

## 2

### Método GPR (*Ground Penetrating Radar*)

#### 2.1.

#### Introdução

Métodos geofísicos fornecem informações sobre algumas das propriedades físicas do subsolo, suas condições e processos, sem a necessidade de escavação ou sondagem. Eles se subdividem em métodos ativos e passivos. Os primeiros medem a resposta do subsolo à energia eletromagnética, elétrica e sísmica, enquanto os métodos passivos medem o campo magnético, elétrico e gravitacional naturais da Terra. Os métodos geofísicos também podem ser subdivididos em métodos de superfície e de poços. Nos métodos de superfície, os instrumentos de medida são posicionados na superfície do terreno. Já os métodos geofísicos de poços requerem que poços ou furos de sondagens estejam instalados para que os instrumentos de medida sejam colocados no interior do poço.

O Radar de Penetração em solo, GPR (*Ground Penetrating Radar*) ou ainda Georadar, é um método geofísico de superfície que utiliza ondas eletromagnéticas de alta frequência, entre 10 e 2500 MHz, para mapear estruturas e feições geológicas rasas da sub-superfície ou ainda localizar objetos enterrados. Segundo Porsani (1999), este método se assemelha ao método de reflexão sísmica e ao sonar, no princípio físico e na metodologia do levantamento de campo, com a exceção de que é baseado na reflexão de ondas eletromagnéticas.

O princípio físico do método consiste na emissão de ondas eletromagnéticas (EM) que são geradas através de um curto pulso de alta frequência e que, por sua vez, são repetidamente radiadas para dentro do terreno por uma antena transmissora. A propagação do sinal e a profundidade de alcance das ondas EM dependem da frequência do sinal emitido e das propriedades elétricas dos materiais (condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética). As variações nessas propriedades elétricas fazem com que parte do sinal emitido seja refletida; essas ondas, então refletidas e difratadas em sub-superfície, são recebidas por outra antena também colocada na superfície e

denominada de antena receptora. A Figura 2.1 apresenta o princípio de funcionamento. A energia refletida é registrada em função do tempo de percurso (tempo duplo), que é amplificada, digitalizada e gravada no disco rígido do computador, deixando os dados prontos para um posterior processamento quando se fizer necessário (Nunes, 2002).

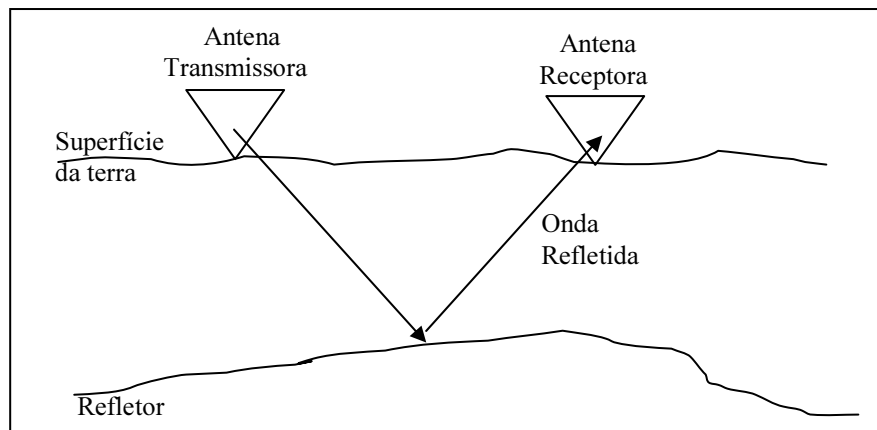


Figura 2.1– Diagrama de arranjo das antenas

Os perfis de reflexão GPR, comumente denominados radargramas, são então obtidos movendo-se as antenas transmissora e receptora com um intervalo de espaçamento constante; maiores detalhes acerca dos métodos de aquisição de sinais podem ser obtidos no item 2.4. O resultado de um perfil GPR é uma imagem das variações em sub-superfície das propriedades elétricas em função do tempo duplo de percurso do pulso eletromagnético.

## 2.2. Histórico

A utilização de ondas de rádio de altas frequências para o conhecimento de feições de sub-superfície data do final da década de 20. Segundo Olhoeft (1996), o primeiro trabalho foi realizado na Alemanha em 1929, com o objetivo de determinar a espessura de uma geleira. Entretanto, esta tecnologia foi pouco utilizada até a década de 50. Isto se deveu muito provavelmente às limitações instrumentais. No entanto, os interesses científicos voltados ao tema foram reativados devido à queda de placas de gelo na Groelândia (Olhoeft, 1996). Já na década de 60, um dos maiores sucessos deste método consistiu na sua utilização para a determinação da espessura de placas de gelo no Ártico e na Antártida (Scaife & Annan, 1991).

O trabalho em ambiente sem gelo iniciou-se em meados da década de 70. Segundo Ulriksen (1982), uma intensificação nas atividades de pesquisa ocorreu associada com a missão à Lua com a nave Apollo 17. A partir desse evento, a utilização do sistema GPR foi intensificada e, deste modo, surgiram diversas aplicações, pesquisas e publicações.

Na década de 80, foi reconhecido como método de exploração geofísica por parte da comunidade geocientífica mundial. Segundo Porsani (1999), isso se deveu ao desenvolvimento tecnológico, que possibilitou a construção de equipamentos com os modos de aquisição de registros digitais, otimizando sua portabilidade, baixando seu custo, tornando-se mais fácil a sua aquisição e, portanto, a sua utilização. Como consequência, um grande número de trabalhos científicos utilizando o método GPR, foi publicado nessa década, dentre eles, considera-se de maior significância os trabalhos escritos em Ulriksen, 1982; Annan *et al.*, 1984, 1988; Olhoeft, 1984; Davis *et al.*, 1984, 1985; Fenner&Smith, 1985.

