



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
ESCOLA POLITÉCNICA  
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA**

**NELSON SILVA DO AMPARO**

**UTILIZAÇÃO DO RADAR COMO MÉTODO NÃO  
INTRUSIVO PARA A REALIZAÇÃO DE MEDIDAS DE  
CONTEÚDO DE ÁGUA NA ZONA VADOSA**

Salvador  
2006

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**NELSON SILVA DO AMPARO**

**UTILIZAÇÃO DO RADAR COMO MÉTODO NÃO  
INTRUSIVO PARA A REALIZAÇÃO DE MEDIDAS DE  
CONTEÚDO DE ÁGUA NA ZONA VADOSA**

Dissertação apresentada ao Mestrado de Engenharia Ambiental Urbana, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental Urbana.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Lemos Machado

Co-Orientador: Prof. Pós-Dr. Marco Antônio Barsotelli Botelho

Salvador  
2006

# SUMÁRIO

<b>Sumário</b>	i
<b>Lista de Figuras</b>	iii
<b>Agradecimentos</b>	v
<b>Resumo</b>	vi
<b>Abstract</b>	vii
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	1
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b>	4
<b>2.1 G P R.</b>	4
2.1.1 Princípios de Funcionamento	5
2.1.2 Princípios Físicos	7
2.1.3 Técnicas de Ensaio do Radar	10
2.1.3.1 Método de Afastamento Constante	10
2.1.3.2 Método do Ponto Médio Comum (CMP)	12
2.1.4 Métodos para Determinação da Velocidade de Propagação da Onda Eletromagnética	14
2.1.5 A Influência da Constante Dielétrica na Velocidade de Propagação do Pulso Eletromagnético	17
<b>2.2 Algumas Técnicas para Medida da Umidade do Solo</b>	19
<b>3 METODOLOGIA</b>	21
<b>3.1 Ensaio de Laboratório</b>	22
3.1.1 Ensaio Utilizando Antenas de 1000Mhz	23
3.1.1.1 Descrição do Mecanismo Utilizado nos Ensaio de Laboratório com Antenas de 1000Mhz de Frequência	25
3.1.2 Ensaio Utilizando Antenas de 200Mhz	28
3.1.2.1 Descrição do Mecanismo Utilizado nos Ensaio de Laboratório e de Campo com Antenas de 200Mhz de Frequência	31
<b>3.2 Ensaio de Campo</b>	35
3.2.1 Escolha do Local e Procedimentos Utilizados	35

<b>Sumário</b>	i
3.2.2 Determinação da Permeabilidade Saturada de Campo	38
3.2.2.1 Descrição do Permeômetro de Gueph	39
3.2.2.2 Fundamentos Teóricos do Permeômetro de Gueph	39
<b>3.3 Cálculo da Umidade a Partir da Velocidade de Propagação dos Pulsos de Radar – Ensaio de Campo e Laboratório</b>	42
<b>3.4 Metodologia Utilizada em Campo</b>	47
3.4.1 Cálculo do Tempo de Influência das Precipitações no Meio Poroso, Utilizado no Caso dos Ensaio de Campo	47
3.4.2 Metodologia de Campo – Exemplo Ilustrativo	48
<b>3.5 Metodologia Utilizada em Campo</b>	51
<b>4 RESULTADOS E ANÁLISES</b>	54
<b>4.1 Resultados Laboratoriais</b>	54
4.1.1 Resultados Laboratoriais Utilizando Antenas com 1000Mhz	54
4.1.2 Resultados dos Ensaio Utilizando Antenas com 200Mhz	56
<b>4.2 Resultados dos Ensaio de Campo</b>	58
4.2.1 Caracterização do Solo da Área Piloto	58
4.2.2 Dados dos Ensaio de Permeabilidade	59
4.2.3 Resultados dos Dados de Campo	64
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	69
<b>6 REFERÊNCIAS</b>	71

## LISTA DE FIGURAS

1	Radargrama resultante de ensaio realizado com o GPR em uma via urbana.	7
2	Relação entre velocidade e frequência para diferentes resistividades.	8
3	Ensaio com afastamento constante (d) entre as antenas receptora e transmissora com 200 Mhz de frequência.	10
4	Representação gráfica da técnica de execução de ensaio com afastamento constante utilizada para a construção do radargrama de reflexão.	11
5	Técnica de execução de ensaio utilizada para a construção do radargrama através da técnica CMP.	13
6	Eventos idealizados dos tempos de chegada em função da separação das antenas em sondagens do tipo CMP (adaptada de Annan, 2001).	14
7	Pontos coletados da hipérbole.	15
8	Reta obtida a partir do método $t^2 - x^2$ .	16
9	Antena com 1000 Mhz (a) e 200 Mhz (b) de frequência.	21
10	Equipamento GPR utilizado na pesquisa.	22
11	Equipamento desenvolvido para a realização de testes do tipo CMP em laboratório.	23
12	Esquema de funcionamento dos ensaios de radar do tipo CMP para execução em laboratório, com variações no teor de umidade.	24
13	Conjunto de dispositivos utilizados para a realização dos ensaios tipo CMP em laboratório.	24
14	Realização do ensaio tipo CMP em laboratório.	24
15	Mecanismo utilizado nos ensaios laboratoriais.	26
16	Peças utilizadas.	27
17	Peças utilizadas.	27
18	Detalhamento das peças.	27
19	Escavação utilizada para realização dos testes de laboratório com antenas de 200Mhz.	29
20	Esquema de funcionamento dos ensaios de radar do tipo CMP com controle de umidade utilizando antenas de 200Mhz.	29
21	Escavação preenchida com areia seca.	30
22	Dispositivo mecânico desenvolvido para realização dos ensaios tipo CMP em campo	31
23	Sistema de roldanas.	32
24	Peças do mecanismo.	32
25	Representação gráfica do dispositivo mecânico utilizado em campo.	32
26	Hastes utilizadas no aparato.	33
27	Odômetro de cordão.	34

