofrem perdas referentes à habilidade de detecção quando a condutividade elétrica do background apresenta valor elevado. O MAG é um ótimo método para localizar metais sob todas as condições de subsuperfície e o GPR pode ser utilizado para detectar as paredes das escavações onde os resíduos foram dispostos.

Olhoeft *et al.* (1994) testaram vários sistemas GPR aéreo e de superfície em uma área de testes controlados próximo ao Estado do Arizona, EUA, para determinar a viabilidade do método na localização de objetos enterrados, tais como, tubulações, fios elétricos, minas metálicas e plásticas, entre outros. A calibração da área foi realizada através da coleta e análise em laboratório das amostras do solo, tendo como parâmetro a variação das propriedades elétricas a partir do teor de água e dados de subsuperfície adquiridos com o método GPR. Conforme os autores, os perfis GPR obtidos sobre os alvos mais rasos, os quais foram enterrados na camada de solo arenoso seco, apresentaram melhores respostas em comparação aos alvos mais profundos, dispostos na camada argilosa.

Bernabini *et al.* (1994) desenvolveram experimentos de campo para caracterizar as antenas de GPR e a propagação do pulso eletromagnético utilizando-se de dados adquiridos no ar e na subsuperfície. Segundo os autores, as interpretações dependem de uma melhor compreensão da radiação, propagação e dispersão da onda eletromagnética em materiais geológicos e do conhecimento preciso das características de reflexões dos alvos dispostos em tais meios. Assim, eles avaliaram os padrões de radiação das antenas em dois planos perpendiculares, XZ e YZ, paralelos ao campo H (magnético) e ao campo E (elétrico), respectivamente, através de medidas realizadas no ar (meio homogêneo, o qual não apresenta dispersão ou atenuação). Em seguida, analisaram as respostas de GPR obtidas sobre um alvo suspenso no ar e alvos enterrados em uma caixa preenchida com calcário, todos construídos

por lâminas de acrílico e revestidos por folhas de alumínio. Bernabini *et al.* (*op. cit.*) concluíram que os experimentos controlados permitem analisar os parâmetros envolvidos na aquisição de dados bem como a viabilidade do método utilizado.

Daniels *et al.* (1994), avaliaram a resolução do método GPR na detecção de hidrocarbonetos em subsuperfície. Os autores observaram através de comparações de dados GPR coletados em diferentes épocas do ano (verão, outono e inverno) em uma área controlada, que os resultados obtidos no inverno (solo congelado) demonstraram maior sensibilidade à presença da gasolina do que os obtidos durante o verão e o outono. Eles concluíram que o método GPR é uma ferramenta significativa, a qual pode ser utilizada para localizar e delimitar a presença de líquidos contaminantes em subsuperfície, quando as condições do *background* são consideradas na interpretação final.

Ainda em 1994, Herman & Singh, obtiveram resultados consideráveis referentes à localização e recuperação automática de objetos enterrados em uma caixa de areia utilizando um sistema constituído por um robô hidráulico, uma antena monoestática de GPR acoplada à cunha de uma retroescavadora e um *scanner* a laser. Para os autores, as respostas obtidas através do experimento possibilitam a otimização e diminuição de escavações associadas às investigações diretas da subsuperfície.

Zeng & McMechan (1997) realizaram simulações numéricas 2D para perfis GPR sintéticos de diversos tanques e tubulações enterradas na subsuperfície. Além disso, apresentaram alguns exemplos de dados GPR reais obtidos em uma área de testes controlados. De acordo com os autores, a avaliação não destrutiva de tanques, tambores e tubulações enterrados é interessante para as aplicações ambientais e de engenharia civil, já que os métodos geofísicos são mais rápidos e econômicos que as escavações, além disso, contribuem para a diminuição de impactos ambientais, isto é, migração de contaminantes em subsuperfície.

Em 1996, o Professor William Sauck da *Western Michigan University* – WMU, desenvolveu um projeto sobre testes controlados, para avaliar a potencialidade dos métodos geofísicos frente a várias situações que podem ser encontradas no meio urbano (Sauck, 1996). O experimento foi implantado em uma área adquirida pela universidade em 1970, e vem sendo utilizado por vários cursos de graduação, através de estudos biológicos, químicos, hidrogeológicos e geofísicos sobre o meio ambiente.

Estudos semelhantes vêm sendo realizados em outras universidades. Na *University of Massachusetts*, Mabee & Brown (2003), instalaram uma área de testes controlados proporcionando aos estudantes a utilização e calibração de métodos em pesquisas geofísicas e hidrogeológicas. Os principais estudos e experiências de campo baseiam-se em: técnicas de perfuração e instalação de poços; práticas de amostragem e monitoramento de água subterrânea; aplicação de métodos diretos e geofísicos, para interpretar a geologia de subsuperfície e investigar possíveis contaminações; teste com aquíferos; e testes hidroquímicos.

Na *University of Nevada Las Vegas*, vários métodos geofísicos: EM – eletromagnéticos, sísmicos e de resistividade elétrica e um *ground truthing*¹ foram empregados para a caracterização de uma área de testes instalada nessa instituição, com o intuito de calibrar os equipamentos e produzir experiências de práticas de campos aos estudantes (UNLV, 2003).

Um projeto visando à instalação de uma área de testes controlados também foi elaborado pela *York University*, em Ontário (Szeto, 1996). Para a sua viabilização, os professores da Universidade consultaram as indústrias locais, o Ministério do Ambiente e da Energia e outras instituições de pesquisas para obterem sugestões e colaborações. Vários objetivos foram vinculados ao projeto, dentre eles, o treinamento e a pesquisa de instrumentos geofísicos avançados aplicados na investigação da subsuperfície; que são utilizados em estudos ambientais, mineração convencional e exploração de petróleo. Para simular essas aplicações, foram enterrados na área de testes alguns tambores preenchidos com areia e minérios em vários tamanhos e orientações.

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos - EPA vem desenvolvendo pesquisas em ambientes controlados para avaliar e melhorar a resolução dos métodos geofísicos, tais como: Resistividade Complexa (CR), Potencial Natural (NP), Eletromagnético (EM), Sísmico e GPR, frente a investigações relacionadas às formações geológicas complexas e a delimitação de contaminantes orgânicos em subsuperfície. Para tanto, a equipe que coordena a pesquisa construiu um tanque com vazamento controlado, considerando as seguintes etapas de gerenciamento: caracterização da geologia dentro do tanque antes do

¹ Fiel de terra. Nos levantamentos aeromagnéticos, monitor deixado em terra, para a verificação de condições anômalas, como a ocorrência de tempestades magnéticas, que podem comprometer o levantamento (Duarte, 1997).

vazamento; mapeamento e monitoramento do vazamento controlado; e o desenvolvimento de um *software* computacional para a interpretação dos dados (EPA, 2004).

No final da década de 90, Grandjean *et al.* (2000) avaliaram as diferentes técnicas de GPR referentes à aquisição e processamento dos dados aplicadas na engenharia civil, estabelecendo o desempenho e habilidade do método através do estudo de uma área de testes controlados instalada na França. A área de testes foi construída utilizando-se heterogeneidades comuns encontradas no contexto urbano, tais como, tubulações de ferro e PVC preenchidas com água ou vazias, cavernas, vazamento de água, blocos, entre outros. Os autores concluíram que a escolha da técnica de GPR dependerá do tipo de aplicação e das condições de campo. Os estudos alcançaram profundidades de penetrações entre 1 m e 5 m, tornando o método GPR uma ferramenta essencial para aplicações em engenharia civil.

No mesmo ano, Radzevicius & Daniels (2000) descreveram teorias de dispersão e polarização relevantes para o usuário de GPR através de soluções analíticas e exemplos de dados GPR obtidos por meio de mapeamento sobre tubulações enterradas de vários tamanhos. Para os autores, a polarização depende das propriedades de dispersão, tendo implicações importantes na detecção de alvos, no arranjo utilizado no levantamento e na interpretação dos dados.

No Brasil, o primeiro projeto relacionado à instalação de uma área de testes controlados de geofísica rasa está sendo desenvolvido por Porsani (2002), denominado de Sítio Controlado de Geofísica Rasa-SCGR do IAG/USP. Foram implementadas sete linhas contendo diferentes alvos instalados em diferentes profundidades; diversos materiais foram utilizados, tais como, caixas de areia e brita, vasos cerâmicos, tubulações de PVC e aço, tambores plásticos e metálicos, cabos elétricos e conduítes para passagem de fibra ótica, dentre outros. Os alvos foram enterrados visando simular estudos geológicos, geotécnicos, arqueológicos, ambientais e de planejamento urbano, dentro de um contexto urbano. A organização do SCGR-IAG foi baseada na área de testes controlados da *Western Michigan University* - WMU (Sauck, 1996).

Assim, a proposta desta pesquisa, baseia-se no estudo específico de duas das sete Linhas que compõem a área de testes controlados do IAG, instalada no campus da USP (Porsani *op.cit.*), na qual serão adotados os seguintes procedimentos:

- ✓ aquisição dos dados geofísicos “antes” de enterrar os alvos, ou seja, levantamento geofísico visando à definição do *background*;

- ✓ escavação dos buracos para a implantação dos alvos;
- ✓ disposição dos alvos;
- ✓ recuperação da paisagem;
- ✓ aquisição dos dados geofísicos “depois” de enterrar os alvos; e
- ✓ análise dos resultados através da comparação dos perfis GPR, profundidades reais e simulações numéricas.

2.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

O SCGR-IAG compreende uma área de 1500 m² (30 m x 50 m) e foi instalado dentro do campus da Universidade de São Paulo “Armando Salles de Oliveira”, localizado à margem esquerda do Rio Pinheiros, no Distrito do Butantã, na região centro-oeste do Município de São Paulo – SP. Na Figura 2.1 é apresentada a localização da área de estudos.

O Município de São Paulo está situado sobre a Bacia Sedimentar de São Paulo, que compreende uma área de aproximadamente 5000 km², sendo uma porção do *Rift* continental do Sudeste do Brasil, formada na era Cenozóica (Iritani, 1993).

De acordo com Riccomini (1989) e Marcelino (1999), o embasamento cristalino da Bacia de São Paulo é constituído por granitos sin e pós-tectônicos, migmatitos, gnaisses, xistos, quartzitos e anfibolitos, superpostos pelos sedimentos terciários do Grupo Taubaté (Formações São Paulo, Tremembé e Resende) e Formação Itaquaquetuba, e pelos sedimentos quaternários da Formação Pindamonhangaba.

No Campus da USP afloram as Formações São Paulo e Itaquaquetuba, na porção sul e norte, respectivamente. No entanto, a área de estudos localiza-se na porção sul, sendo constituída pela Formação São Paulo, que apresenta duas litofácies principais: arenitos grossos e arenitos médios a grossos, conglomerados com granodecrescência ascendente para siltitos e argilitos (Marcelino, 1999).

Segundo Iritani (1993), na Formação São Paulo é freqüente a existência de crostas e concreções limoníticas de várias espessuras entre os sedimentos arenosos e argilosos.

Figura 2.1. Localização da área de estudos.

Borges (2002) caracterizou os sedimentos e o topo do embasamento cristalino da Bacia de São Paulo através dos métodos geofísicos, furos de sondagens e três poços para investigações geológicas e geofísicas de 80 m de profundidade. Na porção sul do campus universitário foi possível: mapear a base do aterro e o topo da camada de areia grossa utilizando o método GPR; identificar os horizontes resistivos e condutivos da Bacia de São Paulo até 43 m de profundidade através das sondagens elétricas verticais (SEV's); e mapear as variações de condutividade nos sedimentos da Formação São Paulo com os caminhamentos elétricos (CEs).

Borges & Porsani (2003) definiram o *background* geoeletrico da área onde foi Instalado o SCGR do IAG/USP utilizando os métodos geofísicos eletromagnéticos: *Slingran* (EM38) e GPR, caracterizando os materiais condutivos provenientes de aterro, assentados sobre os sedimentos de Bacia de São Paulo.

Porsani *et al.* (2004) caracterizaram a estratigrafia dos sedimentos e o topo do embasamento da Bacia Sedimentar da São Paulo na área do SCGR do IAG/USP, através da integração dos métodos geofísicos: sísmica rasa (reflexão e refração), eletrorresistividade (caminhamento elétrico e sondagem elétrica vertical) e GPR, e as perfilações de poços: perfilagem gama natural e resistividade elétrica. Os dados dos poços mostram que a espessura dos sedimentos na área do SCGR não ultrapassa 53 m de profundidade.

2.3 DESCRIÇÃO DAS LINHAS DE ESTUDO

O SCGR-IAG é composto por sete Linhas, cada uma com 30 m de comprimento. Em cada Linha foram enterrados tipos específicos de alvos, com profundidades variando de 0.5 m até 2 m referentes ao topo. Na Figura 2.2 é mostrado o mapa de localização do SCGR com as posições das linhas.

Embora o SCGR comporte sete Linhas, o enfoque desta pesquisa é dado a duas Linhas:

- Linha 4 – Referente aos tambores metálicos vazios dispostos na horizontal e vertical (Figura 2.3). Estes alvos, numerados de 1 a 8, são feitos de aço carbono pintados com tinta antiferrugem, com 86 cm de comprimento e 59 cm de diâmetro, espessura da parede de 0.12 cm.

- Linha 5 – Referente aos tambores de plásticos dispostos na vertical. Os alvos desta linha, numerados de 9 a 19, foram preenchidos com água salgada, água doce, ou vazios (Figura 2.4). Os tambores são feitos de polietileno de alta densidade na coloração azul, com 69 cm de comprimento e 47 cm de diâmetro, espessura da parede 0.18 cm.

Os alvos 4 (Figura 2.3) e 14 (Figura 2.4) correspondem a um cano metálico de 3.8 cm de diâmetro, feito de aço carbono, localizado a 15 m de distância e 0.5 m de profundidade, disposto transversalmente às 7 Linhas, com o intuito de ser utilizado como um alvo guia comum a todas as Linhas do SCGR.

Conforme o Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas (CETESB, 2001) diferentes tipos de fontes potenciais geram resíduos que podem contaminar o solo, subsolo, águas subterrâneas, entre outras. Destaca-se entre as fontes potenciais:

- ✓ as fontes relacionadas à descarga de substâncias no subsolo (tanques sépticos) e efluentes industriais ou municipais aplicados no solo etc;
- ✓ as fontes projetadas para armazenar, tratar ou dispor substâncias, ou seja, lagoas de armazenamento e tratamento de efluentes industriais, depósitos de resíduos de mineração, tanques aéreos e subterrâneos de armazenamento de substâncias;
- ✓ as fontes projetadas para reter substâncias durante seu transporte (oleodutos, tubulações de esgoto e efluentes industriais);
- ✓ as fontes utilizadas para descarregar substâncias como consequência de atividades planejadas (por exemplo, irrigação ou fertilização de lavouras);
- ✓ as fontes que funcionam como caminho preferencial para que os contaminantes entrem em um aquífero (poços de monitoramento com falhas de construção, etc); e
- ✓ fontes ou fenômenos naturais associados às atividades humanas (por exemplo, interação entre as águas subterrâneas e águas superficiais contaminadas).