No aspecto prático, o GPR é uma técnica muito versátil e, desde a década de 90 até os dias atuais, ele tem sido utilizado na geologia, na geotecnia, na hidrogeologia, no meio ambiente, nas ciências do solo, na arqueologia e em vários outros campos. Dentre suas aplicações, podem ser destacadas: localização de objetos enterrados em ambiente urbano, por exemplo, galerias de canalização de águas pluviais, canos e dutos (metálicos ou não metálicos); localização de sítios arqueológicos; localização de “plumas” de contaminação (orgânica e inorgânica); localização de fraturas em rocha e determinação da profundidade do topo rochoso; determinação da profundidade do nível freático; entre outras. Sendo que muitos desses trabalhos foram realizados em países da América do Norte, Europa e Ásia, nos quais o tipo de solo e as condições climáticas diferem dos solos tropicais. Destacam-se os trabalhos publicados em Annan *et al.*, 1991; Beres & Haeni, 1991; Scaife & Annan, 1991; Benson, 1995; Greenhouse *et al.*, 1995; Mellett, 1995; Grasmueck, 1996; Olhoeft, 1996; Sauck *et al.*, 1998; Atekwana *et al.*, 2000.

No Brasil, os primeiros trabalhos de aplicação do método GPR foram realizados pelo Centro de Pesquisa da PETROBRAS (Cenpes/PETROBRAS), em 1994. No entanto, apesar do sucesso das aplicações do método GPR em vários países, é necessário estudar as potencialidades do método em condições geológicas e geotécnicas brasileiras.

## 2.3. Fundamentos teóricos

O conhecimento da fundamentação teórica e das limitações do método GPR são necessários para se fazer um bom uso do método durante a aquisição dos dados (Porsani, 1999). Os fundamentos do método GPR estão embasados na teoria de propagação das ondas eletromagnéticas, ou seja, nas equações de Maxwell. Estas equações são utilizadas para estudar a estrutura interna da Terra, a partir de suas propriedades elétricas e magnéticas, descrevendo o comportamento do campo eletromagnético em qualquer meio. Entretanto, elas não possuem nenhuma informação sobre as propriedades elétricas dos materiais por onde os campos elétricos e magnéticos atuam. Dessa forma, é necessário introduzir as relações constitutivas do meio, que relacionam o campo elétrico externo aplicado ao campo interno pelas propriedades elétrica e magnética dos materiais.

### 2.3.1. Propriedades elétricas e magnéticas

As propriedades EM dos materiais dependem de sua composição e umidade, ambos controlando a velocidade de propagação das ondas EM e sua atenuação (Annan, 1992). Os materiais geológicos (rochas sedimentares, ígneas e metamórficas) podem ser considerados semi-condutores ou dielétricos, podendo ser caracterizados por três propriedades: condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética.

#### 2.3.1.1. Condutividade elétrica

A primeira relação constitutiva do meio, conhecida como Lei de Ohm, relaciona a densidade de corrente de condução ( $\vec{J}$ ) ao campo elétrico ( $\vec{E}$ ), e é escrita como:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.1)$$

Nos materiais geológicos simples, essa relação é aproximadamente linear e a constante de proporcionalidade é a condutividade elétrica ( $\sigma$ ). A condutividade elétrica de um material é uma medida de sua habilidade em conduzir corrente elétrica (Keller, 1987). A condutividade, em geral, é expressa em Siemens por

metro (S/m). Para as investigações rasas, como é o caso das aplicações do GPR, é mais comum trabalhar com a unidade em mS/m.

Segundo Keller (1987), a condutividade ( $\sigma$ ), ou o seu inverso, a resistividade ( $\rho$ ), pode variar até 20 ordens de magnitude para os materiais geológicos. Os principais fatores que afetam a condutividade elétrica nos materiais geológicos próximos a superfície são: o teor de umidade, a porosidade, a salinidade, a proporção da fração argila e a presença de minerais condutivos.

### 2.3.1.2. Permissividade dielétrica

A segunda relação constitutiva do meio relaciona diretamente o campo elétrico ( $\vec{E}$ ) à corrente de deslocamento, ou à polarização ( $\vec{D}$ ), e a constante de proporcionalidade é a permissividade dielétrica do material ( $\epsilon$ ). Segundo:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.2)$$

De acordo com Annan (1996), tanto a condutividade elétrica quanto a permissividade dielétrica são importantes, posto que afetam diretamente a atenuação e a propagação das ondas de radar, respectivamente. Ward & Hohmann (1987) sugerem que a condutividade é dominante para ondas EM de baixas frequências (<1MHz), enquanto que em altas frequências (>1MHz) a permissividade dielétrica é dominante. Usualmente, utiliza-se a permissividade dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) ou constante dielétrica dos materiais ( $k$ ), definida como:

$$k = \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.3)$$

onde:

$\epsilon$  = permissividade dielétrica do material (F/m);

$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$  F/m, é a permissividade dielétrica no vácuo.

### 2.3.1.3. Permeabilidade magnética

A terceira relação constitutiva do meio relaciona diretamente o campo magnético ( $\vec{H}$ ) com o campo indução magnética ( $\vec{B}$ ), e a constante de

proporcionalidade é a permeabilidade magnética do material ( $\mu$ ). A permeabilidade magnética é obtida de acordo com a seguinte relação:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.4)$$

Em muitas situações geológicas, os fatores mais importantes que controlam as respostas GPR são as propriedades elétricas. Para a propagação de ondas EM nas frequências do radar, supõe-se que a permeabilidade magnética da maioria dos materiais geológicos é essencialmente independente da frequência, e não varia significativamente em relação à permeabilidade magnética do vácuo (Olhoeft, 1981; Keller, 1987). Portanto, o efeito da variação na permeabilidade magnética não tem sido considerado quando são feitas medidas eletromagnéticas na Terra (Topp *et al.*, 1980; Ward & Hohman, 1987). Segundo Annan (1992), deve-se atentar para o fato de que os efeitos de uma forte permeabilidade magnética podem não ser totalmente ignorados nas seções de GPR.

Substituindo-se as relações constitutivas do meio nas equações de Maxwell, obtém-se as equações de propagação da onda EM num determinado meio, onde os fatores mais importantes que as governam são a velocidade e a atenuação. Maiores detalhes sobre as deduções matemáticas podem ser encontradas em Annan (1992) e Porsani (1999).