28	radargramas obtidos do ensaio tipo CMP realizado em campo, utilizando cordas guia de aço (a) e cordas guia de seda (b).	34
29	Realização dos ensaios para escolha de área piloto nas proximidades do shopping Iguatemi.	36
30	Local de realização dos ensaios de campo com o radar.	37
31	Representação das precipitações mensais referente aos meses de ago/2004 a fev/2005.	38
32	Esquema ilustrativo e foto do equipamento de Guelph.	39
33	Desenho do furo com indicação dos fluxos de água $V_r$ , $V_z$ e $V_g$ .	40
34	Variação de $C$ em função de $H/a$ .	42
35	Representação esquemática das fases constituintes do solo.	43
36	Relações entre volumes e entre pesos e volumes adotando-se um volume de sólidos unitário.	44
37	Radargrama obtido no ensaio realizado em 18 de agosto de 2004 na área piloto.	48
38	Representação esquemática das fases constituintes do solo indicando o acréscimo de água devido a precipitações.	51
39	Radargramas obtidos para a areia na umidade higroscópica (à esquerda) e de saturação.	55
40	Variação da velocidade de propagação da onda em função da umidade gravimétrica do solo. Valores experimentais e previstos pela equação 18.	55
41	Curva granulométrica obtida para a areia ensaiada.	56
42	Radargramas obtidos para a areia com umidade de 5% (a) e 25% (b).	57
43	Variação da velocidade de propagação da onda em função da umidade gravimétrica do solo. Valores experimentais e previstos pela equação 37.	58
44	Curva granulométrica obtida para a amostra de solo ensaiada.	59
45	Obtenção do valor de permeabilidade do solo a partir da realização de ensaios com cargas hidráulicas de 5 (a) e 10 cm (b).	60
46	Obtenção do valor de permeabilidade do solo a partir da realização de ensaios com cargas hidráulicas de 5 (a) e 10 cm (b).	61
47	Obtenção do valor de permeabilidade do solo a partir da realização de ensaios com cargas hidráulicas de 5 (a) e 10 cm (b).	62
48	Obtenção do valor de permeabilidade do solo a partir da realização de ensaios com cargas hidráulicas de 5 (a) e 10 cm (b).	63
49	Dados experimentais de campo de variação de umidade em função das precipitações acumuladas para 2,5m de profundidade de solo.	65
50	Variação da umidade em função das precipitações acumuladas para 2,5m de profundidade de solo. Valores experimentais e previstos pela equação 45.	66
51	Dados experimentais de campo de variação de umidade em função das precipitações acumuladas para 4,5 m de profundidade de solo.	67
52	Variação da umidade em função das precipitações acumuladas para 4,5m de profundidade de solo. Valores experimentais e previstos pela equação 45.	68

## **AGRADECIMENTOS**

Ao prof. Sandro pela orientação sempre paciente dentro da sua incontestável capacidade profissional, incentivando-me a permanente busca do saber.

Ao prof. Marco Botelho pelo grande apoio.

Ao prof. Luís Aníbal pela enorme contribuição.

A prof. Iara pelas preciosas sugestões.

Ao Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFBA por todo o apoio dado à pesquisa.

À CAPES pelo financiamento da bolsa de estudos.

A todos os amigos do Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFBA.

Aos colegas e amigos do MEAU.

E, particularmente, ao amigo Tiago Dourado pela grande contribuição em todos os momentos solicitados.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar o potencial do uso do GPR para o estudo do perfil da umidade dos solos não saturados. Para tanto um aparato mecânico foi desenvolvido para a realização de testes de laboratório e de campo, tipo CMP (ponto médio comum). Foram realizados testes de laboratório com antenas de 200 e 1000Mhz de frequência em areia com controle de umidade para calibração do equipamento. Os testes de campo tiveram como objetivo estudar o potencial desta ferramenta no monitoramento da umidade do solo em campo. Utilizou-se o método  $T^2 \times X^2$  para determinação da velocidades da onda para os dados refletidos dos ensaios tipo CMP, em combinação com a equação do DIX. Os dados de umidade obtidos nos ensaios de campo foram comparados com os dados das precipitações diários, coletadas no local, nos períodos de chuvas fortes e de estiagem. Para cálculo da umidade de campo, utilizando-se as informações do GPR, uma formulação teórica dependente dos índices físicos do solo e da velocidade da propagação dos pulsos eletromagnéticos foi usada. Os dados experimentais da umidade do solo calculados através das medidas obtidas com o radar tiveram resultados condizentes com a condição do solo, nos períodos chuvosos e de estiagem. Esta pesquisa demonstra a grande potencialidade do radar para estudos de monitoramento da umidade de campo.