Desta forma, cada alvo instalado nas Linhas do SCGR foi idealizado visando simular situações reais do meio ambiente, podendo apresentar mais de um significado, por exemplo:

- tambor plástico vazio pode representar contaminantes resistivos, tais como, benzeno, DNAPL-*Dense Non Aquosus Phase Liquid*, borra de petróleo, bem como cavernas etc;

- tambor plástico preenchido com água salgada pode simular contaminantes condutivos, tais como, resíduos químicos, solventes etc;
- tambor plástico preenchido com água doce pode representar água proveniente de reatores nucleares; e
- tambor metálico pode simular recipientes enterrados com contaminantes resistivos (por exemplo, borra de petróleo) ou condutivos e tubulações metálicas.

Nas Tabelas 2.1 e 2.2 são mostradas as posições dos alvos enterrados na Linha 4 e na Linha 5.

Tabela 2.1. Posição dos alvos enterrados na Linha 4: Leste, Norte e Profundidade do alvo.

Alvos	Posição Leste (m)	Posição Norte (m)	Profundidade do alvo (m)
1	27.04	3.34	1.97
2	26.99	7.08	0.50
3	26.90	11.20	0.97
4	-	15.02	0.52
5	26.91	19.02	0.97
6	26.94	20.02	1.00
7	26.91	23.96	0.90
8	26.76	27.95	1.80

Tabela 2.2. Posição dos alvos enterrados na Linha 5: Leste, Norte e Profundidade do alvo.

Alvos	Posição Leste (m)	Posição Norte (m)	Profundidade do alvo (m)
9	35.95	1.18	0.96
10	35.87	4.09	0.98
11	35.94	6.85	0.45
12	35.94	9.84	0.48
13	35.94	12.81	1.48
14	-	15.02	0.47
15	35.98	16.83	1.49
16	35.93	19.83	0.48
17	35.98	22.81	0.47
18	35.97	25.84	0.52
19	36.09	28.80	0.52

Figura 2.2. Mapa do SCGR com a disposição das linhas.

Figura 2.3. Disposição espacial dos tambores metálicos na Linha 4 do SCGR.

Figura 2.4. Disposição espacial dos tambores de plásticos na Linha 5 do SCGR.

Para caracterizar a geologia da subsuperfície – *background*, ou seja, obter informações da composição geológica anterior às perturbações provocadas pela instalação dos alvos, várias aquisições foram realizadas “antes” da instalação do SCGR a fim de compará-las aos dados GPR adquiridos com as interferências em subsuperfície.

Assim, a primeira etapa de aquisição dos dados foi realizada ao longo das Linhas 4 e 5. As aquisições foram realizadas com as antenas de 100 MHz, 200 MHz e 500 MHz. Utilizou-se a técnica de perfil de reflexão com afastamento constante, com incrementos espaciais de 0.2 m para o modo passo-a-passo (antenas não blindadas) e 0.05 m para o modo contínuo (antenas não blindadas acopladas ao trenó e antenas blindadas).

As respostas obtidas através das simulações numéricas GPR auxiliaram a escolha dos melhores parâmetros para a aquisição (espaçamento entre cada traço, frequência, resolução), além de verificar se os contrastes entre as propriedades físicas dos alvos e o meio geológico geram reflexões de topo e base.

Após a primeira etapa de aquisição dos dados, foram iniciadas as atividades referentes às escavações das trincheiras visando à instalação dos alvos no SCGR-IAG, as quais foram realizadas por mão de obra contratada e uma retroescavadeira cedida pela Prefeitura do Campus da USP (Figura 2.5).

Nas Figuras 2.6 e 2.7 são mostrados os alvos correspondentes à Linha 4 (tambores metálicos) e à Linha 5 (tambores plásticos), respectivamente. Os alvos foram colocados nas posições pré-determinadas, profundidade e distâncias, utilizando-se trenas e uma Estação Total Modelo TP 350 – Leica, pertencente ao Departamento de Geofísica do IAG.

A segunda etapa de aquisição dos dados iniciou-se “após” a instalação do SCGR – IAG. Todos os dados GPR adquiridos na área de estudo foram processados e interpretados de forma integrada com as profundidades conhecidas dos alvos e as simulações numéricas, resultando em uma análise da aplicabilidade do método em situações que envolvem problemas ambientais.

Figura 2.5. Escavação das trincheiras para a instalação dos alvos no SCGR.

Figura 2.6. Tambor Metálico.

Figura 2.7. Tambor de Plástico (PVC).

A recuperação da paisagem iniciou-se logo após a instalação dos alvos no SCGR-IAG. Os funcionários contratados para auxiliar na implantação dos alvos em subsuperfície também participaram da recuperação das gramas sobre a área alterada. Na Figura 2.8 é mostrada a área do SCGR após a recuperação da paisagem.

Figura 2.8. Área do SCGR-IAG após a recuperação da paisagem.

CAPÍTULO 3

O MÉTODO GPR

Nesta seção será abordado o histórico sobre o método GPR, bem como os princípios físicos e a fundamentação teórica envolvida na propagação de ondas eletromagnéticas (EM) de altas frequências na subsuperfície.

3.1. HISTÓRICO DO MÉTODO

Entre as várias e importantes contribuições para a evolução da ciência proporcionada por James Clerk Maxwell, está o desenvolvimento da teoria eletromagnética. Em 1864, ele obteve matematicamente as relações que expressam a interação dos campos elétricos e magnéticos, baseados em conhecimentos já existentes: Lei de Coulomb, Lei de Ampère, Lei de Faraday e Lei de Gauss (Cisneros, 2001).

Em 1886, o físico Heinrich Hertz, conseguiu demonstrar estes princípios teóricos, produzindo e recebendo ondas eletromagnéticas através das leis de reflexão de ondas, que são inerentes às equações de Maxwell.

No início do século XX, o engenheiro Huelsmeyer (1904, citado por Reynolds, 1997) propôs o uso de sinais eletromagnéticos para determinar a presença remota de objetos metálicos. Porém, a primeira descrição do uso das ondas eletromagnéticas para localização de objetos enterrados foi realizada em uma patente alemã por Leimbach & Lowy (1910) através da transmissão de ondas contínuas. O trabalho de Hülsenbeck (1926, citado por Daniels, 1996), foi o primeiro a utilizar pulsos de radar para investigar a natureza das feições enterradas.

Stern (1929, citado por Olhoeft, 2003), realizou o primeiro levantamento geofísico com o método GPR para determinar a espessura de uma geleira. O desenvolvimento das técnicas de pulsos eletromagnéticos se deu a partir dos anos 30, com objetivos voltados à caracterização de ambientes com gelo.

A tecnologia do GPR foi pouco utilizada até o final da década de 50 devido às limitações instrumentais. A partir da década de 60, os interesses relacionados ao uso do método foram retomados associados às investigações e desembarques lunares. Da década de

80 até os dias atuais, o método GPR se consolidou, passando a ser utilizado como uma ferramenta auxiliar vinculada a diversos objetivos, tais como: testes não destrutivos para caracterização de estruturas enterradas (tubulações, *containers*), estudo de sítios arqueológicos, avaliação de túneis e estradas, estudo de contaminação ambiental, mapeamento estratigráfico detalhado, localização de corpos enterrados, entre outras (Daniels, 1996; Conyers & Goodman, 1997). Essa gama de aplicações proporcionou a utilização do método GPR na resolução de muitos problemas relacionados diretamente ao meio ambiente antrópico.

No Brasil, os primeiros trabalhos sistemáticos utilizando o método GPR foram realizados pelo Centro de Pesquisas da Petrobrás a partir de 1994, conforme registros da literatura (Porsani, 1999a). Atualmente, o GPR está bem difundido e vem sendo utilizado por várias instituições de pesquisas e universidades brasileiras.

3.2 PRINCÍPIOS E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O método GPR baseia-se na propagação de ondas eletromagnéticas (EMs) em altas frequências (1 MHz a 2500 MHz). Uma antena transmissora dipolar disposta sobre a superfície emite pulsos eletromagnéticos para dentro da Terra, ao encontrar mudanças nas propriedades físicas (elétricas e magnéticas) entre os materiais em subsuperfície, o sinal é refletido e registrado em tempo duplo (tempo de ida e volta) por outra antena receptora, também disposta na superfície. As ondas refletidas recebidas pela antena receptora são convertidas em sinais elétricos e transmitidas para a unidade de controle, amplificadas, registradas e gravadas em um computador. (Davis & Annan, 1989; Daniels, 1996; Conyers & Goodman, 1997).

Para se obter os dados GPR, as antenas transmissora e receptora são movidas ao longo de um perfil através de incrementos espaciais, resultando assim, em uma imagem baseada nas variações laterais das propriedades físicas dos materiais em subsuperfície em função do tempo de percurso da onda eletromagnética (Figura 3.1).

Figura 3.1. Ilustração da reflexão do sinal EM em subsuperfície.

Um breve resumo sobre os fundamentos teóricos do método GPR é apresentado nos parágrafos seguintes. Informações detalhadas sobre os procedimentos matemáticos envolvidos no método GPR podem ser encontradas na literatura (Ward & Hohmann, 1987; Daniels, 1996; Porsani, 1999a).

A compreensão do funcionamento do método GPR está relacionada à teoria eletromagnética, fundamentada pelas equações de Maxwell.

As equações de Maxwell descrevem a propagação da onda EM através da interação entre os campos elétricos e magnéticos, em função das propriedades físicas dos materiais por onde a onda EM passa. Para se obter informações sobre um determinado material onde os campos EMs atuam é necessário utilizar as relações constitutivas do meio, na qual relacionam o campo elétrico externo às propriedades elétricas (condutividade elétrica e permissividade dielétrica) e magnéticas (permeabilidade magnética) dos materiais, i.e., as propriedades físicas.

Para a faixa de frequência utilizada na metodologia GPR, as relações constitutivas podem ser consideradas lineares e são obtidas através das expressões:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.1)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3.2)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.3)$$

onde: $\vec{J}$ - densidade da corrente de condução (A/m^2)

$\vec{E}$ - campo elétrico aplicado (V/m)

σ - condutividade elétrica (S/m)

$\vec{D}$ - deslocamento elétrico (C/m^2)

ϵ - permissividade dielétrica (F/m)

$\vec{B}$ - campo de indução magnética (T)

$\vec{H}$ - campo magnético (Amp/m^2)

μ - permeabilidade magnética (H/m)

A primeira relação constitutiva do meio (3.1), Lei de Ohm, relaciona a densidade da corrente de condução à intensidade do campo elétrico, através da constante de proporcionalidade dada pela condutividade elétrica. A condutividade indica a facilidade em conduzir corrente elétrica, quando um meio é submetido a uma diferença de potencial associada à dissipação de energia. O seu inverso é a resistividade elétrica (ρ).

Os principais fatores que controlam o aumento da condutividade elétrica em materiais geológicos situados na subsuperfície rasa estão relacionados à quantidade de água, porosidade, aumento de concentração de sais dissolvidos e conteúdo de argilas e de minerais condutivos (Keller, 1987).

A segunda relação constitutiva do meio (3.2) relaciona o armazenamento das cargas elétricas à intensidade do campo elétrico, através da constante de proporcionalidade denominada permissividade dielétrica. Nos materiais dielétricos, o deslocamento é atribuído ao movimento de elétrons e moléculas polares de uma posição de equilíbrio para outra polarizada, originado pela aplicação de um campo elétrico externo.

Os valores de permissividade dielétrica são sempre diferentes de zero, no vácuo a ϵ_0 é igual a $8,85 \times 10^{-12}$ F/m. De modo geral, utiliza-se a permissividade dielétrica relativa ou constante dielétrica “ ϵ_r ”, que relaciona a permissividade dielétrica do material com a permissividade dielétrica do vácuo “ ϵ_0 ”, dada por:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}.$$

A presença da água é um dos fatores importantes na determinação da permissividade dielétrica, pois as moléculas de água possuem um momento de dipolo natural intrínseco. Consequentemente, as correntes que fluem em respostas à aplicação de um campo elétrico, em qualquer material geológico, são controladas pelas propriedades elétricas, influenciando a atenuação e propagação da onda eletromagnética. Onde a condutividade elétrica é dominante para as ondas EM de baixas frequências e a permissividade dielétrica é dominante para as ondas EM de altas frequências, ou seja, maiores que 1 MHz (Keller, 1987; Ward & Hohmann, 1987).

A terceira relação constitutiva (3.3) descreve o vetor campo de indução magnética e o campo magnético, que se relacionam através da constante de proporcionalidade dada pela permeabilidade magnética “ μ ”.

A permeabilidade magnética possui uma influência considerável em relação aos métodos magnéticos, por outro lado, para os métodos eletromagnéticos as propriedades elétricas são mais importantes no tocante das respostas. Para fins práticos, supõe-se que a permeabilidade magnética dos materiais geológicos não apresenta variações consideráveis de minerais magnéticos. Todavia, ela não pode ser ignorada quando o GPR estiver vinculado às aplicações onde os materiais a serem investigados apresentem valores elevados de permeabilidade magnética, por exemplo, materiais metálicos (Annan, 1992).

Segundo Ward & Hohmann (1987), as propriedades elétricas e magnéticas são tensores complexos, as quais permitem que as fases dos campos elétricos relacionados à intensidade de correntes (condução e deslocamento) e dos campos magnéticos relacionados à indução magnética, sejam diferentes. Contudo, para os estudos de propagação da onda EM na Terra, algumas suposições podem ser feitas: i) o meio é composto por camadas horizontais, isotrópicas, homogêneas e possuem propriedades elétricas que são independentes do tempo, temperatura ou pressão, e ii) a permeabilidade magnética é igual a do espaço livre, $\mu = \mu_0$, $4\pi \times 10^{-7}$ H/m. Assim, a permeabilidade magnética relativa é igual a 1 para os materiais geológicos e PVC, e igual a 100 para os materiais metálicos como ferro e aço (Powers & Olhoeft, 1996b).

Considerando que as ondas esféricas podem ser representadas por uma superposição de ondas planas, combinando as equações de Maxwell com as relações constitutivas do meio, obtêm-se a equação da onda plana:

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (3.4)$$

onde “k” é o número de onda, expresso por:

$$k^2 = \omega^2 \mu \epsilon - i \omega \mu \sigma \quad (3.5)$$

Em situações ideais e com propriedades físicas constantes, há uma frequência de transição que divide os campos EM a partir da corrente de condução ou deslocamento (Annan, 1992). A maioria dos métodos EMs atua em baixas frequências, sendo assim, observa-se um regime indutivo da onda, que se propaga com velocidade constante nos meios materiais, cujas correntes de condução são predominantes. Em altas frequências, como é o caso do método GPR, tem-se um regime radiante para a propagação dos campos EMs e as duas correntes devem ser consideradas, ressaltando que a de deslocamento (propagação) prevalece sobre a de condução (atenuação), já que este método funciona em uma faixa de frequências entre 1 MHz e 2500 MHz, onde o meio é denominado dielétrico de baixa perda (Daniels, 1996; Porsani, 1999; Prado, 2000).

