

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Michelle Matos de Souza

Uso do Georadar (GPR) em Investigações Ambientais

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador:
José Tavares Araruna Júnior

Rio de Janeiro,
Agosto de 2005



Michelle Matos de Souza

Uso do Georadar (GPR) em investigações ambientais

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Tavares Araruna Jr.

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Franklin dos Santos Antunes

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Eng. Cassiane Maria Ferreira Nunes

Co-Orientador

Petrobras

Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Profa. Maria Claudia Barbosa

COPPE/UFRJ

Prof. Lúcio Flávio de Souza Villar

UFMG

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial

do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 05 de agosto de 2005

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Michelle Matos de Souza

Engenheira Civil formada pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG – em abril de 2003.

Ficha Catalográfica

Souza, Michelle Matos de

Uso do Georadar (GPR) em investigações ambientais / Michelle Matos de Souza ; orientador: José Tavares Araruna Júnior. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2005.

120 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Georadar. 3. GPR. 4. Radar de penetração. 5. Investigação ambiental. 6. Geofísica. I. Araruna Júnior, José Tavares. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia civil. III. Título.

Aos meus pais,
Miguel e Maria.

A minha irmã,
Giza.

Agradecimentos

Agradeço a todos que ajudaram na realização deste trabalho.

Professor Araruna, agradeço a orientação e a oportunidade desta dissertação.

Professor Franklin, pela dedicação fornecida e pela amizade conquistada. Seus conselhos foram essenciais para a minha formação.

Cassiane, pelos conhecimentos transmitidos que foram indispensáveis para a realização deste trabalho e, em especial pela amizade.

Professor Lúcio, meu grande amigo e incentivador. Obrigada por me incentivar a chegar até aqui e por estar presente numa hora tão importante.

Meus pais e Giza que sempre me apoiaram em todas as circunstâncias. O meu sincero agradecimento por todo amor e carinho.

Eder, existem sentimentos que são inenarráveis: Amor, amizade, companheirismo, cumplicidade, apoio, energia... Você é tudo isso e muito mais. Obrigada por existir e estar presente em minha vida.

Ana, a “irmandade” que conquistamos ficará gravada em nossos corações. Você foi minha família nas horas mais difíceis. Valeu negona!

Nelly, Luciana e irmã Graça, vocês foram além de grandes amigas, grandes psicólogas. Incentivaram-me e me deram força nas horas de cansaço e desilusão. Obrigada amigas!

Cyntia, Emiliana, Joabson, Sabrina, Patrício, Flávio, Júlio, Fábio, amigos da PUC, que estiveram presentes durante a realização desta dissertação. Obrigada pelas longas conversas, festas e pelos bons momentos.

Minha família e amigas de BH, que sempre me deram a maior força e nunca deixaram de estar aqui comigo, mesmo que seja no coração, vai aí o meu Muito Obrigada!

Agradeço aos técnicos do Laboratório de Mecânica dos Solos e Meio Ambiente. Obrigada Willian, “Seu” José, Amaury e Josué pelo apoio em laboratório e em campo.

Agradeço ao pessoal da secretaria do departamento de engenharia civil. Em especial à Ana Roxo, por nos ter acolhido como filhas e filhos.

As empresas que permitiram a execução e a divulgação desta pesquisa.

A CAPES, ANP e PRONEX pelo apoio financeiro.

