

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO**

**RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR): ASPECTOS
GEOFÍSICOS E GEODÉSICOS, PROCESSAMENTO E
ANÁLISE EM PAVIMENTO FLEXÍVEL**

JÚLIO CÉSAR MASCARENHAS AGUIAR

Orientador: Prof. Dr. Admilson da Penha Pachêco

Dissertação de Mestrado

Recife, 2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
ESCOLA DE ENGENHARIA DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO

JÚLIO CÉSAR MASCARENHAS AGUIAR

**RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR): ASPECTOS
GEOFÍSICOS E GEODÉSICOS, PROCESSAMENTO E ANÁLISE EM
PAVIMENTO FLEXÍVEL**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, área de Concentração: Sensoriamento Remoto, defendida e aprovada no dia 21/12/2005.

Orientador: Prof. Dr. Admilson da Penha Pachêco

Recife, 2005

A282r **Aguiar, Júlio César Mascarenhas.**

Radar de penetração no solo (GPR): aspectos geofísicos e geodésicos, processamento e análise em pavimento flexível. – Recife : O Autor, 2005.
128 folhas. : il. ; fig., tab.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Cartográfica, 2005.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia cartográfica. 2. Radar de penetração no solo (GPR). 3. Radar de penetração no solo (GPR) – Análise em pavimento flexível. 4. Tecnologia da Geoinformação. I. Título.

526 CDD (22.ed.)

UFPE
BCTG/2006-12

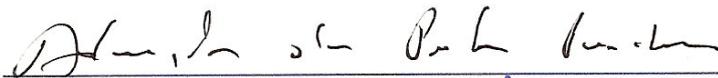
**RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR): ASPECTOS
GEOFÍSICOS E GEODÉSICOS, PROCESSAMENTO E
ANÁLISE EM PAVIMENTO FLEXÍVEL**

POR

JÚLIO CÉSAR MASCARENHAS AGUIAR

Dissertação defendida e aprovada em 21.12.05.

Banca Examinadora:



Prof. Dr. ADMILSON DA PENHA PACHÊCO (Orientador)

Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco



Prof. Dr. -Ing. TARCÍSIO FERREIRA SILVA

Departamento de Engenharia Cartográfica - Universidade Federal de Pernambuco



Prof. Dr. EDELMAR DE ALBUQUERQUE MENOR

Departamento de Engenharia de Minas - Universidade Federal de Pernambuco

DEDICATÓRIA

A meu pai Ivo Sebastião (in memoriam)

e minha mãe Célia que me indicaram o norte da vida retilínea .

AGRADECIMENTO

Muitos ajudaram nesta caminhada. Perdão às omissões.

Ao Prof. Dr. Admilson da Penha Pachêco grande orientador, amigo e pesquisador por ter acreditado e confiado em mim , ainda no embrião deste trabalho;

Ao Prof. Dr. José Gouvêa Luiz da UFPA, que sem vossa boa vontade, não teria viabilizado e concluído essa dissertação. Obrigado! Muito obrigado! Pela orientação e cessão do Equipamento utilizado nesta pesquisa;

Ao Professores Adjuntos Fernando Luiz Nogueira e Helio Alvarez Elarrat, por terem me avalizado perante o Programa de Pós-Graduação;

A Profa. Dr. Maisa Tobias por relatar, favoravelmente, meu processo para o Mestrado;

Ao Prof. Adjunto Renato Balbi, a quem recorri muitas vezes, sempre apto em me ajudar;

Aos Arquitetos J. M. Coelho Bassalo e Flavio Nascimento que me deram dignidade profissional e permitiram completar “meu pão “ nos últimos anos;

Aos Arquitetos Emerson Bruno e Renata Barroso ontem alunos, hoje meus professores;

Ao Prof. Dr. André Montenegro, leal amigo e meu grande companheiro;

Ao Eng. Eletrônico Paulo Magalhães, que garantiu a qualidade e eficiência dos complexos equipamentos operados;

Aos colegas do Mestrado Helio Lopes e Marcello Benigno, que entenderam meus limites computacionais e muito me ajudaram em superá-los;

Ao Corpo Docente do DeCART da UFPE pela maneira gentil com que sempre me distinguiram na Academia;

Aos amigos Agrimensores Neylton e Elizabeth Eloy pela grande colaboração e apoio nas atividades laboral de subsistência;

A minha ex-mulher MARILIA que muito me ajudou , incentivou e de maneira solidária enfrentou dias de dificuldades e alegrias sempre dando apoio firme e decisivo e hoje não está mais comigo. Paz à sua alma!

E, finalmente, agradeço ao Governador do Mundo, pelo dom da vida, pela Existência.

SUMÁRIO

RESUMO E PALAVRAS-CHAVE	x
ABSTRACT AND KEYWORDS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xv
LISTA DE QUADROS	xvi
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xvii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1. Como objetivo geral o presente trabalho se propõe:	3
1.2. Os objetivos específicos são:	4
CAPÍTULO 2 – CARACTERÍSTICA DA PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE RADAR EM MEIOS MATERIAIS	5
2.1. Considerações iniciais	6
2.2. Perdas de energia por processos internos ao meio	6
2.2.1. Dispersão geométrica da frente de ondas	7
2.2.2. Absorção	7
2.2.3. Dispersão da energia	7
2.2.4. Atenuação e profundidade pelicular de penetração	8
2.2.5. Fator de perdas	8
2.3. Classe ou categoria do radar	9
2.4. Resolução vertical e horizontal	9
2.4.1. Resolução Vertical	10
2.4.2. Resolução horizontal	10
CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTOS DA PROSPECÇÃO COM GPR ...	12
3.1. Propagação de ondas eletromagnéticas	14
3.2. Parâmetros eletromagnéticos de um meio	15
3.2.1. Condutividade(σ)	16
3.2.2. Permissividade dielétrica(ϵ)	17

3.2.3. Permeabilidade magnética(μ)	18
3.3. Velocidade de propagação e comprimento de onda	19
3.3.1. Velocidade de propagação de uma onda EM em ... meio material	21
3.3.2. Comprimento da onda num meio diferente ... vácuo	23
3.4. Atenuação	23
3.5. Parâmetros efetivos	24
3.6. Reflexão e refração	24
CAPÍTULO 4- FUNDAMENTOS DA PROSPECÇÃO COM GPR	26
4.1. Considerações iniciais	28
4.2. Desenvolvimento do radar	28
4.3. Considerações teóricas sobre a emissão de energia	30
4.3.1. Direcionamento e ganho	30
4.3.2. Equação de transmissão	31
4.3.3. Equação do radar	31
4.3.4. Diagramas de radiação	33
4.4.1. Unidade central	33
4.4.2. Acessórios e equipamentos complementares	34
4.4.3. Antenas	34
4.5. Equipamento de GPR utilizado	35
4.5.1. Características físicas	35
4.5.2. Características de radiação	35
CAPÍTULO 5 - PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DOS MEIOS	36
5.1. Considerações iniciais	38
5.2. Composição do meio	39
5.2.1. Relação da permissividade com a temperatura do meio	40

5.2.2. Relação dos parâmetros eletromagnéticos com a composição	41
5.3. Densidade, granulometria, porosidade e conteúdo de água	41
5.4. Classificação de solos segundo GARCIA(1997)	42
5.5. Origem dos solos	43
5.6. Identificação dos solos por meio de ensaios	43
5.6.1. Análise granulométrica	43
5.6.2. Índices de consistência (Limites de Atterberg)	44
CAPÍTULO 6 - TRATAMENTO DE DADOS E INTERPRETAÇÃO DE REGISTROS	45
6.1. Considerações iniciais	46
6.2. Processamento de dados GPR	47
6.2.1. Parâmetros de um registro. Informação no cabeçário de um traço	48
6.3. Registro de amplitudes	53
6.4. Obtenção dos parâmetros necessários para a interpretação de radargramas	55
6.5. Filtragem de sinais	56
6.5.1. Filtros horizontais (ou espaciais)	57
6.5.2. Filtros verticais (ou temporais)	59
6.6. Outras técnicas de tratamento de dados	63
6.7. Correções sobre os sinais	69
6.7.1. Correções estáticas	70
6.7.2. Ganho	71
6.8. Interpretação dos registros	71
6.8.1. Planejamento	72
6.8.2. Realização: tarefas preliminares	72
6.8.3. Realização da coleta de dados	75
6.8.4. Análise de dados	76

CAPÍTULO 7 - ESTUDOS E TESTES INTEGRADOS DE GPR E DADOS GEODÉSICOS EM PAVIMENTO RODOVIÁRIO FLEXÍVEL SOBRE SOLOS MOLES	80
7.1. Introdução	81
7.2. Localização da Área	82
7.2.1. Meio-ambiente	83
7.3. Geologia	83
7.4. Geomorfologia	84
7.5. Características Geológicas-Geotécnicas	84
7.6. Hidrografia	85
7.7. Formulação do Problema da Estrada	85
7.8. Hipótese da Pesquisa	85
7.9. Consistência e Embasamento Técnico-Científico	86
7.9.1. Construções de Vias Rodoviárias	88
7.9.2. Método do Georadar – GPR	89
7.10. Metodologia	89
CONCLUSÕES	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
ANEXOS	120

RESUMO

AGUIAR, Júlio César Mascarenhas. **Radar de Penetração no Solo (GPR): Aspectos Geofísicos e Geodésicos, Processamento e Análise em Pavimento Flexível**. Recife, 2005. 119 p. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco.

O presente trabalho propõe-se a analisar o desempenho do Radar de penetração no solo como ferramenta para definição de substrato de pavimento rodoviário flexível, apoiada em testes integrados de GPR e dados geodésicos. Este trabalho constou de três fases bem distintas: a primeira se compôs de estudos para definição da base cartográfica de apoio à coleta de dados GPR; a segunda fase se resumiu à coleta de dados radargramétricos e posterior processamento em programa Gradix. É destacado os locais escolhidos para estudos de imageamento. O primeiro trecho bastante deteriorado (com defeitos e recalques) e outro bem conservado. A pesquisa utilizou equipamento SIR3000, fabricado pela GSSI, e antenas de 200 e 400MHz. O perfil obtido é uma função (x,z) onde as distâncias são cotadas no eixo dos x e duplo tempo de propagação no eixo dos z em nano-segundos. Os meios foram definidos através de reflexões eletromagnéticas. A limitação nominal das antenas disponíveis limitou uma melhor definição dos refletores. As observações foram realizadas atravessando as estações (verão e inverno) tendo a preocupação de observar o nível freático local.

Palavras-chave: Radar de Penetração no Solo, Interpretação de dados radargramétricos, pavimento rodoviário flexível.

ABSTRACT

The present work intends to analyze the performance of the Ground Penetrating Radar as tool for definition of substratum of flexible road pavement, leaning in integrated tests of GPR and geodesic data. This work consisted of three very different phases: the first was composed of studies for definition of the cartographic base for collection of GPR data; the second phase was summarized to the collection of radargrammetric data and subsequent processing in Gradix software. It is outstanding the chosen places for imaging studies. The first stretch quite deteriorated (with defects and repress) and other well conserved. The research used SIR3000 equipment, manufactured by GSSI, and antennas of 200 and 400MHz. The obtained profile is a function (x,z) where the distance are quoted in x axis and double time of propagation in the z axis in nano-seconds. The environment was defined through electromagnetic reflections. The nominal limitation of the available antennas limited a better definition of the reflectors. The observations were accomplished crossing the seasons (summer and winter) heaving the concern of observing the local freatic level.

Key words: Ground Penetrating Radar, Interpretation of radargrammetric data, flexible road pavement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Esquema de um radar GPR	11
Figura 3.1.	Gráfico da permissividade contra a frequência. Modelo de Cole-Cole, modificado.	18
Figura 3.2.	O gráfico representa a comparação da velocidade em função da constante dielétrica e a curva obtida ao representar a equação 3.22.	
Figura 4.1.	Diagrama esquemático da radiação de uma antena GPR.	33
Figura 4.2.	Observa-se à esquerda da figura a antena GPR, no centro o cabo ótico e à direita a unidade central.	33
Figura 4.3.	Arranjo mostrando o esquema CMP.	34
Figura 4.4.	Unidade central do GPR.	34
Figura 5.1.	a) Dependência da permissividade dielétrica relativa da água com a temperatura; b) Dependência da velocidade de propagação na área com a temperatura.	41
Figura 6.1.	Radargrama AV1 mostrado no eixo dos X o estaqueamento e no eixo Z a profundidade imageada com antena de 400 MHz.	56
Figura 6.2.	Esquemas dos diversos métodos de imageamento GPR.	75
Figura 7.1.	Localização Política da Alça Viária (Esquemático).	82
Figura 7.2.	Fluxograma Simplificado do Processamento.	90
Figura 7.3.	Em cima o perfil topográfico longitudinal do primeiro trecho investigado com 175 m de comprimento (T1). Em baixo, a secção GPR AV1-200 obtida com antena de 200 MHz e processada em Gradix.	93
Figura 7.4.	Mostrando na parte superior perfil topográfico longitudinal de 0 a 50m. Início do primeiro trecho em Acompanhamento da Via pela SETRAN. Em baixo o imageamento correspondente ao alinhamento executado com antena GSSI de 200MHz.	94
Figura 7.5.	Mostrando na parte superior perfil longitudinal topográfico de 50 a 100m. Primeiro trecho em Acompanhamento (a-	95

terro em consolidação) da Via pela SETRAN. Em baixo o imageamento correspondente ao alinhamento executado com antena GSSI de 200MHz.

- Figura 7.6. Mostrando na parte superior perfil topográfico longitudinal de 100 a 150. Em baixo o imageamento correspondente ao alinhamento executado com antena GSSI de 200MHz. 96
- Figura 7.7. Mostrando na parte superior perfil longitudinal topográfico de 150 a 175m. Final do primeiro trecho em Acompanhamento(aterro em consolidação) da Via pela SETRAN. Em baixo o imageamento correspondente ao alinhamento executado com antena GSSI de 200MHz. 97
- Figura 7.8. Mostrando na parte superior perfil longitudinal topográfico de 0 a 200m. Início do segundo trecho em Acompanhamento (aterro em consolidação) da Via pela SETRAN. Em baixo o imageamento correspondente ao alinhamento executado com antena GSSI de 200MHz. 98
- Figura 7.9. Mostrando na parte superior perfil longitudinal topográfico de 0 a 50m. Início do segundo trecho em Acompanhamento (aterro em consolidação) da Via pela SETRAN. Em baixo o imageamento correspondente ao alinhamento executado com antena GSSI de 200MHz. 99
- Figura 7.10. Mostrando na parte superior perfil longitudinal topográfico de 50 a 100m. Início do segundo trecho em Acompanhamento (aterro em consolidação) da Via pela SETRAN. Em baixo o imageamento correspondente ao alinhamento executado com antena GSSI de 200MHz. 100
- Figura 7.11. Mostrando na parte superior perfil longitudinal topográfico de 100 a 150m. Início do segundo trecho em Acompanhamento (aterro em consolidação) da Via pela SETRAN. Em baixo o imageamento correspondente ao alinhamento executado com antena GSSI de 200MHz. 101
- Figura 7.12. Mostrando na parte superior perfil longitudinal topográfico de 150a 200m. Início do segundo trecho em Acompanhamento (aterro em consolidação) da Via pela SETRAN. Em baixo o imageamento correspondente ao alinhamento e- 102

xecutado com antena GSSI de 200MHz.

Figura 7.13. Mapa da área 1 mostrando na parte superior o relevo da primeira área pesquisada. O traço do radar aparece em negrito. Em baixo, o perfil longitudinal com 175m de comprimento.

103

Figura 7.14. Mapa da área 2 mostrando na parte superior o relevo da primeira área pesquisada. Em baixo, o perfil longitudinal com 200m de comprimento. O traço do radar aparece em negrito.

104

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Valores de v e γ para diferentes comportamentos do meio (MARSHALL e ali, 1982). Simplificada.	21
Tabela 5.1	Características dos Solos	43
Tabela 7.1	Coordenadas topográficas UTM dos Perfis GPR – Área I e II	105

LISTA DE QUADROS

Quadro 6.1	Identificação, localização, comprimento, observação	78
Quadro 7.1	Coluna Estratigráfica proposta para a área do Projeto Alça Viária(VETEC,1997).	84

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
CMP	Common Midle Point
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (Atual DNIT)
EM	Eletromagnético
GEIPOT	Grupo Executivo de Infra-estrutura em Transportes
GPR	Ground Penetrating Radar
GSSI	Geophysical Survey Systems Inc
IDESP	Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Pará
SETRAN	Secretaria Executiva de Transportes do Pará
TC	Controle temporal de corte
WARR	Wide Angular Reflection and Refraction
ZPE	Zonas de Processamento Exportações

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1 – INTRODUÇÃO

O Sistema GPR (RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO) nasceu como aplicação ao estudo do interior da Terra partindo dos radares aéreos que se desenvolveram durante a segunda Guerra Mundial para detectar aviões e navios.

O desenvolvimento posterior de sistemas de GPR cada vez mais complexos e precisos tem permitido que este tipo de estudo no solo se estenda ao subsolo terrestre e também possa ser utilizado sobre estruturas como estradas, subsolo de pontes e similares. Estas aplicações apresentam um campo de estudo interessante e competitivo em relação a outros métodos de prospecção geofísica que tenham uma resolução adequada para realizá-los com êxito.

Um dos campos mais habituais de aplicação é o da engenharia civil, encontrando aplicação na detecção de rocha base em terreno a ser edificado, na localização de armaduras em vigas de concreto e na investigação ou mapeamento de tubos ou fugas de água, entre outros. Também se utiliza em estudos geotécnicos e de controle de qualidade como por exemplo: no controle de qualidade de diferentes tratamentos realizados no terreno, no estudo do estado de túneis, cubagem de material necessário para reparos em obras civis, e análise de terrenos em busca de bolsões de argila ou cavidades.

A técnica do Radar de Penetração no Solo (Ground Penetrating Radar - GPR) oferece uma nova forma de investigação de condições geológicas e geotécnicas rasas, diferente da sondagem clássica. O radar produz uma onda eletromagnética de alta frequência (10 - 1000 MHz) que é transmitida ao solo, onde a propagação do sinal depende das propriedades elétricas dos materiais existentes. Mudanças das propriedades elétricas do meio geológico fazem com que parte do sinal transmitido seja refletido. O sinal refletido é detectado por um receptor onde é amplificado, digitalizado e armazenado, para ser processado e transformado em registro (radargrama).

A maioria dos sistemas pode operar em várias frequências, porém aquelas compreendidas na faixa de 100 MHz a 1,5GHz são as mais comuns para o uso em estudos geotécnicos.

Os registros de reflexão GPR são interpretados analisando-se suas características determinadas pelo comportamento das microondas e radio frequências ao atravessar o meio. Este comportamento é consequência das características do meio,

de tal maneira que alguns autores propõem este método de prospecção para classificar solos (ULRIKSEN,1982) ou melhor para caracterizá-los (HÄNNINEN, 1992). Os fenômenos mais importantes nestes estudos de reflexão em descontinuidades eletromagnéticas do subsolo são basicamente quatro: os que afetam a resolução; os que limitam a penetração da energia no meio (atenuação, dispersão); os que determinam o percentual de energia refletida e transmitida em cada um dos contactos e que determinam a velocidade de propagação da onda em cada material. Concluindo, os parâmetros que influem na velocidade da onda são: a permissividade relativa do meio, a condutividade, a permeabilidade magnética e a frequência da emissão. Os três primeiros são característicos do meio, enquanto que o quarto depende do equipamento utilizado.

Neste contexto, este estudo visa estudar e caracterizar o sistema GPR em relação aos aspectos físicos de fundamentação, instrumentação, medição, processamento e análises experimentais preliminares em pavimento flexível rodoviário sobre solos moles integrando-os com o sistema geodésico de medição e representação (dados geodésicos).

Pretende-se, neste sentido, investigar e fornecer subsídios preliminares para as causas dos recalques, identificados por método geodésico ou mesmo por observação visual e buracos existentes no pavimento de uma rodovia (plano piloto) a partir de estudos integrados de GPR e posicionamento geodésico. Através de imageamento do subsolo o equipamento pode identificar com uma certa incerteza o leito, a sub-base, a base e o revestimento onde houve a utilização de drenagem do terreno natural através de geomembranas, como também identificar a utilização de estacas flutuantes nos encontros de algumas pontes compondo o agulhamento.

1.1. Como objetivo geral o presente trabalho se propõe:

Caracterizar o sistema GPR em relação aos aspectos de fundamentação, instrumentação, medição, processamento, testes e análises experimentais preliminares em pavimento flexível rodoviário/plano piloto, integradas com dados geodésicos, como indicativos de causas de recalques e buracos existentes no pavimento da Rodovia.

1.2. Os objetivos específicos são:

- ✓ Caracterizar a propagação de ondas de radar em meios materiais com base na Teoria da Radiação;
- ✓ Descrever e caracterizar a instrumentação e equipamentos de GPR vinculado aos fundamentos de prospecção geofísica;
- ✓ Estudar os métodos de aquisição e tratamento de dados por GPR de acordo com as propriedades e características dos meios;
- ✓ Testar e Analisar numa área piloto medidas de GPR em Pavimento Flexível sobre solos moles, integradas com dados do posicionamento espaciais com base nas ciências geodésicas.

CAPITULO 2

CARACTERÍSTICAS DA PROPAGAÇÃO DAS ONDAS DE RADAR EM MEIOS MATERIAIS

Neste capítulo se comentam fenômenos associados com a propagação de ondas eletromagnéticas que influem de forma notável na prospecção de GPR. Se analisam os processos que produzem perdas na energia durante a propagação pelo meio:

- ✓ Expansão geométrica da frente de ondas, absorção ao transformar parte da energia eletromagnética em calor, principalmente como consequência da polarização por orientação das moléculas de água. Este é o fenômeno de maior importância na banda de frequências habituais na prospecção GPR.
- ✓ Dispersão da energia ao incidir em elementos de dimensões compatíveis com o comprimento de onda ou inferiores.
- ✓ Dispersão cromática devido à dependência da velocidade com a frequência e a atenuação.

A partir do fator de atenuação se define a profundidade de penetração pelicular como a inversa de α , obtendo também uma expressão simplificada a partir do chamado fator de perdas (este último parâmetro se determina como o quociente entre a condutividade efetiva do meio, a pulsação e a permissividade efetiva); analisa-se ainda a variação da profundidade pelicular de penetração em função da frequência e da condutividade do meio, considerando-se diferentes valores da permissividade; por último analisa-se os conceitos de resolução vertical e horizontal, recorrendo a distintas formas de estimá-los.

2.1. Considerações iniciais

Os registros de reflexão de GPR se interpretam analisando-se suas características, determinadas pelo comportamento das ondas ao atravessar o meio. Este comportamento é uma consequência das características do meio.

2.2. Perdas de energia por processos internos ao meio

Influem na atenuação da onda durante sua propagação pelo meio os seguintes fatores: dispersão geométrica da frente de ondas, efeitos de polarização (absorção) e dispersão.

As duas causas mais importantes são a expansão geométrica da frente de onda e os fenômenos de absorção (mais importantes para condutividade grandes e estreitamento relacionados com a percentagem de água contido no meio).

Uma análise final da atenuação permite estimar a profundidade pelicular de penetração e a possibilidade de simplificar, em alguns usos concretos, a expressão que permite calcular a atenuação.

2.2.1. Dispersão geométrica da frente de ondas

A emissão das ondas de radar são produzidas na forma de um feixe de energia aproximadamente cônico, com seção elíptica. A direção de deslocamento da antena corresponde ao semi-eixo maior da sua pegada (área de incidência na superfície refletora) elíptica. A maior parte da energia de radiação fica compreendida dentro da zona definida pelo ângulo de radiação, que em muitas antenas utilizadas atualmente é de 45° .

A antena irradia a maior parte da energia num feixe cônico cujo ângulo (na direção de deslocamento da antena) é de 90° . Estas propriedades estão desenvolvidas nos trabalhos de simulação de propagação de ondas de radar como os de CAI et Mc MECHAN (1995), nos quais se define a atenuação geométrica a partir de estudos anteriores aplicados à sismologia.

2.2.2. Absorção

A absorção é produzida quando, durante a propagação da onda, parte da energia eletromagnética se converte em calor (REYNOLD,1997). Isto é consequência da polarização por orientação das moléculas de água, fenômeno que aparece para frequências da banda de microondas e banda de ondas de rádio (ULRIKSEN,1982).

2.2.3. Dispersão da energia

Este fenômeno é produzido quando a energia eletromagnética incide em objetos cujas dimensões são da ordem de seu comprimento de onda ou inferiores. Nestes casos, se produz uma distribuição aleatória da energia incidente.

Nos casos em que não se pode obter a velocidade de grupos de onda se utiliza a velocidade média de transporte de energia, definida como o quociente entre a média temporal do vetor de “Poynting” e a densidade de energia (LORRAIN e CORSON,1986).

2.2.4. Atenuação e profundidade pelicular de penetração

A atenuação como resultado da absorção de energia pelo meio se produz como consequência das características eletromagnéticas do material pelo qual a onda se propaga, e é a causa fundamental das perdas de energia nos casos dos meios materiais. A atenuação é uma função complexa das propriedades dielétricas, elétricas e magnéticas do meio. O fator de atenuação, α , depende da permissividade dielétrica do meio (ϵ), da condutividade (σ), da permeabilidade magnética (μ) e da pulsação da onda emitida (ω). Como os meios sobre os quais se trabalha na prospecção não são homogêneos, suas propriedades eletromagnéticas e seu comportamento dependem dos elementos que os compõem e de sua importância.

Considerando a equação 3.17 e as expressões dos parametros μ (equação 3.9) e ϵ (equação 3.6) chega-se à seguinte expressão:

$$\alpha = \omega(\mu\epsilon/2)((1+\sigma^2/\omega^2\epsilon^2)^{1/2} - 1))^{1/2} \quad \text{Equação 2.1}$$

Sendo: $\omega = 2\pi f$ a pulsação da onda, f a frequência (em Hz), $\mu = \mu_r 4\pi 10^{-7}$ (em H/m) a permeabilidade magnética ($B = \mu H$), σ (em S/m) a condutividade à frequência dada, $\epsilon = \epsilon_r 8.8510^{-12}$ (em F/m) a constante dielétrica à frequência f (ver equação 3.6), ϵ_r a permissividade dielétrica relativa do material e, μ_r a permeabilidade magnética relativa do material.

2.2.5. Fator de perdas

O fator de perdas se define como o quociente entre a condutividade e o produto da pulsação pela constante dielétrica. Esta relação entre σ , ϵ , e ω , separa os meios entre os chamados de pequenas perdas e os que se denominam de meios de grande perda. O fator de perdas P é dado pela Equação 2.2

$$P = \sigma/\omega\epsilon = \text{tang}D \quad \text{Equação 2.2}$$

Sendo D o ângulo de defasagem, σ a condutividade efetiva do meio e ϵ a permissividade dielétrica relativa efetiva.

Utilizando-se o fator de perdas (equação 2.2), a equação 3.12 que relaciona a permissividade no vácuo, a permeabilidade no vácuo e a velocidade da onda no vácuo, obtém-se a partir da equação 2.3 a velocidade de atenuação escrita como:

$$\alpha = \omega/c(\mu_r \epsilon_r / 2)((1+p^2)^{1/2} - 1)^{1/2} \quad \text{Equação 2.3}$$

A partir do coeficiente de atenuação se define a profundidade de penetração pelicular ou nominal, d ("Skin depth"), como o inverso do coeficiente de atenuação:

$$d = 1/\alpha \quad \text{Equação 2.4}$$

2.3 Classe ou categoria do radar

De forma geral pode-se dizer que as perdas que apresenta uma radiação eletromagnética durante sua propagação a uma distância dada do emissor, são:

- ✓ Perdas produzidas pela antena
- ✓ Perdas durante a transmissão da energia entre o ar e o meio
- ✓ Perdas ocasionadas pela dispersão geométrica da frente de ondas
- ✓ Atenuação no interior do meio devido às propriedades EM do material
- ✓ Atenuação por dispersão e difração em pequenos elementos e heterogeneidade do meio.
- ✓ Atenuação por reflexão de parte da energia em discontinuidades de grande tamanho.

2.4. Resolução vertical e horizontal

A resolução de um equipamento se define como sua capacidade de resolução de elementos independentes no subsolo, seja a espessura (resolução vertical), ou extensão horizontal (resolução horizontal). Conhecer a resolução do aparelho num meio dado significa saber qual é a mínima distância que deve existir entre dois refletores (seja vertical ou horizontal) para que estes se registrem como eventos separados.

A resolução vertical permite conhecer a sensibilidade do equipamento para diferenciar entre dois sinais adjacentes no tempo como eventos diferentes. A resolução horizontal indica a distância mínima que deve existir entre dois refletores situa-

dos um junto ao outro, horizontalmente (paralelos à superfície do meio analisado), para que o aparelho os detecte como eventos separados.

2.4.1. Resolução vertical

A sensibilidade do equipamento para distinguir dois sinais adjacentes no tempo, como eventos separados, depende da frequência da emissão utilizada e da duração do pulso.

A resolução vertical, R_v , é definida a partir da seguinte expressão LORENZO (1994):

$$R_v = v/\Delta f = v\Delta t/2 \quad \text{Equação 2.5}$$

onde v é a velocidade da onda no meio, Δf é a banda de frequência e Δt é o dobro do período do sinal.

2.4.2. Resolução horizontal

A resolução horizontal se define como a capacidade do aparelho para definir um refletor e sua geometria. Depende da velocidade de deslocamento da antena e do número de pulsos emitidos por segundo (o produto destes dois fatores é o número de pulsos emitidos por unidade de comprimento do terreno analisado), da geometria do feixe emitido (cone de emissão), da seção eficaz do refletor (primeira zona de Fresnel) e da profundidade na qual se localiza o refletor.

São vários os critérios que se podem considerar para determinar a resolução horizontal.

Recorrendo a Reynolds (1997), a resolução horizontal também é inversamente proporcional a $\alpha^{1/2}$, sendo α o fator de atenuação. Isto indica que o valor da resolução horizontal é maior num meio altamente atenuante, enquanto que piora em meios não atenuantes.

Outro critério é o que proporcionam CONYERS e GOODMAN (1997). Por este critério se define a pegada da antena como a interseção entre o cone de energia radiado e a superfície refletora, isto é, como a área iluminada pela antena (figura 2.1), a que outorgam um raio r_a definido como:

$$r_a = \lambda/4 + h/(\epsilon_r + 1)^{1/2} \quad \text{Equação 2.6}$$

Onde: h é a distância vertical entre a antena e a superfície refletora, e ϵ_r a permissividade relativa média do material compreendido entre ambas.

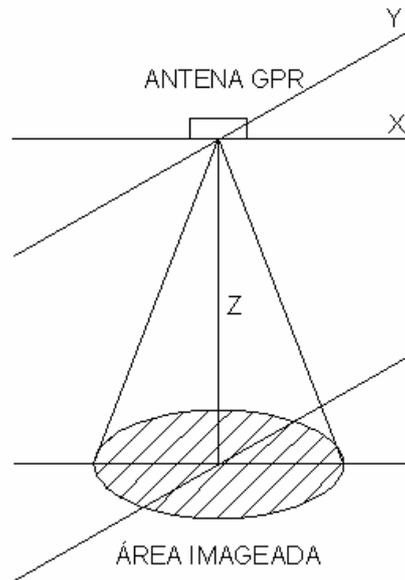


Figura 2.1 Esquema de um radar GPR (CONYERS & GOODMAN,1997, modificado)

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTOS DA PROSPECÇÃO COM GPR

A prospecção com GPR consiste na emissão e propagação de ondas eletromagnéticas, em um meio físico, com a posterior recepção dos sinais refletidos, em descontinuidades desse meio. Aqui se comentam aqueles conceitos que nos servem para entender este processo. Os campos eletromagnéticos ficam definidos mediante as equações de Maxwell. Estas equações ligam os campos elétrico e magnético com as fontes que os produzem, a partir desta série de parâmetros constantes para cada meio determinado. Estas constantes definem eletromagneticamente o meio. Na prospecção com GPR três destes parâmetros são básicos para compreender o que se está registrando. Trata-se da condutividade(σ), da permissividade dielétrica(ϵ) e a permeabilidade magnética(μ). Estes três parâmetros são valores complexos. Quando efetuamos uma medida com radar, os parâmetros que se obtém são o que se denominam valores efetivos, isto é, combinações entre as partes reais e imaginárias de cada um dos três. Por exemplo, a parte real da permissividade relativa de um meio gera uma corrente em fase com o campo elétrico aplicado, enquanto que sua parte imaginária gera uma corrente defasada. Com a condutividade ocorre o inverso: sua parte real determina a amplitude da corrente defasada e a imaginária da corrente, em fase com o campo elétrico aplicado. A condutividade efetiva se obtém como a soma da componente real da condutividade do meio e da imaginária de sua permissividade relativa. A permissividade efetiva é formada pela componente real da permissividade relativa e a parte imaginária da condutividade do meio que, junto com a pulsação da radiação, ω , indica o efeito das cargas livres. Ao longo deste trabalho, quando se fala em geral de permissividade e de condutividade se faz referência a estes valores efetivos, a não ser que se indique explicitamente que se trata de valores relativos do meio.