Para as aplicações do GPR, que atua em altas frequências, normalmente é utilizada a seguinte expressão:

$$k = \alpha + i\beta \quad (3.6)$$

onde “ α ” corresponde a constante de atenuação e “ β ” a constante de propagação dos campos EMs, dadas por:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (3.7)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \quad (3.8)$$

Em materiais geológicos que apresentam baixa condutividade (menores que 100 mS/m) e não magnéticos, tem-se para as altas frequências, uma velocidade de propagação da onda EM independente da frequência, dada pela seguinte expressão:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (3.9)$$

sendo “c” a velocidade da onda EM no vácuo, aproximadamente 0,3 m/ns.

A constante de atenuação “ α ” é expressa como se segue:

$$\alpha = 1,636 \frac{\sigma_o}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.10)$$

sendo “ α ” expressa em dB/m e “ σ_o ” a condutividade em corrente contínua em mS/m.

Os efeitos da atenuação e a dependência com a condutividade elétrica, são fatores importantes, pois comprometem a eficiência do método GPR. Na Tabela 3.1 são apresentados valores para a velocidade e atenuação da onda EM observadas em materiais comuns para as frequências utilizadas no GPR.

Tabela 3.1. Condutividade elétrica (σ), constante dielétrica (ϵ_r), velocidade de propagação (v) e atenuação (α) observadas em materiais comuns para as frequências utilizadas no GPR (Daniels, 1996; Powers & Olhoeft, 1996b; Zeng & McMechan, 1997; Porsani, 1999a).

Material	ϵ_r	σ (mS/m)	v (m/ns)	α (dB/m)
Ar	1	0	0.3	0
Água doce	81	0.5	0.033	0.1
Água do mar	81	3000	0.01	10^3
PVC	3.3	0	0.11	0
Argila	5-40	2-1000	0.06	1-300
Metal	300	10^{10}	0.017	9.5×10^8
Solo arenoso seco	2-6	0.14	0.18	0.14
Solo arenoso saturado	25	6.9	0.06	2.25
Solo argiloso seco	2.4	0.27	0.19	0.28
Solo argiloso saturado	15	50	0.07-0.09	21

Segundo os valores apresentados na Tabela 3.1, tanto a permissividade dielétrica relativa quanto a condutividade elétrica exercem influência sobre a velocidade de propagação da onda eletromagnética, por exemplo, quando dois materiais apresentam valores iguais para a permissividade dielétrica relativa e valores diferentes para a condutividade elétrica, a velocidade de propagação da onda será menor para o material com maior condutividade elétrica (Reynolds, 1997).

No caso do GPR, um outro parâmetro importante é a amplitude do coeficiente de reflexão da onda EM. Annan (1992), para quantificar as reflexões e refrações da onda EM, supôs que as ondas se propagam através de uma incidência normal às interfaces das camadas.

Considerando que estas camadas possuem valores diferentes de propriedades físicas, o sinal refletido dependerá dos contrastes de propriedades existentes entre elas, podendo causar uma forte impedância nas interfaces.

A amplitude do coeficiente de reflexão poder ser quantificada através do tensor de impedância, dado por:

$$Z = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\epsilon}} \quad (3.11)$$

Considerando uma incidência normal para a onda EM (Annan, 1992), a amplitude do coeficiente de reflexão GPR, r_{gpr} , pode ser definida como:

$$r_{\text{gpr}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (3.12)$$

sendo Z_1 e Z_2 os tensores de impedância elétrica para um meio composto por duas camadas.

Os cálculos realizados para determinar o coeficiente de reflexão entre as camadas, são importantes na análise da polaridade do sinal e, unidos a resolução vertical e horizontal, proporciona uma avaliação da viabilidade do GPR nas diversas aplicações.

A resolução vertical é a habilidade em distinguir as reflexões do topo e da base de camadas que apresentam pequenas espessuras (Davis & Annan, 1989). Cada antena de GPR é desenvolvida para operar em uma faixa de frequência central, sendo o comprimento do pulso dado pela relação:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.13)$$

A resolução teórica é de $\lambda/4$ (Sheriff, 1991). Considerando as incertezas no cálculo da velocidade dos campos eletromagnéticos em altas frequências e devido às variações da onda durante a sua propagação, a resolução alcançada na prática é de $\lambda/2$ a $\lambda/3$, sendo assim, o limite da resolução teórica é de $\lambda/2$ a $\lambda/4$ (Beres & Haeni, 1991).

A resolução horizontal está relacionada à Zona de Fresnel (Yilmaz, 1987), determinada pelo padrão de radiação da antena. O padrão de radiação indica a direção em que o GPR é mais sensível e a área que está sendo radiada pela antena, podendo ser uma radiação transversal elétrica (TE) ou transversal magnética (TM). No padrão de radiação TE o campo elétrico é transversal à direção do perfil GPR e no padrão de radiação TM o campo magnético

é transversal à direção do perfil. Sendo o padrão de radiação TE o mais utilizado nos levantamentos GPR, pois apresenta uma maior área de iluminação da antena (Daniels, 1996; Porsani, 1999a).

Na Tabela 3.2 é mostrada a relação entre as frequências GPR utilizadas nos levantamentos geofísicos realizados no SCGR e a resolução vertical teórica. A velocidade assumida para os cálculos teóricos foi de 0.065 m/ns (velocidade aproximada do aterro argiloso).

Tabela 3.2. Frequência central das antenas versus resolução vertical teórica.

Frequência Central (MHz)	Resolução Teórica (m)
500	0.065 – 0.0325
200	0.1625 – 0.0812
100	0.325 – 0.1625

A profundidade de penetração é uma das principais limitações do método GPR, portanto deve ser analisada quando se pretende realizar uma investigação geofísica. Segundo Reynolds (1997), a profundidade em que o sinal atenua é de 1/e do valor inicial (37%), conhecido como *skin depth* (δ), inversamente proporcional a atenuação. Em materiais que apresentam condutividades elétricas elevadas, tem-se um baixo valor do δ . No entanto, com valores baixos de condutividade elétrica ocorre um aumento do δ , proporcionando uma maior penetração.

É importante ressaltar que o δ não exprime o valor exato da profundidade de penetração. Para determinar o intervalo do radar, as perdas de energia também devem ser consideradas (Figura 3.2):

- Perdas referentes ao efeito do acoplamento das antenas e do solo;
- Perdas de transmissão e reflexão a cada momento que as ondas EMs passarem por uma interface;
- Perdas por dispersão provocada por objetos com dimensões semelhantes ao comprimento de onda do sinal EM, gerando ruídos na seção do radar;
- Perdas por absorção da energia EM;
- Perdas por relaxação dielétrica – efeito que ocorre em altas frequências, quando a molécula de água não consegue se polarizar, causando a dissipação da energia mecânica em forma de calor; e

- Perdas por espalhamento geométrico, a energia se espalha causando uma redução por unidade de área a uma taxa de $1/r^2$, onde “r” é a distância percorrida pela onda EM, isto é, o amplitude do sinal diminui devido à frente de onda esférica que se espalha gradativamente.

Figura 3.2. Perdas de energia da propagação das ondas eletromagnéticas (modificada de Reynolds, 1997).

Além de depender das perdas por condução elétrica, relaxação dielétrica, espalhamento geométrico e dispersão, a profundidade de penetração da onda EM depende da frequência do sinal transmitido, como já mencionado anteriormente. Na Tabela 3.3 é apresentada a relação das frequências centrais das antenas e os valores de profundidade máxima de penetração da onda EM, encontrados na área do SCGR do IAG, onde predominam sedimentos argilosos.

Tabela 3.3. Frequência central das antenas e as profundidades observadas nos perfis GPR na área do SCGR do IAG.

Frequência Central (MHz)	Profundidade Máxima de Penetração (m)
500	1
300	1.5
200	2.5
100	3.5

Com base na análise das Tabelas 3.2 e 3.3 nota-se que em altas frequências, a resolução vertical do GPR aumenta devido ao menor comprimento de onda, por outro lado a profundidade de investigação diminui; e em baixas frequências, a profundidade de penetração da onda EM aumenta e a resolução diminui.

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÕES NUMÉRICAS GPR 2D

Neste capítulo são apresentadas descrições básicas sobre o método de modelagem numérica utilizado na pesquisa e os resultados obtidos por meio das simulações numéricas.

As modelagens numéricas realizadas sobre o problema geofísico a ser investigado são de grande importância para simular os resultados que podem ser obtidos numa situação real de campo. Além disso, auxilia na escolha dos parâmetros ótimos a serem utilizados numa aquisição de dados.

4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os trabalhos que utilizam modelagens numéricas para simular respostas geofísicas provenientes de métodos eletromagnéticos, vêm sendo extensivamente realizados, apoiando-se no desenvolvimento tecnológico de sistemas computadorizados.

Em estudos de aplicações do GPR, o método numérico das diferenças finitas tem sido o mais disseminado nas últimas décadas, por ser preciso e robusto, comparado aos demais, como por exemplo: elementos finitos, equações integrais, métodos híbridos e traçado de raios (Zeng & McMechan, 1997; Cunha, 2003).

Lázaro-Mancilla & Gómez-Treviño (1996) construíram radargramas sintéticos utilizando o método das equações integrais para avaliar a importância das variações magnéticas (permeabilidade magnética) e elétricas (condutividade elétrica) em reflexões GPR. A motivação desse trabalho deve-se ao fato de que em estudos GPR somente as variações de permissividade dielétrica são frequentemente utilizadas. Eles utilizaram um modelo de camadas horizontais heterogêneas, variando as três propriedades físicas dos materiais. A simulação do campo elétrico foi baseada numa fonte de ondas planas. De acordo com os autores, os resultados indicam que enquanto a permeabilidade magnética não é tão importante (exceto para trabalhos relacionados a materiais magnéticos) as reflexões devido às variações de condutividade elétrica podem ser da mesma ordem das reflexões associadas às variações da permissividade dielétrica. Em outras palavras, um modelo da subsuperfície

composto por camadas condutivas pode produzir radargramas similares aos causados por um contraste de permissividade dielétrica.

Powers & Olhoeft (1996a) modelaram respostas GPR usando medidas de solo obtidas em laboratório. Essa interação, permite: transferir experiência e conhecimento para outras áreas onde não se tem informação da subsuperfície; testar rapidamente hipóteses quanto à detecção e profundidade de alvos; e escolher os parâmetros ótimos para a aquisição. A simulação foi gerada por um algoritmo de modelagem baseado no método do traçado de raios, isto é, método que utiliza os caminhos de propagação da onda EM e suas integrações para definir os tempos de percurso e as amplitudes. As reflexões primárias e múltiplas são modeladas através de um perfil *zero-offset* ². O modelo é considerado infinito na direção ortogonal ao perfil, sendo o pulso polarizado na direção também ortogonal ao perfil, assim nenhuma mudança de polarização é considerada.

Powers & Olhoeft (1996b) analisaram vazamentos de líquidos contaminantes provenientes de tubulações enterradas através de simulações numéricas utilizando o método do traçado de raios em um meio dispersivo 2,5D ³. Segundo os autores, as modelagens numéricas de respostas GPR relacionadas às mudanças das propriedades físicas dos materiais é uma etapa muito importante para o entendimento completo dos dados de campo. Eles concluíram que os vazamentos poderão ser mais bem detectados quando o material sedimentar ao redor da tubulação estiver completamente saturado com água.

Zeng & McMechan (1997) realizaram simulações numéricas de respostas GPR com antenas monoestáticas e biestáticas para vários tanques e tubulações enterradas baseado no método do traçado de raios. As amplitudes sintéticas a serem modeladas dependem dos seguintes fatores: direções da fonte e do receptor, espalhamento geométrico, coeficientes de reflexão e transmissão, e atenuação da onda no meio. Conforme os autores, esse método é rápido e eficiente, entretanto, apresenta algumas limitações quanto ao modelo, tais como, as dimensões são 2,5D e os alvos são considerados homogêneos com comprimentos infinitos perpendicular ao plano 2D em que são definidos; e quanto às respostas GPR, elas não incluem fenômenos de onda, tais como as difrações ⁴. Os autores concluíram que esse tipo de simulação numérica revela a potencialidade do método GPR, sendo útil para detectar objetos

² Quando as antenas transmissoras são colocadas ao lado das antenas receptoras com espaçamento nulo.

³ Representação espacial em duas dimensões, mostrando uma seção em corte, contendo detalhes referentes às cavidades, furos e entalhes.

⁴ Fenômeno que permite que as ondas contornem os obstáculos, desde que eles tenham dimensões comparáveis ao comprimento de onda (Ferraro & Soares, 1998).

enterrados e detalhar suas geometrias e conteúdos; além disso, permite auxiliar na escolha apropriada das frequências e separação das antenas.

Chen & Huang (1998) desenvolveram modelos sintéticos utilizando o método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD – *Finite Difference Time Domain*), simulando diferentes tipos de geometrias para o levantamento de radar, baseados em uma configuração dipolar transmissor-receptor e no conceito de *exploding reflector*⁵. Esse trabalho demonstra a robustez da simulação de dados GPR para os campos elétricos ortogonais à direção das estruturas. Os autores não consideram explicitamente os efeitos secundários, tais como, campos magnéticos induzidos. Eles estudaram os efeitos da atenuação em radargramas sintéticos visando aliviar os efeitos de contorno computacionais e verificaram a viabilidade de aplicações do GPR por meio de comparações entre dados de campos e simulações numéricas.

Carcione *et al.* (2000) realizaram um estudo de modelagem numérica com dados GPR em uma área contaminada localizada em uma base militar na Polônia. A área apresentava uma acentuada poluição devido à desmontagem dos tanques de combustíveis, que sucedeu depois da mudança política em 1990, na antiga União Soviética. Como uma etapa inicial para aquisição de dados, eles simularam e avaliaram as respostas esperadas do GPR para camadas contaminadas e não contaminadas. Para os autores, o uso dessas calibrações, pode possibilitar o mapeamento das características geométricas de áreas contaminadas por hidrocarbonetos a partir das simulações de dados GPR.

Hammon III *et al.* (2000) simularam por meio das FDTD 2.5D respostas GPR para restos de corpos humanos enterrados, propondo uma avaliação do método aplicado aos estudos *forenses*. As simulações numéricas foram desenvolvidas a partir de sete modelos correspondentes aos corpos enterrados em função dos efeitos da frequência do radar, tipo de solo e saturação da água, profundidade dos alvos, separação das antenas, quantidade de decomposição, complexidade da estratigrafia do solo, e os incrementos espaciais e temporais. Segundo os autores, para determinar os detalhes internos do corpo humano, as frequências do GPR devem ser iguais ou maiores que 900 MHz e o incremento espacial deve ser menor ou igual a 0.01 m.