Resumo

Souza, Michelle Matos; Araruna, José Tavares. **Uso do Georadar (GPR) em Investigações Ambientais**. Rio de Janeiro, 2005. 120p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar as potencialidades do método GPR (*Ground Penetrating Radar*) em investigações de campo que englobam estudos hidrogeológicos, geotécnicos e ambientais. Para o alcance deste objetivo foram realizadas investigações de campo na região sudeste do Brasil procurando verificar a aplicabilidade deste método no conhecimento da sub-superfície. Os estudos englobaram a determinação da estratigrafia do solo identificando suas camadas e respectivas profundidades; a determinação da posição do lençol freático; a localização de estruturas enterradas e a detecção de possíveis anomalias decorrentes de contaminações. As seções obtidas com o GPR permitiram identificar com boa resolução os contrastes bruscos, como a posição do lençol freático e a localização das estruturas enterradas. A identificação dos contatos entre as camadas de solo foi possível quando as propriedades elétricas destes materiais se diferiam bastante. Já no que diz respeito ao mapeamento de regiões contaminadas, ainda se faz necessária a realização de uma maior quantidade de estudos para afirmar a eficiência do GPR para este objetivo. A utilização da técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR) foi muito útil para correlacionar a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas com a profundidade. O seu emprego permitiu aumentar a exatidão da determinação das profundidades dos alvos de interesse.

Palavras-chave

GPR; Georadar; Radar de penetração; Investigação ambiental; Geofísica.

Abstract

Souza, Michelle Matos; Araruna, José Tavares (Advisor). **The use of Georadar (GPR) in environmental site investigation**. Rio de Janeiro, 2005. 120p. MSc Dissertation - Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present work aims to assess the adequacy of the ground penetrating radar as a screening tool in site investigation practice in hydrogeological, geotechnical and environmental studies. An extensive site investigation program was carried out in Southeast Brazil looking for characterizing the subsurface. Tests were performed to determine the stratigraphy of soil profiles, the position of the water level, the detection of buried structures and contamination. The results have shown a great deal of success in identifying water levels and buried structures. Soil surfaces were only identified when abrupt changes in the dielectric constant of the porous media were observed. However, the results so far do not enable to delineate contamination plumes with the accuracy desired. The accuracy of the target depths were greatly improved by using the results of the dielectric constant measured by the time domain reflectometry (TDR).

Keywords

GPR; Ground Penetrating Radar; Environmental site investigation; Geophysics.

Sumário

1 Introdução	18
2 Método GPR (<i>Ground Penetrating Radar</i>)	21
2.1. Introdução	21
2.2. Histórico	22
2.3. Fundamentos teóricos	24
2.3.1. Propriedades elétricas e magnéticas	24
2.3.2. Uso do TDR (<i>Time Domain Reflectometry</i>) para determinação da constante dielétrica	29
2.3.3. Profundidade de penetração x resolução	30
2.3.4. Coeficiente de reflexão	32
2.4. Aquisição de dados	34
2.4.1. Sistema GPR	34
2.4.2. Planejamento de um levantamento GPR	35
2.4.3. Técnicas de aquisição de dados	35
2.5. Processamento dos dados	39
2.6. Interpretação dos dados	40
3 Equipamentos utilizados	42
3.1. GPR (<i>Ground Penetrating Radar</i>)	42
3.2. TDR (<i>Time Domain Reflectometry</i>)	43
3.3. Sistema GPS geodésico	44
3.4. Perfuratriz	45
4 Avaliação na caracterização da sub-superfície	47
4.1. Base de combustíveis em São Paulo	48
4.1.1. Aquisição de dados	50
4.1.2. Processamento dos dados	52
4.1.3. Análise dos resultados	52

4.2. Indústria mecânica em Nova Friburgo	57
4.2.1. Aquisição de dados	57
4.2.2. Processamento dos dados	59
4.2.3. Análise dos resultados	59
4.3. Considerações finais	63
5 Avaliação na detecção de contaminação por hidrocarbonetos	64
5.1. Descrição do meio físico	65
5.2. Aquisição de dados	67
5.2.1. Aquisições com o GPR	67
5.2.2. Sondagens	69
5.2.3. Direção do fluxo de água subterrânea/gradiente hidráulico	70
5.3. Processamento dos dados	70
5.3.1. Dados do GPR	70
5.3.2. Dados das sondagens e GPR	71
5.4. Análise dos resultados	72
5.5. Considerações finais	79
6 Avaliação na detecção de vazamentos no sistema de distribuição de água	80
6.1. Descrição da geologia	83
6.2. Aquisição de dados	84
6.2.1. Aquisições com o GPR	84
6.2.2. Sondagens e amostragens	86
6.2.3. TDR para obtenção da constante dielétrica do meio	88
6.3. Processamento dos dados	89
6.4. Análise dos resultados	89
6.5. Considerações finais	96
7 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	98
Referências Bibliográficas	102