A partir da equação de propagação de uma onda plana e harmônica e das relações de Maxwell se chega a expressões para a velocidade de propagação e para o comprimento de onda, em função destes parâmetros do meio e das características da radiação (frequência utilizada). Estas expressões dependem do tipo de meio pelo qual se produz a propagação: espaço livre, dielétrico perfeito, dielétrico, dielétrico de baixas perdas ou condutor.

A atenuação que se produz durante a propagação de uma onda por um meio material pode obter-se considerando os fatores de expansão geométrica da frente de onda e o denominado fator de atenuação. Este último é uma função também dos parâmetros eletromagnéticos do meio e da frequência da radiação. A atenuação de-

vida aos efeitos do meio é uma função exponencial que determina a diminuição de energia (e portanto de amplitude) da onda, conforme nos afastemos do foco de geração.

A amplitude da onda que se recebe na antena é também dependente da percentagem de energia refletida em cada uma das descontinuidades do meio. Definem-se os coeficientes de transmissão e reflexão como as percentagens de energia refratada e refletida, relativas à energia incidente numa superfície determinada. Estes coeficientes dependem das impedâncias eletromagnéticas dos campos incidente e refratado. No caso particular de um GPR a incidência pode-se considerar normal, isto é, o ângulo de incidência e o ângulo de refração são zero (aproximadamente). Com esta condição a expressão destes coeficientes se simplifica, ficando unicamente em função das permissividades dos meios em contato.

3.1. Propagação de ondas eletromagnéticas

A base teórica deste método de prospecção é, por um lado, os conceitos de óptica geométrica e, por outro, a teoria de campos magnéticos, cujas equações básicas foram formuladas por Maxwell em 1867, relacionando os campos elétrico e magnético com suas fontes. Estas relações se completam com as denominadas equações de continuidade, que especificam o comportamento destes campos em zonas nas quais existem distribuições superficiais de carga, isto é, onde teremos descontinuidades no meio.

Estas equações para o campo elétrico e magnético, são dadas segundo LORRAIN e CORSON (1972) ; CARCIONE (1986) por:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_f$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{M}$$

$$\nabla \times \vec{H} = - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}$$

Equação 3.1

Em geral, os meios pesquisados são anisotrópicos. Neste caso, a relação que existe entre estas grandezas é expresso através dos tensores da permissividade, permeabilidade e condutividade(CARCIONE,1996).

$$\vec{D} = \tilde{\epsilon} * \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\vec{B} = \tilde{\mu} \vec{H}$$

Equação 3.2

$$\vec{J} = \tilde{\sigma} * \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J}_m$$

Onde: J_m é a densidade de corrente devido tanto a polarização como magnetização do material em consequência dos campos elétrico e magnético aplicados, e as expressões ϵ , μ e σ aproxima-se por três tensores de dimensão 3x3 (CARCIONE, 1996).

Para meios homogêneos e isotrópicos, as equações podem ser simplificadas para:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}$$

Equação 3.2.1

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

Partindo das equações de Maxwell e, com a equação geral de propagação de ondas, pode-se obter as relações que regem a propagação de uma onda eletromagnética em função das propriedades do meio pelo que se produz. Com estas relações é possível determinar a velocidade de propagação da onda, o comprimento da onda no meio material, e a atenuação que sofre a energia durante a trajetória.

3.2. Parâmetros eletromagnéticos de um meio

Os parâmetros eletromagnéticos (condutividade, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética) são os que definem um meio à passagem de uma onda eletromagnética.

3.2.1. Condutividade(σ)

A condutividade de um meio fornece a resposta de suas cargas livres na presença de um campo elétrico externo, sendo o fator de proporcionalidade entre o campo livre aplicado e a densidade de volume de corrente, devido ao movimento de cargas livres. Isto é, proporciona a medida da capacidade do material de conduzir corrente elétrica. Segundo a lei de Ohm:

$$J_f = \sigma \vec{E} \quad \text{Equação 3.3}$$

onde \vec{E} é o campo elétrico aplicado, J_f é a densidade volumétrica de corrente devido às cargas livres e σ é a condutividade do material expressa em Siemens/metro (S/m).

Existem materiais condutores, semi-condutores e isolantes. Pertencem ao primeiro grupo aqueles materiais cuja condutividade é maior que 10^5 S/m, enquanto que materiais que apresentam uma condutividade menor que 10^{-8} S/m se classificam como isolantes, sendo semi-condutores aqueles cuja condutividade se encontra entre estes valores.

Em muitos meios sucede que o conteúdo de água nos vazios do material e a composição química desta são os fatores que determinam sua condutividade, mais que os grãos minerais que o compõe.

Na maior parte das rochas e subsolos nos quais se realizaram pesquisas, a condutividade é principalmente eletrolítica já que, exceto no caso de existência de minerais metálicos ou de argilas, a maior parte dos materiais podem ser considerados como isolantes. Nestes meios a condução elétrica se deve basicamente à existência de fluido (com íons dissolvidos) nos vazios e fissuras. Isto é, quanto maior o conteúdo de água, o percentual de íons dissolvidos e a porosidade do meio, maior será sua condutividade.

A condutividade é dada por:

$$\sigma = \sigma' - i\sigma \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde σ' é a parte real da condutividade complexa, e determina a amplitude da corrente em fase com a intensidade do campo elétrico externo e σ'' é a parte imaginária da condutividade complexa, que determina a amplitude da corrente defasada respectiva ao campo elétrico externo, e considera o retardo na resposta de condução que apresenta o material, na presença de um campo elétrico variável com o tempo (SUTINEN,1992).

3.2.2. Permissividade dielétrica(ϵ)

A permissividade dielétrica é uma constante de proporcionalidade entre a intensidade do campo elétrico externo aplicado e o vetor deslocamento, D:

$$D = \epsilon \vec{E} \quad \text{Equação 3.5}$$

A permissividade absoluta, (medida no SI em F/m), se define como o produto entre uma permissividade relativa do material (ϵ_r), que é uma constante adimensional e a permissividade dielétrica do vácuo ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m):

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad \text{Equação 3.6}$$

A permissividade dielétrica relativa é uma constante que dá a medida da capacidade de polarização do material na presença de um campo elétrico. Para a maioria dos materiais que podemos encontrar no subsolo ao se realizar uma prospecção eletromagnética, os valores da permissividade dielétrica relativa varia entre 1 (do ar) e 81, sendo esta última a constante dielétrica relativa da água a 20°C.

A constante de proporcionalidade (adimensional) entre a polarização de um material, P, e o campo externo é a susceptibilidade, X.

$$D = P + \epsilon_0 E = X \epsilon_0 E + \epsilon_0 E = (1 + X) \epsilon_0 E = \epsilon_r \epsilon_0 E \quad \text{Equação 3.7}$$

A constante dielétrica se apresenta na forma complexa (MARSHALL et ali.,1982); TURNER e SIGGINS (1994) como uma expressão na qual a componente real produz uma constante na fase respectiva ao campo elétrico externo, e a componente imaginária provoca uma corrente defasada, respectiva ao campo elétrico, sendo:

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$$

Equação 3.8

Onde ϵ' é a parte real da permissividade dielétrica complexa, chamada permissividade real, e ϵ'' a parte imaginária.

Para frequências altas (entre 10 MHz e 1000 MHz), na maior parte dos materiais do subsolo, os fenômenos de deslocamento (ou polarização) sobrepõem-se aos fenômenos de condutividade. Desta maneira, os meios são caracterizados a partir de sua constante dielétrica. Para frequências menores o termo condutividade estática predomina sobre o outro. Para frequências baixas (menores que 100 MHz) não se tem observado que este parâmetro dependa da frequência do pulso, porém para frequências mais altas se observa uma dependência entre ambos. Tanto a parte imaginária como a parte real da permissividade dielétrica apresenta variação em função da frequência (fig 3.1). Há diferentes mecanismos que caracterizem esta dependência (ROBERT,1996). Os dois mais utilizados, comumente, são o modelo de DEBYE e o modelo de COLE-COLE (1941), chamado modelo de MAXWELL-WAGNER.

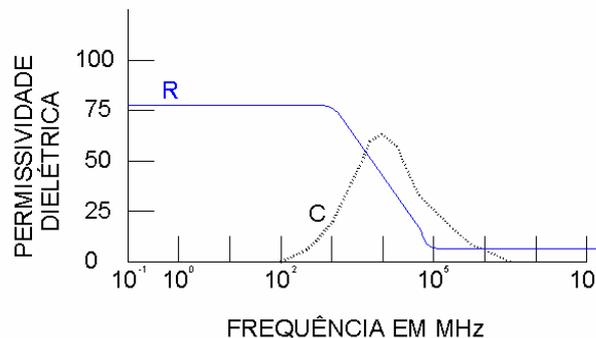


Figura 3.1. Gráfico da permissividade contra a frequência. Modelo de Cole-Cole, modificado.

3.2.3. Permeabilidade magnética (μ)

Este parâmetro (μ) é o que relaciona a indução magnética, B , com a intensidade do campo magnético H , medido em Henry/metro (H/m). Pode ser escrito como o produto da permeabilidade magnética do vácuo ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m) e a permeabilidade relativa do material (μ_r):

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 (1 + \chi_m) H = \mu H$$

Equação 3.9

A permeabilidade pode ser escrita na forma complexa como:

$$\mu_r = \mu' - i\mu'' = 1 + X_m$$

Equação 3.10

A parte real desta expressão dá ideia da energia eletromagnética armazenada no material, e se denomina permeabilidade magnética elástica. Entretanto, a parte imaginária determina a quantidade de perdas magnéticas devido a correntes turbilhonárias, histerese, viscosidade magnética do material, e se denomina permeabilidade magnética viscosa.

Na maior parte dos materiais que encontramos nas pesquisas com GPR (exceto nos ferromagnéticos), se constata que a permeabilidade magnética é próxima de 1, não dependendo da frequência do campo magnético.

A maioria dos materiais da Terra tem comportamento isotrópico relativo à permeabilidade magnética, de maneira que para se realizar um tratamento tensorial, como no caso da condutividade e da permissividade dielétrica, o tensor deste parâmetro é uma constante multiplicada pela matriz identidade de dimensões 3x3:

$$\mu = \mu I$$

Equação 3.11

A relação entre a permeabilidade magnética no vácuo e a permissividade dielétrica no vácuo é dada por:

$$c = 1 / (\epsilon_0 \mu_0)^{1/2} = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Equação 3.12

Sendo c a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no vácuo.

3.3. Velocidade de propagação e comprimento de onda

A partir das quatro equações formuladas por Maxwell em 1867 e uma onda plana que se propaga num meio, pode-se calcular as relações que definem a propagação das ondas eletromagnéticas no material. Considerando o caso na direção r , obtém-se as seguintes equações supondo uma variação do campo harmônico relativo ao tempo, isto é, dependente de $e^{i\omega t}$:

$$E(r,t) = E_0 e^{i(\omega t - \gamma r)}$$

Equação 3.13

$$H(r,t) = H_0 e^{i(\omega t - \gamma r)}$$

Equação 3.14

Observa-se que a expressão tem uma parte que define a propagação da onda com o tempo. Entretanto, outro termo mostra diminuição da amplitude da onda com a distância percorrida, isto é, considera a atenuação da onda eletromagnética durante sua propagação pelo meio. O final da amplitude (que consta de uma amplitude inicial no ponto dado e de um final de atenuação com a distancia ao ponto) depende do fator de decaimento γ .

$$\begin{aligned} E(r) &= E_0 e^{-\gamma r} \\ H(r) &= H_0 e^{-\gamma r} \end{aligned} \quad \text{Equação 3.15}$$

Este termo γ é denominado constante de propagação ou número de onda complexo, que pode ser expresso em função dos parâmetros eletromagnéticos característicos de cada meio (STEWART et ali.(1994); GARCIA(1997) introduzindo as relações que se observam nas equações de Maxwell:

$$\gamma = i\omega(\epsilon_0\epsilon_r\mu_0\mu_r)^{1/2} = i\omega/c(\epsilon_r\mu_r)^{1/2} = i2\pi/\lambda_0(\epsilon_r\mu_r)^{1/2}$$

Onde: c é velocidade de uma onda eletromagnética no vácuo, isto é, uma constante; λ_0 é o comprimento da mesma onda também no vácuo; ϵ_0 a constante dielétrica do vácuo; ϵ_r a constante dielétrica relativa do meio; μ_0 a permeabilidade magnética do meio.

Considerando as componentes real e imaginária da constante de propagação (equação 3.16):

$$\gamma = \alpha + i\beta \quad \text{Equação 3.16}$$

é possível determinar o fator de atenuação da onda (a componente real do número de onda complexo) e a constante de fase da onda (a componente imaginária do número(de onda complexo), que determina a velocidade de fase da mesma. A dependência destes parâmetros depende também da dependência freqüencial que apresenta os parâmetros do material. As expressões do fator de atenuação da onda α , e da constante de fase β , pode ser escrito como TURNER e SIGGINS,1994; GARCIA,1997):

$$\alpha = \omega \operatorname{Im}(\epsilon_r\epsilon_0\mu_r\mu_0)^{1/2} \quad \text{Equação 3.17}$$

$$\beta = \omega \operatorname{Re}(\epsilon_r\epsilon_0\mu_r\mu_0)^{1/2} \quad \text{Equação 3.18}$$

3.3.1. Velocidade de propagação de uma onda EM em meio material

O segundo parâmetro (β) permite determinar a velocidade da onda no meio material no qual está se propagando, já que:

$$\beta = \omega/v \quad \text{Equação 3.19}$$

onde: v é a velocidade de fase da onda eletromagnética. Desta forma, a expressão que se obtém para a velocidade de propagação da onda é a seguinte:

$$v = \frac{1}{(\epsilon\omega/2((1+\sigma/(\omega\epsilon)^2)^{1/2}+1))^{1/2}} \quad \text{Equação 3.20}$$

Nos estudos de GPR em meios não magnéticos, que são os mais frequentes, a expressão se simplifica já que: $\mu_r=1$.

Desta forma a expressão que comumente se poderá utilizar é:

$$v = c/(R_e(\epsilon_r)^{1/2}) \quad \text{Equação 3.21}$$

Para materiais diferentes, a velocidade v e a constante de propagação γ , as expressões desenvolvidas adotam diferentes formas, tal como se expressam na tabela 3.1 (MARSHALL et ali., 1982).

Tabela 3.1 Valores de v e γ para diferentes comportamentos do meio (MARSHALL e ali, 1982). Simplificada.

Meio	Velocidade	Constante de Propagação
Espaco livre	$v = \omega / \beta = 0,30\text{m/ns}$	$\gamma = i\beta(\text{m}^{-1})$
Dielétrico perfeito	$v = \omega/\beta(\text{m/s})$	$\gamma = i\beta$
Dielétrico	$v = \omega/\beta(\text{m/s})$	$\gamma = \alpha + i\beta$
Dielétrico de baixas perdas	$v = \omega/\beta(\text{m/s})$	$\gamma = \alpha + i\beta$
Bom condutor	$v = \omega/\beta(\text{m/s})$	$\gamma = \alpha + i\beta$

Em muitos casos a parte imaginária da permissividade dielétrica é pequena frente a parte real. Na equação 3.10 podemos ver que esta parte depende da condutividade do meio e do fator de perdas dielétricas relacionadas com a relaxação na molécula de água. Quando os meios são dielétricos, ou pouco condutores, o termo associado com a condutividade é pequeno. Se além disso se leva em conta que as frequências habituais de trabalho estão situadas entre 10 MHz e 1000 MHz, pode-se considerar que a parte imaginária é muito menor que a parte real da permissividade, uma vez que o termo associado com a relaxão da molécula de água e, portanto, com a parte imaginária da permissividade é pequena (ver a fig 3.1). Nestes casos a equação 3.26 pode ser simplificada para:

$$v=1/(\epsilon_0\epsilon_r\mu_0)^{1/2}=c/(\epsilon_r)^{1/2} \quad \text{Equação 3.22}$$

Na fig 3.2 se projeta a variação da velocidade da onda frente à constante dielétrica a partir da relação 3.27 (linha contínua), assim como diferentes valores pontuais medidos em diversos materiais reais, dado sua permissividade dielétrica característica. Os valores da velocidade são obtidos das tabelas como apresentados por REYNOLDS(1997).

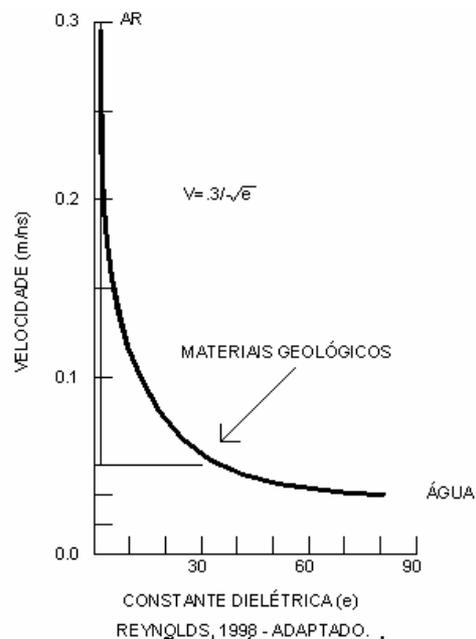


Figura 3.2: O gráfico representa a comparação entre os valores experimentais da velocidade em função da constante dielétrica e a curva obtida ao representar a equação 3.22.

A velocidade mais elevada se obtém para o ar, entretanto o ponto que apresenta menor velocidade, no gráfico, representa a água. Observa-se que a aproximação que proporciona a equação acima, ajusta-se adequadamente aos resultados experimentais.

3.3.2 Comprimento da onda num meio diferente do vácuo

O comprimento de onda num meio λ_m , dependerá da velocidade de fase (e indiretamente da constante dielétrica efetiva do mesmo) e da frequência da onda emitida. Como na expressão aparecem parâmetros da propagação no vácuo, poderemos relacioná-la com o comprimento de onda no vácuo:

$$\lambda_m = \lambda_0 / \text{Re}(\epsilon_r \mu_r)^{1/2} \quad \text{Equação 3.23}$$

Onde λ_0 é o comprimento da onda no vácuo.

Em meios não magnéticos ($\mu_r=1$), a expressão simplificada fica:

$$\lambda_m = \lambda / \text{Re}(\epsilon_r)^{1/2} \quad \text{Equação 3.24}$$

O comprimento de onda determina a resolução vertical do GPR e dependerá da frequência de emissão da antena e da constante efetiva do material.

3.4. Atenuação

A atenuação de uma onda eletromagnética devido às características do material pelo que se propaga é um tema que tem sido discutido em diversas ocasiões, tanto teoricamente (ZONGHOU e TRIPP(1997); CARCIONE(1996); TURNER e SIGGINS (1994) como a partir de simulações (XU e Mc MECHAN, 1997); CARCIONE(1996); CASPER e KUNG(1996).

A componente real do fator de atenuação caracteriza o grau de diminuição da amplitude da onda conforme se aumenta a distância ao ponto no qual foi gerado. A este parâmetro se denomina fator de atenuação (CAI e Mc MECHAN,1955); GARCIA, 1997), sendo sua unidade m^{-1} :

$$\alpha = \omega/c \cdot \text{Im} . (\epsilon_r \mu_r)^{1/2} \quad \text{Equação 3.25}$$

Pode se observar que a atenuação depende da componente imaginária da permissividade dielétrica relativa do meio e de sua permeabilidade dielétrica relativa do meio, e de sua permeabilidade magnética relativa.

O grau de atenuação de uma onda eletromagnética se define como o quociente entre as amplitudes das oscilações da onda em dois pontos separados por uma distância r . Se tomarmos a equação de propagação de ondas esta relação fica:

$$E_0/E(r)=e^{\alpha r} \quad \text{Equação 3.26}$$

3.5. Parâmetros efetivos

Os parâmetros que definem o comportamento eletromagnético dos materiais (permissividade dielétrica e condutividade) têm, como temos visto no início deste capítulo, uma parte real e uma parte complexa.

$$\sigma_{ef} = \sigma' + \omega \varepsilon'' \quad \text{Equação 3.27}$$

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon' - \sigma''/\omega \quad \text{Equação 3.28}$$

3.6. Reflexão e refração

Quando a energia eletromagnética alcança uma descontinuidade nos parâmetros eletromagnéticos do meio, se produzem os fenômenos de reflexão e de refração. Quando a interface é plana, a frequência das ondas refletidas e refratadas é a mesma que a frequência da onda incidente, sendo também o ângulo de reflexão igual ao de incidência.

A lei de Snell relaciona os ângulos de incidência, reflexão e refração com as velocidades de propagação das ondas nos meios que estão em contato.

A porcentagem de energia refletida depende do contraste existente entre os parâmetros eletromagnéticos dos diferentes materiais do meio. Este percentual nos define os coeficientes de transmissão e de reflexão da energia.

A impedância de um campo eletromagnético é o quociente entre o campo elé-

trico e o campo magnético, podendo se definir uma impedância para o campo eletromagnético incidente η_1 , que coincidirá com a do campo magnético refletido, e outra para o campo eletromagnético refratado η_2 , isto é, transmitido:

$$\eta_1 = (\mu_0 \mu_r / \epsilon_0 \epsilon_r)^{1/2} \quad \text{Equação 3.29}$$

$$\eta_2 = (\mu_0 \mu_{r2} \epsilon_0 \epsilon_{r2})^{1/2} \quad \text{Equação 3.30}$$

A partir das expressões das impedâncias se podem calcular os coeficientes de transmissão e de reflexão de Fresnel da energia, como o quociente entre o campo incidente e o campo refratado no primeiro caso, e o quociente entre o campo incidente e o campo refratado no segundo caso.

CAPÍTULO 4

INSTRUMENTAÇÃO, EQUIPAMENTOS E MÉTODOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Neste capítulo se analisa a instrumentação, os métodos na prospecção com GPR e o equipamento utilizado nos trabalhos práticos, que se incluem nesta dissertação. Consideram-se quatro aspectos principais:

- ✓ Considerações gerais sobre a emissão da energia. Basicamente se trata da análise das antenas de radar, resumindo em duas equações: a equação do radar e a equação de transmissão. Trata-se, portanto, de um balanço energético. Tanto a equação do radar como a equação de transmissão são duas formas de determinar a efetividade de uma antena. A primeira equação expressa um balanço de potências quando tanto a antena emissora como a antena receptora são as mesmas. A segunda equação é o balanço de potências no caso de uma antena emissora distinta da antena receptora. A equação do radar, portanto, é um caso particular da equação de transmissão. A análise da antena de radar se completa com os diagramas de radiação. Trata-se de representações gráficas da frente de ondas que radia uma antena qualquer, em função das diferentes direções do espaço.
- ✓ O segundo aspecto analisado são os componentes de um GPR. Um equipamento básico se compõe de uma unidade central, normalmente com monitor incorporado e uma série de antenas conectadas à primeira mediante um cabo ótico. Este equipamento básico se pode complementar com uma série de acessórios. Entre os elementos complementares temos dois tipos de instrumentos: os que servem para visualizar e armazenar os radargramas (impressora, monitor, unidades de registro, etc) e os empregados para situar os perfis (marcadores). Além disso, é possível utilizar outros equipamentos e métodos que não formam parte do GPR para complementar o estudo. Trata-se, aqui de métodos e equipamentos topográficos de posicionamento e de material fotográfico.
- ✓ Em continuação, se compilam e comentam os diferentes métodos existentes para a aquisição de dados com diferentes tipos de antenas. Estes métodos se podem agrupar em perfis, aquisições pontuais, CMP, WARR e aquisições de dados em sondagem.
- ✓ Finalmente se descreve o GPR que foi utilizado nos trabalhos de campo que se incluem na presente trabalho. Trata-se de um GPR projetado para

analisar principalmente os tempos de chegada da energia refletida nas descontinuidades do meio. Se explicam as características técnicas do equipamento e da radiação das antenas.

4.1. Considerações iniciais

Aqui descreve-se o equipamento utilizado, seu funcionamento, e os métodos de aquisição de dados, fazendo-se especial ênfase quanto ao funcionamento das antenas e nos tipos de estudo que se possa chegar com cada uma delas.

Um equipamento de GPR básico, esquematicamente, consta de uma unidade de controle central, uma ou várias antenas conectadas a ela, e um sistema de gravação de dados. A unidade de controle funciona graças a um programa informático implementado que controla a emissão, a recepção e o registro da energia.

O equipamento utilizado e quase todos que podemos encontrar na atualidade no mercado se alimentam com corrente contínua. Uma bateria de 12 volts é suficiente, em muitos casos, para um trabalho de campo de quatro horas de duração.

Nesta dissertação foi utilizado um GPR *SIR-3000*, fabricado pela Geophysical Survey Systems Inc. As antenas que complementam o equipamento, do mesmo fabricante vão desde a frequência central de 15, 20 35 40, 80, 200 e 400 MHz. As antenas utilizadas no campo foram as de 80, 200, e 400 MHz. O equipamento pertence ao Laboratório de Geofísica da Universidade do Pará.

4.2. Desenvolvimento do radar

Um radar pode ser definido como um sistema que permite detectar e situar um objeto por meio da emissão e a recepção de ondas eletromagnéticas que se propagam no meio no qual está imerso o objeto e que se refletem neste.

Partindo da detecção de objetos no ar, o radar foi aplicado a outros meios mais complexos onde se atenuava mais rapidamente, e finalizou com ensaios no subsolo terrestre.

O rápido desenvolvimento da eletrônica, da informática, das técnicas de detecção, de ampliação dos sinais eletromagnéticos, e do processamento de dados

por computador, têm melhorado visivelmente a resolução das técnicas iniciais de radar.

O desenvolvimento do GPR é devido, principalmente, à necessidade de obter uma resolução alta nos estudos de zonas superficiais, utilizando um método que pode ser considerado não destrutivo.

A utilização deste tipo de radiação para localizar objetos enterrados se atribui a Hülsmeier numa patente alemã de 1904. Sem problemas, a primeira publicação de investigações utilizando ondas eletromagnéticas, método no qual está baseado o GPR, se realizou entre 1910 e 1911 por Leimbach e Löwy na Alemanha. Nela se determinava a possibilidade de penetração de ondas de radio em determinadas formações litológicas (gesso, salgema e areias secas), assim como sua pouca penetrabilidade noutro tipo de formações, como pode ser o caso das argilas. Os mesmos autores propuseram, já em 1912, um método para procura de águas subterrâneas e de formações metálicas.

A partir deste experimento, foram desenvolvidos e aplicados métodos baseados na propagação de ondas eletromagnéticas, na Alemanha (patente de Hülssenbach em 1926), que foram utilizados na antiga União Soviética por Petrovsky em 1940, para iniciar estudos sobre o gelo. Durante os anos que se seguiram estes estudos e métodos se aperfeiçoaram e foram desenvolvidos os sistemas por eco de rádio (RES) para estudos em gelos polares (EVANS,1965;COOK,1960). Ao mesmo tempo, se desenvolve teoricamente a propagação de ondas eletromagnéticas em meios estratificados, como por exemplo, nos trabalhos de WAIT (1951, 1952, 1953, 1957, 1958, 1959, 1960 e 1962) e de BREKOVSKIKH (1973).

A partir de 1940-50 dá-se a utilização destes métodos aplicados à investigação e aos estudos de Engenharia. O problema a solucionar, para poder realizar estas aplicações, foi principalmente a forte atenuação produzida no sinal, nos meios que se desejava estudar. Em 1960, Cook expôs de forma a obter sinais de poucos períodos (pulsos de curta duração), mediante uma antena emissora de banda por queda de potencial. É a partir de então quando se inicia um rápido desenvolvimento desta tecnologia que finaliza a principio com a comercialização de GPR de pulsos de curta duração. Estes pulsos têm uma duração que varia entre 0,5 ns a 100 ns.

A ampla banda de freqüências que se pode utilizar com GPR permite que se possa aplicar este método em campos muito diferentes, tanto em estudos de subso-

lo como na análise de estruturas. Esses estudos são muito variados, utilizando-se tanto como uma técnica aplicada (como complemento de outros métodos de prospecção), ou como técnica principal, complementada por outros métodos.

4.3. Considerações teóricas sobre a emissão de energia

Neste estágio se comenta os aspectos básicos da emissão de energia de um radar qualquer: a equação de transmissão e a equação do radar. Ambas se desenvolvem em numerosos tratados, tanto de telecomunicação como de eletromagnetismo (CARDAMA e al., 1993; OLVER, 1992 e MARSHALL et al., 1982). Também se comentam os conceitos de direcionalidade e de ganho das antenas. Para uma informação mais completa sobre este tema pode se consultar qualquer tratado existente dedicado a radares e antenas, ou a dipolos e emissão de ondas eletromagnéticas (CARDAMA e al., 1993 ou LEVANON, 1988).

4.3.1. Direcionalidade e ganho

Uma primeira classificação das antenas nos dois grupos se realiza em função das características do campo radiado. Diferenciamos, deste modo, entre antenas isotrópicas e antenas direcionais.

As primeiras radiam a energia por igual em todas direções do espaço não têm direções preferenciais. Considera-se que o meio no qual a antena radia a energia é homogêneo e infinito (sem descontinuidades), a frente de ondas que se propaga a partir de sua radiação é esférica. Estas antenas são chamadas ideais, já que na prática é impossível conseguir uma perfeita isotropia na emissão.

As antenas direcionais são aquelas que tem uma direção privilegiada de radiação. A emissão que produzem não é homogênea em todas as direções.

O parâmetro que caracteriza as antenas, levando-se em conta estas considerações é a direcionalidade (também chamada directividade). Define-se como o quociente da densidade de potencia, que se tem, a uma certa distância da antena direcional emissora e a densidade de potencia que se teria, nesse mesmo ponto, se a antena emissora fosse isotrópica e radiasse a mesma potência que a primeira.

A densidade de potência de uma antena isotrópica é o quociente entre a potencia radiada (P_r) por ângulo sólido. A directividade D de uma antena tem a seguinte expressão (CARDAMA, 1993):

$$D = \delta P(\theta, \omega, r) = (P_r / 4\pi r^2) \quad \text{Equação 4.1}$$

Onde: $\delta P(\theta, \omega, r)$ é a densidade de potência medida a uma certa distancia r , numa direção definida pelos ângulos θ e ω , e $(P_r / 4\pi r^2)$ é a potência emitida pela antena isotrópica por ângulo sólido.

Se a antena radia isotropicamente, a densidade de potência num ponto do espaço a uma distancia r , definido pelos ângulos θ e ω , fica definida como:

$$\delta P(\theta, \omega, r) = (P_r / 4\pi r^2) \quad \text{Equação 4.2.}$$

Se a antena é direcional, esta mesma densidade de potência fica definida como:

$$\delta P(\theta, \omega, r) = (P_r / 4\pi r^2) D(\theta, \varphi) \quad \text{Equação 4.3}$$

4.3.2 Equação de transmissão

Esta equação é a expressão do balanço de potenciais (ou energético) que se realiza entre a potência radiada por uma antena emissora e a recebida por uma antena receptora. É uma relação importante, já que a potência emitida determina em grande parte o mínimo sinal detectável que se tem na antena receptora.

Se considerarmos o caso de uma antena isotrópica situada em meio não atenuante e homogêneo (no caso do espaço livre), a densidade de energia a uma distancia r da antena emissora é inversamente proporcional ao quadrado da distancia entre a antena emissora e o ponto onde se realiza a medida, sendo diretamente proporcional à potencia radiada (equação 4.2).

4.3.3. Equação do radar

Esta equação é um caso particular da equação de transmissão. Esta última relaciona a potência que, a partir da energia que emite uma antena emissora, recebe a antena receptora anteriormente uma reflexão da energia num objeto, com o ganho da dita antena, seu comprimento de onda e com a potência do pulso emitido no caso ideal que não exista atenuação do sinal exceto por dispersão geométrica da energia.

A equação do radar é uma referência importante para definir um sistema de radar já que relaciona as características da antena emissora e as propriedades do meio (que produzem uma atenuação do sinal) com a potência emitida pela antena e a potência recebida antes de uma reflexão.

Conhecendo a potência máxima que pode emitir uma antena e determinando qual é a mínima potência que deve ter um sinal recebido para que se possa discriminar do ruído de fundo, os fatores de atenuação do sinal num meio dado e a frequência central do pulso emitido, é possível determinar a máxima profundidade que se alcançará.