Radzevicius *et al.* (2003) simularam mecanismos de radiação de dipolo horizontal por meio do método FDTD. Os autores utilizaram um pulso gaussiano como sinal de entrada para

⁵ Método de modelagem sísmica no qual as interfaces são tratadas como fontes externas que, ao explodirem geram ondas com amplitudes proporcionais aos coeficientes de reflexão. É similar à migração, onde os alvos são reposicionados em suas verdadeiras posições espaciais (Duarte, 1997).

alimentar um dipolo horizontal infinitesimalmente pequeno para as simulações FDTD. Por meio do trabalho, eles concluíram que esse tipo de modelagem numérica é uma importante ferramenta para a compreensão e visualização da propagação da frente de ondas e da dispersão em função do tempo e do espaço.

Lampe *et al.* (2003), por meio de simulações numéricas, testaram e compararam a precisão do algoritmo FDTD utilizando medidas de laboratório através de diferentes polarizações do sinal EM nas antenas, com o objetivo de avaliar o padrão de resposta para cada configuração. De acordo com os autores, os padrões de radiação sintéticos demonstram que a iluminação da subsuperfície varia significativamente conforme a antena é disposta ao longo do perfil a ser modelado. Assim, os modelos mostraram efeitos variados em função da polarização das antenas.

4.2 O MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

As simulações numéricas GPR 2D dos tambores metálicos e plásticos enterrados no SCGR-IAG foram realizadas utilizando-se o método FDTD (Farias, 1996; Cunha, 2003). O Método consiste na aplicação de procedimentos matemáticos computacionais, utilizando a implementação de códigos que obedeçam aos algoritmos lógicos, para obter a solução de um problema de caráter científico através de aproximações numéricas sucessivas. Para tanto, o método FDTD busca substituir as equações diferenciais por diferenças finitas obtidas por meio da expansão em Série de Taylor e truncamento ao nível da ordem de erro desejada. As equações de Maxwell são resolvidas via equações algébricas, considerando o conceito de discretização desenvolvido por Euler, na qual as taxas relacionadas às derivadas são substituídas por incrementos espaciais (Δx) e temporais (Δt) (Costa, 2002). Dessa forma, o modelo é discretizado por uma malha geométrica 2D, ou seja, um *grid* caracterizado por um conjunto finito de pontos, representados pelos chamados *nós* da malha, tornando tratável um sistema complexo (Cunha, 2003). A Figura 4.1 mostra o modelo do *grid* de uma malha geométrica 2D para as ondas elétricas transversais em coordenadas cartesianas 2D.

Figura 4.1. Malha geométrica 2D utilizada na discretização do modelo.

Para realizar as simulações GPR 2D dos alvos enterrados na Linha 4 (tambores metálicos) e na Linha 5 (tambores plásticos) do SCGR-IAG, foi utilizado o software REFLEXW (Sandmeier, 2003), que faz uso do método FDTD. Como mencionado anteriormente, o modelo é elaborado através de um sistema discreto composto por uma malha geométrica 2D. As simulações foram realizadas utilizando frequências centrais de 100 MHz, 200 MHz, 300 MHz e 500 MHz. Foram utilizados incrementos espaciais (Δx) de 0.05 m, 0.1 m e 0.2 m e incrementos temporais (Δt) de 0.0943 ns, 0.3771 ns e 0.1886 ns, respectivamente. Os valores de Δt são calculados automaticamente pelo software, respeitando o critério de estabilidade numérica e proporcionando condições de convergência ao sistema (Taflove & Brodwin, 1975; Sandmeier, 2003). O valor máximo para o incremento temporal (Δt) depende da velocidade máxima do meio (V) e do incremento espacial (Δx), dado aproximadamente por:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{2V}} \quad (4.1)$$

O tamanho do incremento espacial está relacionado ao comprimento de onda mínimo, isto é, depende da escolha dos parâmetros físicos e da frequência central da antena. Todavia, vale lembrar que a simulação numérica é baseada na solução das Equações de Maxwell, então assume-se que os parâmetros físicos são independentes da frequência e que são constantes na direção “z”. Dependendo da escolha do incremento espacial e temporal pode ocorrer uma dispersão numérica (não física), pois ela pode influenciar a velocidade de propagação numérica da onda EM em uma malha de diferenças finitas, gerando o erro numérico. A

dispersão numérica está diretamente relacionada à densidade de amostragem (Belém, 2001; Sandmeier, 2003).

A escolha das condições de contorno absorventes é importante para a simulação numérica da propagação de ondas eletromagnéticas, visto que em situações reais, a área de interesse é infinita em algumas direções, e em contrapartida no domínio computacional a memória é finita. Assim, as condições de contorno absorventes lineares, *linear absorbing-range*, foram utilizadas visando limitar no espaço a região infinita, proporcionando uma diminuição de reflexões espúrias dos contornos do modelo, através do aumento gradativo da condutividade, alcançando um valor máximo nas extremidades (Sandmeier, *op cit.*). O valor máximo da condutividade é definido pela expressão:

$$\sigma = f_{ac} \omega \epsilon_{act} \epsilon_o , \quad (4.2)$$

onde ϵ_{act} é a constante dielétrica atual do último ponto do modelo antes do contorno,

$$f_{ac} \text{ é igual a } \frac{\text{Size}}{50}$$

Size = número de pontos do *grid*

A polarização do campo EM escolhida para o registro dos sinais foi a componente Ey, onde as antenas são posicionadas perpendiculares à direção do perfil (ou seja, modo TE – Transversal Elétrico), para se obter o máximo acoplamento entre os sinais transmitidos e recebidos (Annan, 1992; Versteeg, 1996; Daniels, 1996; Olhoeft, 2000).

Considerando o enfoque da pesquisa e visando simular um perfil GPR *zero-offset*, o campo de ondas foi gerado aplicando-se o conceito *exploding reflector*, no qual as ondas são geradas simultaneamente a partir do refletor e enviadas para a superfície (Yilmaz, 1987). Por outro lado, sabe-se que nesse procedimento a onda eletromagnética tem apenas o tempo de ida e que, na realidade, no procedimento usado na aquisição com o GPR a onda refletida é registrada em função do tempo duplo (tempo de percurso de ida e volta). Para que o tempo de ida simule um valor equivalente ao tempo duplo, a velocidade do meio é dividida por dois ($v/2$) na modelagem numérica (Sandmeier, *op cit.*).

Uma vantagem de se utilizar esse tipo de fonte é que a parte cinemática das reflexões primárias (relativas a curvatura das hipérboles dos tambores metálicos e plásticos) é corrigida, colapsando a energia da onda difratada para o ápice da hipérbole, sendo um procedimento comum na etapa de migração dos dados sísmicos e de GPR (Yilmaz, *op cit.*). Uma outra

vantagem é que o uso de uma fonte do tipo refletor explosivo não gera efeito de borda no modelo simulado, o qual é comum quando se usa uma fonte do tipo onda plana (Sandmeier, *op cit.*).

Os modelos sintéticos para simular as Linhas 4 e 5 do SCGR foram construídos por uma camada de solo, sendo caracterizado como o *background*, seguido dos tambores metálicos e plásticos. Na Tabela 4.1 são apresentadas as dimensões dos alvos referentes à Linha 4 (tambores metálicos) e a Linha 5 (tambores plásticos).

Tabela 4.1. Dimensão dos alvos das Linhas 4 e 5 do SCGR.

Alvos	Espessura do material (cm)	Comprimento (cm)	Diâmetro (cm)
Tambores metálicos	0.1214	86	59
Tambores plásticos	0.175	69	47
Cano metálico	0.13	5000	3.8

Para as simulações numéricas dos tambores metálicos, tambores plásticos e o *background* do terreno foram utilizados valores teóricos para as propriedades físicas encontradas na literatura específica (Annan, 1992; Daniels, 1996; Zeng & McMechan, 1997). Na Tabela 4.2 são apresentados os valores das propriedades físicas dos materiais utilizados nas simulações GPR, onde ϵ_r é a permissividade dielétrica relativa, σ é a condutividade em S/m e μ_r é a permeabilidade magnética relativa.

Tabela 4.2. Propriedades físicas dos materiais utilizados nas simulações GPR 2D.

Material	ϵ_r	μ_r	σ (S/m)
Solo argiloso (<i>background</i>)	18	1	10^{-2}
Plástico	3.3	1	0
Ar	1	1	0
Água doce	81	1	5×10^{-4}
Água salgada	81	1	3
Metal	300	100	10^{10}

O primeiro modelo construído corresponde à Linha 4 do SCGR (Figura 2.3), sendo caracterizada por tambores metálicos enterrados na horizontal e na vertical, e por um cano metálico. O cano metálico servirá como um guia de referência para todas as outras linhas que

compõem o SCGR, estando enterrado a 0.5 m de profundidade e na posição de 15 m. Na Tabela 4.3 são mostradas as disposições dos tambores metálicos sob a Linha 4 do SCGR.

Tabela 4.3. Descrição dos alvos da Linha 4 do SCGR.

Alvos	X(m)	Y(m)	Prof (m)	Descrição dos alvos
1	27	3	2	Tambor de aço de 200 litros vazio, horizontal
2	27	7	0.5	Tambor de aço de 200 litros vazio, horizontal
3	27	11	1	Tambor de aço de 200 litros vazio, horizontal
4	27	15	0.5	Cano metálico de 3.8 cm de diâmetro
5	27	19	1	Tambor de aço de 200 litros vazio, horizontal
6	27	20	1	Tambor de aço de 200 litros vazio, horizontal
7	27	24	1	Tambor de aço de 200 litros vazio, vertical
8	27	28	2	Tambor de aço de 200 litros vazio, vertical

O segundo modelo construído corresponde à Linha 5 do SCGR (Figura 2.4), sendo caracterizada por tambores plásticos na vertical e por um cano metálico. Na Tabela 4.4 são apresentadas as posições dos alvos e as descrições dos produtos que estão no interior dos tambores plásticos.

Tabela 4.4. Descrição dos alvos instalados na Linha 5 do SCGR.

Alvos	X(m)	Y(m)	Prof (m)	Descrições
9	36	1	1	Tambor plástico de 100 litros, vertical, vazio
10	36	4	1	Tambor plástico de 100 litros, vertical, cheio de água doce
11	36	7	0.5	Tambor plástico de 100 litros, vertical, semi preenchido com água salgada
12	36	10	0.5	Tambor plástico de 100 litros, vertical, cheio de água salgada
13	36	13	1.5	Tambor plástico de 100 litros, vertical, cheio de água salgada
14	36	15	0.5	Cano metálico de 3.8 cm de diâmetro
15	36	17	1.5	Tambor plástico de 100 litros, vertical, cheio de água doce
16	36	20	0.5	Tambor plástico de 100 litros, vertical, vazio
17	36	23	0.5	Tambor plástico de 100 litros, vertical, cheio de água doce
18	36	26	0.5	Tambor plástico de 100 litros, vertical, semi preenchido com água salgada
19	36	29	0.5	Tambor plástico de 100 litros, vertical, cheio de água salgada

4.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES GPR 2D

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações GPR 2D dos modelos sintéticos correspondentes à Linha 4 (Figura 2.3) e à Linha 5 (Figura 2.4) do SCGR para diferentes frequências e espaçamentos. A velocidade de 0.07 m/ns foi utilizada na conversão do tempo em profundidade.

Na Figura 4.2 é apresentado o resultado da simulação numérica da Linha 4, utilizando as antenas de 100 MHz e espaçamento entre os traços (Δx) de 0.05 m. Os vértices dos refletores hiperbólicos são interpretados como o topo dos tambores, ou seja, interface solo argiloso/metal. A comprovação é realizada pelo cálculo do tempo de percurso da reflexão da onda na interface. Para os tambores 1 e 8, que estão a 2 m de profundidade, $T = 57.14$ ns. Já o tambor 2 e o cano metálico a 0.5 m de profundidade, $T = 14.28$ ns. E nos tambores 3, 5, 6 e 7 localizados a 1 m de profundidade, $T = 28.57$ ns. Estes valores encontrados para todas as interfaces solo argiloso/metal são condizentes com as respostas das simulações numéricas referentes ao primeiro refletor hiperbólico de cada tambor.

As bases dos tambores metálicos não podem ser identificadas, devido o coeficiente de reflexão da onda EM referente à interface solo argiloso/metal ser igual a 1, ou seja, 100% da onda EM é refletida.

Figura 4.2. Simulação GPR 2D da Linha 4, utilizando antenas de 100 MHz.

Na Figura 4.3 é apresentado o resultado da simulação numérica da Linha 4, utilizando as antenas de 200 MHz e $\Delta x = 0.05$ m. Os mesmos refletores hiperbólicos referentes à interface solo argiloso/metal são observados nesta simulação GPR. As reflexões abaixo do topo do primeiro refletor são reverberações que surgem devido ao aumento da frequência das antenas (menores comprimentos de onda).

Figura 4.3. Simulação GPR 2D da Linha 4, utilizando antenas de 200 MHz.

Na Figura 4.4 é mostrado o resultado da simulação numérica da Linha 4, utilizando as antenas de 300 MHz e $\Delta x = 0.05$ m. Nesta figura, observa-se que a amplitude da reflexão no topo dos tambores metálicos diminui devido ao aumento da frequência das antenas provocando uma maior atenuação do sinal EM.

Figura 4.4. Simulação GPR 2D da Linha 4, utilizando antenas de 300 MHz.

Na Figura 4.5 é mostrado o resultado da simulação numérica da Linha 4, utilizando as antenas de 500 MHz e $\Delta x = 0.05$ m. Os resultados obtidos com esta frequência confirmam a limitação da profundidade de investigação em altas frequências. Com esta antena torna-se complicado mapear o topo dos tambores que estão abaixo de 1 m de profundidade.

Figura 4.5. Simulação GPR 2D da Linha 4, utilizando antenas de 500 MHz.

Na Figura 4.6 é apresentado o resultado da simulação numérica da Linha 5, referente aos tambores plásticos preenchidos com diferentes conteúdos, utilizando as antenas de 100 MHz e $\Delta x = 0.05$ m. Nos tambores 9 e 16 (vazios) dispostos a 1 m e 0.5 m de profundidade, observam-se os vértices dos refletores hiperbólicos interpretados como topo dos tambores (interface solo argiloso/ar). A comprovação é feita pelo cálculo do tempo de percurso para o primeiro refletor hiperbólico ($T = 28.57$ ns para o tambor 9, e $T = 14.28$ ns para o tambor 16). A base destes tambores não pode ser identificada, pois o tempo de percurso para a reflexão da onda eletromagnética é de 4.6 ns, portanto, o tempo esperado para a reflexão na base do tambor 9 é de 33,17 ns e na base do tambor 16 é de 18,88 ns. Nota-se que existe uma sobreposição do 1º refletor (topo) com o 2º refletor (base), sendo de difícil distinção.

Figura 4.6. Simulação GPR 2D da Linha 5, utilizando antenas de 100 MHz.

Para comprovar esta análise, foi realizada uma modelagem numérica de uma tubulação de PVC vazia (Figura 4.7) com 3 m de diâmetro e a 0.5 m de profundidade. Foi utilizado as antenas de 100 MHz e $\Delta x = 0.05$ m.