Para materiais geológicos com baixa perda, o campo EM propaga-se com uma velocidade de fase dada por:

$$v = \frac{c}{\sqrt{k}} \quad (2.5)$$

onde:

$c$  = velocidade da luz =  $2,997 \times 10^8$  m/s  $\cong$  0,3 m/ns;

$k$  = permissividade dielétrica ou constante dielétrica dos materiais.

Os valores da constante dielétrica e condutividade elétrica para vários materiais estão listados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Constante dielétrica (k) e condutividade elétrica ( $\sigma$ ), observada nos materiais, comuns para as frequências utilizadas no GPR (Porsani, 1999)

<b>Materiais</b>	<b>Constante Dielétrica (k)</b>	<b>Condutividade Elétrica (<math>\sigma</math>) mS/m</b>
Ar	1	0
Água destilada	81	0,01
Água fresca	81	0,5
Água do mar	81	3000
Areia seca e cascalho	2-6	0,01
Areia saturada	20-30	0,1-1
Argila seca	5	2
Argila saturada	40	1000
Calcáreo seco	4	0,5
Calcáreo saturado	8	2
Folhelho e siltito seco	5	1
Folhelho saturado	7	100
Siltito saturado	30	100
Silte saturado	10	1-10
Arenito saturado	20-30	40
Solo arenoso seco	2,6	0,14
Solo arenoso saturado	25	6,9
Solo argiloso seco	2,4	0,27
Solo argiloso saturado	15	50
Basalto seco	6	1
Basalto saturado	8	10
Diabásio seco	7	10
Diabásio saturado	8	100
Granito seco	5	0,01
Granito saturado	7	1
Sal seco	5-6	0,01-1
Ferro	1	$10^9$
Aço	1	$\infty$
PVC	8	0
Asfalto	3-5	0
Concreto seco	5,5	0
Concreto saturado	12,5	0
LNAPL	2	0
DNAPL	2-3	0
Hexano	1,88	0,5
Diclorometano	8,3	1,1
Benzeno	2,24	0,11
Metanol	33,7	0,38
Mistura de óleo e outras substâncias orgânicas	2	0,5

A Tabela 2.1 mostra a constante dielétrica e a condutividade elétrica observada em alguns materiais para as frequências utilizadas no GPR. Pode-se perceber através destes valores, que o teor de umidade volumétrico de água pode alterar substancialmente as características elétricas das rochas e dos solos. Isto ocorre porque os íons dissolvidos na água proporcionam um mecanismo de condução elétrica, que dissipa o campo eletromagnético aplicado, pois a energia do campo EM é extraída e transferida irreversivelmente para o meio, provocando assim, a atenuação e baixa penetração da onda EM no meio.

Na Figura 2.2 é apresentada uma variação típica da constante dielétrica ( $k$ ) com o conteúdo volumétrico de água nos solos. Essa curva foi obtida empiricamente por Topp *et al.* (1980), usando medidas do tempo de propagação de ondas eletromagnéticas nas frequências de rádio para diversos tipos de materiais geológicos.

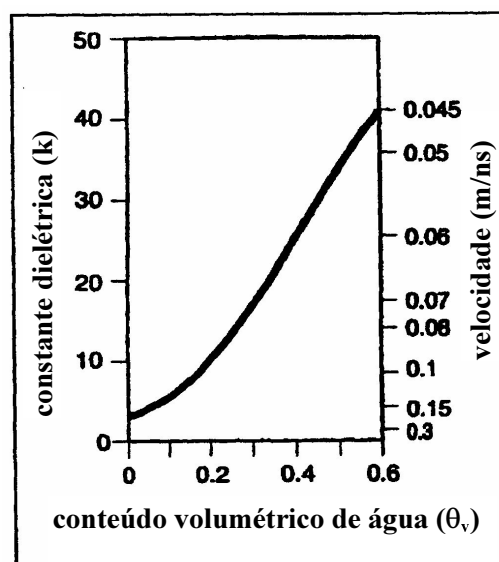


Figura 2.2 – Variação da constante dielétrica em função do conteúdo de água para os materiais geológicos (Topp *et al.*, 1980)

Além da constante dielétrica ser influenciada pelo conteúdo de água no meio, ela também reflete algumas interações, tais como: entre a porosidade, as características do fluido intersticial, a superfície específica, a mineralogia, a estrutura e a temperatura (Nunes, 2002). A relevância de cada parâmetro varia com a frequência utilizada. Santamarina (2001) apresenta um estudo mais detalhado destas interações, expondo relações empíricas correlacionando alguns parâmetros do solo com a constante dielétrica, em função da frequência aplicada.



O autor também relata a dificuldade em avaliar e medir o efeito de cada um destes parâmetros na propagação de ondas eletromagnéticas.

### 2.3.2.

#### **Uso do TDR (*Time Domain Reflectometry*) para determinação da constante dielétrica**

A técnica TDR constitui um método para a determinação da constante dielétrica do meio ( $k$ ). Ultimamente, vem despertando muito interesse principalmente devido a possibilidade de leituras em tempo real e automatizadas (Oliveira, 2003).

A técnica consiste basicamente na determinação da constante dielétrica ( $k$ ) medindo-se o tempo de propagação de uma onda eletromagnética através de um cabo coaxial até as guias de onda (geralmente hastes metálicas de comprimento definido  $L$ ), imerso em um meio. A fonte geradora do TDR aplica uma rápida e crescente voltagem ao cabo coaxial. O sinal caminha ao longo do cabo até alcançar as guias de onda inseridas no solo. Parte da onda incidente é refletida de volta ao atingir a guia devido à diferença de impedância entre esta e o cabo coaxial. Essa reflexão também é devida a diferenças de impedância entre os meios em que as hastes (solo) e o cabo se encontram (ar). O remanescente da onda propaga-se pelas hastes paralelas (guias de onda) até alcançar a sua extremidade, sendo também refletida, devido a uma nova diferença de impedância. Vários pulsos são gerados pelo TDR na quantidade necessária para produzir um gráfico da relação entre variações da impedância (coeficiente de reflexão) e tempo. Esse gráfico fornece o tempo entre a chegada dos sinais refletidos do início das hastes dentro do solo e os refletidos no final das guias de onda. Com o tempo de passagem da onda eletromagnética ( $t$ ) pela guia de onda inserida dentro do solo, calcula-se a velocidade de propagação do pulso no solo, dada por:

$$v = \frac{2L}{t} \quad (2.6)$$

Sendo assim, a constante dielétrica do meio que contém o sensor fica definida:

$$k = \left( \frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (2.7)$$

Diversos estudos, entre eles Marinho e outros (2005) e Tommaselli (2001), tem sido conduzidos para a aplicação do TDR na obtenção do teor de umidade volumétrico dos solos, indiretamente obtido por meio de sua correlação com a constante dielétrica. Diversas variantes tem sido testadas, entre elas a densidade do solo e o modo de instalação da guia de onda, para verificar seus efeitos sobre a curva de calibração do TDR para o solo estudado.