Chamando P_c a potência recebida por antena, P_r a potência radiada, G a seu ganho, θ o tamanho angular do refletor, φ a frequência angular do pulso emitido e r a distância entre a antena e o refletor, se pode escrever a relação:

$$P_c = P_r G^2 \theta / \omega^2 r^4 (4\pi)^3 \quad \text{Equação 4.4}$$

Ao considerar o termo de atenuação do sinal ao propagar-se por um meio ideal (absorvente), adiciona-se um termo à equação 4.4. Este termo de atenuação do sinal pode tomar-se como um fator exponencial que depende de um coeficiente α (variável para cada meio) e da distância r à que se encontra o refletor da antena (LORENZO,1994):

$$A(r, \alpha) = e^{-2\alpha r} \quad \text{Equação 4.5}$$

sendo $A(r, \alpha)$ a atenuação da amplitude do sinal através de uma distância r .

O coeficiente 2 que aparece no termo exponencial é devido à distância total percorrida pela onda que é duas vezes a distância r entre a antena e o refletor.

Como o GPR tem uma antena emissora e uma antena receptora se escreve a equação do radar a partir da equação de transmissão (equação 4.3), considerando que a energia que recebe a antena receptora não é uma emissão direta da receptora, senão a que chega após sofrer uma reflexão. Para isto se considera a directividade das antenas em função do seu ganho e de sua efetividade, o comprimento de onda em função da velocidade e a frequência, a seção eficaz do refletor e o coeficiente de reflexão do mesmo. Deste modo se obtém uma relação

entre a potencia emitida por uma antena e recebida pela outra após a reflexão. Este balanço dá-se em decibéis, na forma do fator Q de sensibilidade do aparelho.

O principal fator que limita a sensibilidade é o ruído termal de fundo no receptor, já que sempre terá que se cumprir, para poder ter uma relação correta sinal/ruído, que a potência captada seja maior que este ruído termal. ULRIKSEN (1982) dá o seguinte valor deste ruído termal, medido em Watt:

$$P_{\text{term}} = 1.6 \times 10^{-20} \cdot \Delta f \quad \text{Equação 4.6}$$

sendo P_{term} o ruído termal e Δf a abertura de banda do receptor.

4.3.4 Diagramas de radiação

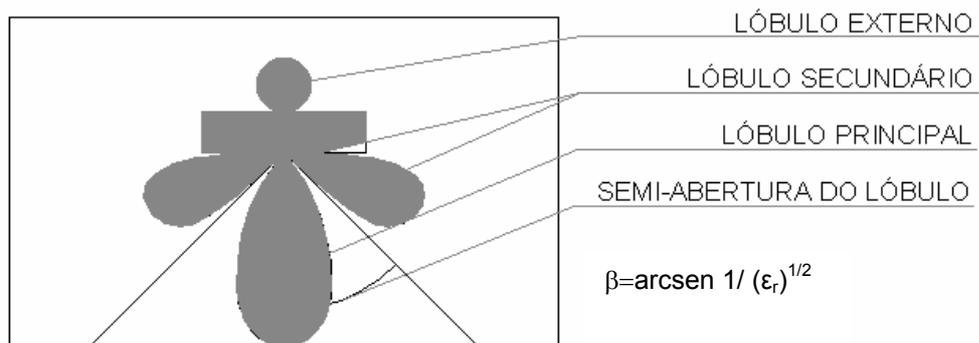


Figura 4.1. Diagrama esquemático da radiação de uma antena GPR

4.4.1. Unidade central

As funções da unidade central são três: controle da emissão de pulsos eletromagnéticos, controle da recepção de energia e armazenamento dos dados.

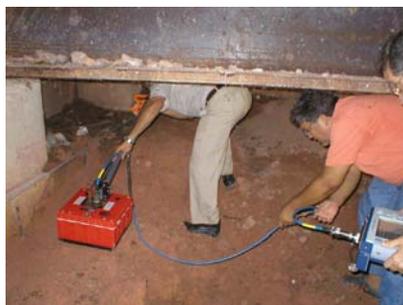


Figura 4.2. Observa-se à esquerda da figura a antena GPR, no centro o cabo ótico e à direita a unidade central.

4.4.2. Acessórios e equipamentos complementares



Figura 4.3. Arranjo mostrando o esquema CMP.

4.4.3. Antenas

As antenas são outra parte importante do equipamento. Estas atuam como um tradutor eletromagnético que transforma os impulsos elétricos que recebe da unidade central numa série de pulsos ou ondas eletromagnéticas de curta duração que se emitem no meio a estudar.

Outra função das antenas é captar a energia refletida e transformá-la em pulsos elétricos que envia à unidade central.

Cada antena se caracteriza por sua frequência central e pela duração do pulso emitido.



Figura 4.4. Unidade central do GPR.

4.5. Equipamento de GPR utilizado.

O equipamento empregado para realizar os experimentos neste trabalho foi um GPR modelo *SIR-3000* fabricado pela *GSSI- Geophysical Survey Systems Inc*, canadense.

Analisa-se dois aspectos: características físicas do equipamento e as radiações.

4.5.1. Características físicas

Este modelo de GPR foi projetado principalmente para aplicações em engenharia. É composto por uma unidade central, *modelo SIR-3000*, com diversos periféricos. Um deles é um monitor colorido, que permite a visualização dos registros durante a aquisição de dados e o acesso aos diferentes menus de trabalho do equipamento mediante um teclado. O cabo de conexão entre a unidade central e o monitor tem um comprimento de 3 metros. Além do teclado o monitor tem uma tela de 7.5 polegadas. Outros periféricos que devem conectar-se ao computador são as antenas.

A fonte de alimentação para a unidade central, consiste, numa bateria de 10.8 volt.

4.5.2. Características de radiação

A teoria de radiação de uma antena (com as mesmas características que as utilizadas neste trabalho) está desenvolvida com detalhes em numerosos tratados, por exemplo em MARSHALL e ali., 1989 e em LORRAIN (1972).

Nos trabalhos realizados por GLOVER (1987) e por DUKE (1990) se encontra uma descrição detalhada das antenas, de suas propriedades físicas e dos diferentes modelos de radiação.

Também se pode encontrar informação detalhada sobre as características técnicas relativas a antenas nas investigações realizadas por ARNONE (1996) e por ROBERTS (2000).

CAPÍTULO 5

PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DOS MEIOS

Ao longo deste capítulo se analisa o comportamento das ondas eletromagnéticas durante sua propagação por meios materiais, em função das características dos meios. Se examinam os fatores de composição do meio, saturação e porosidade para relacionarmos com parâmetros tais como velocidade característica média, penetração e atenuação.

A prospecção com GPR se realiza sobre meios que, em princípio, são misturas de diferentes tipos de materiais. Por separação, cada elemento tem suas próprias características eletromagnéticas. Juntos, formam um meio cuja condutividade, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética dependem de cada um destes elementos e do percentual da mesma mistura. Existem distintos modelos que permitem caracterizar estas misturas, por exemplo, do meio em função dos materiais que formam parte do mesmo e do percentual. Estes mesmos modelos servem também quando se analisa um meio formado por um solo, água e ar. Tudo isto define os valores da condutividade e da permissividade dielétrica do meio. Porém a composição também exerce influência sobre a permeabilidade magnética relativa. Em muitas ocasiões é possível prescindir deste parâmetro quando se analisam os registros de radar de subsolo, por ser um valor próximo da unidade. Se analisarmos a propagação das ondas eletromagnéticas na água pode-se observar que a velocidade é muito baixa e a atenuação elevada. Trata-se de um meio que apresenta um elevado valor de sua permissividade efetiva, que muitos autores aproximam para 80, ainda que o valor seja variável e apresente uma certa dependência com a temperatura e a composição mineral (e portanto com a condutividade). O elevado contraste existente entre a permissividade da água e a que pode apresentar outros elementos faz que o conteúdo desta em um único meio influa notavelmente na velocidade média de propagação das ondas eletromagnéticas. Estudos como os realizados por KNOLL e KNIGHT (1994) mostra que, dentro das frequências habituais na prospecção com radar de subsolo, a permissividade dielétrica relativa do meio aumenta com a saturação. O mesmo sucede com a condutividade. Porém além da saturação, outros parâmetros como a granulometria também tem sua importância nestas relações. Os ensaios efetuados por diferentes autores indicam que, o aumento da permissividade, da condutividade é produzido ao aumentar o percentual de água na amostra. O comportamento destes parâmetros também é fortemente dependente da compactação do meio (porosidade). Uma maior percentagem de poros em amostras secas fazem que decresça o valor tanto da condutividade como da permissividade relativa.

Sem problemas, se a amostra tem um certo conteúdo de água este comportamento se inverte. Estas mesmas tendências observadas experimentalmente se refletem também nos modelos de meios não homogêneos como os chamados CRIM, SSC ou BHS permitem estimar o valor da permissividade relativa do meio se conhecemos os fatores de porosidade, conteúdo de água e composição (materiais e percentagem dos mesmos).

5.1. Considerações iniciais

A propagação das ondas eletromagnéticas em meios que podem considerar-se não magnéticos se caracteriza por dois parâmetros eletromagnéticos: a permissividade dielétrica (ϵ) e a condutividade (σ). As características que apresenta o sinal ao atravessar o meio (velocidade, atenuação, etc.) dependem de σ e ϵ . Portanto, dependem dos materiais que compõem o meio atravessado uma vez que σ e ϵ , dependem das propriedades geotécnicas e da composição do material. O comportamento dos diferentes meios às radiações eletromagnéticas emitidas por um radar (microondas e radio frequências) tem sido estudado por muitos autores tanto para a realização de simulações (FAN e LIU,1998);HÄNNINEN,1997) e modelos (LAZARO MANCILLA e GOMEZ TREVINO,1994) como para a determinação de parâmetros do meio que podem ajudar a caracterizá-lo a partir dos registros de radar (MAIERHOFER e al., 1998); HÄNNINEN,1997;SEN,1981;SCALA e COHEN,1981), ou seja a partir de modelos teóricos (ROBERT,1996) ou de experiências de laboratório (SAAREN-KETO,1996) e obtenção de relações empíricas (SEN,1981;SEN et ali.,1981).

A importante dependência com a propagação das ondas que apresentam estas características pode ilustrar-se considerando, por exemplo, solos com um elevado conteúdo argiloso apresentam um elevado fator de perdas. Ou melhor considerando que solos de elevada porosidade (com poros de tamanho importante), como por exemplo as grauvacas, apresentam velocidades mais elevadas do que o fluido intersticial ar no lugar da água. O conteúdo na água é um fator que influi de maneira importante tanto na constante dielétrica do meio como na condutividade (devido aos sais dissolvidos que contém).

Atualmente se empregam técnicas de estudo com GPR para determinar, por exemplo, a presença de água em materiais construtivos (MAIERHOFER e ali.,1998). Alguns autores consideram inclusive que os parâmetros eletromagnéticos efetivos,

que podem obter-se a partir de medidas realizadas com GPR, podem caracterizar os meios do mesmo modo que caracterizam suas propriedades geotécnicas, por estar ambas estreitamente vinculadas. Deste modo, (SAARENKETO e ROIMELA, 1998), utilizam a permissividade dielétrica efetiva para determinar a qualidade do asfalto, obtendo a variação deste parâmetro em função de sua percentagem de cavidades interiores.

Resumindo, as principais características que influem nos estudos de GPR, são cinco: a composição química (ou mineralógica) do meio, isto é, a abundância de seus elementos componentes; a granulometria, a densidade; a porosidade, que depende do material, da sua granulometria e de sua densidade; o fluido intersticial existente. A influencia do fluido intersticial é função, por sua vez, do conteúdo de água, contraste água – ar e existência de algum gás diferente do ar. Os parâmetros eletromagnéticos que determinam a propagação do sinal estão fortemente ligados à composição dos materiais e às particularidades e abundância de seus elementos componentes.

Neste capítulo se expõe como diferentes características dos meios materiais influem sobre seus parâmetros eletromagnéticos e portanto sobre o sinal de radar. Particularmente se trata da influencia que sobre a propagação da onda eletromagnética exercem as diferentes características geotécnicas e químicas destes meios: conteúdo na água, porosidade, composição química, tamanho do grão, conteúdo de argila e conteúdo em minerais.

Também se calculam as velocidades e as atenuações esperadas para diferentes materiais em função destas características físicas e químicas, assim como os valores de penetração pelicular.

5.2. Composição do meio

Os meios que se estudam com GPR são formados por misturas de diferentes materiais. As rochas, os solos e os materiais construtivos (concreto, alvenaria, asfalto, etc.) se compõem de distintos elementos, cada um com propriedades eletromagnéticas características. A condutividade, a permeabilidade magnética e permissividade dielétrica do meio dependem do valor dos parâmetros eletromagnéticos de cada um dos seus elementos componentes e da percentagem de cada um deles no meio analisado.

Um elemento que tem grande influência no resultado final é o fluido existente nos vazios.

Em geral se pode considerar que um meio está composto por três fases: a fase sólida, formada pela parte mineral ou orgânica sólida; a fase líquida, composta pelo fluido intersticial; e a fase gasosa, que normalmente é o ar que enche os vazios saturados.

Dado que os tempos de propagação e a penetração das ondas depende das características eletromagnéticas do meio e, portanto, de sua composição, o conhecimento das propriedades minerais dos solos estudados permite determinar o valor dos parâmetros eletromagnéticos do meio e, portanto, proporciona os fatores que determinam o estudo: a propagação de penetração das ondas, a amplitude do feixe no meio, a velocidade de propagação da onda (que por sua vez permite situar corretamente os valores de profundidade para cada refletor) e a atenuação esperada.

5.2.1 Relação da permissividade com a temperatura do meio

WOBSCHAL (1977) sugere a seguinte relação para a água na fase líquida:

$$\varepsilon=87.8-0.37.T$$

Equação 5.1

onde T é a temperatura em °C.

5.2.2. Relação dos parâmetros eletromagnéticos com a composição

Em meios formados por misturas se utilizam modelos que permitem obter sua constante dielétrica em função dos materiais componentes e de sua presença percentual.

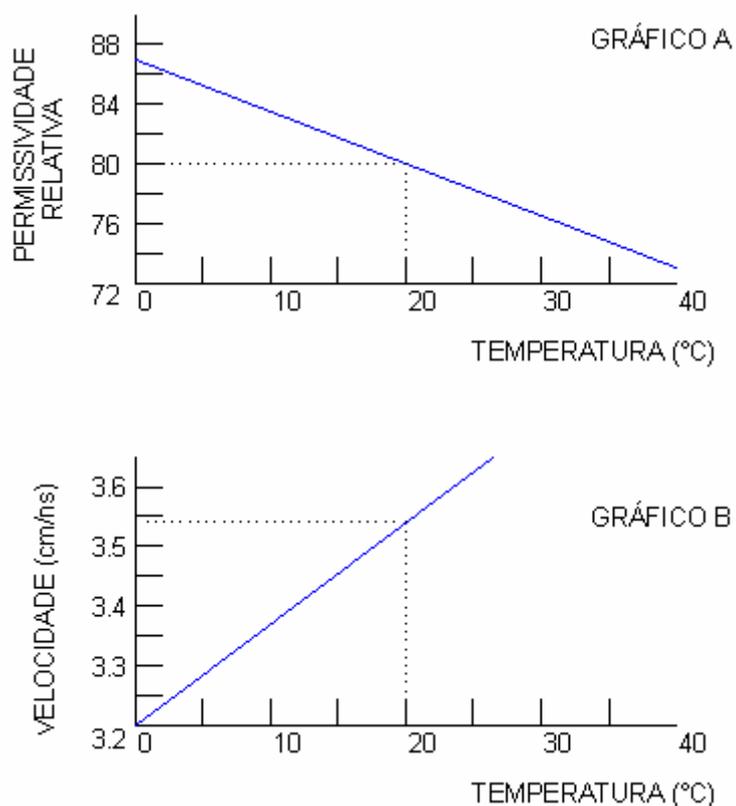


Figura 5.1 a) Dependência da permissividade dielétrica relativa da água com a Temperatura, segundo a relação de WOBSCHAL,1997).
b) Dependência da velocidade de propagação na área com a temperatura.

5.3. Densidade, granulometria, porosidade e conteúdo de água

Nesta seção se analisam as características que definem um meio a partir de suas propriedades geotécnicas: densidade, granulometria, porosidade e conteúdo de água. Considerando os fatores que interessam para os estudos com GPR, estes parâmetros estão fortemente relacionados entre si.

A densidade é a relação entre a massa e o volume de um corpo, e se define como a massa por unidade de volume. É uma propriedade física que varia fortemente dependendo do tipo de materiais que compõem o meio e de sua porosidade. Este parâmetro tem sua maior variabilidade no caso de solos e materiais pouco compactados.

A granulometria dá idéia do tamanho dos grãos materiais do meio (parte sólida). A porosidade total se refere a todo o espaço do meio que não está preenchido de partículas sólidas (ocas). Dentro deste conceito tem cabimento os poros interconectados entre si e as fraturas, fissuras e poros que não apresentam conexão entre eles. A estes últimos se denominam porosidade residual. A porosidade efetiva é parte de vazios que apresenta a conexão e que, totalmente ou em parte, podem estar cheios de fluido livre ou fluido de capilaridade. A permeabilidade de um material dá idéia da facilidade com o qual fluido pode deslocar-se pelos poros comunicantes dentro do meio. Este parâmetro é função da porosidade efetiva, da viscosidade do fluido intersticial, do fluxo do fluido e do gradiente de pressão hidráulica aplicada para gerar dito fluxo. A micro-porosidade se refere aos poros que tem tamanho da ordem de micrômetro. Este parâmetro também deve levar-se em conta uma vez que tem um efeito relativamente importante na permissividade dielétrica do meio (REYNOLD,1997).

A velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas fica afetada por estes parâmetros, principalmente pela porosidade do meio e pelo fluido contido nestes poros uma vez que estes dois condicionantes do meio determinam em grande parte seus parâmetros eletromagnéticos.

5.4. Classificação de solos segundo GARCIA(1997)

Uma classificação geral é a que apresenta GARCIA (1997) compilando diferentes fontes bibliográficas sobre o tema, agrupando por um lado os minerais e por outro solos segundo suas propriedades eletromagnéticas. Os primeiros ficam agrupados em três categorias e os segundos em quatro.

Tabela 5.1 Características dos Solos

Minerais	Condutividade	Permissividade Relativa	Resistividade	
1º. Grupo Metais	Muito Baixa	Muito Elevada	--	
2º. Grupo Semimetais	--	--	$10^{-6} < \Omega_m < 10^{11}$	
3º. Grupo Silicatos	--	$4 < \epsilon < 12$	$\Omega_m > 10^{11}$	
Solos	Umidade	Grau de Saturação	Atenuação f(Freqüência)	Permissividade
1º. Grupo Terrenos argilosos e argilas	Baixa	Inferior a 5%	elevada	diminui
2º. Grupo	-	Inferior a 5%	Menor 1º grupo	Depende da freqüência
3º. Grupo Areias secas e úmidas (não saturadas)	-	Inferior a 5%	< 1 dB para $f < 10^8$ $10 < \alpha < 20$ dB	Suave para freqüências < 10 GHz
4º. Grupo Gelo	-	Inferior a 5%	≤ 1 dB/m para $f = 10$ GHz	Constante

Os solos são constituídos com água (ou outro líquido) e ar nos vazios intermediários.

5.5. Origem dos solos

Os solos se originam da decomposição das rochas que constituem a crosta terrestre, a partir de agentes físicos e químicos. Variações de temperatura provocam trincas, nas quais penetra a água, atacando quimicamente os minerais.

5.6. Identificação dos solos por meio de ensaios

Para a identificação dos solos a partir das partículas que os constituem, são empregados correntemente dois tipos de ensaio: a análise granulométrica e os índices de consistência.

5.6.1. Análise granulométrica

Consiste, em geral, de duas fases: peneiramento e sedimentação.

A análise por peneiramento tem como limitação a abertura da malha das peneiras, que não pode ser tão pequena quanto o diâmetro de interesse. A menor

peneira costumeiramente empregada é a de número 200, cuja abertura é de 0,075mm.

Quando há interesse no conhecimento da distribuição granulométrica da porção mais fina dos solos, emprega-se a técnica da sedimentação, que se baseia na Lei de Stokes. Essa lei determina que a velocidade de queda de partículas esféricas num fluido atinge um valor limite que depende do peso específico do material da esfera (γ_s), do peso específico do fluido (γ_w), da viscosidade do fluido (μ), e do diâmetro da esfera (D), conforme a expressão:

$$v = \frac{g}{9 \nu} (D/2)^2 (\gamma_s - \gamma_w) \mu \quad \text{Equação 5.2}$$

5.6.2. Índices de consistência (Limites de Atterberg)

Os limites se baseiam na constatação de que um solo argiloso ocorre com aspectos bem distintos conforme o seu teor de umidade. Quando muito úmido, ele se comporta como um líquido; quando perde parte de sua água, fica plástico; e quando mais seco, torna-se quebradiço.

CAPÍTULO 6

TRATAMENTO DE DADOS E INTERPRETAÇÃO
DE REGISTROS

6.1 Considerações iniciais

Em algumas ocasiões é possível dar uma interpretação direta aos dados de campo. Entretanto, muitas vezes, antes de chegar a uma conclusão final, faz-se necessário um longo processo de interpretação. Parte deste processo consiste no tratamento prévio dos registros, com objetivo de melhorar os radargramas, destacando aquelas anomalias que se correspondem com sinais de interesse e diminuindo-se ao máximo o ruído.

Este capítulo trata do processo da interpretação de dados de campo. São esboçados os procedimentos e os tratamentos que se podem aplicar. Inicia-se com uma breve explicação do objetivo que se pretende alcançar com o tratamento de dados e com a compilação de toda a informação útil que proporciona um registro de campo. Continua-se com a explicação de alguns tipos de tratamento dos quais se recorre aos seus fundamentos e funcionamento. Desta maneira, se oferece uma visão geral de cada processo, de sua aplicabilidade, seus inconvenientes e vantagens e, em particular, dos resultados que aportam no tratamento das imagens de radar. Para finalizar, esquematiza-se o processo de interpretação de registros.

O processamento dos registros de GPR tem uma grande similaridade com o processamento de dados sísmicos, uma vez que se utilizam os mesmos filtros e idênticas operações aplicados aos traços. Sem dúvidas, os métodos de aquisição de dados e a natureza das ondas são distintos. Isto implica em uma série de diferenças importantes entre os registros obtidos por esses métodos distintos (radar de subsolo e sísmica):

1. O tamanho dos arquivos resultantes de um trabalho com GPR é grande, uma vez que se adquire elevado número de traços por segundo;
2. O GPR trabalha numa banda de frequência mais alta que a utilizada em sísmica;
3. A natureza das ondas é diferente; seu comportamento depende de diferentes características físicas do meio: elásticas com sísmica e eletromagnético com o GPR.

CARCIONE e Cavallini (1995) comparam as ondas sísmicas com as ondas eletromagnéticas, analisando suas analogias e comparando o tratamento matemático das segundas com o das ondas SH.

Nos exemplos de cada um dos processamentos explicados, apresentados neste trabalho, foi realizado um tratamento de sinais utilizando o programa de processamento GRADIX, um pacote específico para o GPR *SIR3000*. Estes programas permitem editar os registros, efetuar operações matemáticas entre os traços (somas, subtrações e produtos), realizar correções estáticas e dinâmicas, aplicar filtros, selecionar partes de um registro e aplicar outros tipos de tratamento e análise de séries temporais.

6.2. Processamento de dados GPR

Antes de proceder ao processamento de dados GPR é indispensável, como em qualquer outro estudo, um conhecimento prévio do problema. Há que se ter claramente delimitado os objetivos do estudo. É muito conveniente dispor de uma informação prévia da zona e do objeto de estudo. Exemplos desta informação prévia são os mapas cartográficos, fotografias aéreas e os mapas geológicos, da zona onde se realiza o estudo. Uma vez analisada esta informação e planejada a campanha de estudo, procede-se à aquisição de dados no campo e a seu tratamento e interpretação posterior.

O processo de interpretação de dados se inicia durante sua aquisição no campo. Devem ser observados e anotadas, cuidadosamente, as condições de contorno que podem influir nos registros, assim como os possíveis eventos que possam introduzir ruído no radargrama. Exemplos de anotações que é conveniente efetuar durante a aquisição de dados no campo são, entre outras: a rugosidade da superfície sobre a qual desliza a antena, a existência de possíveis refletores externos ao longo do perfil efetuado (em qual ponto do perfil se encontra, e qual é a distância mais próxima entre a antena e o elemento anômalo), a existência de redes elétricas de alta tensão, trocas de material superficial, eventos que possam ocorrer durante o deslocamento da antena (tropeços do operador, saltos da antena, etc), escadas, tubulações. Uma superfície muito rugosa ou com irregularidades importantes pode introduzir nos registros ruídos de alta frequência. Os dois fatores são uma fonte importante de ruído que, além disso, é difícil de distinguir do sinal, já que apresenta o mesmo conteúdo frequencial, e a antena o registra do mesmo modo que registraria um elemento anômalo no meio. Como consequência se introduz nos

registros uma anomalia causada por elementos externos, que se localizam verticalmente a um certo tempo duplo de propagação.

Outros efeitos que introduzem ruído nos registros são as trocas laterais de materiais. Estes supõem trocas laterais de velocidade, de tal forma que os tempos duplos de propagação registrados para um refletor à mesma profundidade, nas duas zonas diferenciadas, são distintas. Um salto da antena, um tropeço ou a existência de um degrau durante o deslizamento da antena, introduzem anomalias na zona concreta do perfil. Em definitivo, conhecer previamente estas condições e eventos permite identificar a origem de anomalias conforme influências externas ao meio estudado, ou melhor, tornando-se possível eliminá-las ou minimizá-las mediante a filtragem.

Concluindo, é preciso que o tratamento dos dados comece no campo, durante a aquisição, anotando-se detalhadamente todos aqueles eventos ou condições que surjam durante esses trabalhos de campo e que possa ajudar posteriormente na interpretação. Uma cuidadosa caderneta de campo simplifica muito os trabalhos posteriores, e pode evitar erros na interpretação dos resultados. Uma vez obtidos os dados e armazenados, o processo continua no gabinete de trabalho.

6.2.1 Parâmetros de um registro. Informação no cabeçário de um traço

Uma série de parâmetros definem o radargrama. Tais parâmetros estão associados principalmente à aquisição de dados (alguns deles se referem a posteriores modificações dos registros), e se obtém no cabeçalho dos radargramas. Esta informação é necessária para interpretar corretamente os resultados.

Em todos os equipamentos GPR existentes no mercado há uma série de parâmetros que se podem modificar ser modificados e ajustados ao início de cada prospecção. É importante realizar algumas provas antes de iniciar a aquisição de dados, para que os resultados sejam satisfatórios. É importante conhecer a profundidade a alcançar, assim como a resolução que requer o estudo para que, com estes dados, junto com os resultados preliminares das provas que se realizam em campo, possamos determinar os valores mais adequados dos parâmetros de aquisição de dados.

Todos os registros contém um cabeçalho de texto com informação sobre o radargrama. Esta informação inclui o nome do arquivo, a data do registro, e os dados de posteriores modificações, seu intervalo, a posição do início, o número de

pulsos emitidos por segundo durante a aquisição de dados e os filtros que foram aplicados sobre o radargrama durante a aquisição ou em posteriores tratamentos.

O intervalo de um registro

O intervalo de um registro (R), define seu comprimento temporal, isto é, define a máxima coordenada vertical no radargrama (tempo duplo) que se alcança no radargrama. Portanto delimita uma janela temporal de registro. As reflexões que alcançam a antena em tempos duplos de propagação superiores ao intervalo não ficam registradas. Só ficam registradas aquelas trajetórias cujos tempos duplos de propagação são iguais ou inferiores a este intervalo vertical máximo de registro.

Posição de início do sinal

Este parâmetro permite selecionar o tempo de início da janela temporal. O tempo final da mencionada janela vem determinada pela adição do tempo de início e do intervalo de registro. Trata-se de um parâmetro que deve ajustar-se antes de começar a aquisição de dados. Convém fazê-lo colocando a antena sobre o meio para assegurar que a primeira reflexão recebida fique dentro da janela temporal (CONYERS et Goodman,1997).

Normalmente, quando se ajusta a posição de início procura-se que o primeiro sinal recebido fique incluído na janela. Este primeiro sinal será a onda direta entre o emissor e o receptor, ou a superposição entre a onda direta e a reflexão na superfície do meio.

Ponto por traço

Este parâmetro determina a amostra de cada traço, isto é, os pontos utilizados para sua representação. Cada um destes pontos, é um valor digital que define uma porção do traço da onda refletida. É possível selecionar qualquer amostra, porém usualmente se utilizam os valores de 128, 256, 512, 1024, ou 2048 amostras por traço (CONYERS et Goodman,1997). Considerando uma amostra de 512 pontos por traço (o valor mais utilizado), e um *range* de 256ns. Ou seja, para reconstruir um traço, se tem dois pontos por cada nanosegundo de tempo duplo de propagação. Normalmente para obter uma boa representação do traço, quanto maior seja a janela temporal de registro (intervalo), mais elevado tem que ser o

número de pontos de amostragem. Ainda que supõe deva considerar-se a resolução que se deseja obter e o tamanho dos registros que se gravarão. Uma amostra com excessivos pontos pode gerar arquivos enormes, que devem ser armazenados em suporte magnéticos e posteriormente tratados com programas informáticos de processamentos de dados. Este tamanho excessivo pode exceder o espaço de armazenamento previsto, ou pode tornar muito lento o processamento posterior dos dados. Convém assegurar que a amostra permita detectar aqueles eventos de interesse, registrando os pontos necessários para poder projetar corretamente o traço.

A relação entre este parâmetro, o intervalo e o número de traços registrados por segundo determina para cada antena concreta, em grande medida, a resolução que se tem durante o estudo.

Velocidade de transmissão e de registro

O número de pulsos por segundo que pode transmitir e registrar um GPR são dois parâmetros que se podem ajustar antes ou durante a aquisição de dados, de acordo com as necessidades do estudo.

Ainda que os equipamentos de radar habituais possam transmitir mais de 25 000 pulsos por segundo (CONYERS et Goodman,1997), a tecnologia atual não permite estas velocidades de registro. Os radares não podem registrar cada um dos traços individuais refletidos a partir de cada pulso transmitido devido a alta velocidade de propagação. Para solucionar este problema os equipamentos efetuam uma amostragem do sinal obtendo informações de varios pulsos emitidos para reconstruir um único traço. Em muitos equipamentos modernos, para obter um traço se utiliza a informação procedente de 16 traços emitidos (CONYERS et Goodman,1997). Isto quer dizer, que, como cada traço só utiliza 512 pontos para reconstruí-lo, cada traço registrado provém de 8192 pulsos emitidos por segundo (scan/s).

Uma vez seleccionada a velocidade de transmissão de pulsos ao meio se pode estimar a velocidade de registro levando em conta a amostra desejada. A partir desta velocidade de registro máximo se selecciona a velocidade de registro que se utilizará no estudo. Para isto tem-se que levar em conta a resolução horizontal que se pretende alcançar, o número de traços que hão de contar o evento produzido por reflexao da energia no elemento refletor de menor tamanho e a velocidade à qual se desloca a antena sobre a superfície do meio. Os valores mais elevados da

velocidade de registro se utilizam unicamente no caso em que a velocidade de deslocamento da antena seja muito elevada e necessita uma resolução horizontal extremamente alta para identificar as reflexões nos elementos do meio.

Superposição de traços

Durante ou posteriormente à aquisição de dados se podem realizar uma adição (ou superposição) de traços adjacentes. O número de traços superpostos é um parâmetro a determinar em função do estudo que se realiza.

Este procedimento se utiliza para melhorar a relação entre o sinal e o ruído quando este é aleatório. Isto é, quando se trata de eventos que não se registram para tempos iguais em vários traços consecutivos. A superposição de vários traços fazem que os efeitos devidos a fenômenos aleatórios se reduzam, embora os efeitos ocasionados por fenômenos determinísticos (eventos observados em vários traços adjacentes para um mesmo tempo de propagação) ficam realçados e portanto, definidos com a maior clareza no radargrama.