Figura 4.7. Disposição espacial de uma tubulação de PVC vazia.

O resultado da modelagem desta tubulação de PVC (Figura 4.8) mostra claramente o topo e a base, semelhante aos resultados obtidos por Zeng & McMechan (1997). Conforme os autores, torna-se difícil à caracterização do topo e base de tubulações vazias com diâmetros menores do que 1.5 m, devido à sobreposição dos refletores.

Figura 4.8. Simulação GPR 2D de uma tubulação de PVC vazia com antenas de 100 MHz.

Conforme é observado na Figura 4.8, a reflexão na base da tubulação não ocorre em sua profundidade verdadeira. Este fato deve-se a velocidade de propagação da onda EM

dentro da tubulação que está vazia, ou seja, a onda viaja com a velocidade da luz que é muito maior que a velocidade no solo argiloso (*background*). Como já mencionado, a velocidade de 0.07 m/ns foi utilizada na conversão do tempo em profundidade. Neste caso, observa-se que existe coerência apenas para o valor da profundidade referente ao topo da tubulação.

Na Figura 4.6, os tambores 10, 15 e 17 (preenchidos com água doce), a 1 m, 1.5 m e 0.5 m de profundidade, respectivamente, são caracterizados por três fracos refletores hiperbólicos referentes ao topo ($T = 28.57$ ns para o tambor 10, $T = 42.86$ ns para o tambor 13 e $T = 14.28$ ns para o tambor 17) e três refletores referentes à base ($T = 70.38$ ns para o tambor 10, $T = 84.67$ ns para o tambor 13 e $T = 56.09$ ns para o tambor 17). Observa-se que os refletores da base são mais fortes que os do topo, e que a polaridade das reflexões nos tambores preenchidos com água doce está invertida em relação aos tambores vazios, devido aos contrastes negativos nas constantes dielétricas conforme o cálculo do coeficiente de reflexão baseado na expressão (3.12). Além disso, os refletores menos acentuados (topo dos tambores) estão relacionados a uma fraca impedância elétrica entre o solo argiloso, o PVC e o topo do tambor preenchido com água doce e uma elevada atenuação do sinal, visto que a condutividade elétrica do solo argiloso é maior que a da água doce.

Para comprovar que o segundo refletor, visualizado na Figura 4.6, está relacionado à base do tambor plástico preenchido com água doce e não refere-se a um “artefato” gerado pela interferência dos refletores vizinhos, foi simulado apenas um tambor preenchido com água doce, colocado na posição de 15 m de distância e a 0.5 m de profundidade (Figura 4.9), utilizando as antenas de 100 MHz. Na Figura 4.10 é mostrado o resultado obtido, confirmando, portanto, que os refletores hiperbólicos que ocorrem nos tempos mencionados no parágrafo anterior, são devidos à base do tambor com água doce. O atraso no tempo de reflexão na base do tambor preenchido com água doce é devido à baixa velocidade do GPR na água (0.033 m/ns).

Figura 4.9. Disposição espacial de um tambor de plástico preenchido com água doce.

Figura 4.10. Simulação GPR 2D para o tambor preenchido com água doce, utilizando antenas de 100 MHz.

Nos tambores 11 e 18 (semi preenchidos com água salgada), a determinação do topo da interface solo argiloso/ar é alcançada, sendo caracterizada por uma reflexão de intensidade similar a encontrada para o tambor 9 e 16 (Figura 4.6). Entretanto, não é possível localizar o limite superior da água salgada, pelas mesmas razões explicadas anteriormente para a base do tambor vazio.

Nos tambores 12, 13 e 19 (preenchidos com água salgada), observa-se somente um

forte refletor hiperbólico correspondente ao topo dos tambores (Figura 4.6). A reflexão na sua base não pode ser visualizada devido à elevada atenuação da onda eletromagnética.

Nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 são mostrados os resultados da simulação numérica da Linha 5, utilizando $\Delta x = 0.05$ m e as antenas de 200 MHz, 300 MHz e 500 MHz, respectivamente. Nestas figuras, os vértices dos refletores hiperbólicos correspondem ao topo dos tambores; percebe-se que em altas frequências ocorre uma reverberação dos sinais refletidos no topo dos tambores devido ao pequeno comprimento de onda EM. Nos tambores vazios (alvos 9 e 16) a reflexão ocorre de maneira incipiente, devido à elevada atenuação da onda eletromagnética em altas frequências. Nos tambores preenchidos com água doce (alvos 10, 15 e 17) observam-se várias reverberações devido à presença da água e a visualização da base dos tambores torna-se mais difícil com o aumento das frequências.

Nos tambores semi-preenchidos com água salgada (alvos 11 e 18) nota-se que as reflexões são mais fracas no topo dos tambores devido à presença do ar, seguido por uma forte reflexão no topo da água salgada, somada às reverberações.

Nos tambores preenchidos com água salgada (alvos 12, 13 e 19) observa-se que as reflexões no topo dos tambores sempre ocorrem associadas às reverberações, o que caracterizam a presença de fluidos dentro deles.

O cano metálico (alvo 14) aparece como um forte refletor hiperbólico para a frequência de 200 MHz (Figura 4.11) e sua amplitude diminui para as antenas de 500 MHz (Figura 4.15) devido à atenuação da onda EM nas frequências altas.

Figura 4.11. Simulação GPR 2D da Linha 5, utilizando antenas de 200 MHz.

Figura 4.12. Simulação GPR 2D da Linha 5, utilizando antenas de 300 MHz.

Figura 4.13. Simulação GPR 2D da Linha 5, utilizando antenas de 500 MHz.

Os resultados mostraram que ambos tambores, metálicos e plásticos, podem ser caracterizados utilizando-se o método GPR. Através desses resultados é possível prever se os alvos em subsuperfície estão vazios ou preenchidos com algum tipo de produto. Os melhores resultados foram obtidos com as antenas de 100 MHz, e com as antenas de 300 MHz e 500 MHz, torna-se difícil identificar a base dos tambores preenchidos com água doce, devido à atenuação do sinal.

Nas simulações numéricas nota-se que quanto maior a frequência da antena maior a quantidade de reverberações. A ocorrência das reverberações está relacionada a três fatores: menor comprimento de onda, a fonte de onda EM utilizada na simulação numérica que é do tipo *exploding reflector* e os elevados contrastes entre as condutividades elétricas dos materiais modelados (Sandmeier, 2003).

A seguir é apresentado os resultados das simulações numéricas realizados com as antenas de 100 MHz variando os incrementos espaciais, Δx , usando a fonte *exploding reflector*.

Nas Figuras 4.14 e 4.15 são mostrados os resultados das simulações obtidos para a Linha 4, referente aos tambores metálicos, Δx iguais a 0.1 m e 0.2 m, respectivamente. Nas Figuras 4.16 e 4.17 são mostrados os resultados das simulações obtidos para a Linha 5, referente aos tambores de plástico. Nota-se que com o aumento gradativo dos valores dos

incrementos espaciais a resolução diminui, comprometendo a visualização e identificação dos alvos.

Segundo Sandmeier (*op cit.*), quando o incremento espacial escolhido, Δx , possui um valor elevado, ocorre uma dispersão numérica da frente de onda, portanto, deve-se diminuir o valor do incremento, para melhorar a resolução espacial.

Figura 4.14. Simulação GPR 2D da Linha 4, utilizando antenas de 100 MHz, $\Delta x = 0.10$ m.

Figura 4.15. Simulação GPR 2D da Linha 4, utilizando antenas de 100 MHz, $\Delta x = 0.20$ m.

Figura 4.16. Simulação GPR 2D da Linha 5, utilizando antenas de 100 MHz, $\Delta x = 0.10$ m.

Figura 4.17. Simulação GPR 2D da Linha 5, utilizando antenas de 100 MHz, $\Delta x = 0.20$ m.

CAPÍTULO 5

AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS GPR

Este capítulo refere-se aos trabalhos de aquisição, processamento e interpretação dos dados GPR sobre duas linhas instaladas no SCGR: uma contendo tambores metálicos e outra contendo tambores plásticos. Os seguintes tópicos serão abordados: descrição do sistema de aquisição dos dados GPR, testes práticos com o “trenó”, escolha dos parâmetros ótimos para a aquisição dos dados, processamento e interpretação dos dados.

5.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DOS DADOS GPR

O levantamento geofísico foi realizado com um equipamento fabricado pela empresa sueca, *Mala GeoScience*, disponível no Laboratório de Geofísica Aplicada do IAG – USP. O sistema é composto por seis módulos: antenas transmissora e receptora; unidades eletrônicas do transmissor e receptor; unidade de controle central e um computador (Figura 5.1). Os cabos de fibra ótica e de comunicação paralelo são utilizados para conectar os módulos eletrônicos e o computador à unidade de controle central, respectivamente.

A unidade de controle envia sinais simultâneos para os dois módulos eletrônicos das antenas. O módulo eletrônico transmissor gera pulsos de curta duração e de alta voltagem que percorrem a antena transmissora e são enviados para a subsuperfície (Annan, 1992; Daniels, 1996). Segundo Conyers & Goodman (1997), a taxa de transmissão dos sistemas GPR varia de 25000 a 50000 pulsos por segundo. O módulo receptor ao detectar o sinal de controle inicia a coleta dos dados, enviando os sinais refletidos para a unidade de controle central.

A frequência central, nem sempre corresponde ao valor nominal da antena, ou seja, variações referentes a esse espectro ocorrem devido ao acoplamento das antenas e aos seus componentes eletrônicos. A relação entre a frequência central e a largura da banda de frequências é aproximadamente igual a 1, portanto, a radiação de um pulso possui uma energia que pode variar de 0.5 até 1.5 vezes a frequência central (Annan, 1992; Porsani, 1999a; Prado, 2000).

Figura 5.1. Módulos do sistema GPR.

As aquisições dos dados GPR foram divididas em duas etapas: “antes” e “depois” da instalação dos alvos no SCGR do IAG. Os trabalhos de campo foram realizados através da técnica de perfil de reflexão com afastamento constante, na qual as antenas transmissora e receptora são separadas por uma distância fixa e conduzidas ao longo da linha a ser investigada, resultando em um mapeamento das reflexões relacionadas ao tempo de percurso das ondas refletidas versus a distância correspondente às posições das antenas. O perfil de reflexão com afastamento constante pode ser realizado por meio de dois modos: passo-a-passo – as antenas são carregadas pelas mãos do usuário a cada incremento espacial (Δx); e contínuo – as antenas são rebocadas com o auxílio de trenós, carros ou barcos sem haver interrupções.

5.2 TESTES PRÁTICOS COM O REBOCADOR DE ANTENAS “TRENÓ”

Uma vez que as aquisições dos dados GPR com antenas não blindadas no modo passo-a-passo são mais demoradas que as realizadas com antenas blindadas no modo contínuo, o Professor Dr. Francisco Hiodo do Laboratório de Instrumentação Geofísica do IAG, desenvolveu um rebocador para as antenas GPR não blindadas, denominado de “trenó” do GPR (Figura 5.2), visando otimizar os trabalhos de campo. Ambas aquisições de dados realizadas com as antenas não blindadas no modo passo-a-passo e contínuo (“trenó”) foram

comparadas, com o intuito de identificar qual o melhor resultado considerando o tempo de aquisição e a qualidade dos dados GPR.

Figura 5.2. Treno utilizado para rebocar as antenas não blindadas de 100 MHz.

Para testar a eficiência do treno do GPR e obter dados de boa qualidade, vários perfis GPR experimentais foram realizados visando à obtenção dos parâmetros ótimos para a aquisição dos dados. Neste sentido, os seguintes parâmetros foram testados: o incremento espacial entre os traços (Δx) visando uma boa resolução espacial e o número de empilhamento dos traços. Segundo Versteeg (1996), a melhor relação sinal/ruído é alcançada quanto maior for o empilhamento dos traços. Foram utilizadas as antenas de 100 MHz e 200 MHz não blindadas através do modo contínuo. Os incrementos espaciais (Δx) utilizados foram de 0.05 m e 0.2 m, e as distâncias foram controladas por um odômetro acoplado ao treno e conectado ao módulo de controle do GPR. Na Figura 5.3 é mostrado o arranjo utilizado na aquisição dos dados GPR com o treno.

Figura 5.3. Aquisição de dados com antenas não blindadas de 200 MHz acopladas ao tremó.

Nas Figuras 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7 são mostrados os perfis GPR “A”, “B”, “C” e “D”. Os parâmetros utilizados na obtenção de cada perfil GPR são apresentados na Tabela 5.1. Nota-se que no resultado apresentado pelo perfil “A”, não há uma boa relação entre os traços, isto ocorre devido ao peso do “tremó”, isto é, muito leve, que ao ser conduzido a uma rápida velocidade ($v > 4.2$ m/min e $v > 18.6$ m/min, para *stack* de 64 e 32, respectivamente), provoca vibrações as quais dificultam o seu acoplamento com o solo e em consequência, produz deslocamentos quanto à posição da onda aérea no perfil. No perfil “B”, com a diminuição do *stack*, de 64 para 32, nota-se que os traços estão correlacionados. Nos perfis “C” e “D”, obtidos com as antenas de 100 MHz e 200 MHz, respectivamente, observa-se com clareza o aumento da resolução espacial em razão da diminuição do espaçamento entre os traços, de $\Delta x = 0.20$ m para $\Delta x = 0.05$ m.

Portanto, os resultados obtidos com os testes foram satisfatórios e o “tremó GPR” foi utilizado efetivamente nos trabalhos de campo deste projeto de pesquisa. Em todos os dados GPR (antenas não-blindadas acopladas ao tremó) adquiridos por meio do modo contínuo, foram utilizados os seguintes parâmetros: *stack* de 32 e $\Delta x = 0.05$ m.

Tabela 5.1. Parâmetros utilizados na aquisição dos dados GPR com as antenas não blindadas acopladas ao trenó.

Perfil GPR	Frequências das antenas (MHz)	Stack	Δx (m)
“A”	100	64	0.20
“B”	100	32	0.20
“C”	100	32	0.05
“D”	200	32	0.05

Figura 5.4. Perfil GPR “A” obtido com antenas de 100 MHz, *stack* de 64, $\Delta x = 0.2$ m.

Figura 5.5. Perfil GPR “B” obtido com antenas de 100 MHz, *stack* de 32, $\Delta x = 0.20$ m.

Figura 5.6. Perfil GPR “C” obtido com antenas de 100 MHz, *stack* de 32, $\Delta x = 0.05$ m.

Figura 5.7. Perfil GPR “D” obtido com antenas de 200 MHz, *stack* de 32, $\Delta x = 0.05$ m.