Anexos	108
A Sondagens na base de combustíveis em SP/SP	109
B.1 Sondagens na base de combustíveis em SD/MG	110
B.2 Planilha de cálculo do gradiente hidráulico	117
C.1 Sondagens a percussão no Parque Gráfico do Globo	118
C.2 Sondagens a trado no Parque Gráfico do Globo	120

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Constante dielétrica (k) e condutividade elétrica (σ), observada nos materiais, comuns para as frequências utilizadas no GPR (Porsani, 1999)	27
Tabela 2.2 – Frequência central das antenas versus profundidade máxima de penetração (Porsani, 1999)	31
Tabela 2.3 – Frequência central das antenas versus resolução vertical (adaptado de Annan, 1992)	32
Tabela 2.4 – Coeficientes de reflexão para alguns contatos típicos (adaptado de Annan, 1992)	33
Tabela 3.1– Características técnicas da perfuratriz CT05	46
Tabela 6.1 – Teor de umidade dos solos amostrados	87
Tabela 6.2 – Resultados das análises de pH, condutividade e sais solúveis dos solos amostrados	87

Lista de figuras

Figura 2.1– Diagrama de arranjo das antenas	22
Figura 2.2 – Variação da constante dielétrica em função do conteúdo de água para os materiais geológicos (<i>Topp et al.</i> , 1980)	28
Figura 2.3 – Componentes básicos de um equipamento TDR (Chicota, 2003)	30
Figura 2.4 – Diagrama esquemático dos módulos básicos de um sistema GPR (Porsani, 1999)	34
Figura 2.5 – Esquema de aquisição de dados pela técnica CMP (Porsani, 1999)	36
Figura 2.6 – Esquema de aquisição de dados pela técnica WARR (Porsani, 1999)	36
Figura 2.7 - Esquema de aquisição de dados pelo perfil de reflexão (Porsani, 1999)	37
Figura 2.8 – Fluxograma das etapas de processamento dos dados de GPR	39
Figura 3.1– GPR e seus acessórios	42
Figura 3.2 – TDR e seus acessórios	44
Figura 3.3 – Sistema GPS geodésico e seus acessórios	45
Figura 3.4 – Perfuratriz de trado oco	46
Figura 4.1– Vista aérea da base de combustíveis	48
Figura 4.2 – Modelo Geológico da base de combustíveis (Araruna e outros, 2005)	49
Figura 4.3 – Seção geológica longitudinal na área de investigação geofísica (Araruna e outros, 2005)	50
Figura 4.4 – Aquisição com o GPR na base de combustíveis em São Paulo-SP	51
Figura 4.5 – Constante dielétrica sendo medida na base de combustíveis	51
Figura 4.6 – Primeiro perfil de GPR na área de circulação da base de combustíveis	53