Por exemplo, durante uma aquisição de dados, se trabalha com os seguintes parâmetros:

- ✓ Velocidade de emissão:50kHz
- ✓ Velocidade de registro:50scans/s
- ✓ Superposição de 10 traços adjacentes
- ✓ Velocidade de deslocamento da antena de 5m/s

Emitido 50.000 pulsos por segundo, quer dizer que cada metro se emitem 10.000 pulsos por segundo. A velocidade de registro (50 scans/s) é inferior à velocidade máxima de registro dado a velocidade de emissão de 50kHz, o que indica que é possível realizar uma amostra de 512 pontos por traço. Como para obter um único traço registrado se superpõem 10 traços, o radargrama que se obtém registra 5 traços cada segundo. Considerando a velocidade de deslocamento da antena (5m/s), se obtém que para cada metro de avanço da antena se registra um traço no radargrama. Para aumentar a resolução horizontal, isto é, o número de traços registrados cada metro de avanço da antena sem modificar nem as velocidades de emissão e registro nem a velocidade de deslocamento da antena, é necessário diminuir o número de traços registrados adicionados que dará lugar a cada traço do radargrama. Se a superposição que se realiza é de 5 traços

adjacentes, o registro obtido apresenta 10 traços cada segundo de aquisição de dados, e se tem 2 traços por cada metro de terreno analisado.

Uma superposição de traços excessivos, sobretudo numa zona onde se produzem eventos hiperbólicos (ocasionados em elementos finitos), pode diminuir suas amplitudes até um nível no qual não se podem distinguir, obtendo um radargrama característico de um meio contínuo (MAIJALA,1992). Normalmente não é possível efetuar uma superposição de mais de 3 a 6 traços para poder obter uma imagem do meio que possa considerar-se contínua (MAIJALA,1992).

Ganho

O ganho consiste em amplificar o sinal que se recebe. Este processo pode realizar-se durante a aquisição de dados ou durante o processamento posterior em laboratório ou gabinete.

O objetivo que se busca ao ampliar ganhos sobre um registro durante o processo de aquisição de dados é diminuir os efeitos de atenuação que produzem, principalmente por propagação geométrica da frente de ondas do sinal. Se pretende aumentar a aplicação das reflexões procedentes de tempo de propagação maiores. A amplificação necessária nos sinais para compensar o efeito de dispersão geométrica da frente de ondas pode-se estimar de forma sensível, considerando que a energia é uma função inversamente proporcional ao quadrado da distância percorrida. O GPR SIR3000 tem uma função de grande automação projetada para compensar este efeito sem necessidade de efetuar cálculos.

Quando se aplicam ganhos , temos de levar em conta que se amplifica todo o sinal recebido, ainda que se trate de ruído. Um ganho excessivo, para tempos de propagação grande nos quais o sinal tem uma amplitude similar à do ruído pode amplificar o ruído eletrônico do aparelho e do cabeamento ou emissão das mesmas freqüências que estão sendo registradas, dando lugar a registros confusos.

Em geral, quando se efetua a aquisição de dados, o ganho se seleciona mediante o modo automático ou melhor se escolhe a amplificação mais conveniente observando um traço visualizando no monitor do radar. Neste segundo caso se tem de efetuar provas mantendo a antena emitindo sobre o meio que se pretende estudar. Para que os valores sejam o mais adequados possíveis convém que a antena esteja situada sobre o meio que se queira analisar e que se encontre em movimento. Isto é, é conveniente selecionar este parâmetro realizando um perfil de

prova (ou calibração) antes de começar a aquisição de dados. Ao analisar o registro que se tem obtido aplicando algum tipo de ganho, há que levar em conta que as amplitudes ficam modificadas.

Filtros frequenciais aplicados durante à aquisição de dados

No cabeçalho dos registros também se indicam os distintos filtros aplicados durante a tomada de dados no campo. A possibilidade de se aplicar uma filtragem simultânea com a aquisição de dados é uma opção polêmica. Geralmente é preferível aplicar o mínimo tratamento possível aos dados de campo neste ponto da prospecção, uma vez que se trata de um procedimento facilmente aplicável em etapas posteriores.

Sem problemas, em certas ocasiões, é necessário realizar uma filtragem prévia durante a aquisição de dados, sobretudo nos casos que requer uma interpretação rápida, de forma quase simultânea não podendo esperar uma interpretação posterior. Neste caso, é necessário conhecer o melhor possível o comportamento das antenas e os intervalos de frequências emitidos e recebidos (CONYERS et Goodman,1997).

Dois tipos de filtros pode ser aplicado usualmente durante a aquisição de dados. São os denominados filtros verticais e filtros horizontais.

6.3. Registro de amplitudes

O registro que proporciona o GPR se denomina comumente radargrama. É formado por um elevado número de traços de amplitude. No eixo horizontal se representa distâncias sobre a superfície do meio pelo qual se tem deslizado a antena e no eixo vertical ficam representados os tempos duplos de propagação das ondas refletidas nas anomalias internas ao dito meio (controle entre parâmetros eletromagnéticos).

O número de traços de um radargrama depende do comprimento de registro, da velocidade à que se tenha deslizado a antena ao longo do perfil, do número de pulsos por segundo emitidos pela antena, da amostra selecionada e da velocidade de registro do radar. Como já visto, estes parâmetros se selecionam adequando a prospecção ao estudo e ao meio. Neste ponto, como em tantos outros relacionados com este tipo de estudo, é necessário chegar a um compromisso entre a resolução

que se deseja obter nas imagens de radar e o tamanho dos arquivos com os quais será necessário trabalhar.

A representação dos traços registrados se pode apresentar como um registro de amplitudes. Também mediante uma representação colorida, associando a cada cor uma banda de amplitudes. Com este tipo de representação se consegue efeitos visuais que aclaram os resultados. Para poder realizá-lo seleciona-se uma escala que relaciona intervalos de amplitudes com determinadas cores, as quais podem selecionar-se. Esta escala pode ser linear, exponencial, potencial ou pode-se defini-la segundo os interesses do estudo. Cada um destes intervalos ou “range” de amplitudes fica associado a uma cor, de acordo com a escala selecionada.

Não se pode dizer que uma escala de cores seja mais adequada que outra. A seleção depende do critério do operador que trabalha com arquivos. Em muitas ocasiões, é preferível trabalhar com registros em amplitudes ou com escalas de uma cor cinza ou de qualquer outra cor, com a variação de tonalidade aplicada de forma gradual. É mais sensível (ainda que não tão vistoso) localizar as anomalias, uma vez que um registro com muitas cores pode resultar confuso e, além disso, deve-se ter sempre presente a escala utilizada e que amplitudes tem-se associado a cada cor para não confundir as anomalias de certa importância com pequenas trocas na amplitude da onda. A utilização de escalas de cores pode resultar útil para destacar os elementos identificados na apresentação final.

Uma vez determinado o tipo de representação de anomalias que se utilizará (em intervalos de amplitude ou numa determinada escala de cores), é conveniente realizar uma edição preliminar dos radargramas para identificar, antes de aplicar algum tratamento dos dados, as anomalias mais representativas e analisar sua consistência comparando-as com outros dados referenciais (por exemplo, com os conhecimentos geológicos), com o que se conhece acerca do objetivo do estudo e com as anotações da caderneta de campo. Esta primeira análise orienta a seleção de filtros para eliminar algumas das anomalias ocasionadas por elementos externos ou por incidências indejezadas durante a aquisição de dados.

6.4 Obtenção dos parâmetros necessários para a interpretação de radargramas

O resultado final de um estudo de prospecção GPR é um modelo do meio analisado representado a partir de uma ou mais seções. Em cada uma delas a coordenada x representa a distancia horizontal sobre o meio e a coordenada z o tempo duplo de propagação. Em cada seção tem que se indicar a distribuição de velocidades no meio. Por isso, sobre estas seções deve constar a velocidade de propagação da onda por cada uma das unidades materiais identificadas do meio. Com as velocidades e os tempos duplos de propagação obtém-se a espessura (definição vertical do alvo) destas unidades materiais. Se definem as unidades materiais como zonas que apresentam características similares frente à propagação de ondas eletromagnéticas, de maneira que as variações de velocidade sejam pequenas e portanto desprezíveis. A troca de uma destas unidades com outra representa um contraste brusco ou seja, na condutividade, permissividade dielétrica, permeabilidade dielétrica, permeabilidade magnética ou em qualquer combinação destes parâmetros, produzindo-se nesta zona uma troca brusca na velocidade de propagação. Nestas discontinuidades bruscas se produzem as reflexões, maiores quanto maior seja o contraste entre parâmetros eletromagnéticos, que ficam registradas nos radargramas. Os eventos produzidos em objetos finitos do meio também devem ficar indicados nos radargramas com seu tempo duplo de propagação, seu tamanho aproximado e a profundidade à qual se localiza.

Para obter este modelo de velocidades e espessuras há que conhecer os parâmetros eletromagnéticos que determinam tanto a velocidade de propagação como a atenuação da onda e a amplitude da reflexão. Estes parâmetros, a velocidade de propagação, a atenuação e a amplitude da reflexão são valores constantes para uma mesma frequência e com um mesmo meio material (mesmo conteúdo de água, composição e porosidade).

Para filtros horizontais, as frequências de corte se determinam a partir de um contraste temporal de corte (TC) que, para um filtro passa baixo tem que ser menor que o campo anômalo menor que interesse detectar. O tamanho destes campos anômalos se determina dividindo o comprimento do registro (número de pontos) numa tela de computador pelo tamanho que apresentam as anomalias no dito registro, obtendo o número de traços por anomalia. Um filtro passa alta deve ter um

contraste TC de valor superior ao tamanho da maior das anomalias de interesse que se deseja detectar.

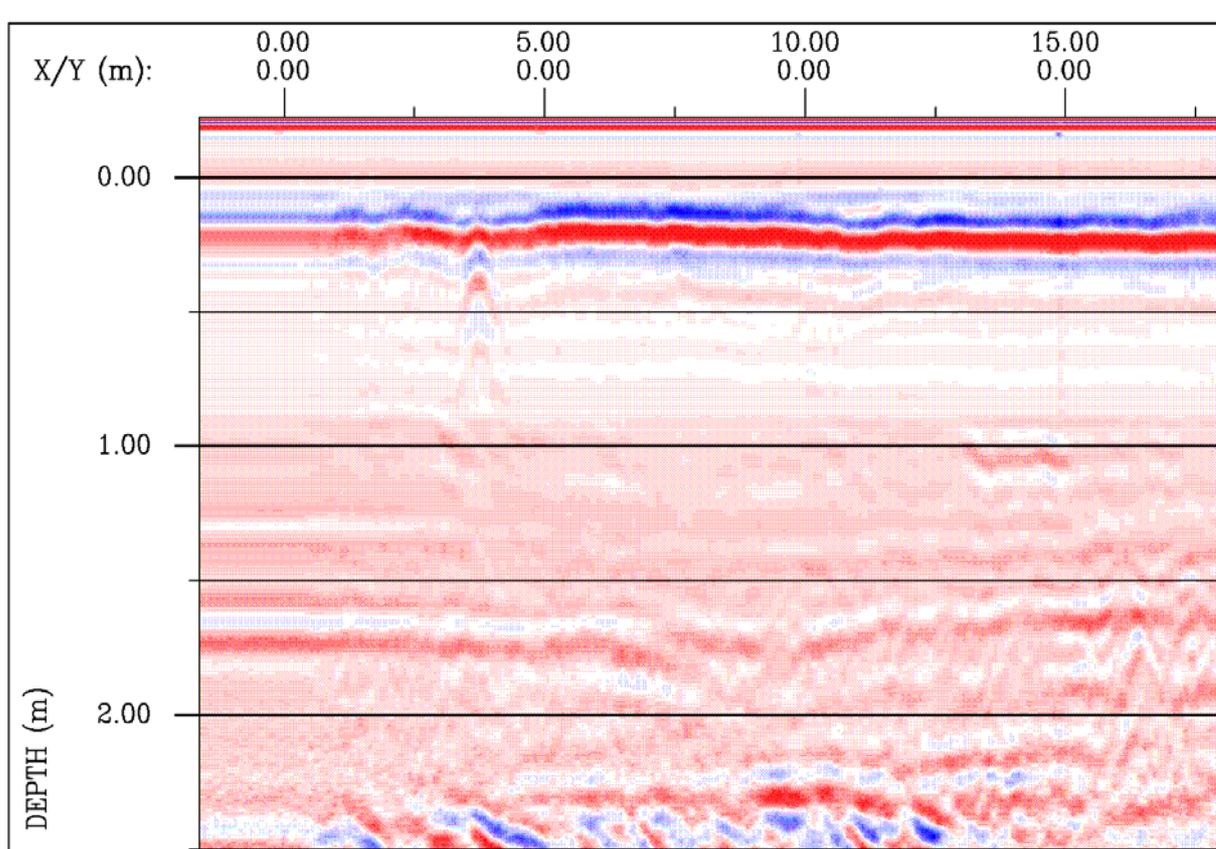


Figura 6.1. Radargrama AV1 mostrado no eixo dos X o estaqueamento e no eixo Z a profundidade imageada com antena de 400 MHz.

As diferenças devido aos tipos de filtros aplicados um IIR e um FIR (quadrado) são desprezíveis. A vantagem do segundo caso (filtro IIR) é a velocidade do processamento informático, muito maior que no primeiro caso (filtro FIR). Este ponto, deve ser levado em conta sobretudo quando se trabalha com radargrama de grandes dimensões.

6.5 Filtragem de Sinais

Os registros de radar obtidos no campo contém, a princípio, ruído superposto ao sinal de interesse. Este ruído diminui sua qualidade fazendo-os, a princípio, difíceis de se interpretar e inclusive chegando a ocultar totalmente o sinal, o que introduz erros e indeterminações na interpretação. O ruído pode ser reflexões produzidas, em elementos externos ao meio, reflexões múltiplas, reflexões laterais

dentro do meio, interferências, irregularidades na superfície do terreno, variações laterais do meio superficial ou ruído produzido pela antena e o cabeamento (reverberações e ruído eletrônico). Para melhorar a relação sinal/ruído há que analisar o tipo de ruído registrado e aplicar os filtros mais convenientes para cada caso.

A diminuição da qualidade dos registros por causa do ruído dificulta a obtenção dos parâmetros do meio (permissividade efetiva, velocidade de propagação e profundidade). Além disso, em numerosas ocasiões, as reflexões externas ou as anomalias devidas a interferências não se diferenciam grande coisa das reflexões produzidas em elementos do meio que se está analisando. Esta similitude pode dar lugar a uma interpretação incorreta.

Para facilitar a obtenção do parâmetro do meio em princípio a partir do registro e identificar melhor as anomalias devidas à reflexões de interesse, é necessário realizar um tratamento dos radargramas obtidos no campo, prévio à interpretação final dos registros. Com estes trabalhos se pretende minimizar o ruído que pode superpor-se ao sinal, corrigir o registro para a topografia pela qual se tem deslizado a antena e ressaltar as anomalias que correspondem a refletores importantes.

Os diferentes tratamentos que se descrevem em continuação são os que permitem efetuar o programa de análise de radargramas RADAN. Trata-se de filtros horizontais, filtros verticais, deconvolução, migração, correções topográficas, ampliações, transformadas de Fourier, etc.

6.5.1 Filtros horizontais (ou espaciais)

Os filtros horizontais se denominam também filtros espaciais. Trata-se de uma filtragem na direção horizontal. O processamento se produz no domínio temporal e seu objetivo é eliminar o ruído de fundo que se observa no radargrama. O mais habitual são bandas horizontais que apresentam muitos radargramas. Estas bandas estão ocasionadas por reverberações na antena e podem mascarar os eventos que, num registro limpo poderiam sobressair-se sem problemas. Em certas ocasiões o ruído na forma de bordas horizontais também se produz por reflexões externas, por exemplo na pessoa que opera a antena ou o veículo no qual se tem acoplado. Estas bordas se observam ao longo de todo o registro ou em grandes trechos do mesmo.

Este ruído é de baixa frequência, de maneira que para eliminá-lo aplicam-se os filtros horizontais passa alta, que eliminam os eventos observados num elevado número de traços. Outro tipo de ruído de fundo horizontal dos radargramas são os efeitos ondulados nos registros devidos às rugosidades existentes na superfície do meio pelo qual se desloca a antena ou em ocasiões à existências de vegetais (CONYERS e Goodman, 1997). Neste caso trata-se de um ruído de alta frequência e se utilizam os filtros horizontais passa baixo, que eliminam efeitos que se observam em poucos traços consecutivos.

Este tipo de tratamento de dados consiste basicamente nos filtros que podem ser passa alta, passa baixa ou passa banda, aplicados horizontalmente sobre o registro. Permitem passar dos componentes freqüenciais do sinal que se situam entre valores dados, ou melhor a partir ou até um certo valor de corte para as freqüências. Se aplicam horizontalmente a todos os traços do registro, tratando-se de uma espécie de média ou filtragem espacial. É um dos tratamentos de dados mais usuais em registros de GPR. O fator de freqüências, para este tipo de processamento está referido ao comprimento horizontal das anomalias, isto é, ao número de traços nas quais se registra um evento dado. Uma anomalia de grande comprimento de onda (e portanto, de baixa freqüência) ficará registrada num elevado número de traços, enquanto que uma anomalia de pequeno comprimento de onda (de alta freqüência) contém poucos traços.

O objetivo deste filtro é eliminar ruído dos sinais. Pode tratar-se tanto de ruído de alta freqüência (que aparece em poucos traços) ocasionado (por exemplo, por uma superfície irregular, sobre a qual se desliza a antena, ou pode transformar-se em ruído de baixa freqüência (que aparece em todos ou em grande número de traços) devido, por exemplo, a um refletor externo, que pode ser a pessoa que maneja a antena.

Os filtros passa baixo diminuem efeitos de ruído de fundo que se observa em poucos traços consecutivos. Os filtros passa alta diminuem os efeitos de linhas contínuas que se observam nos registros durante um número elevado de traços. No primeiro caso estes efeitos podem ser devidos a irregularidade na superfície, porém também pode estar provocado por variações laterais no interior do meio ou por variações laterais na superfície (uma zona por exemplo de vegetação junto a outra asfaltada). Devido a estas anomalias e trocas, se obtém variações laterais de registro de pequena duração espacial (horizontal). Quando estas anomalias de curta

duração espacial são numerosas e contínuas produzem sobre o radargrama um efeito denominado ondulado, por seu aspecto.

No segundo caso, as linhas ao longo de todo o registro podem aumentar reverberações da antena ou reflexões externas no elemento próximo (ou pessoa transportando a antena, cercas, linha de transmissão, dentre outros). As anomalias produzidas por estes eventos são reflexões de larga duração horizontal (espacial), que se apreciam ao mesmo tempo duplo de propagação um elevado número de traços, originando as conhecidas linhas dos radargramas.

6.5.2. Filtros verticais (ou temporais)

Os filtros verticais são os denominados filtros F-K ou filtros temporais, uma vez que se aplica a cada um dos traços de registro, ver traços no item, sendo portanto, filtros aplicados na componente temporal (eixo vertical) dos registros. Quase todas as técnicas desenvolvidas para este tipo de filtragem provêm do processamento de dados sísmicos para a exploração petrolífera (MAIJALA,1992). Sem problemas, há que se ter cuidado ao aplicar estas técnicas porque existem diferenças substanciais entre dados sísmicos e os dados de GPR (CONYERS et Goodman,1997). Em geral, esta técnica de filtragem consiste em transformar reflexões registradas no tempo em dados no domínio das frequências utilizando uma transformada de Fourier. A filtragem se aplica no espaço transformado, no qual os dados temporários (e por isso, geradores de distâncias inclinadas entre o emissor e o refletor) são transformados em dados frequenciais (ou em número de ondas). Este tipo de filtro pode ser passa alta, passa baixa e passa banda. Os filtros passa alta impedem que se registrem baixas frequências, normalmente aquelas abaixo dos 10MHz, consideradas como ruído do sistema. Portanto, o passa alto tem por objeto eliminar o ruído de baixa frequência, que depende em grande parte da antena que se utiliza, do cabeamento ótico e elétrico) e de seu comprimento.

O ruído de alta frequência, pode estar ocasionado por sinais elétricos ou de microondas, externos ao aparelho e ao meio analisado. Neste caso, há que considerar estes sinais parasitas que podem ter frequências muito similares aos sinais de prospecção de forma que uma filtragem excessiva pode eliminar grande parte do sinal.

Estes filtros se aplicam à coordenada temporal do registro (tempos duplos de propagação do sinal), isto é, no sentido vertical sobre cada um dos traços adquiridos. Por isso recebem o nome de filtros verticais ou temporais. Trata-se de uma filtragem freqüencial aplicado sobretudo cada um dos traços que compõem o radargrama. O objetivo, como no caso anterior, é diminuir o ruído de fundo para melhorar a relação sinal/ruído e destacar a informação correspondente às anomalias que se pretende investigar.

O filtro pode ser passa alta, passa baixa ou passa banda, dependendo das freqüências de corte introduzidas. Estas freqüências se podem determinar conhecendo as freqüências dos dados e dos eventos que se deseja filtrar. Para introduzir estas freqüências no programa RADAN temos que transformá-las em ciclos por traço (cycles/scan)(c/sc). Para passar de freqüências em MHz a freqüências em ciclos por traço, divide-se o comprimento de um pelo comprimento de um ciclo (GSSI,1990). Caso a operação que se deseja efetuar é a inversa, isto é, passar de freqüências e ciclos por traço a freqüências em Hz se divide a freqüência dada em ciclos por traço (comprimento temporal do registro).

Para realizar este tratamento de dados se pode utilizar, como no caso anterior, filtros de resposta primitiva (FIR) e filtros de resposta infinita (IIR).

Com os filtros FIR verticais ou temporais, no caso de passa alta se eliminamos as baixas freqüências de cada traço, enquanto que no caso de passa baixa o filtro realiza um média de uma amostra ao redor de um ponto central ao longo de todo o traço. O resultado da média é um valor que se associa no tempo com o ponto central da amostra. Isto se realiza para todos os traços selecionados nos quais interessa aplicar a filtragem, levando em conta que, na direção temporal as freqüências para tempos de propagação maiores são mais altas que para tempos menores de propagação, sendo o ruído de freqüência alta. Esta diferença é importante sobretudo se o range do registro é grande.

Ao utilizar os filtros IIR verticais, se multiplica o sinal por um operador que tem amplitude máxima igual a 1 para a banda de freqüências que corresponde ao sinal que se deseja analisar, sendo uma função que decae, a partir desta banda até um valor zero. O resultado é que se eliminam aqueles componentes freqüenciais que ficam fora da banda de freqüências limitadas pelos valores de corte do operador. São filtros recursivos que se correspondem aos conhecidos filtros analógicos.

Para selecionar a frequência ou as frequências de corte (segundo se aplique um filtro passa baixa, passa alta ou passa banda), é necessário obter o espectro pre-frequencial de vários traços do registro. Para isto se realiza a transformada de Fourier e se representa os espectros de amplitude dos traços.

Conhecidos todos estes aspectos, o cálculo das velocidades de propagação é possível, tal como se pode comprovar nas equações 3.13 e 3.14. Uma vez conhecidos as velocidades médias resultantes para cada uma das unidades materiais também é sensível calcular as espessuras das unidades e a profundidade à qual se encontram da superfície as interfaces de contato entre elas. De forma aproximada as distancias se podem deduzir para o caso de meios não magnéticos, a partir do tempo duplo de propagação, t , obtido nos registros tal como se indica na equação 6.1:

$$x = vt/2 = ct/2(\epsilon_{ef})^{1/2} \quad \text{Equação 6.1}$$

onde x é a distância que se deseja obter, v a velocidade à qual se tem propagado a onda, ϵ_{ef} é a permissividade dielétrica efetiva do meio (que depende de sua condutividade e de sua permissividade relativa).

Analisando os registros em papel se L é o comprimento total do registro sobre o papel medido em milímetros, R o intervalo do radargrama medido em ns e, I a distância desde a origem até a anomalia que se esta analisando medida em mm sobre o papel. O tempo duplo de propagação da onda refletida tem sido registrado como a mencionada anomalia T (em ns), pode obter-se transformando a distância sobre o papel até a anomalia em tempo, sabendo que o comprimento L corresponde um intervalo (tempo máximo) R :

$$T = I.R/L \quad \text{Equação 6.2}$$

Combinando as expressões 6.1 e 6.2 pode-se obter a distância à qual se encontra o corpo anômalo da superfície a partir da informação que proporciona um radargrama.

$$x = vT/2 = c.I.R/2.L.(\epsilon_{ef})^{1/2} \quad \text{Equação 6.3}$$

Para achar a equivalência entre o tempo duplo de propagação e a profundidade é fundamental conhecer a permissividade efetiva do meio ou a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas. Existem diversos métodos que permitem obter alguns destes dois parâmetros. Cita-se em continuação três métodos mais utilizados por sua rápida aplicação. Trata-se da utilização de valores tabulados dos ensaios de tempo duplo de propagação e do conhecimento da estratigrafia do meio.

a) O **primeiro** deles, a utilização de valores tabulados, é o mais sensível e por sua vez o menos exato. Consiste em utilizar valores já tabulados por outros autores, que mediante experimentações tem obtido, para várias frequências, intervalos da constante dielétrica e da condutividade do meio, diferenciado entre variações no conteúdo e água de diferentes materiais. Um dos problemas que apresenta esta forma de determinar valores da constante dielétrica é seu amplo intervalo de valores para um mesmo material em função das condições a que ele está submetido (grau de umidade, porosidade e granulometria). A maior ou menor precisão depende da semelhança que seja o meio analisado com o meio para o qual se tenha efetuado a medida.

b) O **segundo** método é a obtenção dos parâmetros efetivos mediante experimentações no laboratório. Com este método se obtém velocidades de propagação em amostras dos materiais da zona de estudo. Com estes resultados se interpretam os registros adquiridos na área de estudo, transformando o tempo duplo de propagação em profundidade e localizando a distância a cada refletor. Consiste em, uma vez que se tenha a amostra no laboratório, situar uma antena sobre uma das faces planas da amostra, que se procura ou seja o suficientemente grande para poder obter registros claros, com poucos ou nenhum efeito de contorno. A amostra há de ter duas superfícies planas e paralelas entre si. Na face oposta (paralela à primeira), se coloca um material fortemente refletor (um metal, por exemplo). Com isto se pretende que o coeficiente de reflexão na face posterior da amostra seja o mais alto possível. Como a espessura da amostra é conhecida e além disso se realiza também um registro colocando a placa metálica sobre a antena, é sensível determinar o tempo de propagação do sinal no material e junto ao dado de espessura, obter a velocidade de propagação e a constante dielétrica efetiva. O problema que apresenta este método é que ao tomar a amostra e transportá-la para o laboratório se alteram em parte suas propriedades (compactação e grau de umidade).

c) Como **terceiro** método se relaciona o conhecimento da estratigrafia do meio em algum setor com os tempos duplos de propagação às anomalias do radargrama registrado neste setor. Para aplicá-lo se deve traçar alguns perfis nas áreas de estratigrafia conhecida, por exemplo em zonas nas quais se tenha efetuado uma sondagem mecânica. O radargrama resultante se compara com a espessura dos materiais estratigráfico e se correlacionam as discontinuidades no meio com os eventos registrados como reflexões: esta correlação permite conhecer o tempo duplo de propagação e a distância, o que proporciona diretamente a velocidade de propagação em cada material. O inconveniente que apresenta o terceiro método é que nem sempre se dispõe da informação estratigráfica que proporciona uma coluna de sondagem na zona de estudo.

6.6. Outras técnicas de tratamento de dados

Considerações iniciais

a) Preliminares

A deconvolução tem objetivo melhorar a resolução temporal dos registros. Se aplica porque se considera que o traço registrado por uma antena receptora do GPR é um sinal que depende da resposta das antenas, do pulso inicial e dos efeitos que exercem sobre o sinal os materiais da Terra durante sua propagação, atuando estes como um filtro sobre o sinal emitido. Considerando que o sinal recebido não tem a mesma forma que o pulso emitido por efeito dos materiais pelo que se tem propagado, é possível representar o sinal registrado como uma convolução entre o sinal inicial e os efeitos que o subsolo induz sobre a mesma, somando-se o ruído que pode conter o registro.

Pode-se expressar como (VIDAL,1995):

$$r(t)=p_i*s(t)+n(t) \qquad \text{Equação 6.4}$$

Onde $r(t)$ é o traço registrado, $p_i(t)$ é o pulso inicial emitido pela antena, $s(t)$ é a resposta do terreno e $n(t)$ o ruído. O símbolo * indica convolução das funções adjacentes.

A onda que tem recebido é portanto, o pulso inicial convolucionado com o sinal que interessa determinar, isto é, com a seqüência de reflexões que se produz

pelas características do terreno. Além disso, o sinal fica obscurecido pela adição do ruído de fundo.

Se a onda emitida for um impulso, o sinal registrado (traço) representaria a resposta do meio ao impulso.

Sem problema, o sinal emitido não é um pulso ideal (um delta de Dirac). Portanto a onda registrada representa a convolução entre a onda emitida e a resposta do terreno ao impulso. Esta função compreende todas as reflexões primárias e as múltiplas. No pulso emitido (uma onda que está formada por muitos componentes) intervêm tanto a fonte como a resposta da antena receptora as reflexões superficiais que produz e os filtros do registro.

Estes efeitos de convolução fazem com que um pulso que provém de uma reflexao simples se propague pelo meio, se expanda (dilate) toda vez que sua forma se complica.

Cada traço do registro consiste num pulso inicial estreito que vai dispersando a medida que a onda se propaga pelo meio, com a conseqüente diminuição da resolução vertical e conseqüente adição de ruído, como é o caso das reflexões múltiplas. O registro se complica conforme aumenta o tempo de propagação.

A deconvolução é uma técnica de processamento muito utilizada em estudos sísmicos. Seu objetivo é separar os efeitos que forma a onda e eliminar os ruídos ao meio no pulso inicial, convertendo o registro obtido no campo num radargrama onde os sinais registrados representam unicamente a reflexao primária, de tal maneira que os traços não apresentem efeitos devidos a propagacao do pulso pelo meio.

Durante este processamento, o que se faz é deconvolucionar a resposta do terreno e a onda emitida, compreendendo as componentes desta, eliminando as reflexões múltiplas e abandonando unicamente as reflexões primárias produzidas nas descontinuidades do terreno. O resultado desejável de um processo de deconvolução são sinais de reflexão com a forma do pulso inicial o mais sensível possível e com a mínima duração que permitam as características de filtragem da superfície analisada.

Trata-se, portanto de compensar tanto a largura do pulso inicial como os efeitos de filtragem do meio, criando um novo filtro, que seja o inverso do processo não desejado que se produz durante a propagação da onda.

O processo de deconvolução está amplamente documentado na bibliografia especializada no processamento digital de sinais (por exemplo, em PROAKIS e Monolakis, 1988).

b) Deconvolução preditiva. Pre-branqueamento de sinal

O tratamento de deconvolução que se realiza no processamento do GPR com o programa Radan é o denominado preditivo (GSSI,1990). A deconvolução preditiva é o método desenvolvido por PEACOCK e Treitel(1969).

Trata-se de uma das primeiras aplicações da teoria de sinais no campo da geofísica (ROBINSON e Treiter,1978). Tem como objetivo a eliminação de efeitos múltiplos, que se podem prever quando se conhece o tempo de chegada das reflexões primárias procedentes dos mesmos elementos refletoras (SHERIFF e Geldart,1991; Dobrin e Savit,1988; Ilmaz,1987; Peacock e Treitel,1969).

Durante o projeto do filtro, antes de aplicá-lo, pode-se adicionar uma pequena percentagem de ruído branco ao sinal. Este processo se conhece como pre-branqueamento. A percentagem de ruído branco que se introduz fica entre 0.1 e 1% (GSSI,1990). Para entender a razão pela qual se realiza este processo há que considerar que o procedimento de deconvolução se efetua considerando que o ruído do registro é pequeno e, quase desprezível, de forma que o traço gravado no radargrama $r(t)$, pode representar unicamente, como a convolução entre o sinal inicial, $p(t)$, e a resposta do terreno, $s(t)$, de maneira que a equação 6.4 possa ser simplificado para:

$$r(t)=p(t)*s(t) \qquad \text{Equação 6.5}$$

Ao efetuar a transformada de Fourier a expressão (6.5), fica:

$$R(\omega)=P(\omega)S(\omega) \qquad \text{Equação 6.6}$$

Onde as funções $R(\omega)$, $P(\omega)$ e $S(\omega)$ são respectivamente as transformadas de Fourier das função temporal $r(t)$, $p(t)$ e $s(t)$.