## **ABSTRACT**

This work intends to evaluate the GPR potential of use aimed to obtention of water content profiles in the vadose zone. In order to do that, a laboratory mechanical apparatus was developed in way that constant mid point tests can be performed, allowing the obtention of precise CMP radagrams. The apparatus, a sand box with nominal dimensions of 1 x 0,7 x 0,7 m, had a mechanical device that assures equal displacements from central point. Laboratory tests were performed in order to calibrate equipment and obtain experimental data correlating soil water content and pulse travel velocities theoretical equation, develop inside the scope of the research program, was used in order to predict the relative amounts of water and air in the soil voids. Fields test were performed along year weekly and of the occurrence of heavy rain falls. Daily measurements of precipitation were made and the water content profiles obtained were compared with the accumulated precipitation during as choiced time interval. It is showed that GPR is able to monitor the soil water content in the vadoze zone, allowing the obtention of hydric balance, run-off coefficients and other indexes of interest.

---

## INTRODUÇÃO

A crescente evolução das pesquisas tecnológicas, nas mais diversas áreas do conhecimento humano, tem contribuído bastante para o desenvolvimento científico. Por outro lado, a disponibilidade de ferramentas cada vez mais precisas e sofisticadas exigem a realização de novas pesquisas para um melhor conhecimento de suas utilidades. Como exemplo, o uso do equipamento de radar, fabricado por alguns países como EUA, Canadá, Suécia e outros, tem trazido grandes benefícios a vários segmentos da engenharia. Este equipamento, conhecido como GPR (*Ground Penetrating Radar*), ou ainda, Radar Penetrante no Solo, tem diversas utilidades para pesquisas relacionadas com o solo. O GPR é um método de investigação geofísica não destrutivo e não invasivo que se baseia na emissão de ondas eletromagnéticas no solo e tem se mostrado atraente em diversas aplicações. Apesar disto, o seu uso racional exige que estudos específicos sejam realizados.

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o potencial de uso do GPR para o estudo do perfil de umidade de solos não saturados, assim como, para monitorar o avanço da frente de infiltração de água no solo. Como objetivos específicos citam-se:

- i. Desenvolvimento e teste de aparatos mecânicos para realização de testes tipo CMP (*Common Mid Point* ou Ponto Médio Comum), para determinação da velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas e de constante dielétrica de meios porosos.
- ii. Avaliação da confiabilidade dos dados obtidos, quando da comparação com os dados coletados por meio de método convencional.

A pesquisa experimental foi realizada em laboratório e em campo. Nos ensaios laboratoriais foram utilizadas técnicas diretas de medidas de umidade do solo, as quais foram comparadas aos valores obtidos da velocidade de propagação da onda eletromagnética determinada com o GPR, utilizando solos arenosos e com certo teor de silte e argila. Neste caso, procurou-se utilizar o GPR com o mesmo princípio de funcionamento da técnica de TDR (*Time Domain Reflectometry* ou Reflectometria no Domínio do Tempo). Para a realização dos ensaios de laboratório, um equipamento foi desenvolvido para a realização de ensaios de radar do tipo CMP. A calibração do equipamento foi realizada medindo-se a velocidade de propagação do pulso eletromagnético para diferentes valores

de umidade. Para o trabalho de campo foi escolhida área piloto para realização dos trabalhos em diferentes estações do ano, visando monitorar a frente de infiltração por meio de análises da velocidade de propagação do pulso de radar e medidas das precipitações ocorridas no local no período da pesquisa. Em dias de forte chuvas, por exemplo, é de se esperar uma velocidade do sinal de radar mais baixa em relação aos dias de estiagem, pois o conteúdo de água presente no solo aumenta consideravelmente a constante dielétrica média relativa do solo.

Para cálculo da umidade de campo, deduziu-se uma formulação teórica dependente dos índices físicos do solo e da velocidade de propagação dos pulsos eletromagnéticos. Como base nesta formulação, verificou-se que os dados de umidade do solo calculados através do radar tiveram resultados condizentes com a condição de umidade do solo, tanto para os períodos chuvosos, quanto para os períodos de estiagem, demonstrando, desta forma, a grande potencialidade do radar para estudos de monitoramento da umidade de campo.

Este trabalho está dividido da seguinte forma:

- No capítulo 1 é mostrado a que se propõe a pesquisa, bem como, o objetivo geral e específicos e o tipo de pesquisa realizada;
- No capítulo 2, é apresentado uma revisão da literatura onde é mostrado os princípios de funcionamento da técnica de radar, os princípios físicos, as técnicas de ensaio, os métodos para determinação da velocidade de propagação da onda, a influência da constante dielétrica na velocidade de propagação do pulso eletromagnético e alguns trabalhos realizados com o radar para estimativa de umidade em laboratório;
- A metodologia dos ensaios de laboratório e de campo foram descritos no capítulo 3, bem como, os materiais utilizados na pesquisa e o detalhamento dos itens usados na montagem dos aparatos mecânicos desenvolvidos;
- Os resultados alcançados e suas análises são expostos no capítulo 4;
- No capítulo 5 é apresentada a conclusão;
- No capítulo 6 é mostrado as referências.

É importante salientar que todo trabalho desenvolvido contou com o apoio logístico e financeiro do GEOAMB – Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFBA, onde estão alocados computadores e aplicativos capazes de processar dados de radar como o *Gradix V* desenvolvido pela *Interpex* e o *SU – Seismic Unix* da *CWP – Center for Wave Phenomena* da *Colorado School of Mines*. O primeiro programa é compatível com o sistema operacional *Windows 98* e não há distribuição gratuita, o segundo possui distribuição gratuita e requer um ambiente operacional *Unix* ou *Linux* (no caso de

PC's) para ser executado, podendo ser adquirido pela internet no endereço <http://www.cwp.mines.edu/cwpcodes>. O laboratório cedeu, também, todos os equipamentos disponíveis para o desenvolvimento da pesquisa.