A Figura 2.3 mostra um diagrama dos componentes básicos de um equipamento de TDR.

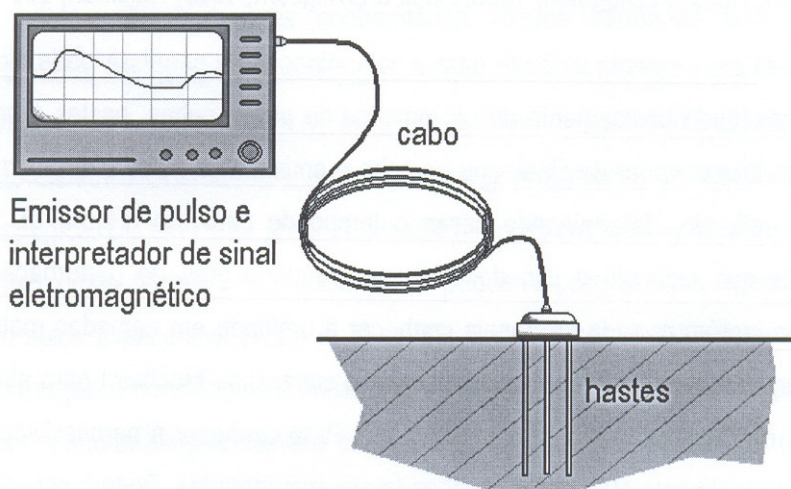


Figura 2.3 – Componentes básicos de um equipamento TDR (Chicota, 2003)

### 2.3.3. Profundidade de penetração x resolução

O sistema GPR é especificado pela sua frequência central ( $f_c$ ) e, normalmente, suas antenas, transmissora e receptora, são projetadas para atuar numa faixa situada entre 0,5 vezes a frequência central (frequência mínima) até 1,5 vezes a frequência central (frequência máxima).

A frequência central tem um importante papel para a profundidade de penetração da onda EM em sub-superfície, sendo esta a principal limitação do GPR. Aumentando-se a frequência da onda transmitida resulta em maior resolução da sub-superfície e menor profundidade de penetração. Por outro lado, diminuindo-se a frequência, aumenta-se a profundidade de penetração, e, por conseguinte, uma menor resolução. Além da frequência central, a profundidade de

penetração da onda também é altamente dependente das propriedades elétricas dos materiais geológicos, *i.e.*, condutividade elétrica e constante dielétrica.

A Tabela 2.2 mostra os valores das frequências centrais das antenas com suas respectivas profundidades máximas de penetração. Segundo Porsani (1999), estes valores foram estimados com base nos experimentos práticos realizados por várias empresas fabricantes de equipamentos GPR (“*Mala Geoscience*” - empresa sueca; “*Sensors & Software*” – empresa canadense e “*Geological Survey Service Inc.*” – empresa americana). Quando *a priori* as informações geológicas são poucas ou até mesmo inexistentes, esta tabela serve como guia prático para os trabalhos de campo.

Tabela 2.2 – Frequência central das antenas versus profundidade máxima de penetração (Porsani, 1999)

Frequência central (MHz)	Profundidade Máxima de Penetração (m)
1000	1
400	2
200	4
100	25
50	30
25	40
10	50

Segundo Daniels *et al.*(1998), a profundidade de penetração pode variar de 4 km no gelo, 1 a 1,5 km na Lua, centenas de metros em rochas de sal, dezenas de metros no granito, areias e cascalhos, até poucos metros em solos com alto conteúdo de argila.

De acordo com Duke (1990), a profundidade de penetração nos materiais é controlada principalmente por quatro tipos diferentes de perdas por atenuação: condução elétrica, polarização, espalhamento geométrico e perdas por dispersão. As perdas por condução elétrica são dominantes nos materiais condutivos para baixas frequências e são proporcionais à condutividade elétrica do meio (Olhoeft, 1981). As perdas por polarização, dominantes para as altas frequências, ocorrem quando a molécula de água não consegue mais se polarizar na presença de um campo aplicado a partir de uma determinada frequência de polarização. Estas também são conhecidas como frequência de relaxação e ocorrem em torno de 20 GHz. Esse fenômeno é conhecido como relaxação dielétrica da água. As perdas

por espalhamento geométrico (“*geometric spreading*”) são independentes do meio, e correspondem à atenuação da amplitude do sinal decorrente da frente de onda que se espalha esféricamente. Finalmente, as perdas por difusão (“*scattering losses*”) são causadas pelas heterogeneidades dos materiais quando estas têm tamanhos comparáveis ao comprimento de onda. As heterogeneidades mais comuns são: porosidade, contatos litológicos, buracos de tatus e insetos.

A resolução vertical corresponde a habilidade de distinguir as reflexões provenientes do topo e da base de camadas de pequena espessura. A Tabela 2.3 apresenta alguns valores estimados de resolução vertical, obtidos em Annan (1992), para as frequências centrais do GPR

Tabela 2.3 – Frequência central das antenas versus resolução vertical (adaptado de Annan, 1992)

Frequência central (MHz)	Resolução vertical (m)
200	0,25
100	0,50
50	1,00
25	2,00

A resolução horizontal é determinada pelo padrão de radiação da antena, o que pode ser comparado a um feixe de luz de uma lanterna cuja área de iluminação se expande com a distância do alvo. O padrão de radiação da antena é complexo; mas pode ser aproximado por um cone vertical, com um ângulo de abertura de 30° e com o vértice localizado na antena transmissora. Dessa forma, a informação refletida é uma média sobre a superfície refletora “iluminada” por esse feixe de ondas eletromagnéticas (Greenhouse *et al.*, 1995). Maiores detalhes sobre o padrão de radiação da antena podem ser encontrados em Annan, 1992.