Da expressão 6.6 pode-se isolar a transformação de Fourier do sinal inicial, $P(\omega)$:

$$P(\omega)=R(\omega)/S(\omega) \qquad \text{Equação 6.7}$$

Assumindo que existe um filtro $f(t)$ tal que, convolucionado com o sinal inicial $p(t)$, se obtém uma função delta, este filtro será o inverso de $p(t)$:

$$p(t)*f(t)=\delta(t)$$

Equação 6.8

O filtro inverso poderá expressar-se como (YILMAZ,1987):

$$F(\omega)= 1/P(\omega)$$

Equação 6.9

Onde $F(\omega)$ é a transformada de Fourier do filtro inverso $f(t)$. Se procede deste modo porque se considera que a resposta do terreno ao impulso é aleatória, o que implica que as probabilidades para as amplitudes de todas as frequências são iguais. Isto também implica que não se pode prever uma reflexão pelo fato de conhecer as reflexões mais superficiais que esta, o que indica que a autocorrelação é muito pequena. Isto equivale a encontrar um filtro inverso a partir da equação 6.9 de modo que o produto de $F(\omega)$ por $P(\omega)$ é uma constante. Se tomamos a unidade como valor desta constante já que outro valor diferente unicamente adicionado de um fator de escala não é importante no resultado final (ROBINSON e Treitel,1978). A amplitude do espectro deste filtro inverso é a inversa da amplitude do traço registrado, e a fase do primeiro é a fase do sinal inicial trocada de sinal (YILMAZ, 1987). Esta equação 6.9 se aplica a qualquer valor de frequência. Pode ocorrer que para um componente determinada da frequência a função $P(\omega)$ seja pequena o que implica que $F(\omega)$ é neste caso, grande. Isto é, que o tipo de processamento destaca os componentes de frequência com amplitude fraca, de maneira que aumenta a resolução destes sinais atenuados (SHERIFF e Geldart,1991). Exceto quando $P(\omega)$ é muito pequena.

O ruído branco se adiciona unicamente a efeitos de projeto do filtro, para diluir este inconveniente e sua presença num ruído gerado pela deconvolução no sinal resultante retarda o processamento que é menor (SHERIFF e Geldart,1991). De forma que a função de saída da deconvolução, $t(\omega)$, se suaviza e estabiliza (se evita determinante zero na matriz de correlação) (GSSI,1990).

7.6.2. Migração

É a mais sensível e rápida técnica. Baseia-se em considerar as hipérbolas que aparecem nos registros para deslocar o refletor ao vértice da parábola. Para obter este registro migrado é necessário obter a excentricidade da hipérbole e a velocidade de propagação da onda no meio. O primeiro destes dois parâmetros se

introduz no programa, antes de calcular a equação da hipérbole e define o número de traços que se envolve no processo. O segundo fator, a velocidade média de propagação, pode-se obter a partir da equação da hipérbole mediante um sensível cálculo de regressão entre outros métodos que a princípio proporciona os programas como uma percentagem da velocidade de propagação da onda no vácuo, c . O método, baseado na soma de amplitudes ao longo das trajetórias hiperbólicas dos registros, foi o primeiro método de computação para efetuar migrações. A curvatura da hipérbole registrada depende da velocidade à qual se propaga a onda pelo meio e a velocidade de deslocamento da antena. Conhecida esta velocidade de deslocamento da antena, e para valores iguais em dois meios diferentes, naquele cuja velocidade média de propagação da energia seja maior se obterá uma hipérbole mais aberta, enquanto que para velocidades de propagação menores se obterá uma hipérbole mais fechada. Para poder determinar esta velocidade média de propagação da onda, pelo meio, é necessário dispor de registro nas quais se observam estes efeitos com clareza.

A equação da hipérbole tem a equação:

$$t^2(x) = t^2(x_0) + 4x^2/v_m^2 \quad \text{Equação 6.10}$$

Onde $t(x)$ é a componente temporal (eixo vertical) da hipérbole sobre a qual se realiza a soma de amplitudes dos dados e se expressam em ns, x é a componente horizontal (distância) de cada um dos pontos da hipérbole expressa usualmente em m ou em cm, x_0 é a componente horizontal do vértice da hipérbole, $t(x_0)$ é a componente vertical (temporal) do vértice em m e a velocidade média de propagação da onda da superfície até o corpo anômalo que fica registrado como uma hipérbole. Conhecidos os pontos $(x_2, t_2(x))$, assim como o valor das duas coordenadas no vértice da hipérbole, uma sensível regressão linear dá uma estimativa da velocidade média procurada. Por isso se realiza uma troca de variáveis na equação 6.10 que fica como a equação de uma reta:

$$y = a + bz \quad \text{Equação 6.11}$$

sendo $y = t^2(z)$, $z = x^2$, $a = t^2(x_0)$ e $b = 4/v_m^2$

Migração de Kirchoff

Outro método de migração que pode aplicar-se com os programas disponíveis é o denominado “migração de Kirchoff”. O princípio é o mesmo que o da soma hiperbólica: considerando-se a hipérbole que se forma a partir das reflexões no objeto finito, somam as amplitudes e se coloca o resultado no vértice da mesma. Uma vez realizado este processo, leva-se em conta uma série de fatores que estão associados tanto com a amplitude, como com a fase dos registros, que se incluem na hipérbole.

Por outro lado há que considerar o fator de atenuação das amplitudes por dispersão geométrica de frente de ondas ao propagar-se pelo meio. Isto se pode simplificar considerando que ondas que se propagam são ondas internas, porque a frente de ondas pode-se considerar esférica, de tal maneira que o fator de atenuação geométrica para a energia resulta inversamente proporcional ao quadrado da distância. Para considerar este fator é necessário corrigir as amplitudes por dispersão geométrica antes de efetuar a soma.

O terceiro fator a considerar é o princípio de propagação de HUYGENS: uma frente de onda progressiva como se cada um de seus pontos fosse um emissor de ondas esféricas elementares, sendo a posição da frente de ondas ao cabo de certo tempo a envolvente destas ondas elementares. Estas ondas secundárias geradas em cada ponto da frente de ondas conforme esta avança produzem, por sua superposição variações na amplitude e na fase e frequência do sinal. A migração de Kirchoff corrige a onda resultante da soma tanto em fase como em amplitude levando em conta este efeito (YILMAZ,1987). Estas correções se realiza antes da soma hiperbólica aplicado no filtro. A descrição deste tipo de filtros está extensamente desenvolvida por exemplo, em (YILMAZ,1987).

Com a migração de Kirchoff se considera três fatores. Para isso se multiplica os dados do registro pelo fator de obliquidade e, pela difusão ou atenuação geométrica. Uma vez realizado este processo, se aplica a equação 6.10 da hipérbole, e se efetua a correção pela soma hiperbólica de amplitudes. Uma vez situado o refletor no vértice da hipérbole se aplica o filtro para corrigir os efeitos devidos ao princípio de HUYGENS e a superposição das ondas secundárias. Esta filtragem melhora a resolução e destaca as altas frequências ao mesmo tempo que efetua correções de fase (GSSI,1990).

Quando as variações laterais ou em profundidades da velocidade de propagação no meio são importantes, o perfil dos corpos anômalos obtidos no registro diferem de seu perfil real, podendo chegar a obter as seções que se denominam sobre-migrados. Estes perfis sobre-migrados são o resultado de considerar uma velocidade de propagação superior à do meio. Ao utilizar esta velocidade para realizar a correção das hipérboles, o que se pode obter é uma troca na sua concavidade. Se a velocidade média considerada é adequada, o resultado da migração será a substituição de cada uma das hipérboles por um ponto.

Há que comentar que este tratamento tem que ser aplicado com cautela já que usualmente se trabalha em duas dimensões, enquanto que os registros de GPR proporcionam informações de setores tridimensionais devido ao feixe de emissão da antena que se representam em duas dimensões (CONYERS e Goodman,1997).

Concluindo a migração é um processamento útil sempre que os registros tenha algum evento hipérbolico claramente visível, já que desta forma se possa estimar a velocidade média de propagação da onda, o que permite calcular profundidade e caracterizar o meio no qual se produz a propagação. (CONYERS e Goodman,1997).

A migração é, portanto, necessária para obter uma estimativa da velocidade de propagação e para facilitar a interpretação dos registros no caso de haverem muitas hipérboles que se superpõem a outros eventos, impedindo defini-los claramente. Com isto se consegue que outros eventos fiquem mais definidos no registro.

Para uma correta interpretação dos radargramas convém comparar o registro tratado com o registro de campo original, utilizando os dois para chegar a uma interpretação final.

6.7. Correções sobre os sinais

Neste parágrafo se descreve tratamentos do sinal que se aplicam para corrigir efeitos perfeitamente predizíveis produzidos sobre os sinais registrados pelas condições do meio durante a aquisição de dados. Se analisam as correções estáticas (topográficas e por troca brusca de velocidade de propagação), o ganho e a superposição de traços.

6.7.1 Correções estáticas

As correções estáticas são um tipo de processamento que tem como objetivo corrigir os efeitos produzidos nos registros pela cartografia da superfície na qual se traça os perfis e também os efeitos ocasionados pelas variações bruscas da velocidade de propagação da onda no meio.

Desconsiderando estas duas circunstâncias (topografia e trocas bruscas na permissividade dielétrica do meio) se pode produzir erros importantes na interpretação dos registros. O resultado então pode ser uma seção de GPR interpretada que não corresponde ou que não é identificável com a seção geológica do perfil estudado.

Tanto a topografia como as variações bruscas da permissividade dielétrica do meio distorcem a imagem do refletor em profundidade uma vez que podem produzir importantes diferenças entre os tempos duplos de propagação registrados e os que se obteriam no caso de uma superfície plana e de um meio sem trocas na permissividade sobre o papel do registro, estas variações nos tempos duplos de propagação se observam como trocas nas distâncias verticais ao evento. Se, por exemplo, há refletora no interior do meio, paralela à superfície inclinada do meio sobre a qual se desloca a antena, no radargrama se registra um evento plano e uma superfície plana. A inclinação real da imagem desta superfície refletora se obtém ao aplicar as correções topográficas.

Este efeito se produz também devido às variações da permissividade dielétrica efetiva dos materiais: da camada ou das camadas do meio, já que trocas laterais deste parâmetro ocasionam trocas laterais na velocidade de propagação das ondas e, portanto, variações nos tempos de propagação registradas entre a antena e o refletor plano, dando lugar a uma modificação visual da espessura desta camada nas anomalias dos registros.

Estas correções, denominadas também estáticas, são calculadas considerando as alterações produzidas nos dados mais próximos à superfície. O método consiste em desprezar todo o conjunto de traços segundo uma janela de largura e forma determinada levando em conta as alternativas esperadas (de topografia ou trocas laterais das permissividades dielétricas), segundo o eixo vertical (temporal). Com isto se corrigem estes efeitos que nos registros se traduz como uma alteração dos tempos de propagação percorrido pelo sinal.

As correções topográficas, também podem realizar-se a partir de procedimentos de medição de migração, resultam inclinadas quando gradientes superficiais superam valores de 10% (LEHMANN e Green,2000).

Porém, ainda que os efeitos de topografia sejam relativamente sensíveis de corrigir, os efeitos de variação de permissividade são complicados e podem produzir erros na interpretação já que poucas vezes se dispõe de informação necessária para fazê-los corretamente.

6.7.2. Ganho

Se à rápida atenuação das ondas eletromagnéticas produzidas por meios materiais somarmos a atenuação que se produz pela expansão geométrica da frente de ondas, o resultado é que a amplitude das reflexões diminua rapidamente com a profundidade. Ainda que amplitudes das reflexões mais superficiais são observadas, as amplitudes das profundidades podem não ser visíveis.

Este amortecimento do sinal se produz principalmente por expansão da frente de ondas, pela presença de descontinuidade eletromagnética (troca brusca destes parâmetros) e por atenuação, α , devido ao meio. É a causa que limita os estudos de GPR à zona mais superficial do meio.

Este tratamento se aplica aos registros temporais e consiste em multiplicar os dados do registro por uma função linear que depende da profundidade, isto é, do tempo duplo de propagação do sinal, e que amplifica o sinal original. Esta função é denominada ganho. É medida em decibéis (dB). O programa Radan permite aplicar diferentes pontos de corte, de forma que é possível fazer amplificações diferentes a cada ponto do segmento temporal.

A aplicação do ganho temporal amortece o efeito da atenuação rápida do sinal, podendo amplificar a energia procedente de distintas profundidades. Como na maior parte dos estudos é difícil conhecer a condutividade do meio e as variações que apresenta, não é usual corrigir mediante ganho a atenuação por absorção.

6.8 Interpretação dos registros

Nesta parte se resume o processo que se realiza para interpretar um registro. Nem sempre deve-se efetuar todos os passos e as correções explicadas. Porém, no caso mais geral possível, deve-se levá-los em consideração.

6.8.1 Planejamento

Há de se recordar que uma boa interpretação de registro começa com um bom planejamento do problema que se quer analisar. Em primeiro lugar, antes de realizar a aquisição de dados, é necessário ter claro o objetivo do estudo. A partir deste objetivo decide-se em primeiro lugar, sobre o tipo de prospecção adequado para alcançá-lo. Cada tipo de estudo tem suas limitações e possibilidades, e a prospecção com GPR não é uma exceção. Conhecer o objetivo permite selecionar também o equipamento que se utilizará (tipo de GPR, antenas, informação prévia que necessitamos, etc.). Em seguida, há que realizar a aquisição de toda informação prévia acerca da zona e do objetivo de estudo. Isto nos permite um planejamento adequado da campanha de aquisição de dados e um conhecimento das condições da zona para poder ajustar os dados obtidos. A existência de uma sondagem ou o conhecimento da estratigrafia de um meio pode permitir calibrar os registros de GPR naquelas zonas nas quais existe esta informação de maneira que se possa ajustar melhor os parâmetros de estudo no resto das áreas. A informação de interesse que se deve obter antes de realizar o planejamento da campanha e a aquisição de dados é variada. Conseguir dados de infraestrutura geodésica da zona, tanto para poder planejar a escala, a situação e o traçado dos perfis como para identificar as zonas estudadas e poder situar posteriormente as anomalias e objetos concretos. Além da cartografia também é interessante conseguir material fotográfico da zona, incluindo fotografias aéreas. Por outro lado, outro tipo de informação interessante são os dados de sondagem ou de cortes estratigráficos realizados nas proximidades, os dados de outros estudos geofísicos na mesma zona ou em suas proximidades e, desde logo, toda a informação geológica possível (mapas, estudos, observações, etc).

6.8.2. Realização: tarefas preliminares

O passo seguinte a se realizar são os trabalhos de campo. Antes de realizar a aquisição de dados é preciso efetuar toda uma série de tarefas preliminares. Em primeiro lugar será necessário comprovar que o traçado dos perfis que se planeja, a partir da informação prévia, é correto e factível na realidade. Há que se levar em conta, que devem-se preparar traçado em zonas planas e pouco abruptas para que seja possível deslocar de maneira selecionada (perfis contínuos) a antena ou as

antenas selecionadas. Considerar, portanto, o tamanho destas. Nos perfis planejados não deve haver obstáculos que dificultem a sua passagem. Se isto ocorre, é necessário trocar os traçados, realizando as anotações pertinentes, no campo, sobre os mapas. Uma vez determinados estes perfis, procede-se sua demarcação.

Usualmente se sinaliza o início e o final do perfil, assim como a direção do deslocamento da antena. E se colocam sinais intermediários que permitam localizar a antena entre os dois pontos extremos: estas marcas, equidistantes, permitem também introduzir nos registros as marcas de distancia horizontal que posteriormente utilizaremos. Os métodos de sinalizar os perfis dependem tanto do equipamento de trabalho como do estudo que está se realizando, e podem ser diversos. Por exemplo, em certas ocasiões se utilizam estacas coloridas cravadas no solo a cada certa distância (por exemplo, cada cinco metros de distância). Este método, ainda que, sensível para os operários que trabalham com a antena são facilmente visíveis, resulta, problemático quando não é possível cravar elementos no solo. Outro método utilizado também quando se trabalha sobre o solo, é esticar uma trena calibrada partindo de um ponto inicial assinalado e tomando a direção do traçado. Neste caso, a distância está claramente assinalada e os operários só tem que seguir a trena com a antena e introduzir as marcas de distâncias necessárias assinaladas pelas divisões da trena. Este método é rápido e sensível, porém tem o inconveniente de que, em alguns casos, divisões da trena são difíceis de definí-las. Também pode-se utilizar para trabalhar sobre superficies horizontais, um carritel (topo-fio) de comprimento e espessura adequados, sobre a qual se tenham marcado (por exemplo, com plástico colorido) as fitas que indicarão as marcas da distância a introduzir. As fitas, utilizando este método, são claramente visíveis, e o trabalho dos operários se simplifica, já que terão de limitar-se a seguir o cabo estendido com a antena e introduzir uma marca de distância. Tem o problema de que não permite variar o espaço entre trenas, isto é, que em zonas onde, por exemplo, interessa uma maior densidade de marcas de distância pode-se tratar de zonas mais problemática onde interessa situar com maior exatidão os eventos registrados), não podemos adaptar o método a menos que o troquemos com outro (por exemplo, o caso de uma trena ou carretéis nos quais se haja preparando uma maior densidade de marcas de distância.

Quando já se tem selecionado o traçado dos perfis, hão de situar-se o mais exatamente possível. Se utiliza métodos topográficos (estações totais, teodolitos

,GPS, etc. caso necessário. Um método rápido de realizar esta tarefa é anotar o azimute do traçado e seu comprimento. Também pode-se traçar perfis que se iniciem e finalizem em pontos característicos da zona , principalmente identificados.

Antes de começar a adquirir dados, ainda são necessários pequenas provas. Em primeiro lugar comparar que, situando a antena sobre o meio que estamos estudando, estes desvios de linha base, ou superposição de ruído de frequências distintas às bandas de trabalho, temos que utilizar algum tipo de filtro frequencial vertical. Senão é preferível prescindir da filtragem durante a aquisição de dados para perder a mínima informação possível e porque se pode realizar o mesmo processamento posteriormente, uma vez obtidos todos os registros. Também se ajusta o range estimado ao analisar o objetivo do estudo, e se comprova no campo que dito range permite um comprimento vertical adequado dos registros. Isto é , que a duração do tempo, de registro é o suficiente para poder observar as anomalias de interesse, porém não tanto como para gravar zonas de registro unicamente com ruído. Observa-se que a atenuação do sinal é importante no meio e que não se pode obter informação a partir de certo tempo duplo de propagação, há que considerar a aplicação de um certo ganho. Esta amplificação pode ser calculado previamente, de forma aproximada, para constatar, os efeitos de expansão e de expansão geométrica da frente de ondas e os efeitos das superfícies refletoras esperadas no meio, ou melhor se pode ajustar no campo, observando o sinal que recebe a antena sem aplicar ganho e ajustado os diferentes valores para a amplificação a partir de provas, “in situ”. Nos dois casos observar os registros que estão sendo produzidos e levar em conta o ruído e considerar o ruído superposto.

Ao analisar o objetivo do estudo temos que considerar também o tamanho do elemento refletor menor que interessa registrar. Levando em conta este fato, há que selecionar a velocidade a qual se deslocará a antena (um valor exato se a levamos num veículo ou aproximadamente caso se faça caminhando) e o número de traços por segundo que se registrarão. Calculando aproximadamente, estes fatores, o número de traços nas quais pode-se observar o evento devido ao refletor de menor tamanho desejado, pode-se decidir se quer e pode aplicar algum tipo de filtro horizontal durante a aquisição de dados ou se deseja realizar a superposição (ou soma) de vários traços consecutivos também durante a aquisição de dados. Sem esquecer, desde logo, que estes dois processos podem realizar-se também posterior à aquisição de dados.

Há também que selecionar outros parâmetros de aquisição, como a velocidade de transmissão de dados entre a antena e a unidade central, a amostra (normalmente seleciona 512 pontos de amostragem por traço, porém pode-se considerar outros valores) e a posição de início do registro. Pode decidir-se também se realiza registro de dados ou se observam os registros em janela ou se enviam à impressora.

Quando ajustado estes parâmetros e o aspecto do sinal que se observa nas provas, como suficientemente bom, pode-se passar a adquirir dados nos perfis de calibração. Trata-se de perfis traçados junto as sondagens ou em zonas onde se conhecem exatamente os materiais do meio e a que profundidade estão as descontinuidades eletromagnéticas. Estes dados permitem, previamente numa análise posterior, ajustar os valores das permissividades dielétricas efetivas obtendo muito boa aproximação, permitindo assim uma melhor interpretação.

6.8.3. Realização da coleta de dados

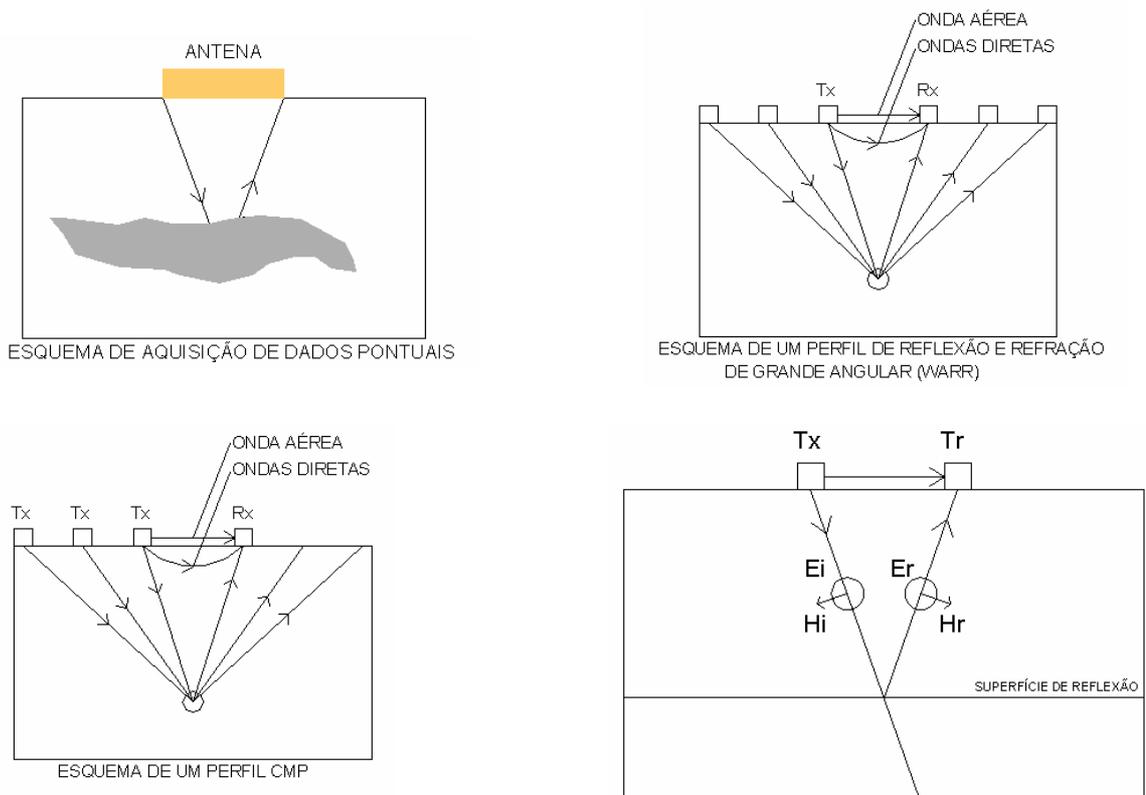


Figura 6.2. Esquemas dos diversos métodos de imageamento GPR.

Finalizando estes trabalhos preliminares pode-se passar à aquisição de dados propriamente dita, ou seja perfis, aquisição pontuais ou métodos(CMP e WARR). É necessário que um operário desloque a antena pela zona selecionada e outro operário tenha cuidado para que não se engate com o cabo. Esta segunda pessoa pode encarregar-se também de introduzir as marcas de distância.

Durante a aquisição de dados há uma parte importante à fazer antes da interpretação: anotar durante o percurso da antena todos aqueles eventos que possam ter afetados os registros. Para isso é preciso levar uma caderneta de campo na qual se tomará nota cuidadosamente tanto das condições externas como de incidentes durante os trabalhos. Por exemplo, anotar se o perfil passa por cima de uma ponte, junto a muro ou sob um cabo de alta tensão. Anota-se também a distância à qual se encontram estes elementos da antena e em que posição do perfil ou da linha projetada se situam.

Os incidentes que se sucedem durante a aquisição de dados também devem ser cuidadosamente anotados, situando o ponto do perfil. Uma reportagem fotográfica da zona e da aquisição de dados também pode ser de grande ajuda nos trabalhos posteriores de interpretação.

6.8.4 Análise de dados

Finalizado a aquisição de dados deve-se iniciar os trabalhos posteriores. Se copiam os registros do GPR num computador, se editam e imprimem os registros de campo para realizar uma primeira observação e comparação de todos eles. Em princípio, tem-se informação suficiente boa sobre o número de eventos registrados e os tempos duplos de propagação do sinal. Os primeiros registros que se devem analisar são aqueles realizados em ensaios e os efetuados para a calibração dos perfis. Estudando-os com detalhe, pode-se obter as permissividades dielétricas efetivas dos materiais.

Trabalhando, já com os registros de campo, decide-se sobre o tratamento que é necessário aplicar a cada um deles (filtros freqüenciais, filtros horizontais, migração, deconvolução, ganho, superposição de traços, topografia, etc.), sempre considerando as limitações, os problemas e as possibilidades de cada tipo de processamento de dados. Realiza-se posteriormente provas dos distintos processa-

mentos possíveis e se trabalha com aqueles registros nos quais se observam claramente as anomalias de interesse. Pode ser útil trabalhar ao mesmo tempo com o registro tratado e com registro original de campo.

Uma vez realizado o tratamento adequado dos sinais, procede à interpretação. O primeiro passo é identificar os eventos de interesse e o número de descontinuidades detectado. Em continuação, considera-se a escala de tempos duplos de propagação (escala vertical) de cada um dos radargramas (range e início dos registros). Utilizando esta escala de propagação se determinam os tempos duplos de propagação de cada um dos eventos selecionados, tanto do início como desde a descontinuidade prévia à analisada, isto é, o evento imediatamente anterior no tempo a que se está analisando.

O passo seguinte é converter os tempos duplos de propagação das reflexões em profundidades. Para esta troca de variáveis precisa-se conhecer a velocidade de propagação da onda pelo meio. Esta velocidade pode obter-se às vezes diretamente, porém o mais normal é que se tenha que determinar antes a permissividade dielétrica efetiva de cada um dos materiais que formam o meio. Para conhecer este parâmetro se realizam os perfis experimentais ou de calibração.

Conhecida a permissividade dielétrica efetiva é sensível obter a velocidade a partir da equação 4.4, ou seja com velocidade como a permissividade dielétrica, a obtenção da distância aos elementos refletores partindo dos tempos duplos de propagação pode obter-se mediante as equações 6.1 e 6.3. Neste último caso se tem-se os registros impressos sobre papel e se conhece seu range. Os resultados de cada um dos perfis deve cumprir três requisitos importantes: devem ser lógicos (não se pode admitir resultados fisicamente ou geologicamente absurdos), coerentes com os obtidos nos demais perfis analisados e concordantes com a informação prévia disponível.

Trata-se de um processo de retro-alimentação de informação, já que em cada uma das etapas da interpretação resulta interessante comparar com os demais resultados e com toda a informação que se tenha do problema. A obtenção de resultados anômalos por qualquer motivo ou de resultados totalmente inesperados deve levar a um cuidadosa análise dos mesmos.

Processamento e apresentação de dados GPR

Etapas:

- a) Edição de dados;
- b) Processamento de dados do sinal e,
- c) Apresentação da imagem processada

As etapas envolvidas no processamento dos dados de radar são: edição de dados, *dewow*, ganhos de tempo, filtragem temporal e espacial e migração (Annam, 1993). Os dados de GPR foram processados no software GRADIX da Interpex Ltd., USA(1998) e as etapas realizadas no processamento, adotadas neste trabalho, são brevemente descritas a seguir.

Importing GPR Data Files (Importação de arquivos de dados GPR). Esta etapa consistiu na criação de um projeto de trabalho no qual foram dispostos todos os dados dos perfis executados. O programa importa estes dados em formato DZT, que é o formato de saída GPR.

Editing Geometry (Edição da Geometria). Nesta etapa foram acentuadas as disposições dos perfis ao longo das áreas (entrada de coordenadas, distância de cada perfil, nome da linha, entre outros).

Quadro 6.1

Identificação	Localização	Comprimento	Observação
AV2_200	E-292	175m	
AV1_400	E_308	200m	

Window traces (janela dos traços). Delimitação dos traços, tanto horizontalmente como vertical.

Dewow -remoção dos ruídos de baixa frequência nos sinais de radar.

Set time zero (Identificação do tempo zero). Definição da disposição do tempo zero do perfil.

Remove Background (remoção do ruído de fundo). Remoção do valor de background dos dados do radargrama com base em um traço ou janela determinada.

Gain (Ganho)-aplicação de ganhos nos dados, com o intuito de melhorar a visualização de refletores fracos.

Filter (Filtro) - remoção de frequências não desejadas (ruídos). Os espectros de amplitude e de fase no domínio do tempo podem ser observados durante a escolha do melhor filtro bandpass (passa banda).

Analyse spectra (análise de espectro). Permite analisar o espectro de amplitude e de fase de qualquer ponto do radargrama, individualmente.

Analyse fk (análise fk)-seleção de intervalos de velocidade a serem utilizados em filtros fk.

Filter fk (Filtro fk). Permite a remoção de eventos lineares através da aplicação da transformada dupla e inversa de Fourier. Tais eventos inclinados no domínio espaço-tempo aparece como linhas retas no domínio frequência-número de onda.

Velocity panels (Painéis de velocidade). Utilizado para analisar sondagens de velocidade (WARR-Wide angular reflection refraction e CMP- Common Midle Point). Funciona onde os refletores hiperbólicos ficam horizontais de acordo com sua velocidade de energia do refletor de acordo com a velocidade selecionada.

Velocity spectra (Espectro da velocidade). Esta opção permite a visualização do espectro de energia de cada refletor, permitindo uma identificação mais precisa das velocidades dos refletores.

Migrate(Migração)-utilizada para a recuperação da forma aproximada dos refletores e disposicao correta dos mesmos, realizadas no domínio da frequência.

Elevation statics (correção topográfica)-inserção da topografia nos dados de radar. *Trace Mix* (utilizado como um filtro móvel de suavização de refletores horizontais).

Depht conversion (Conversão em profundidade)-conversão dos radargramas em constante ou de um perfil de velocidade.

Viewing the Profile (Visualização do radargrama após cada etapa do processamento, sendo possível a edição da visualizacao dos traços (wiggle trace, avariable area e variable density), ganhos, dimensões do perfil e anotações verticais e horizontais.

Plot Profile (Impressão do perfil)- imprime e salva o arquivo gerado após as etapas de processamento.

CAPÍTULO 7

**ESTUDOS E TESTES INTEGRADOS DE GPR
E DADOS GEODÉSICOS EM PAVIMENTO RODOVI-
ÁRIO FLEXÍVEL SOBRE SOLOS MOLES**

7.1. Introdução

O projeto da ALÇA RODOVIÁRIA foi concebido em meados dos anos 80 e adequado para a atual situação da economia paraense, constituindo-se na esperança de mudança radical da economia da região metropolitana de Belém, integrando efetivamente a ela os municípios adjacentes, abrindo novas frentes de expansão urbana. Em consequência, induziu a transformação do Porto de Vila do Conde (em Barcarena), num terminal de carga geral ao qual terão acesso navios de grande calado, liberando o Porto de Belém para cabotagem e navegação fluvial.

A idéia central foi baseada na elaboração de estudos técnicos, econômicos, ambientais e sociais, necessários para definir a viabilidade da interligação física da região metropolitana de Belém com o Porto de Vila do Conde e a rodovia PA-150. O projeto previu a implantação e pavimentação de 155,80 km de rodovias e construiu 4.508,80m de pontes de concreto e mistas (incluindo as ligações complementares).

A Alça Rodoviária, é uma via de Integração do Leste Paraense, ligando a BR-316 a PA-151 e, por estar situada em região de grande potencial sócio-econômico e articular Belém com os municípios de Ananindeua, Marituba, Bujaru, Acará, Moju, Barcarena, a região Sul do Estado e o Porto de Vila do Conde com as ZPE (Zonas de Processamento de Exportações), os Distritos Industriais de Ananindeua e Barcarena, tem grande importância no contexto paraense.

Iniciando-se na BR-316, altura do km10, a partir daí e com extensão de 14,2 km segue para Sul até atingir as margens do rio Guamá. A transposição é feita por ponte de 1972m e largura total de 12,40m. Da margem Sul do rio Guamá segue, ainda, na direção Sul por 27,3 km até atingir a margem do rio Acará, o qual é transposto por uma ponte de 796m de extensão e largura de 10,40m. A partir deste ponto, segue na direção Leste, numa extensão de 36km até o rio Moju, onde faz a transposição por ponte de 880m com a mesma largura da ponte anterior. Deste ponto segue até o entroncamento com a PA-151 por uma distância de 19,9km.