---

## REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 GPR

O Radar de Penetração do Solo ou *Ground Penetrating Radar* (GPR) é um método geofísico de investigação do solo muito utilizado atualmente na engenharia, para fazer investigações não destrutivas em subsuperfície, por meio de emissão de ondas eletromagnéticas, frequentemente comparado com estudos sísmicos. Tanto o radar quanto a sísmica têm como resultado leituras feitas a partir das reflexões e difrações, oriundas da interação entre o sinal emitido e as propriedades dos alvos no subsolo. Deve-se ressaltar, contudo, que as reflexões sísmicas são geradas quando uma onda mecânica encontra uma camada na subsuperfície com diferentes propriedades elásticas de solos e rochas, enquanto que no radar GPR as reflexões são geradas quando uma onda eletromagnética encontra um objeto ou camada na subsuperfície com diferentes propriedades elétricas (Smemoe, 2000). Os sinais eletromagnéticos de alta frequência que refletiram nos contrastes subsuperficiais de constante dielétrica são gravados, produzindo imagens (radargramas de reflexão) de alta resolução da subsuperfície rasa. Trata-se, portanto, de um equipamento de investigação não destrutiva do solo por meio da análise do tempo de percurso de ondas eletromagnéticas.

Além de propiciar ensaios não destrutivos, o GPR possui ainda facilidades operacionais como portabilidade dos equipamentos para aquisição dos dados, grande versatilidade do arranjo de campo das antenas e acessórios, similaridades das técnicas de processamento com aquelas utilizadas para tratamento de dados sísmicos já consagradas no meio geofísico e certa flexibilidade para uso da criatividade em função de se obter a melhor forma de aquisição dos dados.

Inicialmente o radar GPR foi utilizado na determinação das espessuras das camadas de gelo da

Antártica e do Ártico, a exemplo do trabalho de Annan e Davis (1976). Só a partir da década de 90 o radar passou a ser utilizado em estudos de caráter geotécnico, mais recentemente sendo usado para estimar o conteúdo de água do solo, a exemplo dos trabalhos de Greaves et al. (1996), Hagrey, S. A., and Müller, C. (2000), Huisman et al. (2001) entre outros.

O uso da ferramenta geofísica Radar de Penetração no Solo vem se ampliando, nos últimos anos, às mais variadas áreas do conhecimento humano. Na engenharia, diversas aplicações podem ser citadas, como na engenharia de estruturas, na geotecnia, ou mesmo na engenharia ambiental (ver tabela 1). Por outro lado, a grande dependência que o teor de água preserva com a velocidade da onda eletromagnética utilizada pelo radar, vem sendo explorada com sucesso por uma série de trabalhos contidos na literatura. Da mesma forma, este trabalho apresenta uma alternativa de monitoramento dos teores de água, através do cálculo da umidade de campo, obtida a partir da velocidade da onda eletromagnética do radar. A onda eletromagnética sofre variação de velocidade ao percorrer materiais com diferentes propriedades elétricas (Davis e Annan, 1989). A água, por possuir um alto valor de constante dielétrica em relação ao solo, tem a capacidade de modificar o valor da constante dielétrica relativa do mesmo após infiltração.

**Tabela 1.** Trabalhos com aplicação da técnica de radar GPR.

<b>Área</b>	<b>Autor(es)</b>	<b>Aplicação</b>
Estrutural	Grandjean et al. (2000)	Detectaram espaços vazios em grandes estruturas de concreto.
Ambiental	Daniels (1995)	Detectou a presença de alguns líquidos contaminantes no solo.
	Machado et al. (2003)	Estimaram a espessura de escória de chumbo situada abaixo do pavimento.
Geofísica Aplicada	Botelho et al. (2003)	Analysaram a influência da água e de hidrocarbonetos líquidos na velocidade de propagação do sinal de radar em pacotes arenosos.
Geológica	Toshica et al. (1995)	Detectaram fraturas verticais em rochas.
Geotécnica	Nakashima et al. (2001)	Estimaram o nível do lençol freático.

### 2.1.1 Princípios de Funcionamento

Tanto a luz visível como as ondas de rádio são exemplos de ondas eletromagnéticas, sendo que a

primeira possui frequência muito maior do que a segunda. A luz visível é produzida quando um elétron muda de nível dentro do átomo. As ondas de rádio, porém, são produzidas numa antena. A antena possui uma peça de metal e um circuito elétrico onde é produzida uma corrente elétrica, que são elétrons em movimento ordenado. Esses elétrons se movem de um lado para o outro, milhões de vezes por segundo, produzindo ondas eletromagnéticas com frequência igual a frequência do seu movimento.

A relação entre a frequência e o comprimento de onda eletromagnética é dada pela equação:

$$f = \frac{V}{\lambda} \quad (1)$$

Onde  $f$  é a frequência do pulso,  $V$  a velocidade de propagação da onda no meio e  $\lambda$  o comprimento de onda.

O método do radar consiste na emissão contínua de pulsos eletromagnéticos (ondas de rádio com frequências variando entre 10 e 2500MHz) e recepção dos sinais refletidos nas estruturas ou interfaces em subsuperfícies. Os sinais são emitidos e recebidos através das antenas dispostas na superfície do solo. As medidas de tempo de percurso das ondas eletromagnéticas são efetuadas ao longo de linhas que, quando justapostas lado a lado, fornecem uma imagem detalhada do subsolo ao longo do perfil estudado. As mudanças nas propriedades elétricas fazem com que parte do sinal seja refletido e parte refratado. As ondas refletidas em diferentes interfaces são recebidas pela antena receptora colocada na superfície do terreno. A energia refletida é registrada em função do tempo de percurso, sendo amplificada, digitalizada e gravada em um micro computador portátil para posterior processamento, resultando em uma imagem de alta resolução (radargrama), que permite identificar as diversas interfaces presentes no local.