#### 2.3.4. Coeficiente de reflexão

Quando a onda do radar se propaga em um meio, ela se depara com variações nas propriedades elétricas oriundas da existência de diversas camadas. Entretanto, essas variações nas propriedades podem causar uma forte impedância elétrica na interface que separa estas camadas, determinando a quantidade do sinal que deverá ser refletido. Isto é normalmente expresso pelo coeficiente de reflexão.

As ondas de radar são refletidas e refratadas nas interfaces que separam meios com características elétricas diferentes. A reflexão e a refração de ondas planas são governadas pela lei de Snell e pelas equações de Fresnel. A lei de Snell especifica uma relação angular entre a onda EM incidente, a onda refletida e a onda refratada. As equações de Fresnel relacionam as amplitudes dos campos elétricos e magnéticos.

Em estudos de GPR, normalmente supõe-se que as ondas EM se propagam com uma incidência normal às interfaces das camadas (Annan, 1992). Nessa situação, a amplitude do coeficiente de transmissão ( $r_{\text{GPR}}$ ) definida como a razão do campo elétrico transmitido pelo incidente, pode ser reduzida para:

$$r_{\text{GPR}} = \frac{\sqrt{k_1} - \sqrt{k_2}}{\sqrt{k_1} + \sqrt{k_2}} \quad (2.8)$$

onde  $k_1$  e  $k_2$  correspondem às constantes dielétricas acima e abaixo da superfície refletora, respectivamente. Maiores detalhes sobre as deduções matemáticas desta equação podem ser encontrados em Porsani (1999) e Annan (1992).

A Tabela 2.4 mostra os valores do coeficiente de reflexão típicos de algumas interfaces para as frequências do radar.

Tabela 2.4 – Coeficientes de reflexão para alguns contatos típicos (adaptado de Annan, 1992)

De:		Para:		Coeficiente de Reflexão (%)
Ar	$k = 1$	Solo seco	$k = 5$	38
Solo seco	$k = 5$	Água	$k = 81$	80
Solo seco	$k = 5$	Solo saturado	$k = 25$	38
Solo seco	$k = 5$	Rocha	$k = 8$	12
Solo saturado	$k = 25$	Rocha	$k = 8$	28
Solo	$k = 3,5$	Metal	$k = \infty$	100

A interface ar/solo seco produz uma forte reflexão com 38% da energia incidente. Para evitar essa reflexão indesejada nos levantamentos GPR, ou pelo menos para minimizar tal reflexão, as antenas devem ser colocadas o mais próximo possível do solo. Observa-se que a interface solo seco/água também constitui um excelente refletor apresentando 80% da energia incidente. Portanto, o GPR pode ser perfeitamente utilizado para localização do nível do lençol freático.

Finalmente, a interface solo/metal produz uma reflexão total, sendo a situação ideal para as aplicações do GPR na localização de tubos e dutos metálicos enterrados.

## 2.4. Aquisição de dados

### 2.4.1. Sistema GPR

O sistema GPR é normalmente projetado em módulos para dar maior flexibilidade nas operações de campo, sendo todos eles acessados via computador. A Figura 2.4 apresenta um diagrama esquemático dos módulos básicos de um sistema GPR.

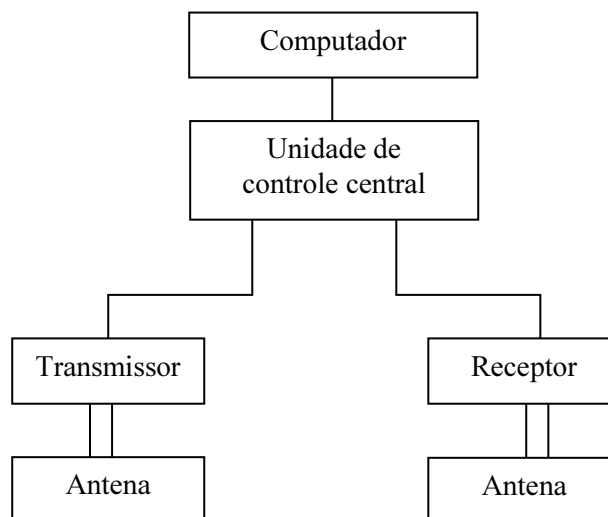


Figura 2.4 – Diagrama esquemático dos módulos básicos de um sistema GPR (Porsani, 1999)

#### 2.4.1.1. Antenas

As antenas utilizadas podem ser blindadas ou não. As do tipo não blindadas possuem a vantagem de se poder trabalhar com diversas orientações entre as antenas transmissora e receptora, além de se poder variar a distância entre elas, permitindo assim o emprego de diversas técnicas de aquisição descritas na seção 2.4.3. Entretanto, possuem a desvantagem de sofrerem interferências provocadas por ruídos eletromagnéticos externos (*e.g.*, torres de alta tensão, celulares, rádios,

entre outros). Já as antenas blindadas, fornecem maior facilidade e velocidade nos trabalhos de aquisição. As antenas ficam alocadas a uma distância e orientação fixas em uma caixa blindada, que as protege de interferências externas.

#### **2.4.2. Planejamento de um levantamento GPR**

Um levantamento GPR deve ser planejado procurando avaliar previamente a viabilidade da utilização do método, uma vez que o problema foi definido. A definição do problema consiste em responder algumas questões, tais como: qual é a profundidade e a geometria do alvo, se existe contraste suficiente entre as propriedades elétricas, quais são as dificuldades da região (relevo acidentado, mata fechada, etc.), se há fontes de ruído eletromagnético (postes de iluminação, torres de alta tensão, cercas metálicas, antenas de rádio, etc.) e se existem dados disponíveis de levantamentos geológicos, geofísicos e geotécnicos na área do levantamento GPR a ser realizado.

#### **2.4.3. Técnicas de aquisição de dados**

O sistema GPR pode ser operado através de três modos básicos: perfis de reflexão com afastamento constante ou “*common offset*”, sondagens de velocidade e a técnica de trans-iluminação ou tomografia.