5.3 AQUISIÇÃO DOS DADOS GPR “ANTES” DA INSTALAÇÃO DO SCGR

Após a realização dos testes com o trenó e das simulações numéricas 2D, iniciou-se a primeira etapa de aquisição de dados, tendo como finalidade a obtenção de perfis geofísicos referentes ao *background* do terreno. Para tanto, os perfis foram adquiridos no modo contínuo com antenas blindadas (100 MHz e 500 MHz) e não blindadas (100 MHz e 200 MHz); e no modo passo-a-passo foram utilizadas as antenas não blindadas de 100 MHz e 200 MHz. A aquisição dos dados foi realizada sobre as Linhas 4 e 5 do SCGR; cada linha foi planejada com 30 m de comprimento, entretanto, cada perfil GPR totalizou 34 m de comprimento, sendo 2 m antes do ponto inicial (0 m) e 2 m depois do ponto final (30 m). Foram adquiridos 12 perfis GPR:

- 6 perfis adquiridos com as antenas de 100 MHz (antenas não blindadas: 2 perfis no modo passo-a-passo e 2 perfis no modo contínuo; e antenas blindadas: 2 perfis no modo contínuo),

- 4 perfis com as antenas de 200 MHz (antenas não blindadas: 2 perfis no modo passo-a-passo e 2 perfis no modo contínuo); e
- 2 perfis com as antenas de 500 MHz blindadas.

O espaçamento utilizado entre as antenas transmissora e receptora foi de 1 m, 0.6 m e 0.2 m para as frequências centrais de 100 MHz, 200 MHz e 500 MHz, respectivamente. O espaçamento entre os perfis foi de 1 m e o número de amostras por traço, isto é, *samples* igual a 512. Todos perfis foram adquiridos usando as antenas transversais à direção do perfil, padrão de radiação TE (Transversal Elétrico), devido a maior área de iluminação da antena (Daniels, 1996; Porsani, 1999). Na Tabela 5.2 é mostrado um resumo dos parâmetros utilizados na aquisição dos dados com as várias antenas. Na Figura 5.8 são mostrados os arranjos de campo utilizados para as várias antenas do GPR.

Tabela 5.2 Parâmetros utilizados na aquisição dos dados GPR antes da instalação do SCGR.

Antenas	Modo de Aquisição	Stack	Δx	Frequência de amostragem (MHz)
100 MHz – não blindadas	Passo – a – passo	256	0.2 m	1025
100 MHz – não blindadas	Contínuo – trenó	32	0.05 m	1025
100 MHz – blindadas	Contínuo	32	0.05 m	1983
200 MHz – não blindadas	Passo – a – passo	256	0.2 m	2125
200 MHz – não blindadas	Contínuo – trenó	32	0.05 m	2125
500 MHz – blindadas	Contínuo	32	0.05 m	5377

a) Antenas não blindadas de 100 MHz.

b) Antenas não blindadas de 100 MHz acopladas ao trenó.

c) Antenas blindadas de 100 MHz.

d) Antenas não blindadas de 200 MHz acopladas ao trenó.

e) Antenas não blindadas de 200 MHz.

f) Antenas blindadas de 500 MHz.

Figura 5.8. Arranjos de campo utilizados para as várias antenas do GPR.

5.3.1 PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Os dados adquiridos na primeira etapa foram processados utilizando o software *Gradix*. O processamento é constituído por três etapas: edição dos dados, processamento do sinal e apresentação das imagens processadas. As etapas utilizadas no processamento são mostradas no fluxograma da Figura 5.9.

Figura 5.9. Fluxograma do processamento dos dados GPR.

A primeira etapa do processamento dos dados consiste na importação dos dados adquiridos nos levantamentos de campo e na criação de um projeto. Na etapa seguinte relacionada à edição dos dados, são inseridas as informações sobre o cabeçalho, geometria e direção dos perfis.

Na correção do tempo zero os traços foram ajustados ao tempo de chegada da primeira onda (onda aérea). Em seguida foi analisado o espectro de frequências, sendo um passo importante para se avaliar a qualidade dos dados e determinar dentro de uma banda limitada na frequência, onde estão contidos os sinais de maior amplitude (Yilmaz, 1987). Após a análise espectral, foi aplicada a filtragem temporal do tipo passa banda, visando melhorar a razão sinal/ruído, realçando a estrutura que está sendo investigada e removendo os ruídos.

Os ganhos no tempo foram utilizados para recuperar os sinais atenuados devido às perdas decorrentes dos espalhamentos geométricos e dispersões, relacionadas à propagação da onda até ser registrada nos receptores. Foram utilizados ganhos lineares, esféricos e exponenciais.

A filtragem espacial *moving average* (média móvel), filtro passa baixa, foi utilizada para realçar a continuidade lateral dos refletores horizontais relacionados à estratigrafia do solo. Já a filtragem espacial *remoção do background*, filtro passa alta, realça os refletores pontuais e inclinados, além de remover as reverberações das antenas de altas frequências (Porsani, 1999). Portanto, no processamento dos dados, é importante a utilização dos dois filtros, pois produzem efeitos opostos sobre os dados GPR.

A velocidade é um importante fator utilizado na conversão do tempo de percurso das ondas refletidas em profundidade. Dessa forma, os valores de velocidades podem ser adquiridos: através da expressão ($v_a = 2h/t$), a qual relaciona os valores reais de profundidades das interferências e o tempo de percurso das reflexões medido no radargrama; ajustando-se as curvas de velocidades aos refletores hiperbólicos; ou ainda, por meio de sondagens de velocidades, CMP- *Common Mid Point* e WARR – *Wide Angle Reflection na Refraction*. Borges (2002) realizou sondagens CMP e WARR na área de estudos e obteve valores para as velocidades de propagação da onda EM no *background*. Desta forma, para converter o tempo/profundidade dos perfis adquiridos antes da instalação dos alvos, foi utilizada uma velocidade de 0,065 m/ns (Borges, *op.cit.*). Já nos perfis adquiridos depois da instalação dos alvos, as velocidades foram ajustadas através dos refletores hiperbólicos visualizados no radargrama.

Nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 são mostrados os perfis GPR sobre a Linha 4, onde serão instalados os tambores metálicos. Os perfis foram adquiridos com as antenas de 100 MHz não blindadas, através dos modos passo-a-passo e contínuo (antenas rebocadas pelo trenó); e blindadas no modo contínuo, respectivamente. É interessante observar que os perfis GPR referentes aos dados adquiridos através do modo contínuo (Figuras 5.11 e 5.12), apresentaram uma melhor resolução espacial, devido ao menor valor do incremento espacial.

Figura 5.10. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 100 MHz não blindadas, modo passo-a-passo, Δx de 0.2 m.

Figura 5.11. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 100 MHz não blindadas, modo contínuo – trenó, Δx de 0.05 m.

Figura 5.12. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 100 MHz blindadas, modo contínuo, Δx de 0.05 m.

Após a análise visual dos dados apresentados nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12, verificou-se a presença de refletores rasos e mais profundos, entre 0.8 m e 2 m de profundidade aproximadamente. Os refletores rasos, localizados a 0.8 m, estão relacionados à interface entre os solos argilo-arenoso e argiloso; e os refletores mais profundos, localizados entre 1.5 m e 2 m, estão relacionados à base do aterro na área de estudos, que é constituído por argila siltosa rica em matéria orgânica. Estas informações foram confirmadas com base nas descrições litológicas das trincheiras abertas para a instalação dos alvos (Figura 5.13). Abaixo destes refletores, o sinal é fortemente atenuado devido aos sedimentos condutores da Bacia de São Paulo (Borges, 2002; Porsani *et al.*, 2004).

Figura 5.13. Descrição litológica das trincheiras na Linha 4 (modificado de Borges, 2004).

Nas Figuras 5.14 e 5.15 são apresentados os perfis GPR sobre a Linha 4 adquiridos com as antenas de 200 MHz não blindadas nos modos passo-a-passo e contínuo (antenas rebocadas pelo trenó), respectivamente. Percebe-se que com o aumento da frequência, a atenuação da onda EM se torna mais intensa e há uma penetração máxima do sinal até 2 m de profundidade. Podemos identificar apenas os refletores mais rasos, os quais indicam o topo de um solo argiloso, todavia, não é possível visualizar os refletores associados à base do aterro, cuja constituição apresenta materiais altamente condutores.

Figura 5.14. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 200 MHz não blindadas, modo passo-a-passo, Δx de 0.2 m.

Figura 5.15. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 200 MHz não blindadas, modo contínuo – trenó, Δx de 0.05 m.

Na Figura 5.16 é mostrado o perfil GPR sobre a Linha 4 adquirido com as antenas de 500 MHz blindadas no modo contínuo. Nota-se que com o aumento das frequências, obtêm-se uma maior resolução vertical, relacionada diretamente ao menor comprimento de onda. Por outro lado, para as baixas frequências (Figuras 5.10, 5.11 e 5.12), têm-se maior profundidade de investigação.

Figura 5.16. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 500 MHz blindadas, modo contínuo, Δx de 0.05 m.

Nas Figuras 5.17, 5.18 e 5.19 são apresentados os perfis GPR sobre a Linha 5, onde serão instalados os tambores plásticos. Os perfis foram adquiridos com as antenas de 100 MHz não blindadas (nos modos passo-a-passo e contínuo) e blindadas no modo contínuo, respectivamente. Como foi observado nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12, a presença de refletores inclinados entre 1 m e 2 m de profundidade e atenuação do sinal entre 2 m e 2.5 m de profundidade correspondem à interface solo argilo-arenoso/solo argiloso e à base do aterro, respectivamente. Os refletores estão de acordo com os horizontes geológicos obtidos através da descrição litológica das trincheiras abertas para a instalação dos alvos (Figura 5.20).

Figura 5.17. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 100 MHz não blindadas, modo passo-a-passo, Δx de 0.2 m.

Figura 5.18. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 100 MHz não blindadas, modo contínuo – trenó, Δx de 0.05 m.

Figura 5.19. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 100 MHz blindadas, modo contínuo, Δx de 0.05 m.

Figura 5.20. Descrição litológica das trincheiras na Linha 5 (modificado de Borges, 2004).

Nas Figuras 5.21 e 5.22 são apresentados os perfis GPR sobre a Linha 5 adquiridos com as antenas de 200 MHz não blindadas nos modos passo-a-passo e contínuo, respectivamente. Também pode ser observada a atenuação da onda EM entre 1 e 2 m, devido às características condutoras dos materiais que constituem a região.

Figura 5.21. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 200 MHz não blindadas, modo passo-a-passo, Δx de 0.2 m.

Figura 5.22. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 200 MHz não blindadas, modo contínuo – trenó, Δx de 0.05 m.

Na Figura 5.23 é apresentado o perfil GPR sobre a Linha 5 adquirido com as antenas de 500 MHz blindadas no modo contínuo.

A análise dos perfis GPR adquiridos com as antenas de 100 MHz permitiu mapear a interface entre as camadas de solo areno-argiloso/solo argiloso e a base do aterro, disposto sobre os sedimentos da Bacia de São Paulo. É interessante notar que com o aumento da

frequência das antenas (200 MHz e 500 MHz), só foi possível mapear as camadas mais superficiais relacionadas aos primeiros refletores.

Figura 5.23. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 500 MHz blindadas, modo contínuo, Δx de 0.05 m.

5.4 AQUISIÇÃO DOS DADOS GPR “DEPOIS” DA INSTALAÇÃO DO SCGR

Após a implantação do SCGR-IAG, todos os perfis GPR referentes às Linhas 4 e 5 foram novamente adquiridos, seguindo as mesmas técnicas e parâmetros de campo escolhidos para a aquisição dos dados da primeira etapa. Na Tabela 5.3 são apresentadas as frequências de amostragem utilizadas na segunda etapa de aquisição de dados.

Tabela 5.3. Frequências de amostragem utilizadas na aquisição dos dados GPR depois da instalação do SCGR.

Antenas	Frequência de amostragem (MHz)
100 MHz – não blindadas	1032
100 MHz – não blindadas	1032
100 MHz – blindadas	1991
200 MHz – não blindadas	1991
200 MHz – não blindadas	2144
500 MHz – blindadas	5576

5.4.1 PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Os perfis adquiridos “depois” da instalação dos alvos no SCGR foram processados na forma de perfis 2D e interpretados individualmente. As etapas de processamento foram às mesmas utilizadas para os dados GPR obtidos na primeira etapa de aquisição do SCGR do IAG, conforme Figura 5.9.

A seguir, os resultados dos perfis GPR em profundidade são apresentados e analisados individualmente. Para a conversão tempo/profundidade, foi utilizado um modelo de velocidades obtido a partir dos ajustes das hipérboles de difração para cada alvo enterrado. Uma vez que os perfis em tempo foram convertidos em profundidade, o objetivo principal na análise dos perfis GPR é determinar a profundidade do topo dos alvos, e assim compará-la com sua profundidade real (item 2.3, Capítulo 2).

Na Figura 5.24 é apresentado o perfil GPR adquirido sobre a Linha 4, correspondente aos tambores metálicos. O perfil foi obtido com as antenas de 100 MHz não blindadas, modo passo-a-passo e $\Delta x = 0.2$ m.

Os topos dos sete tambores metálicos, dispostos tanto na horizontal quanto na vertical, bem como o topo do cano metálico guia, são caracterizados pelos vértices dos refletores hiperbólicos. O alvo 1, disposto na horizontal a 1.98 m de profundidade, é caracterizado por um fraco refletor hiperbólico quando comparado aos outros tambores instalados a profundidades mais rasas. A diminuição na amplitude do sinal é devido à atenuação da onda eletromagnética associada à elevada condutividade da camada de aterro, isto é, do *background*. No radargrama, o vértice deste refletor encontra-se em torno de 1.91 m de profundidade.

O topo dos alvos 2, 3, 5 e 6, instalados horizontalmente a 0.51 m, 0.98 m, 0.98 m e 0.99 m de profundidade, são caracterizados através dos vértices dos fortes refletores hiperbólicos em torno de 0.62 m, 1.07 m, 1.04 m e 1.06 m de profundidade, respectivamente.

Os alvos 7 e 8 foram identificados em torno de 1.04 m e 2.2 m de profundidade, respectivamente. Os refletores hiperbólicos referentes ao topo desses alvos é uma intersecção entre os refletores hiperbólicos gerados nas extremidades do tambor, ou seja, nos pontos de difração. Percebe-se que para o alvo 8 existe uma diferença entre a profundidade real do alvo (1.82 m) e a obtida pelo radargrama. Conforme foi observado na Tabela 2.1 (Capítulo 2), o alvo 8 foi instalado na posição de 26.76 m de distância e a aquisição dos dados foi realizada sobre a posição de 27 m (Figura 5.24). Portanto, esta diferença pode estar relacionada com o

fato da aquisição deste perfil não ser exatamente sobre o alvo 8, apresentando uma diferença no posicionamento horizontal de 0.24 m, o que gera uma reflexão em um tempo maior. Além disso, existe uma pequena diferença no desnível topográfico, que também contribui para a diferença na profundidade do alvo.

O alvo 4, correspondente a um cano metálico guia com 3.8 cm de diâmetro disposto na horizontal a 0.51 m de profundidade, foi identificado por uma forte reflexão hiperbólica em torno de 0.59 m de profundidade.

Os refletores associados ao topo dos tambores metálicos são caracterizados por uma elevada amplitude do sinal do GPR, visto que a onda eletromagnética é refletida totalmente no metal (material com valor elevado de condutividade elétrica).