Na figura 1 é apresentado um radargrama resultante de um ensaio realizado com o radar, em uma via urbana. Nesta figura pode-se observar o padrão de reflexão no radargrama, gerado pela presença de uma “boca de lobo”, obtida pela passagem propositada da antena por sobre a mesma. Um tubo localizado abaixo da pavimentação (perpendicular a linha de ensaio) será representado no radargrama como uma hipérbole, conforme é indicado na figura. Estes eventos serão melhor descritos no item 2.1.3 deste capítulo.

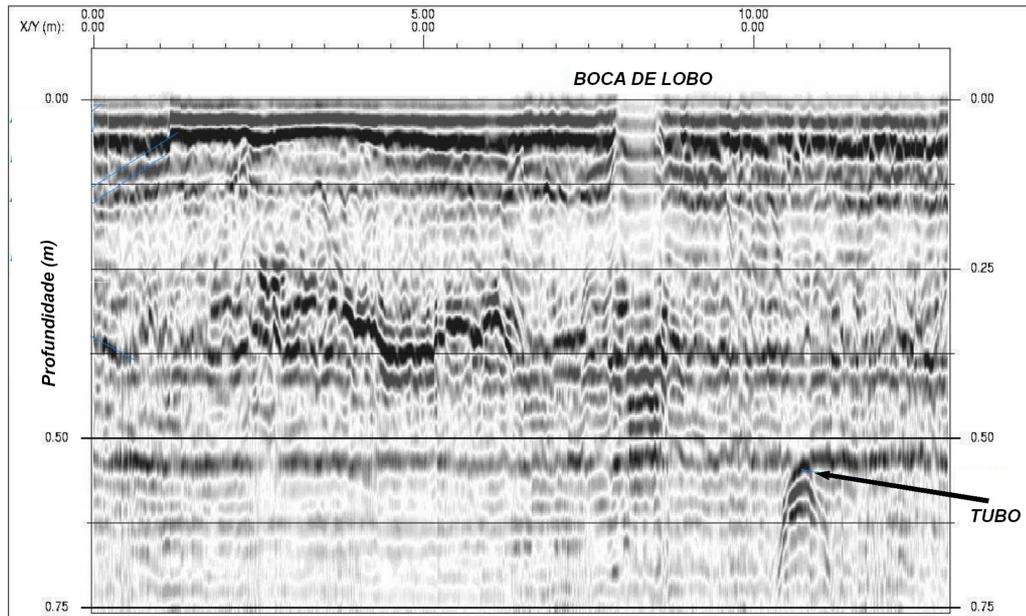


Figura 1. radargrama resultante de ensaio realizado com o GPR em uma via urbana.

### 2.1.2 Princípios Físicos

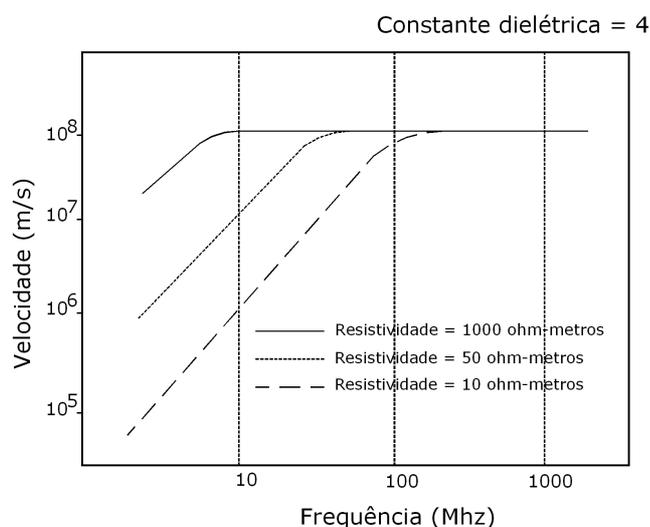
A equação abaixo, estabelecida por Maxwell, pode ser utilizada para cálculo da velocidade de propagação de uma onda eletromagnética em um meio.

$$V = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2} \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \cdot \epsilon^2}} + 1 \right)^{\frac{1}{2}}}} \quad (2)$$

Na equação 2,  $\mu$  é a permissividade magnética,  $\epsilon$  é a permissividade dielétrica,  $\sigma$  é a condutividade do meio e  $\omega$  corresponde à frequência do pulso magnético empregado. A permissividade do meio pode ser calculada pela equação 3 apresentada a seguir. Nesta equação,  $\epsilon_0$  corresponde à permissividade do vácuo e  $\epsilon_r$  corresponde à constante dielétrica relativa do meio. Para o vácuo, os valores obtidos para  $\mu$  e  $\epsilon$  são respectivamente:  $4\pi \times 10^{-7}$  Tesla.m/ampere e  $8,8541 \text{ coulomb}^2/\text{N.m}^2$ .

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (3)$$

Observa-se no gráfico da figura 2 curvas de velocidade *versus* frequência para diferentes resistividades. A frequência dos pulsos eletromagnéticos utilizados pela técnica de radar varia de 10 Mhz a 2,5 Ghz, de modo a evitar a variação de velocidade com a resistividade. A variação da velocidade com a frequência é um fenômeno indesejado já que pretende-se investigar a influência das propriedades do meio sobre a velocidade de propagação, ou melhor, investigar a variação das propriedades do meio através das variações da velocidade de propagação da onda.