Figura 4.7 – Segundo perfil de GPR na área de circulação da base de combustíveis	54
Figura 4.8 – Terceiro perfil de GPR na área de circulação da base de combustíveis	54
Figura 4.9 – Quarto perfil de GPR na base de combustíveis	55
Figura 4.10 – Quinto perfil de GPR na base de combustíveis	56
Figura 4.11 – <i>Lay out</i> da indústria mecânica com a localização e direção dos perfis GPR e das sondagens	58
Figura 4.12 – Furo de sondagem sendo perfurado com o auxílio da perfuratriz	58
Figura 4.13 – (a) Primeiro perfil de GPR adquirido na indústria mecânica (b) Sondagem correspondente	60
Figura 4.14 – Tambor metálico enterrado no subsolo	60
Figura 4.15 – Segundo perfil de GPR adquirido na indústria mecânica	61
Figura 4.16 – (a) Terceiro perfil de GPR adquirido na indústria de autopeças (b) Sondagem correspondente	62
Figura 4.17 – Localização da 3ª aquisição com detalhe da ferragem aparente no furo	63
Figura 5.1 – Foto da base de combustíveis em Santos Dumont–MG	66
Figura 5.2 – Planta de situação da base de combustíveis	66
Figura 5.3 - Planta de situação com a direção dos perfis GPR e localização dos furos de sondagem	68
Figura 5.4 – Aquisição com o GPR na base de combustíveis em Santos Dumont-MG	69
Figura 5.5 – Sondagem sendo realizada	70
Figura 5.6 – Modelo tri-dimensional da estrutura geológica e contaminação (Araruna e outros, 2004)	72
Figura 5.7 – Primeiro perfil de GPR na base de combustíveis	74
Figura 5.8 – Escória preenchida com óleo encontrada durante furo de sondagem	75
Figura 5.9 – <i>Scans</i> do perfil 1: (a) Região atenuada (b) Região não atenuada	75

Figura 5.10 – Segundo perfil de GPR na base de combustíveis	76
Figura 5.11 – Terceiro perfil de GPR na base de combustíveis	77
Figura 5.12 – Quarto perfil de GPR na base de combustíveis	78
Figura 5.13 – Quinto perfil de GPR na base de combustíveis	79
Figura 6.1 – Vista aérea do Parque Gráfico do Jornal O Globo (<i>EarthGoogle</i>)	80
Figura 6.2 – Vista superior da área de lazer do Parque Gráfico do Jornal O Globo	81
Figura 6.3 – Surgência de água na área de lazer	82
Figura 6.4 – Aquisição com o GPR no Parque Gráfico do Jornal O Globo	85
Figura 6.5 – <i>Lay out</i> com a localização e direção dos perfis GPR, das sondagens de interesse e dos pontos de medição de TDR	86
Figura 6.6 – Valor da constante dielétrica sendo medido com ao auxílio do TDR	88
Figura 6.7 – Seção geológica na área do Parque Gráfico obtida com resultados das sondagem a percussão	90
Figura 6.8 – Radargrama no topo do talude	91
Figura 6.9 – Segundo perfil de GPR, na base do talude, próximo a surgência de água	93
Figura 6.10 – Terceiro perfil de GPR adquirido na rua de acesso a área de lazer	95
Figura 6.11 – Quarto perfil de GPR adquirido entre o campo de futebol e a casa de lazer	95
Figura 7.1– Modelo desenvolvido para estudos com o GPR em escala de laboratório	101

Lista de símbolos e abreviaturas

\vec{B}	Campo indução magnético
c	Velocidade da luz
\vec{D}	Corrente de deslocamento ou polarização
e	Espaço percorrido pela onda eletromagnética
\vec{E}	Campo elétrico
ε	Permissividade dielétrica do material
ε_0	Permissividade dielétrica no vácuo
f	Frequência
\vec{H}	Campo magnético
\vec{J}	Corrente de condução
k	Constante dielétrica ou permissividade dielétrica relativa
L	Comprimento das hastes do TDR
λ	Comprimento de onda
μ	Permeabilidade magnética
ρ	Resistividade
σ	Condutividade elétrica
t	Tempo de deslocamento da onda eletromagnética
v	Velocidade
CMP	<i>Common mid-point</i>
C0	<i>Common offset</i>
EM	Eletromagnético
GPR	<i>Ground penetrating radar</i>

GSSI	<i>Geophysical Survey System, Inc.</i>
LNAPL	<i>Light non aqueous phase liquids</i>
PG	Parque Gráfico do Jornal O Globo
TDR	<i>Time Domain Reflectometry</i>
WARR	<i>Wide angle reflection and refraction</i>