A rodovia Alça Rodoviária está projetada com seguintes características: Classe I, rampa máxima 5%, plataforma de aterro: 12,00m, plataforma de corte:13,20m, pista de rolamento:7,00m, acostamento:2,50m, velocidade de 100km/h para região plana e 80km/h para região ondulada, com faixa de domínio de 60m e greide na cota 4,50m, segura contra inundação, para um perfil longitudinal variando de 2.60m a 36,00m de altitude, com horizonte previsto para 10 anos e C.B.U.Q. espessura:10cm.

Dividida em quatro lotes para efeito de construção num total de 70km, integrando as cidades de Belém a Barcarena, via terá um custo final de 260 milhões de reais.

7.2. Localização da Área

A área do projeto está contida nos seguintes mapas: SA.22-X-D-III, SA.22-X-D-V e SA.22-X-DVI; publicadas pelo IBGE em UTM, Datum Vertical Imbituba (SC), Datum Horizontal SAD-69(MG) e Origem UTM "Equador e Meridiano 51°. W Gr". É limitada pelos paralelos 1°.15' e 2°. Sul e meridianos 48°. e 48°. 45' W.



Figura 7.1 Localização Política da Alça Viária (Esquemático).

7.2.1. Meio-ambiente

A área do projeto envolve diversos domínios ambientais, incluindo assim, regiões de: 1) Terra-firme com floresta nativa, capoeira, e culturas diversificadas, desde aquelas para fins industriais, como de subsistência; 2) Várzeas; 3) Calhas Fluviais e Estuarinas; 4) Planície de Marés (Rima VETEC, 1997).

7.3. Geologia

A geologia apresenta depósitos sedimentares dos períodos Quaternário e Terciário.

Os sedimentos do Quaternário são constituídos por areias, siltes e argilas transportadas e depositadas na planície aluvial dos igarapés e rios dessa área, destacando-se na parte sul os depósitos aluviais da planície de inundação do rio Guamá, constituídos por argilas de coloração escura. Estes depósitos são de idade holocênica, e têm espessura máxima em torno de 30 m, evidenciada por sondagens geotécnicas (GEIPOT, 1978).

Os depósitos areno-argilosos de coloração amarelada mais antigos, de idade pleistocênica, têm sido referidos como Pós-Barreiras (SILVA & LOWENSTEIN, 1968).

A seqüência sedimentar do Terciário compreende o Grupo Barreiras, de origem continental, e a Formação Pirabas, de origem marinha.

O Grupo Barreiras é constituído por argilas, siltes, areias, cascalhos, arenitos, siltitos, conglomerados, níveis de concreções ferruginosas, arenito ferruginoso (grés do Pará). Esta litologia apresenta coloração amarelada, avermelhada, marrom, com argilas multicoloridas, variegadas, às vezes claras, caolínicas, às vezes cinza, com matéria orgânica .

O Grupo Barreiras é constituído por duas unidades, separadas por uma inconformidade. A parte superior, é regressiva, com fácies fluviais e feições de fluxos gravitacionais. A parte basal mostra a presença de fácies de planície de lama, de lama/areia, e de canais de maré, com zonas próximas e distantes da atual linha de costa (ARAI et al, 1992).

7.4. Geomorfologia

Características regionais

Esses dados tiveram como base o levantamento, tratamento, análise e interpretação de dados texturais de relevo, drenagem, zonas fotolitológicas e logística da área, obtidos a partir de fotografias aéreas verticais de 1968 (escala 1: 40. 000) e imagem TM do satélite LANDSAT-5 de 1991, cedidas pelo IDESP

A região que engloba a área estudada foi individualizada por BARBOSA et al.(1974) em duas unidades geomorfológicas regionais, com base na homogeneidade e a posição altimétrica das formas de relevo. Essas unidades estão relacionadas à geologia, vegetação, solo e clima da região.

A primeira unidade mostra um relevo caracterizado por uma extensa superfície plana, suavemente ondulada e fortemente dissecada, com cotas médias abaixo de 50 metros.

A segunda unidade é representada pela Planície Amazônica, que caracteriza-se por faixas marginais do rio Amazonas e inúmeras ilhas, incluindo a Ilha do Marajó na sua foz. Apresenta diversas feições geomorfológicas como canais recentes, paleocanais, “furos”, “igarapés”, “paraná”, meandros abandonados e lagos, que marcam um complexo em evolução atual.

7.5 Características Geológicas-Geotécnicas

Coluna Estratigrafica proposta para a área do Projeto Alça Viária(VETEC,1997).

Quadro 7.1

Período	Época	Unidade	Descrição Resumida
	Holoceno	Sedimentos Inconsolidados	Areias quartzosas com e sem matéria orgânica, argilas, argilas orgânicas e silte, intercalados, distribuídos nos leitos dos rios, igarapés e manguezais
Quaternário	Pleistoceno	Lateritas Imaturas	Horizonte de “solo” Horizonte Ferruginoso: Tipo Arenito Ferruginoso Tipo Concrecionário
	Mioceno/Pleistoceno	Formação Barreiras	Sedimentos Siliciclásticos representados por argilitos, arenitos, comumente ferruginizados, com estratificações

7.6. Hidrografia

A hidrografia principal é formada pelos rios Guamá, Acará, e Moju, e igarapés de pequeno a médio porte, tais como os igarapés Pau Grande, Uriboça, Jacarequara, Genipaúba, Itapecuru, Guajaraúna e outros.

7.7. Formulação do Problema da Estrada

Decorridos pouco mais de 1,5 ano de inaugurada, passou a ALÇA RODO-VIÁRIA a exibir no seu revestimento, ao longo do seu traçado, acentuadas degenerações precoces com defeitos e recalques no pavimento.

Construída basicamente em duas regiões: terras firmes e várzeas utilizou, em trechos de leito compostos de solos moles com elevada umidade, alternativas à terraplenagem tradicional, como membranas sintéticas, grelhas geotêxteis, além do agulhamento no encontro das pontes.

Na execução do aterro, principalmente nos encontros das pontes e em trechos com subleito assente em solo mole, foram utilizados drenos fibroquímicos com a finalidade de reforço ao pavimento.

Em alguns alinhamentos aplicou-se, nos encontros de ponte, a metodologia do agulhamento, manta geotextil e geogrelha.

Embora esta diretriz de construção tenha sido obedecida ocorreram rupturas de solo em vários locais, e recalques são visíveis em outros trechos.

Esta pesquisa pretende identificar as prováveis causas desses defeitos utilizando técnica não invasiva / não destrutiva.

7.7 Hipótese da Pesquisa

Para investigar as causas dos recalques e buracos existentes no pavimento da Rodovia, propomos utilizar o Radar de Penetração no Solo (GPR), equipamento de alta precisão, rapidez e com um diferencial de ser não-destrutivo. Através de imageamento do subsolo o equipamento será capaz de auditar o leito, a sub-base, a base e o revestimento onde houve a utilização de drenagem do terreno natural através de geomembranas, como também a utilização de estacas flutuantes nos encontros de algumas pontes compondo o agulhamento.

7.8. Consistência e Embasamento Técnico-Científico

A construção de aterros sobre solos moles sempre se constituiu num dos mais sérios problemas e desafios da engenharia geotécnica. A complexidade e diversidade das condições peculiares de cada local, como as que existem em aterros de grande extensão como o visto na Alça Rodoviária, já está presente na adoção dos parâmetros geotécnicos que expressam o comportamento do maciço, pela heterogeneidade e anisotropia exibida de ponto a ponto, razão pela qual sempre se opta estes parâmetros através de ensaios geotécnicos.

Uma via rodoviária constitui um pavimento que é definido como uma estrutura constituída por um sistema em camadas, assentes sobre a terraplenagem devidamente regularizada (sub-leito).

Quanto às condições estruturais do pavimento é necessário conhecer as características elásticas e geométricas das várias camadas que compõem o pavimento (GONTIJO et ali, 1994).

Segundo o DNER (1994d), a avaliação de pavimentos pode basicamente ser dividida em dois tipos: a avaliação funcional e a avaliação estrutural.

Na avaliação funcional são realizadas medições de irregularidades superficiais, de resistência à derrapagem, além de contagem de defeitos que aparecem na superfície de rolamento.

A avaliação estrutural é realizada para se conhecer as características das várias camadas que compõem o pavimento, quanto à sua resistência e deformabilidade sob a ação do tráfego, que são função das propriedades dos materiais e das camadas. (MEDINA et ali, 1997).

Segundo (CARDOSO, 1995), a avaliação estrutural de pavimentos é função de dois fatores: 1) dos métodos a serem utilizados; 2) da experiência do avaliador.

Neste contexto, torna-se de extrema importância a presença de profissional qualificado no processo de avaliação estrutural de um pavimento (PITTA e BALBO, 1998).

Os métodos de avaliação estrutural de pavimentos são classificados em ensaios destrutivos e ensaios não-destrutivos (HASS et ali, 1994).

Os ensaios destrutivos são realizados através de poços de sondagens abertos com auxílio de pá e picareta. Eles são situados nos bordos do revestimento do pavimento (GONTIJO, 1994). São removidas amostras das camadas do pavimento

para determinação, em laboratório, das suas características *in situ* Segundo (VILLELA e MARCON, 2001), além da amostragem destes materiais, são verificados, nos furos de sondagem: 1. As espessuras das camadas; 2. As condições dos materiais; 3. As eventuais deformações das camadas; 4. Os tipos de materiais; 5. As condições de umidade.

Os ensaios não-destrutivos possibilitam a avaliação das condições do pavimento sem danificá-los. A viga Benkelman é o aparelho mais divulgado para este fim. Geralmente, a avaliação estrutural de pavimentos é feita de ensaios não-destrutivos, por oferecer maior rapidez, segurança e acurácia na obtenção de resultados (CARDOSO, 1995).

Métodos alternativos têm surgido com a finalidade de avaliar a capacidade estrutural dos pavimentos. É exemplo o Radar de Penetração no Solo ou Georadar (MARGARIDO et alii, 1998; GONÇALVES e CERATTI, 1998). Este equipamento consiste num tipo de radar capaz de detectar estruturas e artefatos enterrados. O GPR, através de transmissão de ondas eletromagnéticas de alta frequência, permite o levantamento contínuo do sistema de camadas em estudo.

Baseado no princípio da propagação de ondas eletromagnéticas, o GPR possibilita a definição do perfil do pavimento através da emissão e captação de pulsos através de antenas que operam em alta frequência. A onda emitida é refletida quando encontra interfaces que separam camadas com propriedades eletromagnéticas diferentes.

A primeira etapa de uma investigação geotécnica consiste no estudo geológico da área através de mapeamento cartográfico, visita ao local e elaboração da descrição geológica do mesmo. Os estudos geológicos relativos a aterros sobre solos moles são descritos por ANTUNES (1990).

Durante a terraplenagem, que é uma das primeiras operações de preparo do leito estradal, um dos métodos mais utilizados para reforço de aterros é a execução de uma malha de colunas granulares compactas de areia ou brita na camada de argila, com o objetivo de atuarem como estacas relativamente rígidas, assentes na camada subjacente, e em condições de absorver grande parte da carga transmitida pelo aterro ao solo mole.

A colocação de reforço na interface aterro-fundação de argila mole tem como objetivo primordial a melhoria da estabilidade do conjunto aterro-fundação. Geotexteis e geogrelhas são os tipos de reforço mais utilizados na interface aterro-solo mo-

le. Entretanto outros tipos de reforço, (tiras metálicas), (ROWE e MYLEVILLE, 1988) são também utilizados, segundo PALMEIRA(1981).

Drenos pré-fabricados (ou geodrenos) tem comportamento em alguns aspectos diferentes dos drenos de areia.

7.8.1. Construção de Vias Rodoviárias

Pavimento Flexível

Pavimento é a estrutura constituída por diversas camadas superpostas, construída sobre o subleito, destinada a resistir simultaneamente a esforços horizontais e verticais, bem como melhorar as condições de segurança e conforto do tráfego de veículos.

Pavimento flexível é o pavimento cujas deformações, até um certo limite, não o levam à ruptura, constituído principalmente por materiais betuminosos. Poderá ser decomposto por diversas camadas, como subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento (DER-SP,2004).

Características da Construção

No projeto estrutural básico do pavimento, elaborado por VETEC(1997), foram adotados os seguintes parâmetros:

CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente) =10cm;

Base (concreções lateríticas) =10cm

Reforço do subleito = 20cm

Subleito= 20cm;

Entretanto para o projeto executivo , o Consórcio Muiraquitã, responsável pela construção adotou estes parâmetros:

Revestimento CBUQ = 5cm;

Base (solo laterítico + 20% de areia) 20cm com CBR>90%

Sub-base (solo laterítico) 20cm com CBR (California Bearing Radio) > 40%

Reforço do subleito (solo laterítico) 20cm com CBR>20% o que contraria o Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis do DNER (1981) atual DNIT). Para a estrutura em questão, seria indicado o revestimento de 10cm de CBUQ.

Técnicas de Monitoramento/Avaliação Estrutural

É conhecida como avaliação estrutural de pavimento o conjunto de procedimentos que determinam as respostas da estrutura quando sujeitas às cargas do tráfego, deformações e deflexões em determinados pontos do pavimento, de forma que seja possível verificar sua capacidade de resistir aos mecanismos responsáveis pela degradação do pavimento (RODRIGUES,1995).

7.8.2. Método do Georadar - GPR

A técnica do Radar de Penetração no Solo (Ground Penetrating Radar- GPR) oferece uma nova forma de investigação de condições geológicas e geotécnicas rasas. O radar produz uma onda eletromagnética de alta frequência (10-1000 MHz) que é transmitido ao solo, onde a propagação do sinal depende das propriedades elétricas dos materiais existentes. Mudanças das propriedades elétricas do meio geológico fazem com que parte do sinal transmitido seja refletido. O sinal refletido é detectado por um receptor onde é amplificado , digitalizado e armazenado , para ser processado e transformado em registro (radargrama).

A maioria dos sistemas pode operar em várias frequências, porém as frequências na faixa de 100 MHz a 1,5GHz são as mais comuns para o uso em estudos geotécnicos.

7.9. Metodologia

Os critérios para a escolha das áreas basearam-se evidências de trechos com problemas estruturais na Alça Viária. Decidiu-se pelos dois primeiros trechos de “aterro em consolidação”, assim chamados, ou seja trechos em contínua manutenção pelo SETRAN.

O imageamento foi executado nos dois trechos no sentido BR-316 > Ponte Guamá, usando sempre o acostamento da Via, previamente limpo e varrido, para o deslizar suave da antena no suporte de apoio. Experimentalmente foi utilizada a antena 80MHz apenas para definição da velocidade de propagação (parâmetro importante), inicialmente para o trabalho em epígrafe.

O processamento dos dados utilizou inicialmente o *software* Gradix e posteriormente, por razões técnicas, o programa canadense *RADAN for Windows*.

O processamento dos dados brutos no formato. DZT foram transformados em. DOC e mais tarde em JPG.

Um fluxo simplificado usado neste trabalho é apresentado a seguir.

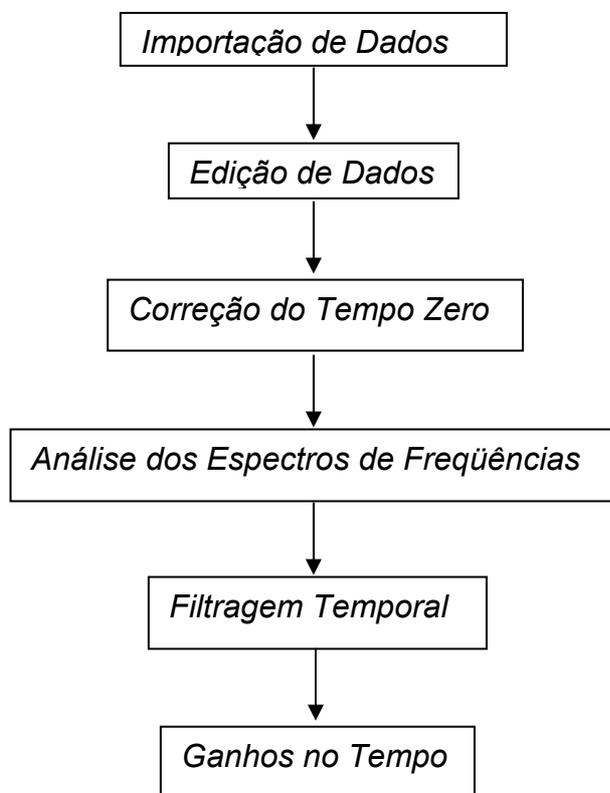


Figura 7.2 . Fluxograma Simplificado do Processamento

Um importante aspecto do projeto de imageamento GPR é o estabelecimento de um sistema de coordenadas. O uso de um sistema padrão para posicionar um registro é muito importante. Logo, é muito mais importante saber com exatidão onde foram capturadas as informações.

A obtenção da cartografia-base para apoio aos trabalhos de execução do imageamento GPR, utilizando pontos rastreados anteriormente (anexos) por DGPS com correções de fase, não só proporcionou a obtenção da malha de pontos de controle no sistema de referencia global, como a base para elaboração do primeiro mapa de precisão da Alça Viária.

Esta base cartográfica foi utilizada como marco fundamental para estabelecer o georeferenciamento dos diferentes perfis elaborados com o GPR, de tal forma a destacar um contraste entre os sistemas, nos quais o parâmetro base é a planta topográfica. Além disso, esta cartografia de precisão é o instrumento adequado para realizar a calibração e posterior aplicação dos resultados obtidos com o GPR.

A planta topográfica foi executada a partir de um conjunto de 10 vértices estabelecidos nas imediações. Foram construídos monumentos permanentes (marcos geodésicos) no sentido BR-316 e Ponte Rio Guamá (ver anexos), onde a topologia do terreno permitiu.

Conhecidas as coordenadas dos vértices no sistema de referência WGS-84, o sistema de referência SAD-69, com projeção UTM, nos permite obter os parâmetros de transformação de um sistema de referência para o outro. As alturas obtidas nestes pontos rastreados foram alturas ortométricas, como consequência da aplicação do modelo geoidal.

Os pontos foram integrados através da Projeção Transversa de Mercator (UTM), com origem no Equador terrestre 10.000.000m e 500.000m no MC=51° (meridiano central do fuso) para posicionamento correto dos trabalhos realizados.

As altitudes dos pontos levantados foram transportadas através de nivelamento trigonométrico, usando estação total Topcon a partir do RN-IBGE de identificação N°841-X, homologado com altitude igual a 18.6115mm de coordenadas LAT1° 24'13" Sul e LONG 48°25'49" W . Os pontos coordenados foram trasladados a partir dos Marcos SAT-2A e SAT-2, obtidos através de rastreamento DGPS. O trabalho se insere na área identificada como: SB-22-X-D-III. Os perfis topográficos foram produzidos a partir do levantamento topográfico executado nos dois trechos estudados. A escala horizontal foi 1:1000 e a vertical 1:100, ou seja, exagero vertical de 10X. As curvas de nível foram confeccionadas com equidistância gráfica de 1m, como preconiza a ABNT (1 milésimo da escala horizontal) para levantamentos topográficos. O meridiano utilizado no mapa é o da quadricula, ou melhor, corrigido dos efeitos da declinação magnética e convergência meridiana. As deformações angulares, lineares e superficiais foram consideradas nas operações de cálculo.

Os perfis radargramétricos obtidos com o GPR representam no eixo dos X, as distâncias, e no eixo dos Z os tempos duplos (ida e volta) em nanosegundos ($1\text{ns} = 10^{-9}\text{s}$), ou após a transformação em $z = vx2xt/2$ (equação 6.1), profundidade atingida em metro. O processamento e definição dos maciços de aterro sobre o solo mole foram avaliados e cubados utilizando nivelamento trigonométrico assim como, o pavimento da VIA.

Durante a pesquisa realizada na Alça Viária, Marituba (Pa) foram utilizados um equipamento GPR *SIR3000* da GSSI, com as seguintes características: resisten-

te, leve e portátil; com tela de alta resolução que permite leitura clara, a luz dia; flexível-compatível com todas as antenas da GSSI; bateria interna; portas de comunicação USB e RS-232. Número de canais: um; capacidade de memória: 1GHz; aquisição de dados formato em formato DZT; intervalo de tempo: 0-8.000ns; filtros:vertical, passa baixo,e passa alto; IIR e FIR. Horizontal. Dimensões: 31,5cmx22,0cmx10,5cm. Peso:4,1kg incluindo bateria.

A segunda campanha experimental do trabalho foi executada com a antena de 200MHz buscando maior penetração no subsolo raso. Horizontes estratigráficos ficaram então melhor definidos.

O imageamento efetuado sempre no acostamento da Alça Viária, sentido BR-316 > Ponte Rio Guamá, foi executado em 2 trechos: o primeiro denominado T1 a partir da estaca 326, com alinhamentos de 50m, extensão total de 175metros lineares nas direções azimutais $080^{\circ}12'35''$, $087^{\circ}20'38''$ e $096^{\circ}01'37''$. O segundo trecho identificado como T2 com 4 alinhamentos de 50m cada, iniciando na estaca 292, encerrando na estaca 302. As direções do imageamento são $091^{\circ}18'47''$, $091^{\circ}13'59''$, $091^{\circ}08'16''$ e $091^{\circ}12'52''$ Az, respectivamente.

Resultados

Área1 imageada

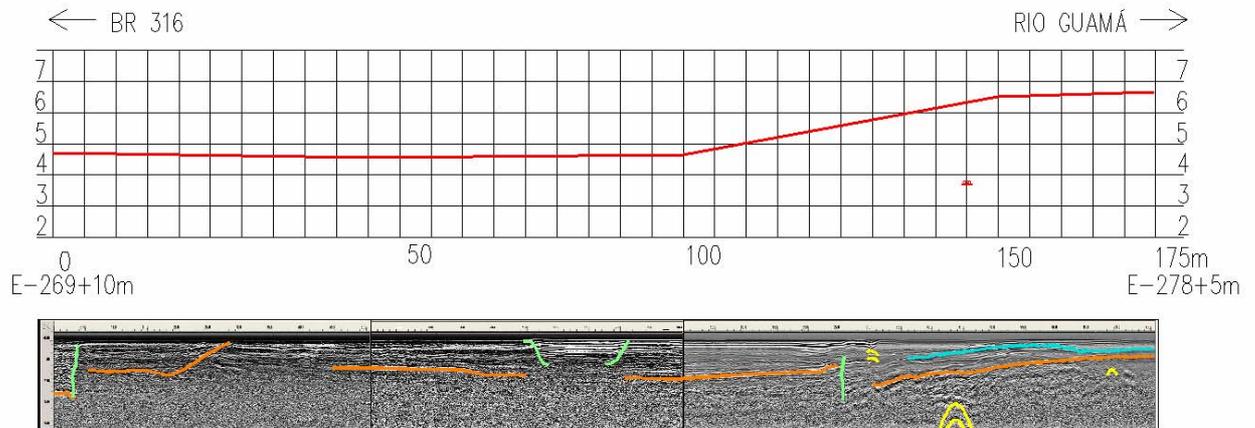


Figura 7.3. Em cima o perfil topográfico longitudinal do primeiro trecho investigado com 175 m de comprimento (T1). Em baixo, a seção GPR AV1-200 obtida com antena de 200 MHz e processada em Gradix.

O primeiro trecho imageado apresentava no pavimento deterioração precoce (defeitos) na sua estrutura. Radargramas obtidos neste trabalho acadêmico mostram atenuação rasa, o que sugere nível freático bem superficial. Os horizontes estratigráficos apresentados são do tipo semi-horizontais com baixo gradiente ora mergulhando em aclave, ora em declive. A antena de 200MHz foi a que melhor respondeu aos ensaios a que foram submetidas as áreas de pesquisa. A de 80MHz, primeiro momento, foi ensaiada apenas para definir o parâmetro velocidade de propagação, que neste opúsculo é de 100m/s. No trecho 1 (T1) foi efetuada a correção estática ou seja, a correção topográfica com a inserção das altitudes no perfil radargramétrico. O trecho em questão, por ocasião do aterro, embora agulhado (para conter fuga horizontal de materiais), sofreu ruptura de solo prestes a ser inaugurado e como solução emergencial foi aliviado o aterro e construídas bermas de equilíbrio para neutralizar os efeitos da ruptura. Durante esta pesquisa, o trecho em destaque, sofreu manutenção em dois momentos diferentes, sendo recuperados a estrutura e o revestimento em CBUQ.

É facilmente observável no Radargrama AV-1-200, o efeito de um curso d'água nas reflexões da posição (distancia 173m) do perfil topográfico T1.

← BR 316

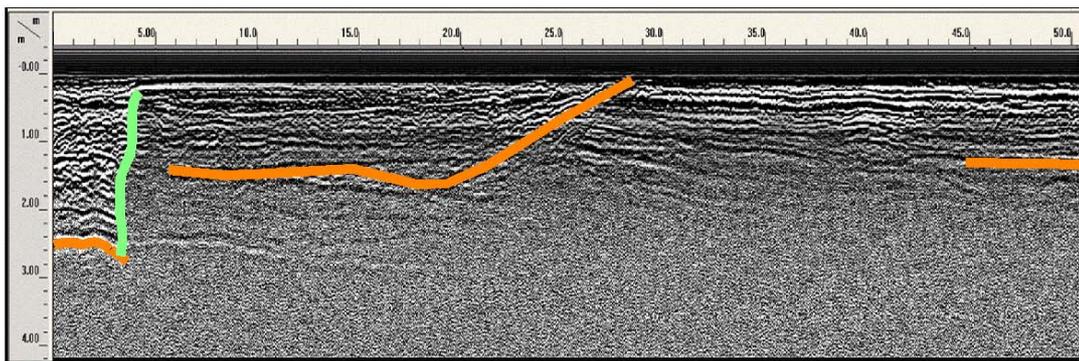
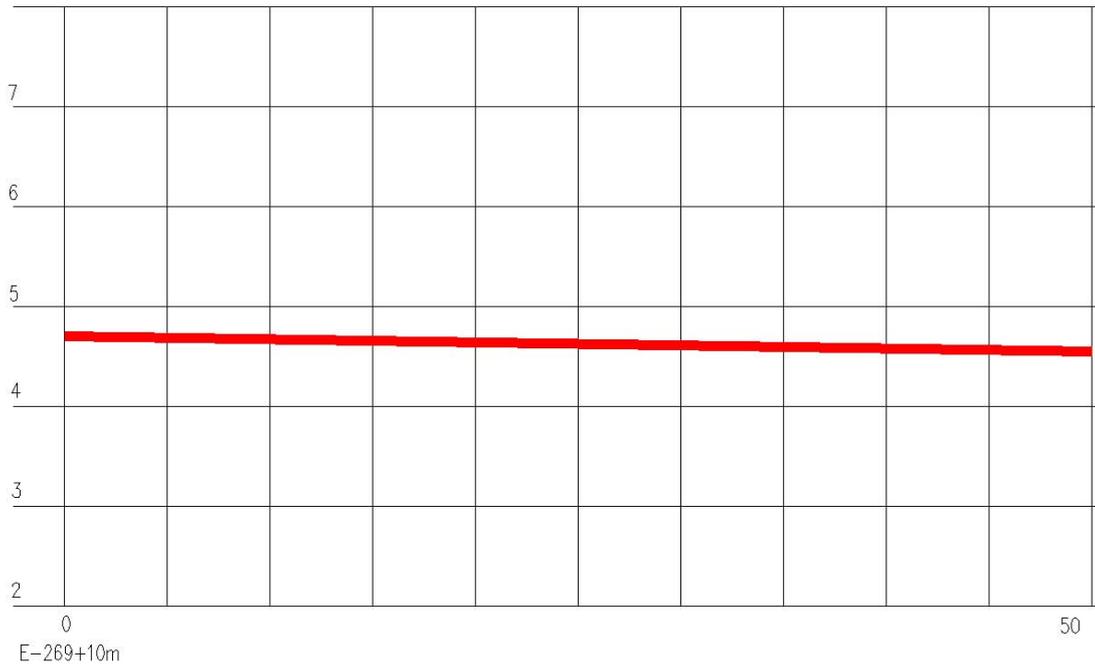


Figura 7.4 mostrando na parte superior perfil topográfico longitudinal de 0 a 50m. Início do primeiro trecho em Acompanhamento da Via pela SETRAN. Em baixo o imageamento correspondente ao alinhamento executado com antena GSSI de 200MHz.

← BR 316

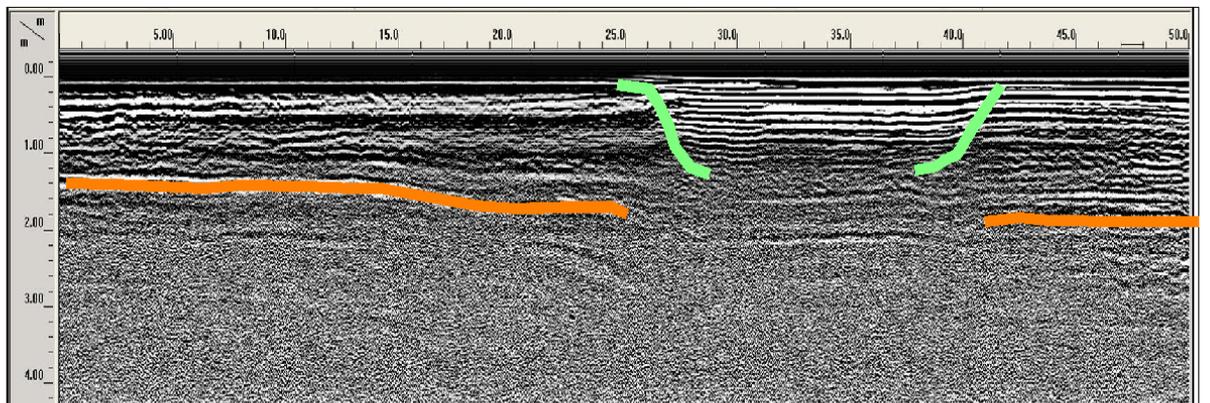
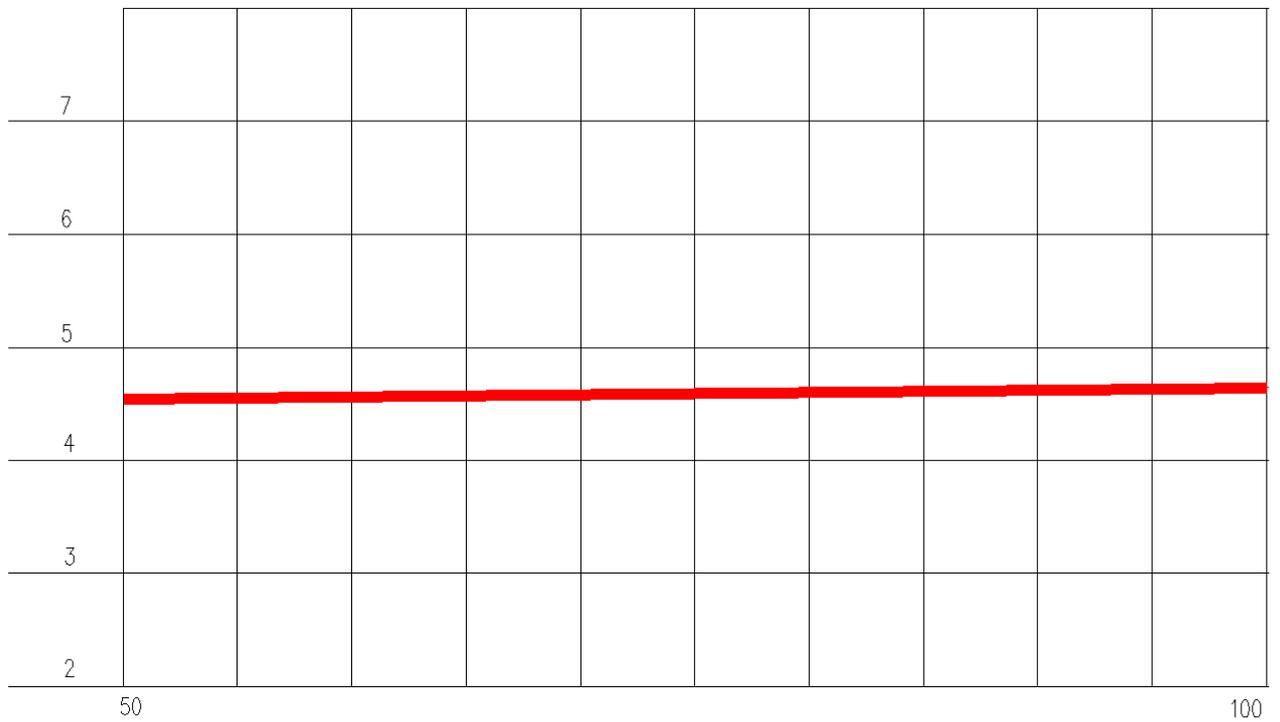


Figura 7.5 mostrando na parte superior perfil longitudinal topográfico de 50 a 100m. Primeiro trecho em Acompanhamento (aterro em consolidação) da Via pela SETRAN. Em baixo o imageamento correspondente ao alinhamento executado com antena GSSI de 200MHz.