**Figura 2.** Relação entre velocidade e frequência para diferentes resistividades.

A partir desta figura é possível observar que a velocidade independe da frequência para meios com resistividade superiores a 1000 Ohm-metro, dentro da faixa de frequência dos pulsos eletromagnéticos de radar.

Desta forma, para meios com alta resistividade e considerando a faixa de frequências onde o GPR trabalha, a equação 2 assume uma forma mais simplificada:

$$V = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} \quad (4)$$

Sendo a permeabilidade magnética relativa  $\mu$  em torno de 1 para a maioria dos materiais geológicos,

com excessão de alguns minerais magnéticos e ferrosos, a constante dielétrica será unicamente responsável por mudanças na velocidade de propagação da onda. Considerando as hipóteses levantadas acima, a velocidade de pulsos eletromagnéticos de alta frequência em meios não muito condutores, será calculada pela equação 5.

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5)$$

Onde,  $c$ , corresponde à velocidade da luz no vácuo, adotada como sendo igual a 30 cm/ηs. São apresentados na tabela 2 os valores de constante dielétrica para alguns materiais. Pode-se notar que a água possui o maior valor de constante dielétrica dentre os materiais da tabela e os materiais geológicos possuem valores de constante dielétrica em torno de 4. Esta larga diferença explica porque a velocidade do sinal do radar é fortemente dependente da umidade do solo (Davis e Annan, 1989). Para a areia saturada, por exemplo, a constante dielétrica é quase dez vezes maior que na areia seca. Neste caso é de se esperar uma diferença notável na velocidade da onda eletromagnética para a areia nas duas condições. Já no caso em que o solo esteja saturado com hidrocarbonetos líquidos (derramamentos de combustíveis no solo, por exemplo), a velocidade de propagação do pulso de radar será maior do que em solos saturados com água. Isto é evidenciado no trabalho de Botelho et al. (2003), onde saturando duas camadas de areia com fluidos diferentes observou-se valores de velocidade de propagação do pulso maiores no meio saturado com óleo diesel, cuja constante elétrica é em torno de 2.

**Tabela 2.** Valores típicos de constante dielétrica relativa,  $\epsilon_r$ , para diferentes materiais.

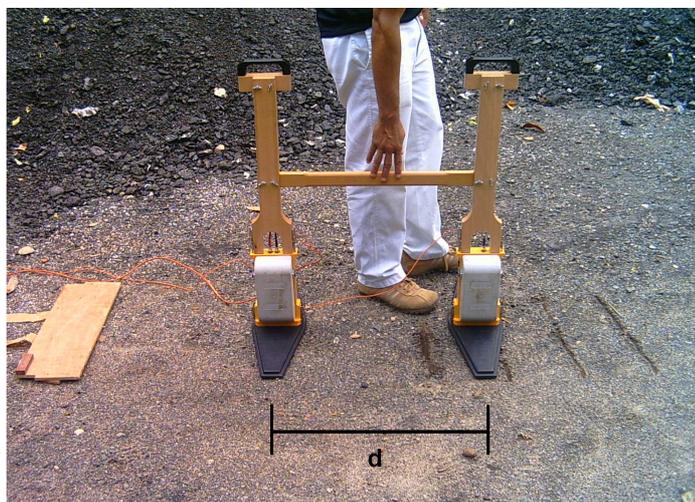
<i>Material</i>	$\epsilon_r$
Água a 20°	80
Ar	1
Quartzo	4,2
Areia seca	3 a 5
Areia saturada	20 a 30
Argila seca	5
Argila saturada	40
Benzeno	2,1 a 2,3
Gasolina	2,0 a 2,2
Tolueno	2,0 a 2,4
Parafina	2,2 a 4,7
Álcool industrial	16 a 32
Acetona	17 a 21

### 2.1.3 Técnicas de ensaio do radar

Duas técnicas de ensaio bastante utilizadas nas investigações com radar são os ensaios com afastamento constante e os ensaios de ponto médio comum.

#### 2.1.3.1 Método de Afastamento Constante

O método de ensaio com afastamento constante é rápido e prático, e permite investigar extensas áreas em curto espaço de tempo. Neste ensaio pode-se identificar anomalias presentes no subsolo, nível do lençol freático, existência de corpos enterrados e formações geológicas. Nos ensaios tipo afastamento constante, as antenas transmissora e receptora deslocam-se juntas com espaçamento entre elas fixo, representado na figura 3. Este afastamento é de cerca de 60 cm para antenas de 200 e 400 Mhz de frequência, variando de acordo a frequência de cada antena e com o modelo de equipamento utilizado.



**Figura 3.** Ensaio com afastamento constante (d) entre as antenas receptora e transmissora com 200 Mhz de frequência.

Ao percorrer uma linha em um determinado terreno com o espaçamento fixo entre as antenas é

produzida uma imagem no microcomputador em tempo real chamada de radargrama. Esta imagem é gerada em função das reflexões dos sinais emitidos decorrentes dos contrastes dielétricos existentes no solo.

A energia refletida quando proveniente de um alvo pontual (tubo, matacão e etc) resulta em uma hipérbole no radargrama. Uma camada de solo ou o nível de água também será um evento de reflexão no radargrama, porém, não terá uma hipérbole como resultado, pois neste caso não se trata de um objeto pontual. É mostrado na figura 4 uma representação gráfica da construção do radargrama a partir da reflexão do sinal gerada por uma camada de solo ou nível de água e por um alvo pontual representado por um tubo.