As sondagens de velocidade são normalmente usadas na sísmica de reflexão e podem perfeitamente ser aplicadas no GPR. São medidas indiretas que podem ser feitas por duas formas: CMP – “*Common Mid Point*” e WARR – “*Wide Angle Reflection and Refraction*”. Ambas as técnicas são usadas para obter uma estimativa da velocidade do sinal do GPR versus a profundidade na terra, através da variação do espaçamento das antenas para uma localização fixa e medindo-se a mudança do tempo duplo das reflexões de sub-superfície. Na técnica CMP, a abertura entre as antenas (transmissora e receptora) é crescente em sentidos opostos partindo de um ponto central fixo, conforme mostra a Figura 2.5. Já na técnica WARR, uma das antenas é mantida fixa, enquanto a outra é sucessivamente afastada da primeira, conforme mostra a Figura 2.6. Entretanto, a

velocidade verdadeira pode ser determinada medindo-se a constante dielétrica do solo e substituindo-a na equação 2.5.

O perfil de reflexão é o modo mais comum de operação e foi utilizado nesta pesquisa. Nesta técnica, a geometria das antenas transmissora e receptora é mantida com uma distância fixa constante, sendo transportada ao longo do perfil para imagear as reflexões versus a posição das antenas. O resultado obtido é um perfil GPR, onde no eixo horizontal estão as distâncias percorridas pelo deslocamento das antenas, mostrando as variações das propriedades elétricas de sub-superfície (reflexões) em função do tempo duplo (tempo de ida e volta do sinal) de percurso do sinal refletido no eixo vertical. A Figura 2.7 mostra o esquema de aquisição de dados pelo perfil de reflexão.

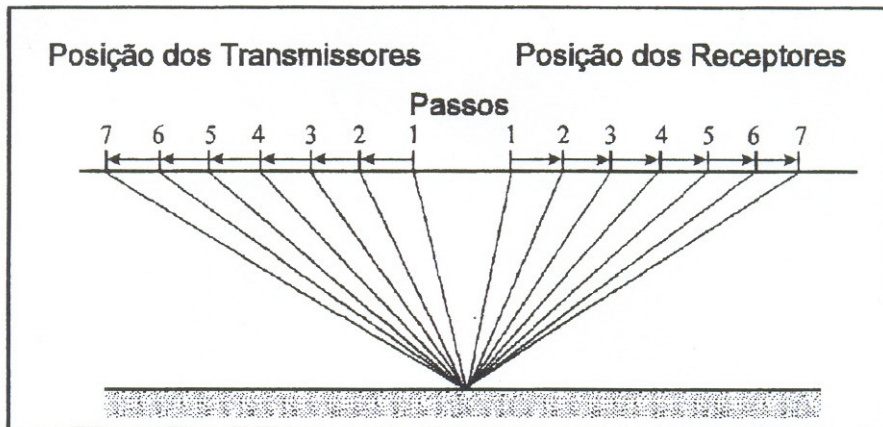


Figura 2.5 – Esquema de aquisição de dados pela técnica CMP (Porsani, 1999)

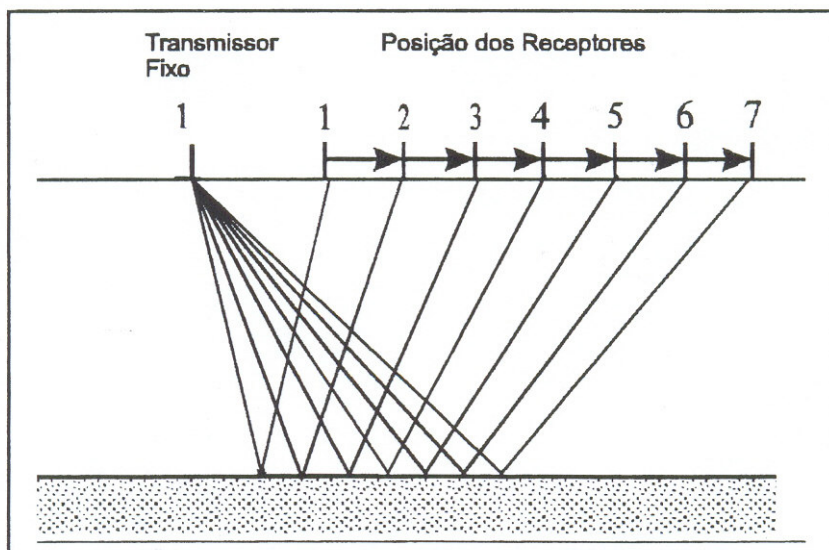


Figura 2.6 – Esquema de aquisição de dados pela técnica WARR (Porsani, 1999)



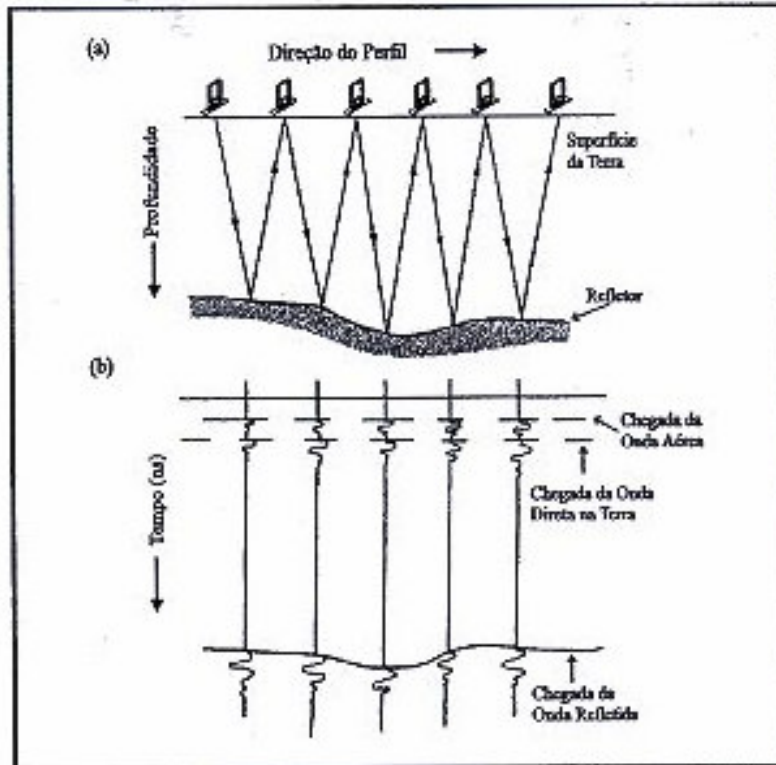


Figura 2.7 - Esquema de aquisição de dados pelo perfil de reflexão (Porsani, 1999)

Para a aquisição dos perfis de reflexão, os parâmetros que devem ser analisados são: a frequência da antena, a abertura da janela temporal, a amostragem espacial, a orientação e o espaçamento entre as antenas (no caso de antenas não blindadas), a localização e orientação do perfil e, finalmente, o número de amostras por traço.