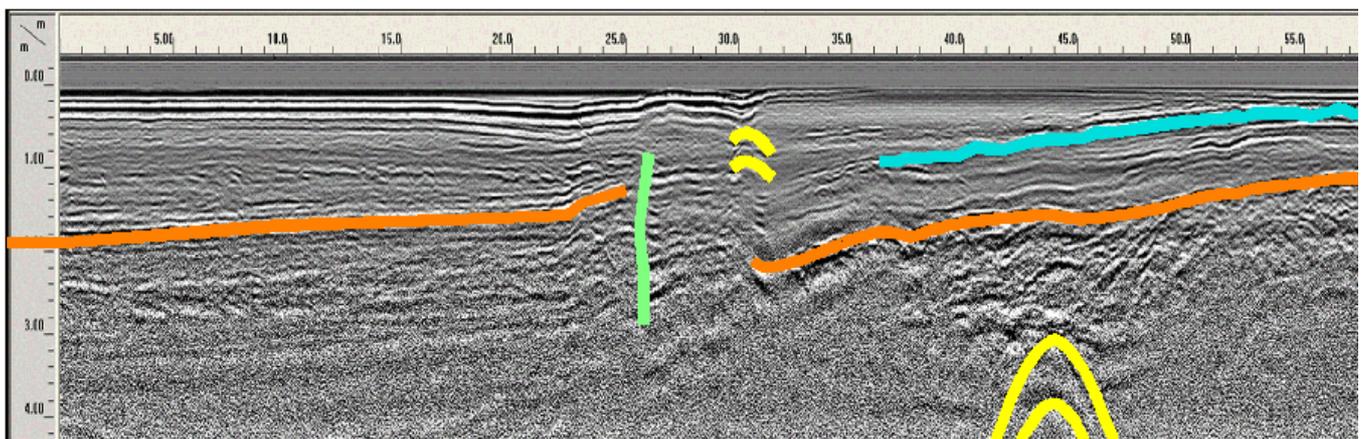
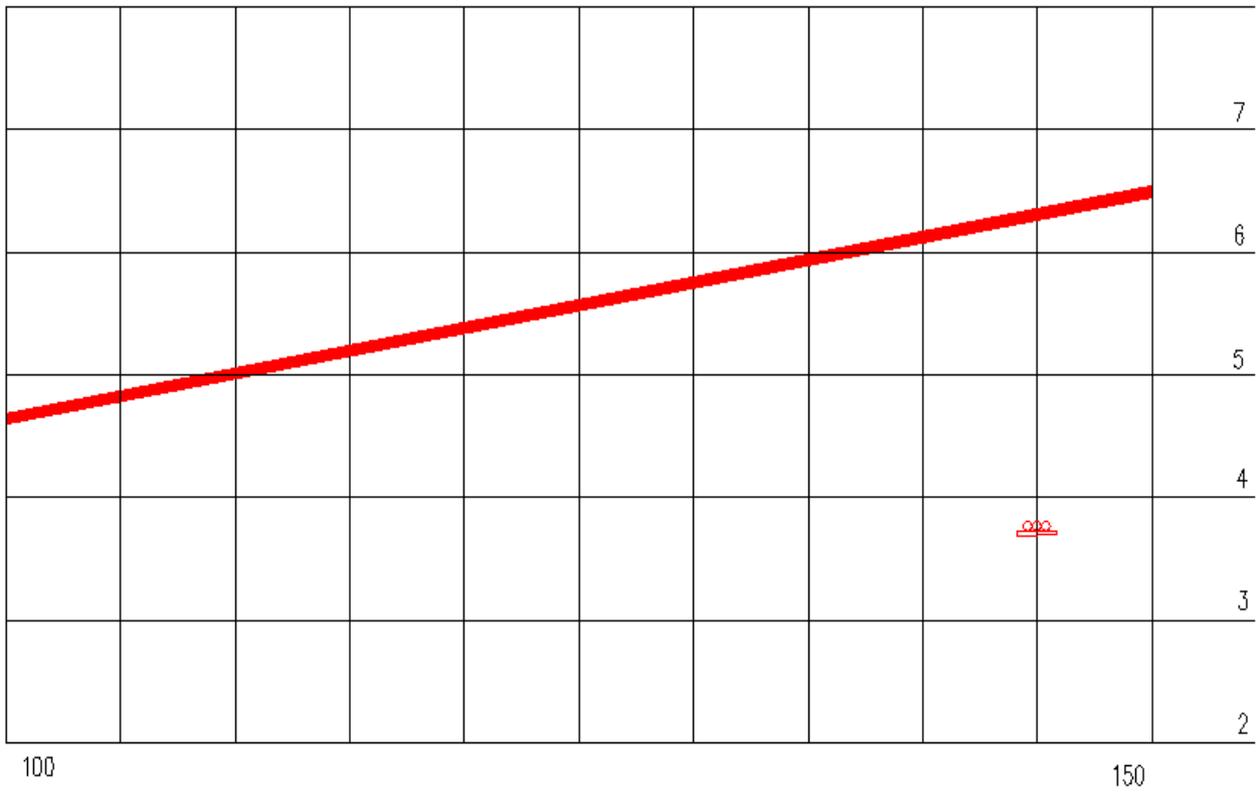


Figura 7.6 mostrando na parte superior perfil topográfico longitudinal de 100 a 150. Em baixo o imageamento correspondente ao alinhamento executado com antena GSSI de 200MHz.

RIO GUAMÁ →

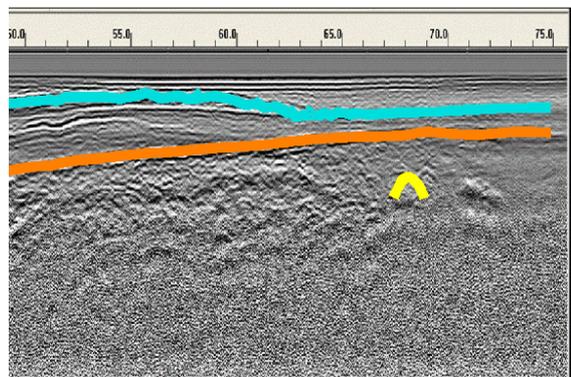
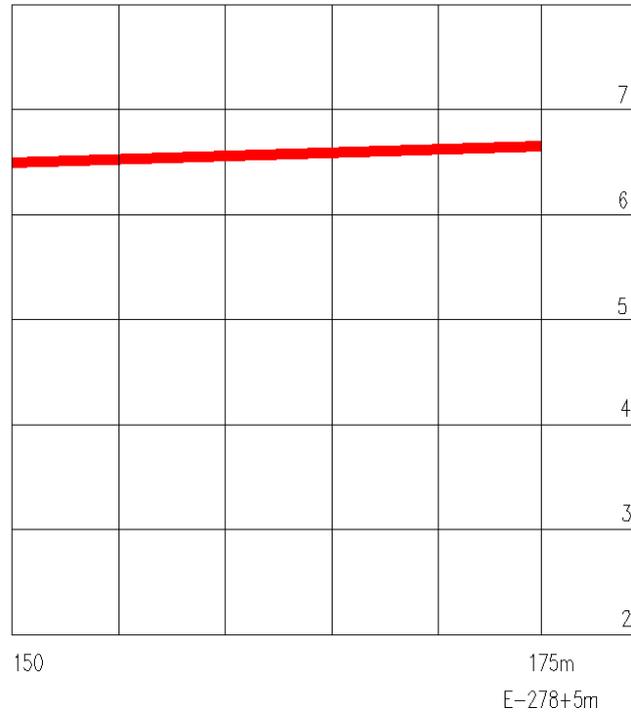


Figura 7.7 mostrando na parte superior perfil longitudinal topográfico de 150 a 175m. Final do primeiro trecho em Acompanhamento(aterro em consolidação) da Via pela SETRAN. Em baixo o imageamento correspondente ao alinhamento executado com antena GSSI de 200MHz.

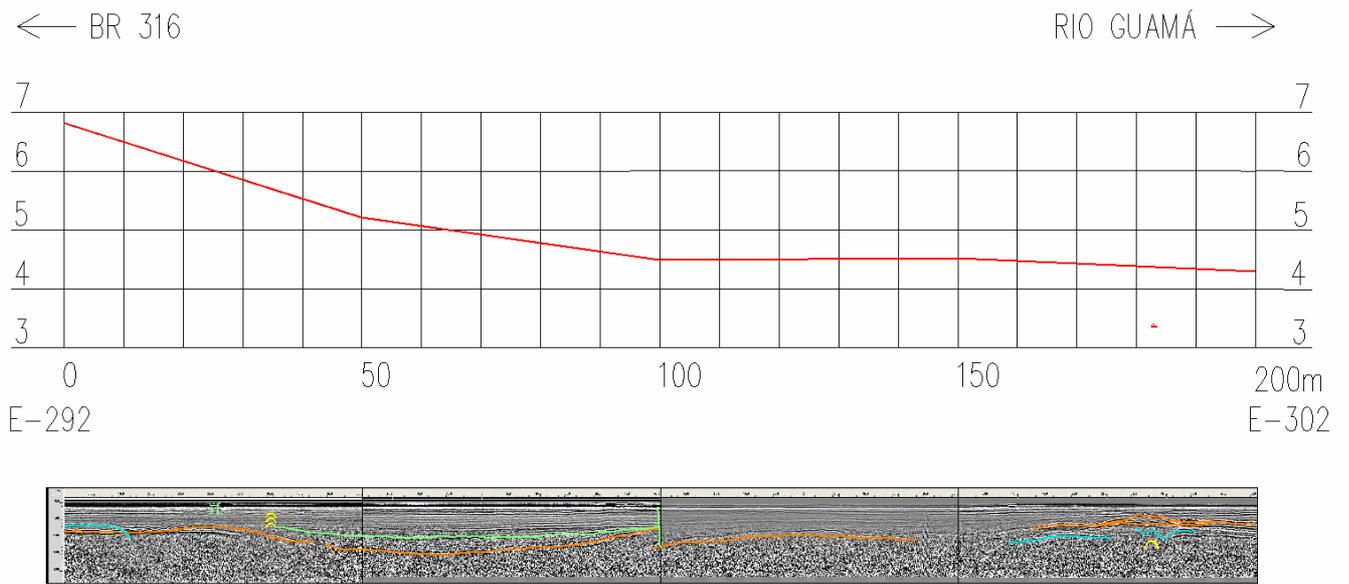


Figura 7.8 mostrando na parte superior perfil longitudinal topográfico de 0 a 200m. Início do segundo trecho em Acompanhamento(aterro em consolidação) da Via pela SETRAN. Em baixo o imageamento correspondente ao alinhamento executado com antena GSSI de 200MHz.

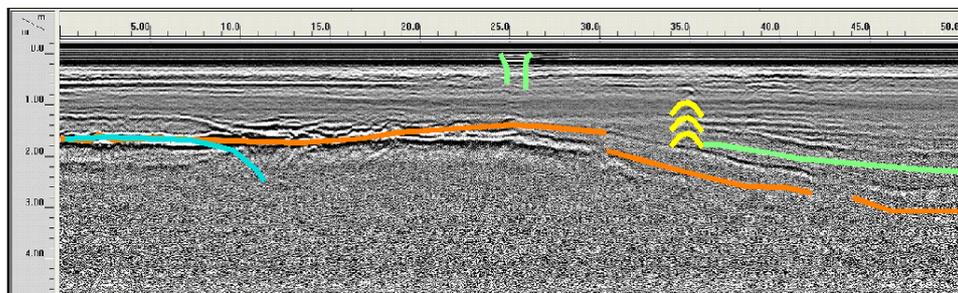
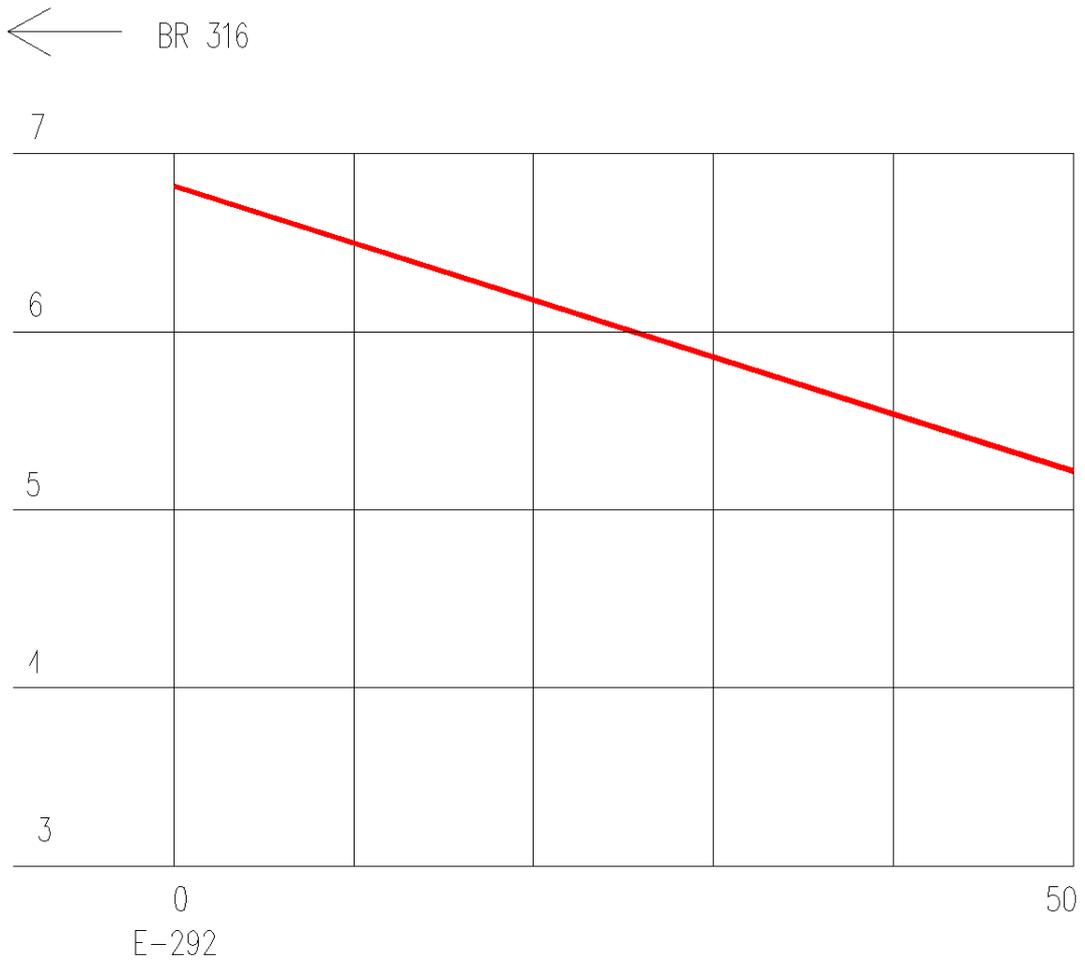


Figura 7.9 mostrando na parte superior perfil longitudinal topográfico de 0 a 50m. Início do segundo trecho em Acompanhamento(aterro em consolidação) da Via pela SETRAN. Em baixo o imageamento correspondente ao alinhamento executado com antena GSSI de 200MHz.

← BR 316

7

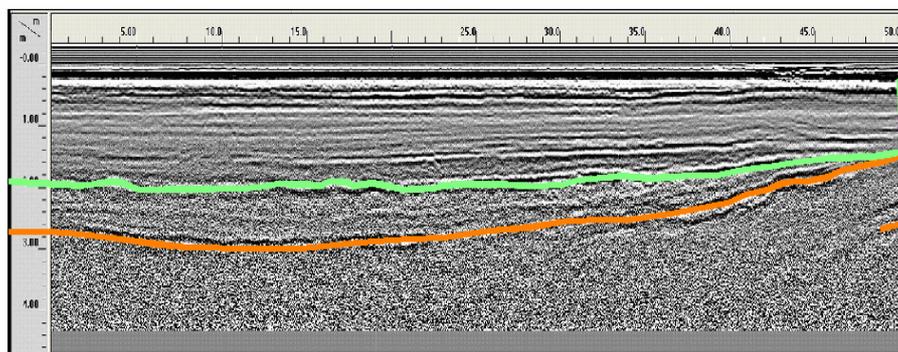
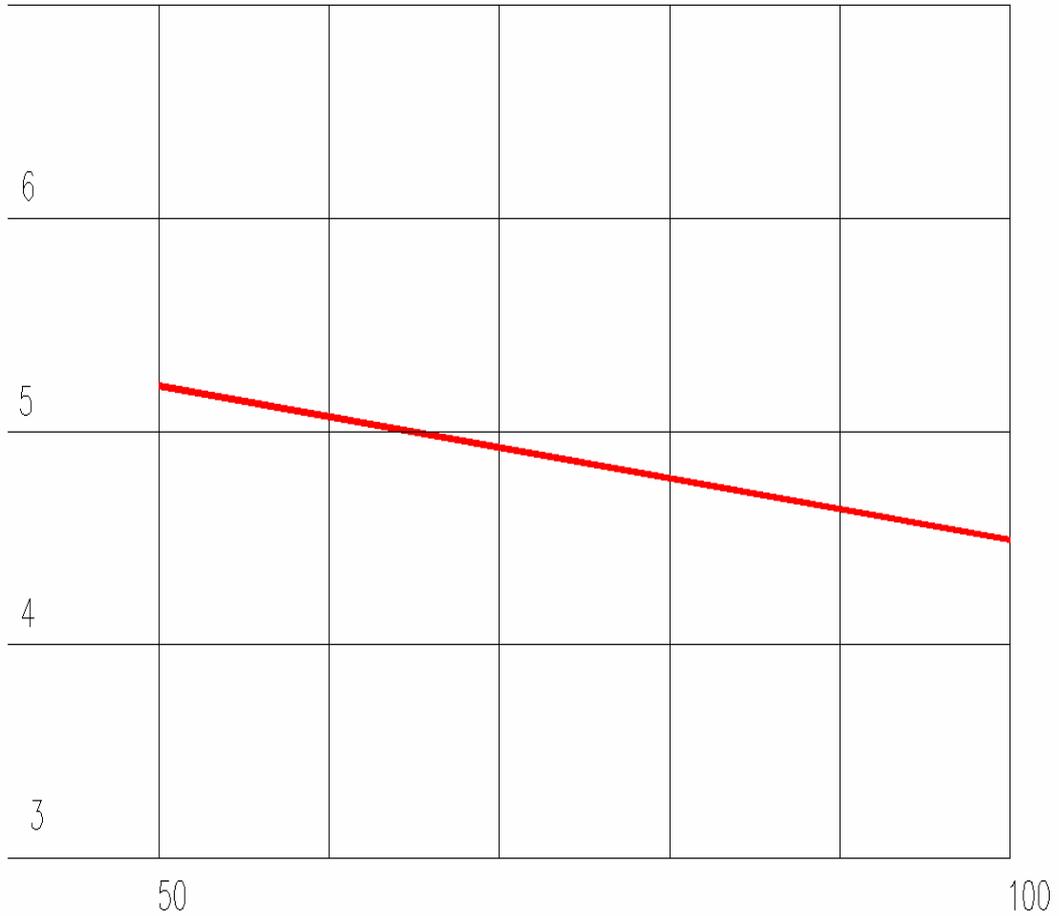


Figura 7.10 mostrando na parte superior perfil longitudinal topográfico de 50 a 100m. Início do segundo trecho em Acompanhamento(aterro em consolidação) da Via pela SETRAN. Em baixo o imageamento correspondente ao alinhamento executado com antena GSSI de 200MHz.

← BR 316

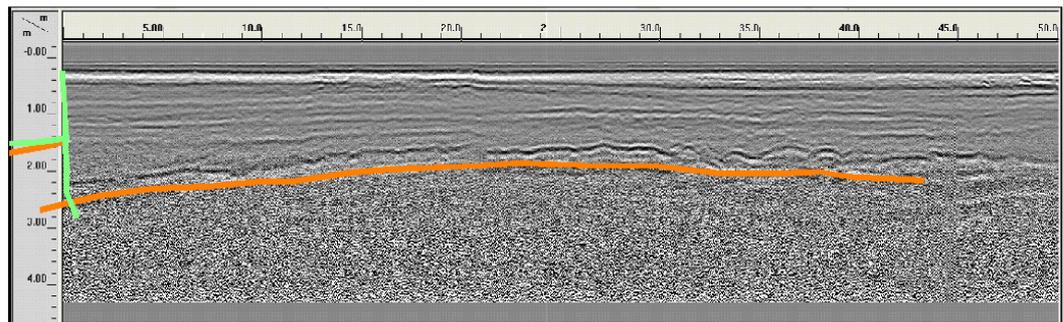
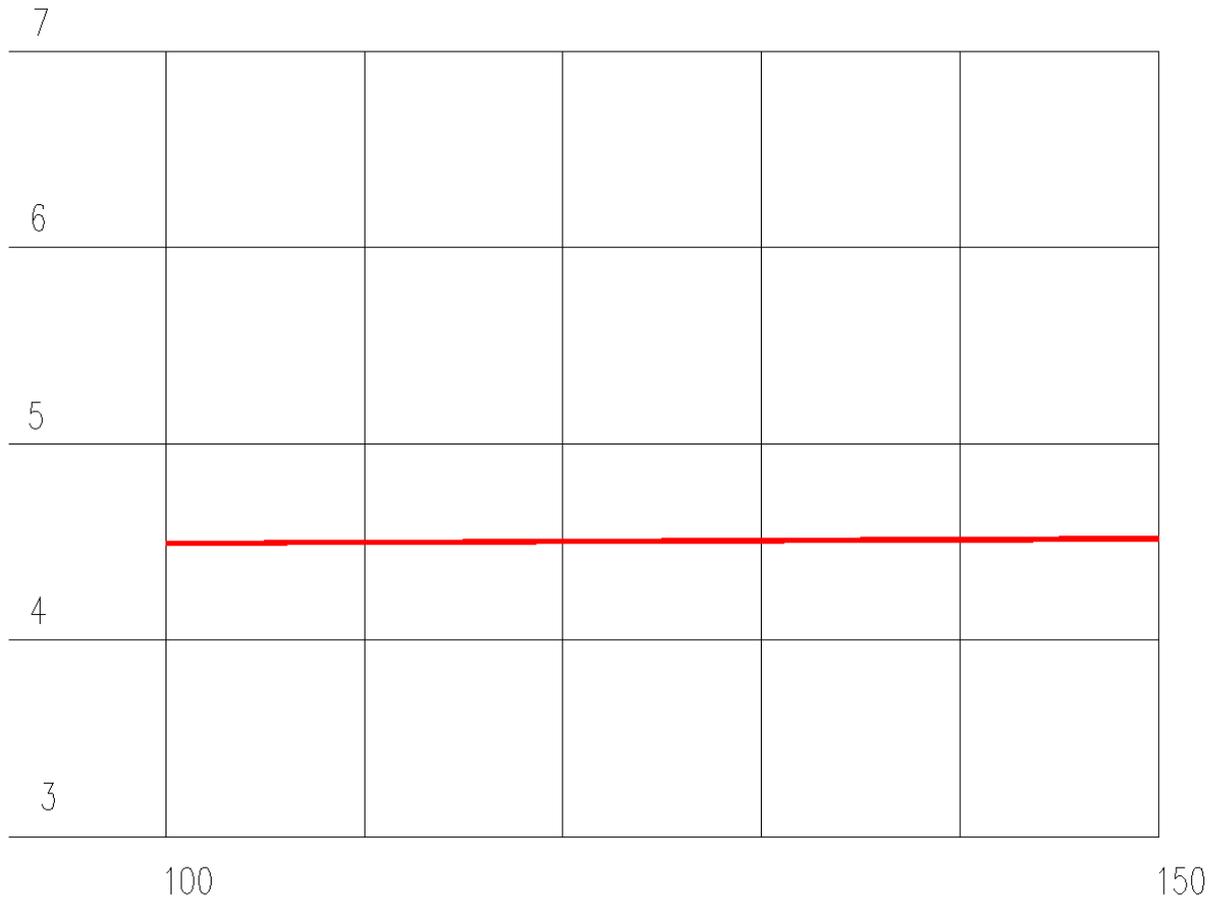


Figura 7.11 mostrando na parte superior perfil longitudinal topográfico de 100 a 150m. Início do segundo trecho em Acompanhamento(aterro em consolidação) da Via pela SETRAN. Em baixo o imageamento correspondente ao alinhamento executado com antena GSSI de 200MHz.

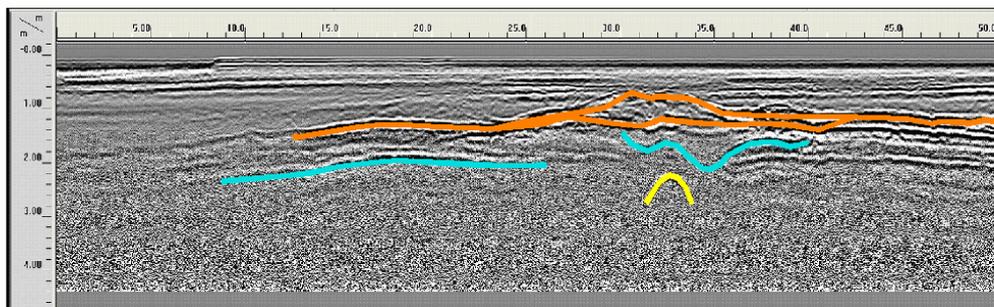
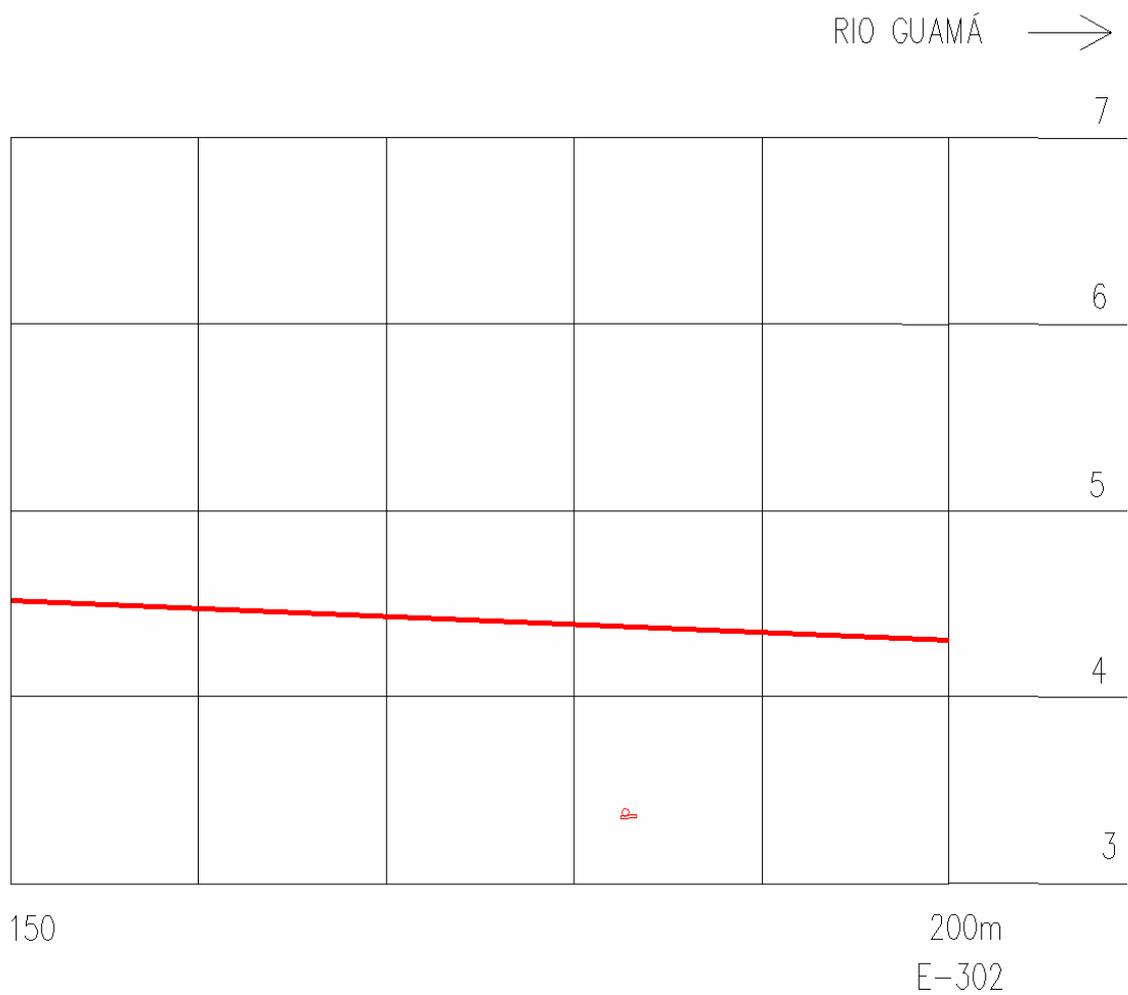


Figura 7.12. mostrando na parte superior perfil longitudinal topográfico de 150 a 200m. Início do segundo trecho em Acompanhamento(aterro em consolidação) da Via pela SETRAN. Em baixo o imageamento correspondente ao alinhamento executado com antena GSSI de 200MHz.

Os dois locais pesquisados são apresentados na Figura 7.111 e 7.12. As coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) dos perfis GPR, obtidas através de levantamento DGPS(*diferencial global positioning system*), são apresentados abaixo.

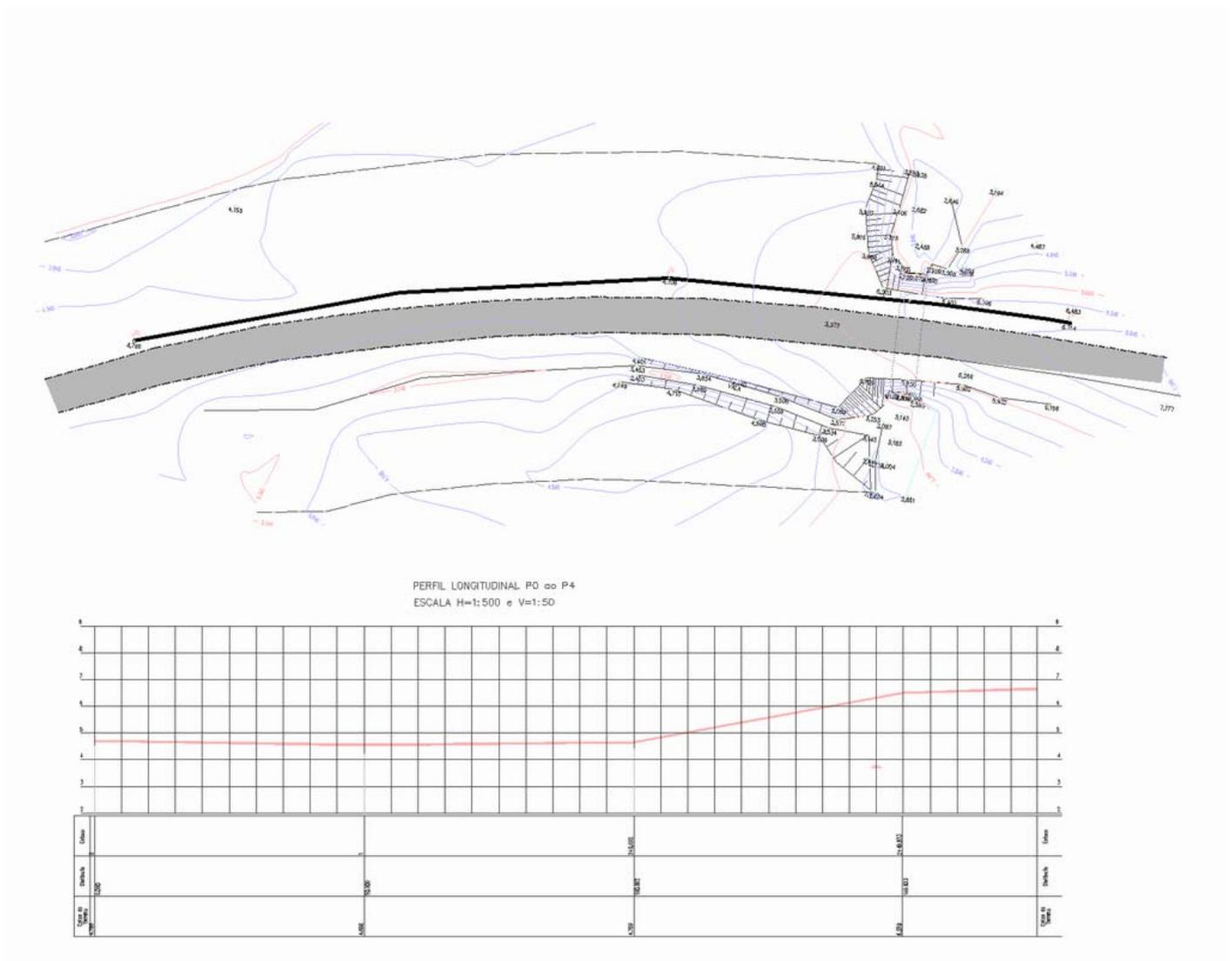
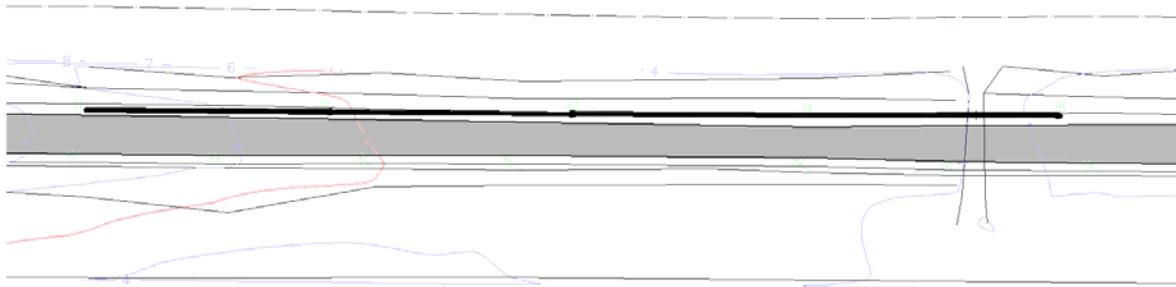


Figura 7.13 – Mapa da área 1 mostrando na parte superior o relevo da área pesquisada. O traço do radar aparece em negrito. Em baixo, o perfil longitudinal com 175m de comprimento.