Figura 5.24. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 100 MHz não blindadas, modo passo-a-passo, Δx de 0.2 m.

Nas Figuras 5.25 e 5.26 são apresentados os perfis GPR sobre a Linha 4 adquiridos com as antenas de 100 MHz não blindadas (rebocadas pelo “trenó”) e blindadas, respectivamente. Ambos os perfis foram adquiridos com Δx de 0.05 m.

A profundidade do topo dos alvos metálicos foi similar aos valores obtidos com as antenas de 100 MHz não blindadas no modo passo-a-passo (Figura 5.24). Nota-se nestes perfis adquiridos no modo contínuo, uma melhor resolução espacial proporcionada pela

diminuição do incremento espacial (Δx), de 0.2 m para 0.05 m. As vantagens da aquisição dos perfis GPR com o modo contínuo usando o “trenó” se devem tanto pelo aumento na resolução espacial quanto pela redução do tempo de aquisição dos dados. Por outro lado, a melhor razão sinal/ruído é obtida quando se tem um maior empilhamento dos traços (*stack*), que é obtido quando da aquisição com o modo passo-a-passo. Este fato pode ser verificado através da análise da amplitude do refletor hiperbólico correspondente ao alvo 8, comparando as Figuras 5.25 e 5.26.

Figura 5.25. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 100 MHz não blindadas, modo contínuo - trenó, Δx de 0.05 m.

Figura 5.26. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 100 MHz blindadas, Δx de 0.05 m.

Nas Figuras 5.27 e 5.28 são apresentados os perfis GPR sobre a Linha 4, utilizando as antenas de 200 MHz não blindadas, através do modo passo-a-passo e contínuo, respectivamente. No perfil passo-a-passo foi utilizado Δx de 0.2 m e no contínuo Δx de 0.05 m. Os topos dos tambores metálicos são identificados com nitidez através dos vértices das hipérboles de difração, como observado para as antenas de 100 MHz. Entretanto, com o aumento da frequência obtém-se uma melhor resolução vertical e menor profundidade de investigação. Este fato pode ser verificado comparando, por exemplo, as Figuras 5.24 e 5.27.

Nota-se que os alvos 2, 3, 5, 6 e 7 (tambores metálicos) instalados até 1.5 m de profundidade são caracterizados por um forte refletor hiperbólico quando comparado aos alvos 1 e 8 instalados a maiores profundidades. A diminuição da amplitude do sinal para os alvos mais profundos está relacionada à atenuação da onda devido à elevada condutividade elétrica do aterro e curto comprimento de onda. Nos radargramas (Figuras 5.27 e 5.28), o vértice dos refletores hiperbólicos correspondentes aos topos dos alvos 2, 3, 5, 6 e 7 são identificados em torno de 0.62 m, 1.07 m, 0.95 m, 0.98 m e 1 m de profundidade.

Os topos dos alvos 1 e 8 foram identificados como fracos refletores a aproximadamente 1.95 m e 2.05 m de profundidade. O alvo 4, correspondente a um cano

metálico guia, é identificado por uma forte reflexão hiperbólica “apertada” em torno de 0.58 m de profundidade.

Figura 5.27. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 200 MHz não blindadas, modo passo-a-passo, Δx de 0.2 m.

Figura 5.28. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 200 MHz não blindadas, modo contínuo - trenó, Δx de 0.05 m.

A Figura 5.29 mostra o perfil GPR sobre a Linha 4, adquirido com antenas de 500 MHz blindadas, com Δx de 0.05 m. Nesta figura observa-se que os topos dos alvos 2, 3, 5, 6 e 7 são identificados em 0.5 m, 1.07 m, 0.91 m, 0.95 e 0.98 m de profundidade, respectivamente. Os alvos 1 e 8 não foram identificados devido à atenuação do sinal.

Figura 5.29. Perfil GPR da Linha 4, adquirido com antenas de 500 MHz blindadas, Δx de 0.05 m.

Em aspectos gerais, todos os alvos metálicos instalados na Linha 4 foram identificados. Observa-se que a amplitude das reflexões é elevada tanto nos tambores metálicos quanto no cano metálico guia. Este fato deve-se à elevada condutividade do ferro e do aço, provocando uma reflexão total nos alvos metálicos. Outra característica interessante está na diferenciação através da reflexão do tambor horizontal ou do cano metálico na horizontal, a qual nota-se que a hipérbole mais apertada está associada a um alvo de menor dimensão (cano metálico). Os tambores, na horizontal, apresentam-se como reflexões hiperbólicas perfeitas. Por outro lado, os tambores, na vertical, as hipérboles não são perfeitas.

Os resultados mostram que quanto maior a frequência da antena mais precisa é a identificação do topo dos alvos, entretanto, é necessário o uso de antenas de frequências mais baixas para investigar maiores profundidades.

Nas Figuras 5.30, 5.31 e 5.32 são apresentados os perfis GPR sobre a Linha 5, correspondente aos tambores plásticos. Os perfis foram adquiridos com as antenas de 100 MHz não blindadas no modo passo-a-passo ($\Delta x = 0.2$ m) e rebocadas pelo “trenó” ($\Delta x = 0.05$ m), e com as antenas blindadas ($\Delta x = 0.05$ m), respectivamente. Os resultados obtidos com as

antenas de 100 MHz, tanto blindadas como não blindadas, são similares. Entretanto, com as antenas blindadas os alvos ficaram mais nítidos.

O topo dos tambores plásticos e o cano metálico guia são determinados pelos vértices dos refletores hiperbólicos, com exceção dos tambores preenchidos com água doce. O alvo 9 (tambor vazio) disposto a 0.96 m de profundidade, é identificado através de um fraco refletor hiperbólico em relação ao alvo 16 (tambor vazio) disposto a uma profundidade mais rasa, ou seja, 0.48 m. As razões que propiciaram à diminuição na amplitude do sinal, são as mesmas explicadas para os alvos da Linha 4. No radargrama, o vértice destes refletores encontra-se em torno de 1 m e 0.47 m de profundidade, respectivamente. Entretanto, a base destes tambores não é caracterizada em virtude da velocidade de propagação da onda eletromagnética, ou seja, a onda viaja com a velocidade da luz que é maior que a velocidade no solo argiloso ocorrendo então, uma sobreposição do 1º refletor (topo) com o 2º refletor (base), tornando difícil esta diferenciação.

O topo dos alvos 10, 15 e 17 (tambores preenchidos com água doce) dispostos a 0.98 m, 1.48 m e 0.47 m de profundidade, respectivamente, não foram caracterizados com a antena de 100 MHz, com exceção do alvo mais raso. O alvo 17 é identificado por um fraco refletor hiperbólico, disposto a aproximadamente 0.48 m (Figura 5.32). Este fato é associado à baixa impedância elétrica na interface e a alta atenuação do sinal, em virtude da condutividade elétrica do meio geológico ser maior que a da água doce. Além disso, observa-se que o refletor apresenta uma polaridade invertida comparada a do topo dos tambores vazios, conforme resultados da modelagem 2D (Figura 4.6).

Nota-se que a base dos tambores foi identificada por fortes refletores caracterizados por reverberações devido à presença da água. Além disso, no alvo 17 (mais raso), observa-se uma reflexão múltipla em torno de 2.5 m de profundidade. Conforme pode ser observado na Figura 5.32, a reflexão na base dos tambores não corresponde à profundidade verdadeira onde os alvos foram instalados, isto se deve à velocidade de propagação da onda na água doce, a qual é menor que a do solo argiloso. Na conversão de tempo em profundidade foram utilizadas as velocidades ajustadas na interface solo argiloso/plástico/água doce, não tendo, portanto, coerência para a interface associada à base do tambor.

Nos alvos 11 e 18 (semi preenchidos com água salgada), o topo dos tambores é identificado a 0.55 m e 0.49 m de profundidade, respectivamente, sendo caracterizado por uma reflexão de intensidade similar a encontrada para os tambores vazios. Observa-se que o limite superior da água salgada torna-se indistinguível da primeira reflexão que identifica a

interface solo/pvc/ar, pelos mesmos motivos explicados anteriormente para a base do tambor vazio.

Nos alvos 12 e 19 (preenchidos com água salgada), dispostos a 0.48 m e 0.51 m de profundidade, o topo dos tambores é identificado em torno de 0.54 e 0.50 m de profundidade (Figura 5.32), sendo caracterizado por fortes refletores hiperbólicos com a polarização invertida.

O alvo 14, que corresponde ao cano metálico guia disposto na horizontal a 0.51 m de profundidade, é identificado em torno de 0.55 m de profundidade, sendo caracterizado por um refletor hiperbólico “apertado”.

O topo dos tambores plásticos dispostos na Linha 5 é caracterizado por refletores hiperbólicos que apresentam variações na intensidade do sinal, pois a porcentagem de reflexão está associada aos contrastes das propriedades físicas nas interfaces. De uma maneira geral, o topo dos tambores vazios, semi-preenchidos por água salgada e cheios de água salgada foram bem caracterizados, entretanto, o topo dos tambores cheios de água doce não foram mapeados com clareza com as antenas de 100 MHz.

Nota-se que os perfis adquiridos no modo contínuo apresentam melhor resolução espacial, entretanto os adquiridos no modo passo-a-passo apresentam melhor razão sinal/ruído. A comprovação é feita através da análise da amplitude dos refletores hiperbólicos mais profundos, comparando as Figuras 5.30 e 5.31.

Figura 5.30. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 100 MHz não blindadas, modo passo-a-passo, Δx de 0.2 m.

Figura 5.31. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 100 MHz não blindadas, modo contínuo – trenó, Δx de 0.05 m.

Figura 5.32. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 100 MHz blindadas, Δx de 0.05 m.

Nas Figuras 5.33 e 5.34 são apresentados os perfis de GPR adquiridos sobre a Linha 5, utilizando-se as antenas de 200 MHz não blindadas, modo passo-a-passo e contínuo, respectivamente. Os topos dos tambores plásticos, exceto dos preenchidos com água doce, foram melhores identificados pelos refletores hiperbólicos se comparados aos obtidos com antenas de 100 MHz. Isto ocorre, devido à diminuição do comprimento de onda proporcionando um maior detalhamento vertical.

O topo dos alvos 9 e 16 (tambores vazios) foram caracterizados pelos vértices dos refletores hiperbólicos em torno de 0.98 m e 0.55 m de profundidade. Nos alvos 10 e 15 (tambores preenchidos com água doce) somente a base dos tambores foi caracterizada com nitidez; o topo e a base do alvo 17 pode ser caracterizado com clareza, devido a profundidade que se encontra (rasa). O topo dos alvos 11 e 18 (semi-preenchidos com água salgada) é identificado pelas reflexões hiperbólicas em torno de 0.52 m e 0.49 m de profundidade. Os topos dos alvos 12 e 19 (preenchidos com água salgada) são caracterizados pelos vértices das reflexões em torno de 0.51 m e 0.54 m de profundidade.

O alvo 13 (preenchido com água salgada) não foi caracterizado devido à atenuação do sinal. O alvo 14, correspondente ao cano metálico guia, é identificado por um refletor hiperbólico “apertado” em torno de 0.55 m de profundidade.

Figura 5.33. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 200 MHz não blindadas, modo passo-a-passo, Δx de 0.2 m.

Figura 5.34. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 200 MHz não blindadas, modo contínuo, Δx de 0.05 m.

Na Figura 5.35 é apresentado o perfil de GPR sobre a Linha 5, adquirido com antenas de 500 MHz blindadas, $\Delta x = 0.05$ m. Observa-se que os topos dos alvos 9, 11, 12, 16, 17, 18 e 19 são identificados em 1.05 m, 0.52 m, 0.5 m, 0.6 m, 0.5 m, 0.52 m e 0.55 m de profundidade, respectivamente. Os alvos 10, 13 e 15 não foram identificados devido à atenuação do sinal associada ao aumento da frequência. O alvo 14 foi identificado a 0.54 m de profundidade.

Em síntese, os tambores plásticos vazios, semi-preenchidos com água salgada e cheios de água salgada foram caracterizados por reflexões geradas no topo. Por outro lado, os tambores preenchidos com água doce apresentaram características bastante particulares, que foram as reflexões geradas tanto no topo (frequências de 200 MHz e 500 MHz) quanto na base dos tambores (frequências de 100 MHz, 200 MHz e 500MHz). Além disso, a amplitude das reflexões referentes ao topo dos tambores mais profundos é mais fraca que a dos tambores instalados a menores profundidades, devido à atenuação do sinal. Podemos concluir que tanto as antenas de altas como as de baixas frequências são importantes na caracterização dos alvos em subsuperfície, pois os resultados se complementam. As antenas de baixas frequências permitem investigar alvos mais profundos e as de altas frequências permitem melhor detalhamento vertical.

Figura 5.35. Perfil GPR da Linha 5, adquirido com antenas de 500 MHz blindadas, Δx de 0.05 m.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A presente pesquisa revelou a habilidade do método GPR na caracterização de tambores metálicos e plásticos enterrados no SCGR-IAG, os quais simulam estudos de contaminação ambiental dentro do contexto urbano. Os testes realizados através das modelagens numéricas GPR 2D foram representativos para esta pesquisa. Através das simulações verificou-se que os contrastes entre as propriedades físicas dos alvos enterrados e o *background*, são fundamentais para produzir reflexões em suas interfaces, além de auxiliar na escolha dos melhores parâmetros utilizados na aquisição dos dados.

Os estudos sintéticos mostraram que os menores incrementos espaciais ($\Delta x = 0.05$ m) proporcionam uma melhor resolução horizontal. Com o aumento gradativo dos incrementos espaciais, a resolução diminui, comprometendo a visualização e identificação dos alvos. Além disso, através das simulações numéricas pode-se observar as inversões de polaridades provocadas pelas diferentes composições e/ou preenchimentos dos alvos, as quais auxiliam na identificação do tipo de produto que pode estar contido no seu interior.

As aquisições dos dados GPR foram realizadas com as antenas de 100 MHz, 200 MHz e 500 MHz, e os incrementos espaciais (Δx) usados foram de 0.05 m e 0.2 m. Para Δx de 0.05 m, foi utilizado o modo contínuo (antenas blindadas e não blindadas rebocadas pelo “trenó”) e para Δx de 0.2 m, o modo passo-a-passo (antenas não blindadas).

As aquisições realizadas através do modo passo-a-passo proporcionaram uma melhor razão sinal/ruído, tornando mais intenso o sinal dos refletores correspondentes aos alvos profundos, visto que para este tipo de aquisição utiliza-se um maior empilhamento dos traços. Por outro lado, o modo contínuo, proporciona uma melhor resolução espacial em virtude da diminuição do incremento espacial, de 0.2 m para 0.05 m, além de otimizar o tempo de aquisição dos dados.