A escolha da frequência da antena dependerá do objetivo de cada levantamento. Existe uma relação entre a profundidade de penetração e a resolução quando selecionada uma frequência de operação. As Tabela 2.2 e 2.3 servem como guia de referência para a escolha da frequência de operação da antena. Vale ressaltar que, se mais de uma antena estiver disponível, e o tempo e os recursos permitirem, todas as antenas devem ser utilizadas a fim de que as informações se complementem.

A abertura da janela temporal, ou “*range*”, significa quanto tempo que se deve deixar a janela de tempo aberta, para que o sinal seja transmitido e refletido, retornando ao receptor. Isto depende da profundidade que se deseja atingir, da velocidade da onda EM no meio e da frequência da antena utilizada. Para penetrações mais profundas, deve-se ter uma maior abertura da janela temporal,

significando que uma maior quantidade de dados estão sendo registrados (Annan, 1992).

O intervalo de amostragem espacial ou o intervalo entre as emissões do sinal eletromagnético é de extrema importância durante os procedimentos de aquisição de dados. Para se obter uma resposta sem “*aliasing*”, isto é, sem falsa amostragem, não se deve exceder o intervalo de amostragem de Nyquist. Segundo Annan (1992), o intervalo de amostragem de Nyquist varia de  $\frac{1}{4}$  até  $\frac{1}{2}$  do comprimento de onda ( $\lambda$ ). Quando o intervalo é muito grande, os dados não definem adequadamente refletores com mergulhos acentuados. Do ponto de vista prático, o volume de dados adquiridos e o tempo do levantamento são reduzidos pelo aumento no espaçamento entre as emissões; entretanto, do ponto de vista da interpretação dos dados, é importante aderir-se à amostragem de Nyquist para que não ocorra uma falsa amostragem espacial. Além disso, o aspecto visual dos dados também é um importante fator para o olho humano.

No caso das antenas não blindadas, considera-se a separação das antenas igual a 20% da profundidade do alvo quando não se tem maior conhecimento da área a ser investigada (Annan, 1992). Na prática, a distância entre as antenas transmissora e receptora é adotada como sendo igual ao comprimento das antenas. As antenas blindadas, utilizadas neste trabalho, possuem um espaçamento fixo fornecido pelo fabricante.

A localização dos perfis GPR é importante para se saber a origem dos dados. Os perfis são orientados perpendicularmente à direção da estrutura da sub-superfície, pois as reflexões serão inclinadas, distintas de ruídos (horizontais) tornando sua identificação mais fácil.

A escolha da orientação das antenas afeta a qualidade dos dados devido aos diferentes padrões de radiação. Os levantamentos GPR são normalmente realizados com ambas as antenas, transmissora e receptora, perpendiculares a direção do perfil, onde o pulso é radiado com o campo elétrico transversal à direção do perfil, definido como padrão TE – transversal elétrico, o qual apresenta a mais larga cobertura angular de um refletor em sub-superfície. Esta orientação também é a utilizada nas antenas blindadas. Maiores detalhes sobre os padrões de radiação das antenas podem ser obtidos em Annan (*op. cit.*).

O número de amostras por traço significa quantos pontos devem ser amostrados em um traço. Este parâmetro deve ser cuidadosamente adotado para

evitar o efeito de “aliasing” (falsa amostragem), e é utilizado para transformar o dado analógico em digital. A discretização do traço pode variar de 128 a 1024. Um valor adequado e comumente utilizado é 512.

**2.5. Processamento dos dados**

O processamento dos dados GPR, posterior ao levantamento de campo, normalmente é realizado de maneira sistemática, podendo remover ou realçar certas feições de interesse. Ele envolve basicamente as seguintes etapas: edição dos dados, processamento do sinal e apresentação da imagem processada. A Figura 2.8 mostra o fluxograma básico das etapas do processamento. Vale ressaltar que esses procedimentos são normalmente atividades muito dependentes do intérprete, sendo, portanto, muito interativos e infinitamente subjetivos.