MAPA - ÁREA 2

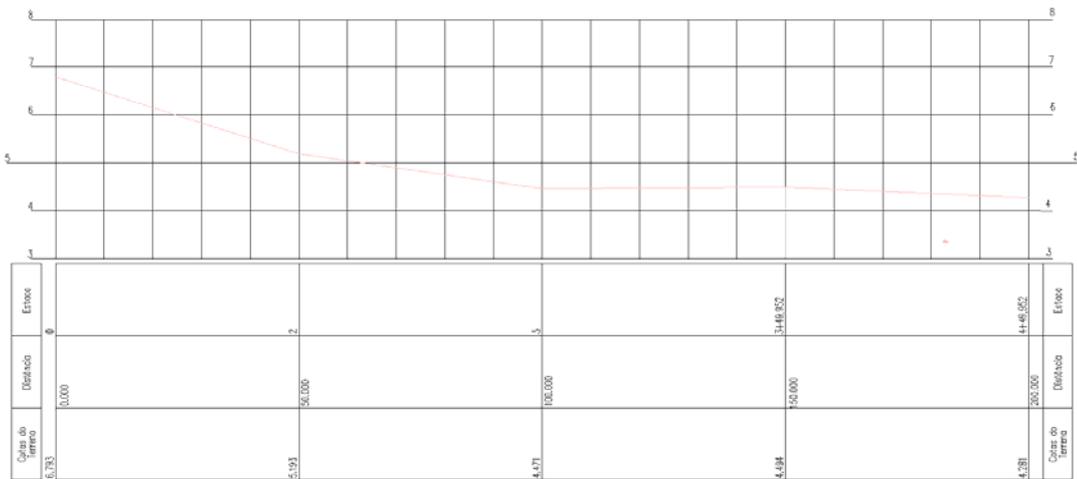


Figura 7.14 – Mapa da área 2 mostrando na parte superior o relevo pesquisado. O traço do radar aparece em negrito. Em baixo, o perfil longitudinal com 200m de comprimento.

Tabela 7.1 Coordenadas topográficas UTM dos Perfis GPR – Área I e II.

Área 1	Pt	Norte(m)	Este(m)
Estaca 269+10m	P0	9.844.923,0064	796.079,1140
	P1	9.844.931,4990	796.128,3306
	P2	9.844.933,8186	796.178,3292
Estaca 278+05m	P3	9.844.928,5837	796.227,9115
Área2			
Área2	Pt	Norte(m)	Este(m)
Estaca 292+00m	J1	9.844.797,5775	796.346,8939
	J2	9.844.796,4324	796.396,8506
	J3	9.844.795,3566	796.446,8363
	J4	9.844.794,3643	796.496,8022
Estaca 302+00m	J5	9.844.797,5415	796.346,9154

CONCLUSÕES

Esse trabalho não pretende fornecer uma opinião definitiva a respeito do assunto, mas sim ressaltar alguns pontos que devem ser considerados quando da utilização da ferramenta GPR em avaliações de aterro executado sobre solos moles.

A ferramenta GPR, sem dúvida, apresenta recurso poderoso para avaliação de pavimentos, pois possibilita, de forma indireta, a análise das condições estruturais de uma via rodoviária. No entanto, sua aplicação deve ser feita cautelosamente, visto que mesmo para os equipamentos mais sofisticados aparecem limitações intrínsecas quando comparadas com técnicas invasivas.

Este trabalho apresentou mais uma forma de emprego do radar na avaliação estrutural de pavimentos flexíveis em um intervalo de freqüências considerável. O trabalho foi objeto de vários ensaios experimentais.

Os resultados mais importantes podem ser resumidos nos seguintes pontos:

1. Os parâmetros eletromagnéticos utilizados foram analisados em seu contexto local, evidenciando adequabilidade para aplicação nas operações de campo na região.
2. Os parâmetros permeabilidade (ϵ), permeabilidade magnética (μ), e condutividade (σ), são importantes na caracterização eletromagnética dos meios mas, carecem de parâmetros adaptados à pedologia local;
3. É notório na altura do ponto 28m do perfil GPR AV1-200, ondulações (elevações e depressões) na sub-base, causados talvez por erosão e/ou percolação;
4. O grau de compactação do CBUQ não pode ser avaliado com as antenas disponíveis;
5. Fendas (vazios), ou lentes de matéria úmida, não foram detectados nesta pesquisa;
6. A opção de reforço do subsolo utilizando geotexteis, membranas, agulhamento com capitel, para conter o aterro, não conseguiu resultado satisfatório. Uma comprovação deste fato é a implementação de bermas de equilíbrio nas duas áreas imageadas com GPR;
7. As antenas GPR disponíveis, e utilizadas neste trabalho (200 e 400MHz), foram insuficientes para detalhar a camada que reveste o pavimento. Antenas nominalmente maiores precisam ser testadas;

8. Outro ponto a ponderar na interpretação dos radagramas é a proximidade do nível freático à superfície aflorante, conjuntamente com a constituição do solo que, na área, apresenta substrato argiloso orgânico.
9. Comparando medidas obtidas usando antenas com diferentes frequências, os registros mostram GPR anomalias nos pontos em que a observação direta detecta defeitos no pavimento.
10. Com algumas limitações, considera-se que a técnica GPR pode ser aplicada no controle estrutural de pavimentos flexíveis observando sempre que a intervenção direta no campo é indispensável para correlação de informações geotécnicas-geodésicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M.S.S., 1984. *Stage Constructed Embankments on Soft Clays*. Tese de Dsc, Universidade de Cambridge, Inglaterra. ANNAN, A. P., S.W. Cosway y T. Sigurdsson,1994.*GPR for snow pack water content*. Proceedings of the fifth international conference on ground penetrating radar. Vol. 2 Canada. Pags.: 465-475.

ANNAN, A.P. e J.L. Davis, 1976. *Impulse Radar sounding in permafrost*. Radio Science. Volume II. Number 4.Pags: 383-394.

ANNAN, A. P.,1992.*Uses and techniques of ground penetrating radar in near-surface geophysics*.*Workshop Notes*: Society of Exploration Geophysicists, Sensor & Software Inc.,110pp.1992

ANTUNES ,F. 1990.*Aspectos Geológicos e Geomorfológicos*. Cap. 4 do Manual de Projetos e Execução de Aterros sobre solos Moles. P. 49-68, DNER/IPR.

ARAÍ, M.; TRUCKENBRODT, W.; NOGUEIRA, C., R.; GÓES, A, M.; ROSSETTI, D., F.; 1992. *Novos Dados sobre a Estratigrafia e Ambiente Deposicional dos Sedimentos Barreira, NE do Pará*. Anais do IV Simp. de Geol. da Amazônia, SBG, Belém, 3 p.

ARCONE, S. A.,1996. *High-resolution of glacial ice stratigraphy: A ground-penetrating radar study of Pegasus Runway, McMurdo Station, Antarctica*. Geophysics, 61(6). Pags.: 1653-1663.

BALANIS, C.A., W.S. Rice y N.S. Smith, 1976. *Microwave measurements of coal*. Radio Science.Volume 11.Number 4. Pags: 413-418.

BARBOSA, G.V. et alii. 1974. *Geomorfologia da folha SA-22-Belém*. In : Brazil. Projeto RADAM.

BOX, George E. P., Wililam G. Hunter y J. Stuart Hunter, 1988. *Estatística para investigadores. Introducción al diseño de experimentos, análisis de datos y construcción de modelos*. Ed. Reverté. ISBN: 84-291-5041-2. 675páginas.

BREKOVSKIKH, L.M., 1973.*Waves in layered media. Applied mathematics and mechanics*. Vol: 16. Ed. Academis Press Inc. New York. 483 Pgs.

BRIGHAM, O., 1974. *The fast Fourier transform*. 320 pgs.

CABRERA, José Manuel, Fernando Jesus Lopez, y Fernando Agulló López., 1993. *Óptica eletromagnética* .Ed: Addilson-Wesley iberoamericana.256pgs.

CAI, Jun e George A. Mc MECHAN. 1995. *Ray-based synthesis of bistatic ground penetrating radar profiles*. Geophysics, vol. 60, N,1(jan-fev,1995. pag 87-96).

CARCIONE, José M. e Favio Cavallini. 1996. *Ground penetrating radar: Wave theory and numerical simulation in lossy anisotropic media*. Geophysics, vol61,N 6(nov-dez, 1996). Págs 1664-1677.

CARDAMA Aznar, Ängel, Lluís Jofre Roca, Manuel Rius Casals, Jordi Romeu Robert y Sebastián Blanch Boris, 1993.*Antenas*. Ediciones UPC. Pgs.: 550.

CARDOSO, S. H. (1995). *Faixas de Módulos Dinâmicos (elásticos) Obtidos por Retroanálise*. Durante Sete Anos. In: 29ª. *Reunião Anual de Pavimentação* .V. 2, pp.377-401,Cuiabá,MG, Brasil.

CARMICHAEL, R.S., 1990. *Practical handbook of physical properties of rocks and minerals*.Ed. CRC Press. 741 pgs.

CASPER, David A. e K.J. Samuel Kung. 1996. *Simulation of ground penetrating radar in a 2D soil model*. Geophysics, vol61, N.4(jul-ago). Pgs 1034-1049.

CERATTI, J.P. *Emprego de Deflectógrafo Digital (Viga Benkelman Eletrônica) na Monitoração do Pavimento*. In 32ª. *Reunião Anual de Pavimentação*.V 2 pp987-995,Brasília,DF, Brasil.

CERRATI, J. A P., 1991,"Estudo do Comportamento a Fadiga de Solos Estabilizados".16ª *Reunião Anual de Pavimentação*, ABPV, Olinda, Pernambuco, Brasil.

COLE, K.S. e R.S. Cole.1941. *Dispersion and adsorpcion in dielectrics,I, alternating current characteristics* .Journal of Chem. Phys., vol 9. Pags 341-351. Dimensions.Geophysics,vol 62,N.1 (mar-abril,1997).

COLE, K.S. y R.S. Cole. 1941. *Dispersion and adsorption in dielectrics, I, alternating current characteristics*. Journal of Chem. Phys, vol. 9. Pgs: 341-351.

CONYERS, Lawrence B. y Dean Goodman, 1997. *Ground-Penetrating Radar. An introductions for archaeologists*. Ed. Altamira Press. Walnut Creek. California(USA). 232 pgs.

COOK, J. C., 1960. *Proposed monocytle very-high-frequency radar for air-borne ice and snow measurements*. AIEE comm. Electron., 51. Pgs: 588-594.

DAVIS, J.L. y A. P. ANNAN,1989. *Ground – penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy*. Geophysical Prospecting, 37(5).Pags.: 531-551.

DNER PRO 269/94 (1994d) *Procedimento- Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis* .Rio de Janeiro.

DNER, 1996, “Manual de Pavimentação”, IPR/DNER/ABNT ,Publicação 697, 2º

DNER, 1997, “Especificações Gerais para Obras Rodoviárias do DNER”,

DOBRIN, Milton B. y Carl H. Savit, 1988. *Introduction to Geophysical Prospecting*. 4ª edicao. Ed. Mc Graw-Hill. 867 paginas .

DUKE, S.K., 1990. *Calibration of ground penetrating radar and calculation of attenuation and dielectric permitivity versus depth*. M.S. Thesis. Colorado School of Mines(USA). 236 Pgs.

EVANS, S., 1965. *Dielectric properties of ice and snow: a review*. Journal of Glaciology, 5(42). Pgs. : 773-792.

FAN, Guo-Xin y Qing Huo Liu, 1998. *A 3D PML-FDTD Algorithm for simulating ground-penetrating radar on dispersive earth media*. Proceedings of the seventh international conference on ground-penetrating radar. Larence (Kansas), USA. Pags.: 579-584.

GARCIA , Francisco.1997. *Aplicaciones de la técnica geofisica de prospección por geo-radar, englaciologia e ingenieria civil*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Espanha. 219 pgs.

GEIPOT; 1978. *Acesso Viário ao Novo Porto do Pará – Sondagens das Travessias*. GEIPOT, Belém, 36 p.

GLOVER, J.M., 1987. *The use of sub-surface radar for shallow site investigation*. Ph.D. Thesis. Kings College. University of London. U.K.415 Pgs.

GONCALVES, F.P. e CERATTI(1998). *Utilização do Ground Penetration Radar na Avaliação de Pavimentos*. In 31^a. Reunião Anual de Pavimentação.São Paulo.SP

GONTIJO, P.R.A et al.1994. *Metodologias Brasileiras para Avaliações das Características Funcionais e Estruturais de Pavimentos Rodoviários*.Estado de Arte.In 28^a. Reunião Anual de Pavimentação. Belo Horizonte. MG.

GOODMAN, Dean, Yasushi Nishimura, R. Uno y T. Yamamoto, 1994. *A ground radar survey of medieval kiln sites in Suzu City, Western Japan*. *Archaeometry*, 36. Pgs.: 317-326.

GREENHOUSE, John P.1996.*Aplicações de Metodologias Geofísicas em Estudos Ambientais e Geotécnicos*. Rio Claro,SP.1996

HAENI, F.P., Gary Placzec y R.E. Trent, 1992. *Use of ground-penetrating radar to investigate refilled scour holes at holes bridge foundations*. IV int. Conf. On GPR. Geological Survey of Finland, special paper 16. Pgs. 285-292.

HÄNNINEN et alii. 1992. *Ground penetrating radar*. Geophysical Society Research Methods.

HÄNNINEN,Pauli. 1992. *Application of ground penetrating radar and radio wave moisture probe techniques to peatland investigations*. Ed the Finnish Geotechnical Society. Londres 64 pgs.

HASS, R., Wall., J., E Carroll, R.G., “Geogrid Reinforcement of Granular Bases in Flexible Pavements”.1994. Florida, Publishing Company.

HASTED, J.B.1973. *Aqueous dielectrics*. Chapman e Hall,Londres.

HAYAKAWA, H. e Kawanaka.1998. *Radan imaging of underground pipes by automed estimation of velocity distribution versus depth*. Journal of Applied Geophysics, 46(1-3). Pag 37-48.

IAKUBOVSKII, IU.V. y L.L. LIAJOV, 1980. *Exploración eléctrica*. Ed. Reverte, 1980 3ª edición. (edición original: ed. Nedra, Moscú). Barcelona(España). 421 pgs.

IDESP; 1980. *Reconhecimento dos Recursos Naturais da Região Metropolitana de Belém*. Anexo I – Reconhecimento Hidrogeológico. IDESP, Belém, 9 p. (mimeo).

KLIMENTOS, T., 1991. *The effects of porosity-permeability-clay content on the velocity of compressional waves*. Geophysics, 56(12).Pags.: 1930-1939.

KNOLL, M.D. e R. Knight. 1994. *Relation ships between dielectric and hydrogeologic properties of sand-clay mixtures*. Proceedings of the Fifth International Conference on Ground Penetrating Radar.Vol 1. Canadá. Pag 45-61.

LAU, Chun Lok, Tom Scullion y Paul Chan, 1992(a). *Modeling of ground penetrating radar wave propagagation in pavement systems*. Proceeding of the 71st. Annual meeting transportation research board. Washington D.C.(Texas transportation institute). Pags.: 1-27.

LÁZARO Mancilla, O. Y E. Gomez Treviño ,1994. *Modelling GPR reflections from magnetic susceptibility and electrical conductivity variations*. Proceedings of the fifth international conference on ground penetrating radar. Kitchener(Ontario, Canadá). Pags.: 79-86.

LEVANON, Nadav, 1988. *Radar principles*. Ed. Wiley Interscience publication. Pgs.: 308.

LORENZO, Cimadevila, Enrique. 1994. *Prospección geofísica de alta resolución mediante geo-radar. Aplicación a obras civiles*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid. 201 páginas.

LORRAIN, Paul e Dale R. CORSON. 1972. *Campos y ondas electromagnéticos*. Ed Selecciones científicas. 772 páginas.

MAIJALA, P., 1992. Application of some seismic data processing methods to ground penetrating radar data. Proceedings of the fourth international conference on ground-penetrating radar. Rovaniemi (Finlandia). Pgs.: 103 -110.

MARGARIDO, R. A. *Ground Penetration Radar., GPR.*In 31a. Reuniao Annual de Pavimentação.V. 2 pp.889-897, São Paulo,SP, Brasil.

MARSHALL, Stanley V., Richard E. DuBroff y Gabriel G. Skitek, 1982. Electromagnetic concepts and applications. Ed. Prentice Hall International (USA). 734 Paginas.

MASER, K. 2001. *Use of Nondestructive Methods por Large Scale Bridge Deck Evaluation.* In Second International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Paviment. Alabama, USA.

MASSAD, Façal. Obras de Terra: Curso Básico de Geotécnica .São Paulo. Oficina de Textos, 2003.

MEDINA, J.; Motta, L.M.G.; Pinto, S. e Leite, L. M. 1990. *Um Estudo de Fadiga de Misturas Asfálticas com Seis Cimentos Asfálticas da Petrobrás* . Anais do 10° IBP, Rio de Janeiro.

MEDINA, J.1997. *Mecânica dos Pavimentos.* Rio de Janeiro, Editora UFRJ.

NELSON, S. O.1994. *Measurement of microwave dielectric properties of particulate materials.* J. of Food Eng. 21:365-384.

NOGAMI, J. S. e VILLIBOR, D. F., 1981, "Uma Nova Classificação de Solos COP-PE/UFRJ, v. 1, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, pp. 30 – 41.

OLHOEFT, Gary R. y Dennis E. Capron, 1994. Petrophysical causes of electromagnetic dispersion. Proceedings of the fifth international conference on ground-penetrating radar (GPR'94). Vol 1 de 3. Kitchener, Ontario(Canadá). Pgs: 145-152.

OLVER, A.yt D., 1992. Microwave and optical transmission. Ed. John Wiley and sons. 389 pgs.

OR, D e J.M.WRAITH.1999.*Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: a physical model.* Wat. Resour. Res. 35:371-383.

PALMEIRA, EM.1981. *Utilizações de Geotexteis como Reforço de Aterros sobre Solos Moles.* Tese Msc. , COOPPE-UFRJ.

PALMEIRA, E. M. 1988. *Utilização de Geossintéticos como Reforço de Aterros Sobre Solos Moles.* In Anais, Simpósio Sobre Depósitos Quaternários das Baixadas Litorâneas Brasileiras, Rio de Janeiro, 1988, 1:0-0 Rio de Janeiro: ABMS.

PEACOCK, K.L. y S. Treitel,1969. *Predictive deconvolution: theory and practice.* Geophysics, vol 34. Pgs 155-169.

PITTA, D.M., BALBO, J.T(1998). *Estudo de Caso de Retroanálise de Superfícies Deformadas em Pavimentos Asfálticos da Região Sul do Brasil* . In 31^a. Reunião Anual de Pavimentação.V.2 pp815-834, São Paulo, SP, Brasil

PORSANI., J.L.,1999. *Ground penetrating radar(GPR): proposta metodologica de emprego em estudos geologico-geotecnicos nas regioes de Rio Claro e Descalvado-SP.* Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Unesp,145p.

PREUSSLER, E. S., PINTO, S., MEDINA, J., 1981, “Determinação da Vida de Fadiga de Concretos Asfálticos Brasileiros e Aplicação no Dimensionamento de Reforço“, 16^a Reunião Anual de Pavimentação, ABPV, Olinda, Pernambuco, Brasil.

REYNOLDS, John M. 1997. *An introduction to applied and environmental geophysics.* Ed. John Wiley & Sons. 796 pgs.

RIBEIRO, J. A J. Propagação das ondas eletromagnéticas : Princípios e aplicações .1 ed. São Paulo . Érica , 2004.

ROBERT, Antoine.1996. *Dielectric permittivity of concrete between 50MHz and 1GHz and GPR measurements for building material evaluation.* Proceedings of 6th International Conference on Ground Penetrating Radar. Japão.Pgs 117-122.

ROBINSON y Treitel, 1978. *Geophysical signal analyses.* Ed. Prentice Hall Inc.326 pgs.

RODRIGUES, R.M. 1995. Consultoria para o Projeto de Restauração da Rodovia MG-173, elaborado pela ENECON S.A. para o DER-MG.

ROWE, R.K., MYLEVILLE, B.L.J., *The Analysis of Steel Reinforced Embankments on Soft Clay Foundations*. Anais do 6th Int. Conf. On Num. Methods in Geomechanics, Innsbruck, v.2, p.1273-1278, 1988.0

SAARENKETO, T. y P. Roimela, 1998. Ground penetrating radar technique in asphalt pavement density quality control. Proceedings of the seventh international conference on ground-penetrating radar. Lawrence, Kansas (USA). Pgs 461-466.

SAUCK, William A., Lawrence G. Desmond e Rene E. Chavez, 1998. Preliminary GPR results from four Maya sites, Yucatan. Mexico. Proceedings of the seventh international conference on ground-penetrating radar. Lawrence, Kansas (USA). Pgs: 101-104.

SAUCK, W.A., J.G. das Virgens Alves, and J.Gouvêa Luiz, 1995, "Successful Applications of GPR in the Lower Amazon region, Belem, Para, Brazil, "Expanded Abstracts, 4th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and 1st Latin American Geophysical Conference, Rio de Janeiro; p. 974-975.

SEN, P. N, C. Scala e M. H. Cohen, 1981. *A Self similar model for sedimentary rocks with application to the dielectric Constant of glassbeads* . Geophysics 46. Pags 781-795.

SILVA, O., F.; LOWENSTEIN, P.; 1968. *Contribuição à Geologia da Folha de São Luiz (SA-23) no Estado do Pará*. MPEG, Bol. n. 13, Belém, p 1-17.

STEWART, Duff C., Warter L. Anderson, Thomas P. Grover y Victor F. Labson, 1994. Shallow subsurface mapping by electromagnetic sounding in the 300 kHz to 30kHz range: Model studies and prototype system assessment, . Geophysics, Vol. 59, N.8 (August, 1994). Pgs. 1201-1210.

SUTINEN, Raimo. 1992. *Glacial deposits their electrical properties and ground penetrating radar*. Geological Survey of Finland. Bulletin 359. Geologian tutkimuskeskus. Espoo 1992. 123 pgs.

TELFORD, W.M., L.P. Geldart y Sheriff, 1990. Applied geophysics. Ed. Cambridge University press. 770 pgs.

TURNER, Greg y Anthony F. Siggins, 1994. Constant Q attenuation of subsurface radar pulses . Geophysics, vol. 39, N.8 (august 1994). Pgs. 1192-1200.

ULRIKSEN, C.P.F., 1982. *Application of impulse radar to civil engineering*. Ph. D. Thesis. Dept of Eng. Geology. Lund university of Technology. Suess.175 pgs.

UNTERBERGER, R.R., 1978. Radar propagation in rock salt. Geophysical Prospecting 26. Pgs.: 312-328.

van DAM, R.L., Schlager, M.J. Dekkers, e J. A. Huisman. 2002. *Iron oxides as a cause of GPR reflections*. Geophysics 67:536-545.

VERTEMATTI, J. C., 2004. Manual Brasileiro de Geossintéticos. São Paulo. Edgard Bücher.

VIDAL, Neus. 1995. *Estructura litosférica en ewl margen oriental de la península ibérica a partir de dados de sísmica de reflexión vertical y de gran ángulo*. Tesis doctoral. Departamento de Geología Dinámica, Geofísica y Paleontología de la Universidad de Barcelona. Barcelona. 287 pgs.

VILLELA, A.R.A, MARCON, A.F. (2001). *Avaliação Estrutural de Pavimentos Utilizando um Método Simplificado de Retroanálise-Retrans-2CL*. In 33^a. Reunião Anual de Pavimentação pp622-633, Florianópolis, SC, Brasil

WAIT, J.R., 1953. *Propagation of radio waves over a stratified medium*. Geophysics, 18. Pgs.: 416-422.

_____, 1957. *The transient behaviour of the electromagnetic ground wave over a spherical earth*. Trans. I.R.E., AP-5. Pgs.: 198-202.

_____, 1958. *Introduction by an oscillant magnetic dipole over two-layer ground*. Appl. Scien. Res., B-7. Pgs.: 73-80.

_____ 1959. *On the electromagnetic response of an imperfectly conducting thin-dyke*. Geophysics, 14. Pgs.: 167-171.

_____, 1960. *Propagation of electromagnetic pulses in a homogeneous conducting earth*. Appl. Scien. Res., B-8. Pgs.: 213-253.

_____, 1962. *Electromagnetic waves in stratified media*. Ed. Macmillian. New York. 320 Páginas.

_____, 1951. *The magnetic dipole over the horizontally stratified earth*. Can. Jour. Of Phy., 26. Pgs.: 577-592.

_____, 1952. *A transient magnetic dipole source in a dissipative medium*. Jour. Of Appl. Phy., 24. Pgs.: 1244-1245.

WOBSCHALL, D., 1977. *A theory of the complex dielectric permittivity of soil containing water, the semidespersive model*. IEEE Trans. Geosci. Electron. GE-15. Pgs.: 29-58.

WYSEURE, G.C.L., M.A. MOJID, e M.A. MALIK. 1997. *Measurement of volumetric water content by TDR in saline soils*. Eur. J. of Soil Sci. 48:347-354.

XU, Tang e George A. Mc Mechan. 1997. *GPR attenuation and its numerical simulation in*

YILMAZ, Özdoğan, 1987. *Seismic data processing*. Ed. Stephen M. Doherty. Society of Exploration Geophysics. 526 páginas.

YOUNG, Matt. *Óptica e Lasers*: traduzido por Yara Tavares Fornaris. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1998.

ZONGHOU, Xiong e Alan C. Tripp. 1997. *Ground penetrating radar responses of dispersive models*. Geophysics, vol 62, N.4. Pags 1127-1131.

ANEXOS

ANEXO I
1. RN - IBGE.

Situação do marco principal:

Última visita(mês/ano): /

841 V 23/10/71 20,7235 ALTA PRECISÃO AJUSTADA 1 23 7 48 24 29 CARTA 1:50.000
 PA ANANINDEUA ANANINDEUA - BELEM (BR-010)

Localização: CHAPA CRAVADA NA CALCADA, JUNTO A JANELA, LADO LESTE, DO PREDIO DO POSTO FISCAL DE RENDAS DA SECRETARIA DA FAZENDA, NA LOCALIDADE DE COQUEIRO; 3,1 KM AQUEM DO SEMINARIO TEOLOGICO BATISTA EQUATORIAL, EM BELEM.

Situação do marco principal:

Última visita(mês/ano): /

841 X 25/10/71 18,6115 ALTA PRECISÃO AJUSTADA- 1 24 13- 48 25 49 CARTA 1:50.000
 PA BELEM ANANINDEUA - BELEM (PU)

Localização: CHAPA CRAVADA NA CALCADA; LADO SUL, DO PREDIO DO SEMINARIO TEOLOGICO BATISTA EQUATORIAL, NA AVENIDA ALMIRANTE BARROSO, N. 1246.

Situação do marco principal: BOM

Última visita(mês/ano): 10 / 1994

841 Z 25/10/71 14,848 ALTA PRECISÃO AJUSTADA - 1 24 43- 48 26 32 CARTA 1:50.000
 PA BELEM ANANINDEUA - BELEM (PU)

Localização: CHAPA CRAVADA NA CALCADA, LADO NORTE, DO PREDIO DO D.R.A.M., A AVENIDA PEDRO ALVARES CABRAL.

ANEXO II

2.Dados do Rastreamento e Transformação de Datum

CONVERSAO DE DATUM

SAT-2

Datum: WGS-84

Latitude:-01.285901127 E:800705.6640

Longitude:-48.175187264N:9835893.4556

Meridiano Central:51°00'00" WGr

Datum:SAD-69

E : 800753.8496 Latitude: 1°28'57.71839"S

N : 9835932.5739 Longitude:48°17'57.71839"WGr

CONVERSÃO DE DATUM

SAT-2A

Datum: WGS-84

Latitude:-01.285891060 E:800445.8364

Longitude:-48.180027214N:9835896.8684

Meridiano Central:51°00'00"WGr

Datum:SAD-69

E : 800494.0230 Latitude: 1°28'57.61768" S

N : 9835935.9866 Longitude:48°17'58.75122" WGr

```
-----  
#####  
# GE_PS PROJECT SETTINGS #  
#####  
Processing software :Leica Sky/Data processing version2.2  
Processing kernel :Psi version 2.200 Gd 1.07x  
General header :LEICA AG, CH-9435 Heerbrugg  
Project name :  
Coordinate name :WGS84  
Time :All results in local time (GPS-3.00hrs)  
#####  
# GE_PP PROCESSING PARAMETERS #  
#####  
Cut_off angle(deg) :20  
Tropospheric model :Hopfield  
Ionospheric model :Standard  
Solution type :Standard  
Ephemeris :Broadcast  
Date used :Use Code and Phase  
Phase frequency :Automatic  
Code frequency :Automatic  
Limit to resolve ambiguities(km):20  
a priori rms(mm) :10  
Sampling rate for static(séc):Use all  
Phase processing :Automatic  
Cycle slip detection :10  
Update rate for kinematic(epoch):1  
Min. time to fix amb.-L1 only (min):9  
#####  
# GE_SS SATELLITE SELECTION #  
#####  
Manually disabled satellites:None  
#####  
# GE_IC INITIAL COORDINATES #  
#####  
Reference:  
Point id:SAT-90115  
X 4225611.0849 m Y -4774907.7820 Z -1600794.8541 m
```

Lat 1 27 15.53707S Lon 48 29 32.63340W h 72.9840m

BASELINE RESULTS

Rov:SAT-2A Ref:SAT-90115 Amb:N Proc: Iono free 03/09/98 13:29:00

Cartesian:

X	4241497.9184m	Y	-4760565.5485m	Z	-163966.5447m
dX	15886.8335m	dY	14342.2335m	dZ	-3171.6906m
sX	0.0113m	sY	0.0093m	sZ	0.0049m

Geodetic:

Lat	1 28 58.91060S	Lon	48 18 0.27214W	h	-21.6708m
dLat	-143.37353	dLon	11 32.36126	dh	-94.6548m
SLat	0.0048m	sLon	0.0118m	sh	0.0087m

Distance:
Slope 21636.7919 m sSlope 0.0120 m

ANEXO III



Foto 1. Área de aterro com pavimento deteriorado



Foto 2. Limite do primeiro trecho em manutenção



Foto 3. Final do primeiro trecho imageado



Foto 4. Berma de equilíbrio deteriorada por precipitação pluviométrica



Foto 5. Área indicando manutenção contínua da Alça Viária



Foto 6. Indicação do Marco geodésico 3A



Foto 7. Obelisco do Marco Zero da Alça Viária na interseção com a BR-316 no município paraense de Marituba.