Na figura 4, a antena transmissora (T) emite um pulso que se propaga no solo e ao encontrar contrastes dielétricos este pulso retorna, sendo captado pela antena receptora (R). Na posição (1) as antenas emitem pulsos que iniciam a construção da hipérbole (gerada pela presença do tubo) cujo vértice é construído pelos pulsos gerados com as antenas centralizadas com relação ao tubo. A maior aproximação das antenas em relação ao tubo na posição 2 determina um menor tempo observado no eixo vertical.

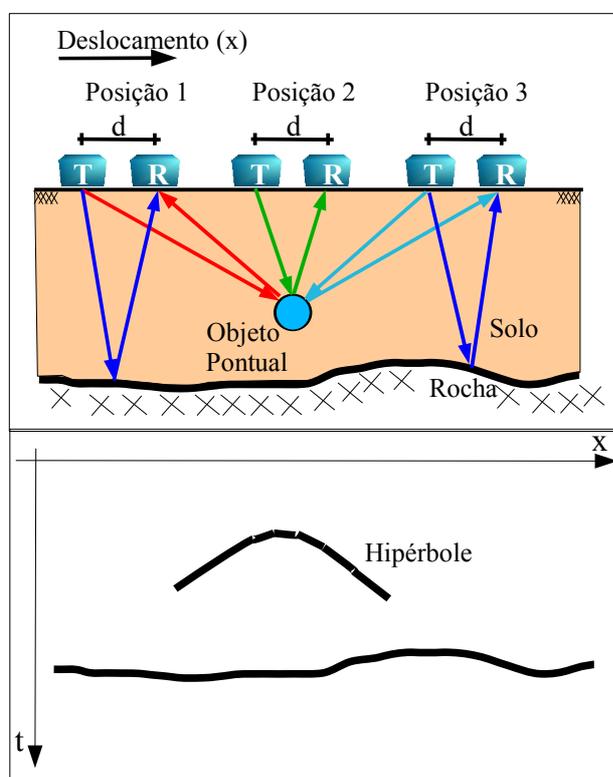
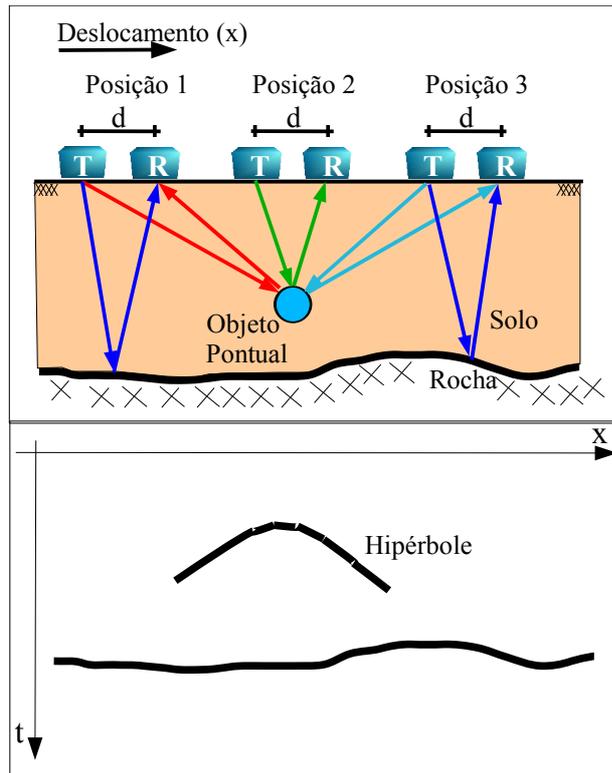


Figura 4. Representação gráfica da técnica de



execução de ensaio com afastamento constante utilizada para a construção do radargrama de reflexão.

Conforme mostra a figura 4, o radargrama é gerado em função do deslocamento ( $x$ ) das antenas e o tempo ( $t$ ) de percurso da onda. No caso do tubo transversal, a linha do ensaio é representado, no radargrama, como uma hipérbole por se tratar de um alvo pontual.

A velocidade média (ou velocidade *rms*) entre a superfície do solo e a anomalia pontual determinada por este método, é obtida do ajuste da hipérbole aos tempos de chegada medidos em diversas posições  $x$ , de acordo com a equação 6.

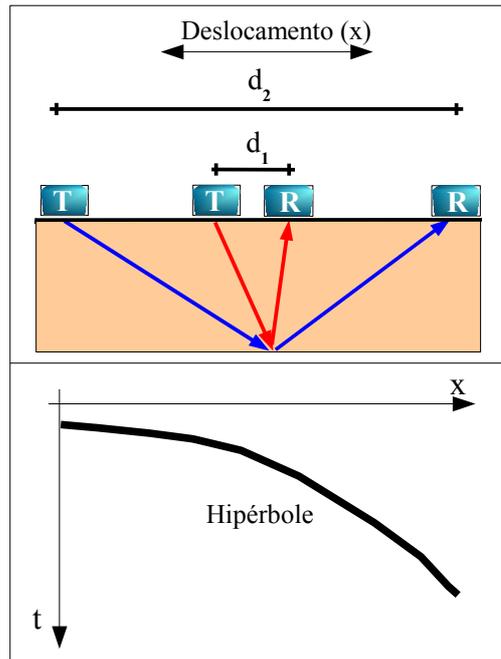
$$V = \frac{2\sqrt{x^2 + z^2}}{t} \quad (6)$$

Onde  $x$  é a posição central das antenas localizadas na superfície acima do objeto,  $z$  a profundidade na qual se encontra o alvo e  $t$  o tempo de chegada da onda refletida.