Os tambores metálicos foram bem identificados com as antenas de 100 MHz e 200 MHz através dos fortes refletores hiperbólicos gerados no topo. A base dos tambores não foi identificada porque o coeficiente de reflexão da onda EM na interface solo argiloso/topo do tambor metálico é equivalente a 100%. Com as antenas de 200 MHz, obteve-se um melhor detalhamento vertical proporcionado pela diminuição do comprimento de onda. Em altas

freqüências (500 MHz), os tambores metálicos dispostos abaixo de 1 m de profundidade não foram caracterizados devido à elevada atenuação do sinal, diminuindo a profundidade de investigação. Entretanto, observa-se que em altas freqüências, torna-se mais nítida a diferenciação dos alvos mais rasos e a distinção entre os dois tambores metálicos dispostos próximos um do outro. Os tambores dispostos na vertical e na horizontal apresentaram padrões de reflexões distintos concordando com os obtidos através das simulações numéricas.

O cano guia e os tambores metálicos foram caracterizados por fortes refletores hiperbólicos, devido à elevada condutividade do ferro. A diferenciação entre os dois tipos de alvos, torna-se nítida, em razão da hipérbole “mais apertada” que corresponde ao alvo de menor dimensão (cano metálico). Os refletores hiperbólicos correspondentes ao cano metálico guia foram fundamentais na orientação do posicionamento dos outros alvos.

De uma maneira geral os tambores plásticos foram caracterizados com as antenas de 100 MHz e 200 MHz. Os mais rasos foram caracterizados com as antenas de 100 MHz, 200 MHz e 500 MHz. Quanto ao conteúdo destes tambores, pode-se observar que os preenchidos com água salgada foram caracterizados por reflexões geradas no topo; a não identificação da base se deve a elevada atenuação da onda EM. Os preenchidos com água doce foram identificados por reflexões geradas na base, com exceção do tambor mais raso identificado por um fraco refletor no topo e um forte refletor na base. Os semi-preenchidos com água salgada e os vazios foram identificados por reflexões geradas no topo.

Os estudos realizados através das simulações numéricas 2D mostraram que os tambores plásticos vazios e os preenchidos com água doce podem ser identificados por reflexões de topo e base. Contudo, as dimensões dos tambores de plásticos vazios impossibilitam a caracterização da sua base porque a onda EM viaja com a velocidade da luz, na qual é muito elevada e proporciona o registro entre o 1º refletor (topo) e o 2º refletor (base) em um tempo mínimo, sobrepondo os dois refletores. O mesmo ocorre com tambores plásticos semi-preenchidos com água salgada que são apenas identificados por reflexões geradas no topo, tornando-se de difícil distinção o limite superior da água salgada. Os tambores plásticos preenchidos com água doce podem ser caracterizados por fracos refletores gerados no topo e por forte refletores associados à sua base, mesmo tendo dimensões idênticas à dos vazios; isto ocorre porque a velocidade da onda EM na água é lenta, proporcionando um atraso referente ao registro do tempo de reflexão.

Em síntese, as simulações numéricas foram significativas no decorrer da pesquisa, visto que seus resultados apresentaram uma excelente concordância com os dados GPR adquiridos sobre os alvos enterrados.

Pode-se concluir que tanto as antenas de altas como as de baixas frequências são importantes na caracterização dos alvos em subsuperfície, pois os resultados se complementam. A identificação do topo dos alvos torna-se mais precisa com as antenas de altas frequências e as antenas de frequências mais baixas permitem caracterizar os alvos dispostos em maiores profundidades.

Para finalizar, estudos futuros utilizando outras frequências poderão ser realizados de modo que forneçam informações complementares às obtidas por meio da presente pesquisa. Além disso, uma interpretação mais detalhada poderá ser obtida através do cálculo da margem de erro entre os dados de GPR, modelagens numéricas e as profundidades reais dos alvos, fornecendo informações importantes sobre a precisão do método GPR, quando testado em condições controladas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANNAN, A. P. 1992. Ground Penetration Radar Workshop notes. Sensors & Software, Inc., Internal Report, 130p.
- BELÉM, A.N., 2001. Caracterização bidimensional de canais de rádio através de diferenças finitas no domínio do tempo. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Eletronica, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – MG, 124p.
- BERES, M. & HAENI, F.T., 1991. Application of ground penetrating radar methods in hidrogeologic studies. *Ground Water*, v.29, (3), pp. 375 – 386.
- BERNABINI, M., PETTINELLI, E., PIERDICCA, N. PIRO, S. & VERSINO, L., 1994. Field experiments for characterization of GPR antenna and pulse propagation. *Journal of Applied Geophysics*, 33, pp. 63-76.
- BORGES, W.R., 2002. Investigações geofísicas na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e Eletrorresistividade. Dissertação de Mestrado, IAG/USP. São Paulo, 153p.
- BORGES, W.R. & PORSANI, J.L., 2003. Caracterização geofísica rasa do sítio controlado do IAG-USP: resultados preliminares. In: 8th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Resumos Expandidos, Rio de Janeiro-RJ, SBGf, CD, 6p.
- BORGES, W.R., 2004. Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP. Tese de Doutorado, IAG/USP. São Paulo (em desenvolvimento).
- BOWDERS JR., J.J., KOERNER, R.M. & LORD Jr., A.E., 1982. Buried container detection using ground-probing radar. *Journal of Hazardous Materials*, v.7, issue 1, pp. 1-17.
- CARCIONE, J.M., MARCAK, H., SERIANI, G. & PADOAN, G., 2000. GPR modeling study in a contaminated area of Krzywa Air Base (Poland). *Geophysics*, 65 (2), pp. 521-525.
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2001. Manual de gerenciamento de áreas contaminadas, 2 ed., São Paulo, 389p. Disponível em: http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/manual.asp. Acesso em 14 mar. 2004.

- CHEN, H. W. & HUANG, T.M., 1998. Finite-difference time-domain simulation of GPR data. *Journal of Applied Geophysics*, 40, pp. 139-163.
- CISNEROS, J.I., 2001. Onda eletromagneticas: fundamentos e aplicações. Campinas, SP, Editora da UNICAMP, pp.19-38.
- CONYERS, L.B. & GOODMAN, D., 1997. Ground penetrating radar: an introduction for archaeologists. Altamira Press – A Division of Rowman & Littlefield Publishers, Inc. Oxford, England, 232p.
- COSTA, F.P., 2002. Solução numérica de equações diferenciais. Mini curso. Departamento de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual de Santa Cruz – SC. 22p.
- CUNHA, M.C.C., 2003. Métodos numéricos. 2 ed. Campinas, SP, Editora da UNICAMP, pp.173-198.
- DANIELS, D.J., 1996. Surface penetrating radar. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 300p.
- DANIELS, J.J., ROBERTS, R. & VENDEL, M., 1994. Ground Penetration Radar for the detection of liquids contaminants. *Journal of Applied Geophysics*, 33, pp. 195-207.
- DAVIS, J.L. & ANNAN, A.P., 1989. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, v.37, pp.531-551.
- DUARTE, O.O., 1997. Dicionário enciclopédico inglês – português de geofísica e geologia. 1 ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 304p.
- EPA, 2004. U.S Environmental Protection Agency. Characterization and Monitoring – Ground water sampling and geophysical methods development and evaluation. National Exposure Research Laboratory Environmental Sciences, United States. Disponível em: http://www.epa.gov/nerlesol1/cmb/tasks/gw_geo.htm. Acesso em 01 jun. 2004.
- FARIAS, R.G., 1996. Método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) aplicado a guia dielétricos controlados por plasma. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Elétrica. Universidade Estadual de Campinas – SP, 133p.
- FERRARO, N.G. & SOARES, P.A.T., 1998. Física básica: volume único. 4 ed. São Paulo, SP, Atual Editora, 699p.

- 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*, 45, pp. 141-156.
- 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*, 45, pp. 171-186.
- HAYCOCK, O.C., MADSEN, E.C. & HURST, S.R., 1949. Propagation of electromagnetic waves in Earth. *Geophysics*, v.14, pp. 162-167.
- HERMAN, H. & SINGH, S., 1994. First Results in the autonomous retrieval of buried objects. In *Proc. International Conference on Robotics and Automation*, San Diego.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2004. Mapa de São Paulo – Divisão por Municípios. Formato WNF bitmap. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/ibgeteen/mapas/imagens/sp_mapa_gde.wnf. Acesso em 27 maio 2004.
- IRITANI, M.A., 1993. Potencial hidrogeológico da Cidade Universitária de São Paulo. Dissertação de Mestrado, IG/USP. São Paulo. 97p.
- KELLER, G.H., 1987. Electromagnetic theory for geophysical applications: Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, ed. Misac N. Nabighian, v.1, (3), pp.13-24.
- LAMPE, B., HOLLIGER, K., & GREEN, A.G., 2003. A finite-difference time-domain simulation tool for ground-penetrating radar antennas. *Geophysics*, 68 (3), pp. 971-987.
- LÁZARO-MANCILLA, O. & GÓMEZ-TREVIÑO, E., 1996. Synthetic radargrams from electrical conductivity and magnetic permeability variations. *Journal of Applied Geophysics*, 34, pp. 283-290.
- LORD Jr., A.E. & KOERNER, R.M., 1988. Nondestructive testing (NDT) techniques to detect contained subsurface hazardous waste. *Journal of Hazardous Materials*, v. 19, issue 1, pp. 119-123.
- MABEE, S.B. & BROWN, L., 2003. Dedicated hydrogeology/geophysical field laboratory for enhancing undergraduate education (submitted to *Journal of Geoscience Education*). Disponível em: http://www.geo.umass.edu/dept_info/hydro/hyphy.html. Acesso em 21 abr. 2003.

- MARCELINO, M.B. (1999). Delimitação de Perímetros de Proteção dos Poços tubulares (PPP) empregando a técnica de modelagem numérica tridimensional. Dissertação de Mestrado. IGc/USP. São Paulo. 122p.
- MENDONÇA, C.A., DIOGO, L.A., PORSANI, J.L. & HODO, F.Y. (1999). Ensino de geofísica aplicada: o campus universitário como laboratório de exploração. In: 6th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Resumos Expandidos, Rio de Janeiro-RJ, SBGf, CD, 4p.
- OLHOEFT, G. R. Ground Penetrating Radar, 2003. (Ground Probing Radar, Subsurface Radar, Georadar, Earth Sounding Radar). Disponível em: <http://www.g-p-r.com>. Acesso em 21mar 2003.
- OLHOEFT, G.R., 2000. Maximizing the information return from ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, v. 43, pp. 175-187.
- OLHOEFT, G.R., POWERS, M. H. & CAPRON, D. E., 1994. Buried object detection with Ground Penetrating Radar: in Proc. Of Unexploded Ordnance (UXO) detection and range remediation conference, Golden, CO, May 17-19, pp. 207-233.
- PORSANI, J.L., 1999a. 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., 1999b. Investigações Geofísicas de superfície e de poço na borda da bacia sedimentar de São Paulo. Projeto de Pesquisa FAPESP (Processo No. 99/12215-2).
- PORSANI, J.L., 2002. Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano, meio ambiente e arqueologia: estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. Projeto de Pesquisa. Processo FAPESP No. 02/07509-1, São Paulo - SP.
- PORSANI, J.L.; BORGES, W.R.; ELIS, V.R.; DIOGO, L.A.; HODO, F.Y.; MARRANO, A. & BIRELLI, C.A., 2004. Investigações geofísicas de superfície e de poço no sítio controlado de geofísica rasa do IAG-USP. *Revista Brasileira de Geofísica* (no Prelo).

- POWERS, M. H. & OLHOEFT, G. R., 1996a. Computer modeling to transfer GPR UXO detectability knowledge between site. In Proc. Of Unexploded Ordnance (UXO) Forum 1996 Conference Proceedings, Williamsburg, VA, March 26-29, pp. 347-356.
- POWERS, M. H. & OLHOEFT, G. R., 1996b. Modeling the GPR Response of leaking, buried pipes: In Proc. Of SAGEEP'96, 28 April – 2 May, Keystone, C.O., R.S. Bell and M.H. Cramer, compilers, Wheat Ridge, CO, EEGS, pp. 525-534.
- PRADO, R.L., 2000. A sísmica de reflexão rasa e o radar de penetração no solo na investigação geológico-geotécnica em ambientes urbanos. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro – SP, 174p.
- PCO - Prefeitura do campus universitário Armando de Salles Oliveira, 2004. Mapa da Cidade Universitária da Universidade de São Paulo – USP. Formato JPG bitmap. Disponível em: <http://www.circular.pco.usp.br/mapa.html>. Acesso em 14 jun. 2004.
- PRITCHETT, W.C., 1952. Attenuation of radio frequency waves through the Earth. Geophysics, , v. XVII, (2), pp. 193-207.
- RADZEVICIUS, S.J.& DANIELS, J.J., 2000. Ground penetrating radar polarization and scattering from cylinders. Journal of Applied Geophysics, 45, pp. 111-125.
- RADZEVICIUS, S.J., CHEN, C., PETERS Jr, L. & DANIELS, J.J., 2003. Near-field dipole radiation dynamics through FDTD modeling. Journal of Applied Geophysics, 52, pp. 75-91.
- REYNOLDS, J.M., 1997. An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons Ltd., Baffins Lane, Chichester. West Sussex P019 1UD, Englad, pp. 681-749.
- RICCOMINI, C., 1989. Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de Doutorado. IG/USP. São Paulo, 320p.
- SÁNCHEZ, L.E., 1998. A desativação de empreendimentos industriais: um estudo sobre o passivo ambiental. Tese de Livre Docência. Escola Politécnica, USP, 178p.
- SANDMEIER, K.J., 2003. ReflexW Version 3.01. Program for processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. Manual do Software. Karlsruhe, Germany, 345p.

- SAUCK, W., 1996. Controlled Site for Shallow Geophysics. Institute for Water Sciences, Department of Geosciences, Western Michigan University. Disponível em: <http://www.geology.wmich.edu/fhydro/Gptest1.htm>. Acesso em 20 abr. 2003.
- SHERIFF, R.E., 1991. Encyclopedic dictionary of exploration geophysics. 3 ed. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 376p.
- SZETO, A.M.K., 1996. York University Environmental Test Site (YES). Department of Earth and Space Science and Engineering, York University, Ontario. Disponível em: <http://www.yorku.ca/esse/yes>. Acesso em: 14 mar 2004.
- TAFLOVE, A. & BRODWIN, E., 1975. Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Aug, vol. 23, pp. 623-630.
- UNLV, 2003. Engineering Geophysics Test Site. Department of Civil and Environmental, University of Nevada, Las Vegas – United States. Disponível em <http://www.ce.unlv.edu/egl/egts> . Acesso em: 14 mar. 2004.
- VERSTEEG, R., 1996. Optimization of GPR acquisition and noise elimination parameters. In: International Conference on Ground Penetrating Radar, 6, 1996, Sendai. Proceedings, Sendai: GPR'96, pp. 289-292.
- YILMAZ, O., 1987. Seismic Data Processing. Tulsa: Society of Exploration Geophysics Press, 526p.
- ZENG, X. & MCMECHAN, G.A., 1997. GPR characterization of buried tanks and pipes. Geophysics, vol. 62, 3, pp. 797-806.
- 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, v.1, (3), pp.131-311.