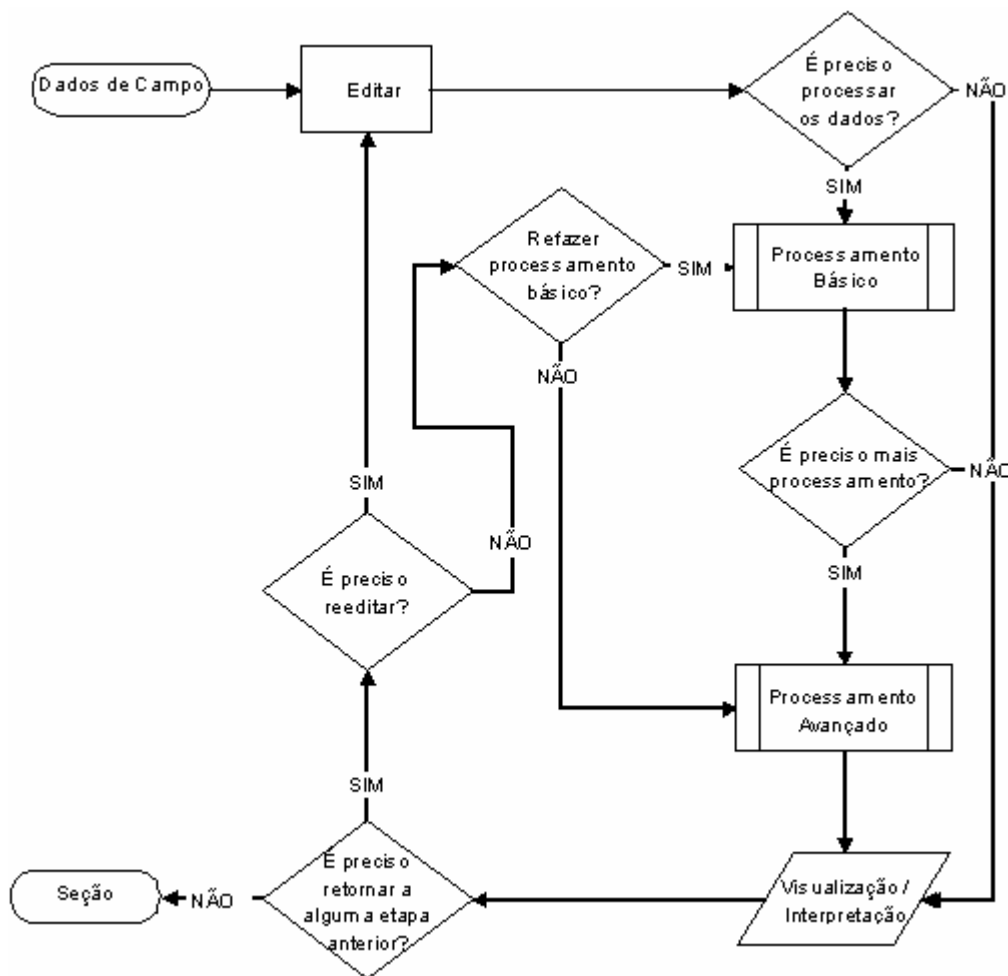


Figura 2.8 – Fluxograma das etapas de processamento dos dados de GPR

Após a aquisição dos dados, o primeiro passo no processamento é a edição dos dados. A edição permite manipular os dados para melhorar a apresentação, reverter a direção do perfil, incluir as informações da topografia, editar os traços, corrigir o tempo zero da chegada da onda, entre outros.

A etapa de processamento básico inclui a filtragem dos dados e a aplicação de ganhos. A filtragem é uma das mais simples, mas é a técnica mais potente para a análise dos dados GPR. O uso apropriado de uma filtragem pode melhorar a razão sinal/ruído, permitindo delimitar uma banda de frequência atingível pela antena (Nunes, 2002). A aplicação de ganhos tem como objetivo tentar equalizar todas as amplitudes de cada traço, a fim de compensar a atenuação sofrida pelo sinal à medida que se propaga em sub-superfície.

O processamento avançado inclui as etapas de “migração” e “deconvolução”. A migração é uma etapa importante no processamento dos dados, pois permite reconstruir uma imagem que melhor representa a sub-superfície (Sheriff, 1991). As reflexões podem ser recolocadas em suas verdadeiras posições espaciais; entretanto, o intérprete deve estar atento quanto às falsas reflexões criadas pela migração (Annan, 1993). A “deconvolução” permite remover múltiplas ou “ringing” dos dados, as quais são causadas pela ressonância da energia do radar (Nunes, 2002).

A princípio, os dados de GPR eram processados em *softwares* de sísmica, mas atualmente existem no mercado uma variedade de programas desenvolvidos para tratamento dos dados de GPR, entre eles: *RADAN*<sup>®</sup>, da empresa *GSSI (Geophysical Survey System, Inc.)*; *GRADIX*<sup>®</sup>, da empresa *Iterpex Limited*; *RADPRO*<sup>®</sup>, da empresa *MalaGeoscience* e até mesmo o *GROUNVISION*<sup>®</sup>, da empresa *Ramac*, que mesmo sendo um *software* de aquisição de dados, possui algumas ferramentas de processamento.

## 2.6. Interpretação dos dados

Antes de interpretar os dados, existem alguns conceitos que devem ser considerados. As duas ondas diretas, no ar e na terra, observadas freqüentemente no topo dos perfis são sempre os sinais mais fortes (vide Figura 2.7). A onda direta no ar é sempre a primeira a chegar, porque a onda EM se propaga no ar com

a velocidade da luz. A onda direta na terra, “*ground wave*”, é normalmente a segunda a chegar.

O primeiro passo na análise dos perfis é identificar a origem das reflexões e se as interfaces indicadas pelas reflexões representam mudanças na sub-superfície ou interferências. As feições identificáveis em um perfil se enquadram dentro de três classes principais: refletores horizontais contínuos, refletores de objetos de duas e três dimensões (2D e 3D) e descontinuidades laterais, hipérbolos de difrações. As interferências podem ser originadas de várias fontes: objetos na superfície (árvores de grande porte, casas e edifícios, carros, estrada de ferro e cercas metálicas), transmissores de sinais EM de alta frequência (estações de rádio FM, antena de microondas e aparelho de comunicação “*walkie-talkie*”) e ressonância da antena (Bevan, 1984; Sun & Young, 1995). Entretanto, muitas dessas feições podem ser identificadas nos perfis, sendo fundamental uma boa descrição das observações de campo.

As reflexões provenientes de objetos 2D e 3D enterrados, tais como, dutos, tanques, galerias, entre outros, são identificadas pelas suas características hiperbólicas apertadas no perfil. Já as reflexões provenientes da presença de objetos na superfície, tais como, árvores, casas, edifícios, torres de alta tensão e postes de iluminação, são caracterizadas por feições hiperbólicas abertas. A velocidade média calculada para os objetos 2D e 3D enterrados é diferente da velocidade proveniente de objetos na superfície, tornando-os facilmente distinguíveis num perfil de GPR (Annan *et al.*, 1984; Sun & Young, 1995).

A interpretação dos perfis GPR é bastante subjetiva e depende muito do intérprete. É importante que o intérprete esteja ciente dos objetivos do levantamento e tenha conhecimento sobre as propriedades elétricas do alvo e do meio encaixante. É recomendável o uso de outras fontes de informações geológicas e geofísicas para complementar os dados de GPR, aumentando-se assim, a confiabilidade da interpretação dos dados.