### **2.1.3.2 Método do Ponto Médio Comum (CMP)**

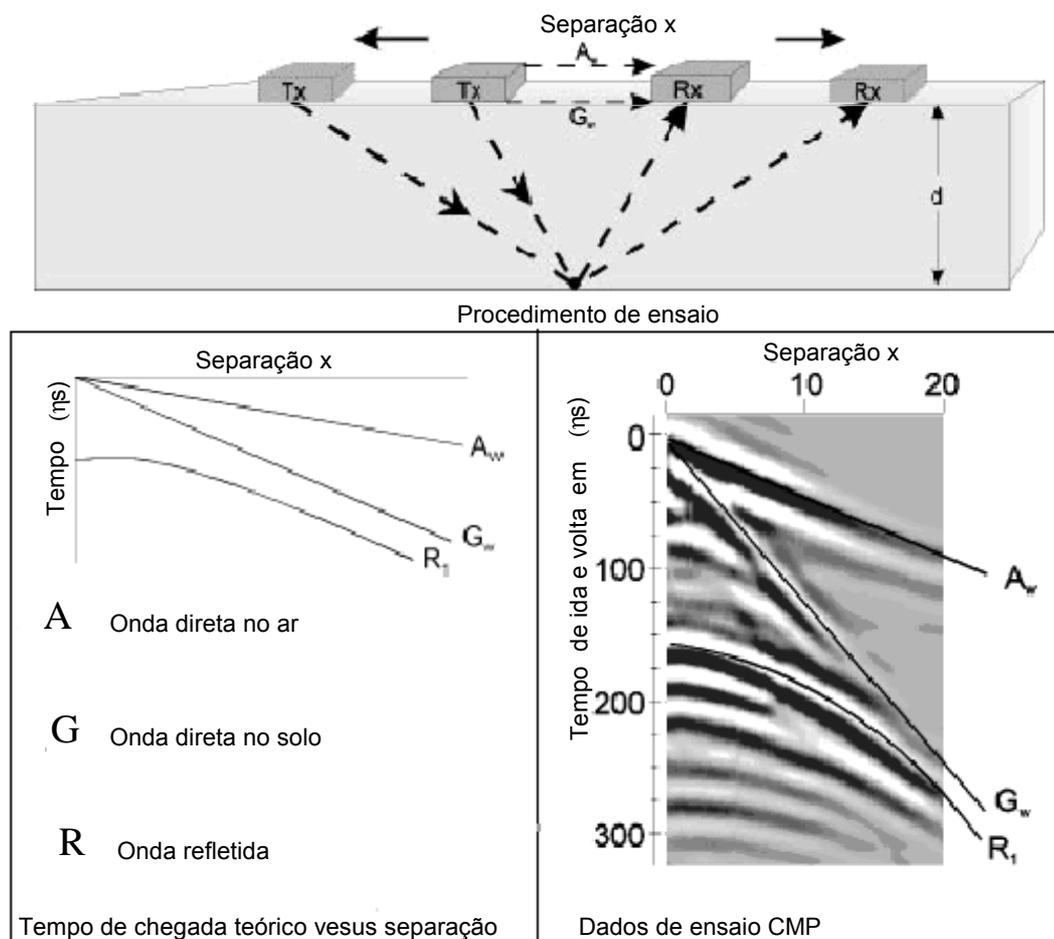
O ensaio realizado com geometria CMP fornece informações do ponto central correspondente ao eixo vertical entre as antenas, ao contrário do ensaio realizado com afastamento constante. A vantagem deste método em relação ao anterior é que não se necessita de pontos difratores para determinação da velocidade. O arranjo de aquisição CMP gera hipérbolas de reflexão, como aquela observada na figura 5, as quais permite a determinação da velocidade utilizando algum método de análise de velocidade, como por exemplo, o método  $t^2 - x^2$ .

Nos ensaios de radar realizados seguindo a técnica CMP as antenas são deslocadas de maneira equidistante em relação ao ponto médio comum, como mostrado na figura 5.



**Figura 5.** Técnica de execução de ensaio utilizada para a construção do radargrama através da técnica CMP.

Nota-se, nesta figura, que o tempo de propagação da onda aumenta em relação ao afastamento das antenas, segundo uma função hiperbólica. A figura 6 mostra o procedimento de ensaio tipo CMP identificando os diferentes caminhos percorridos pelo pulso eletromagnético emitido pela antena transmissora. Observando o radargrama da figura, as primeiras reflexões normalmente são referentes às ondas diretas no ar (A), ou seja, ondas que se propagam da antena transmissora diretamente para a antena receptora pelo ar. Estas ondas podem ser facilmente reconhecidas, pois a sua velocidade de propagação corresponde à velocidade da luz ( $c = 30\text{cm}/\text{ns}$ ). A onda direta no solo (G) percorre a sua camada superficial (primeiros 20cm), também diretamente de uma antena a outra, porém pela subsuperfície. A onda refletida R é proveniente de uma reflexão quando do contraste de mudanças dielétricas presentes no solo, podendo, no entanto, atingir uma profundidade de dezenas de metros, dependendo da frequência da antena utilizada e das propriedades elétricas do material.



**Figura 6.** Eventos idealizados dos tempos de chegada em função da separação das antenas em sondagens do tipo CMP (adaptada de Annan, 2001).

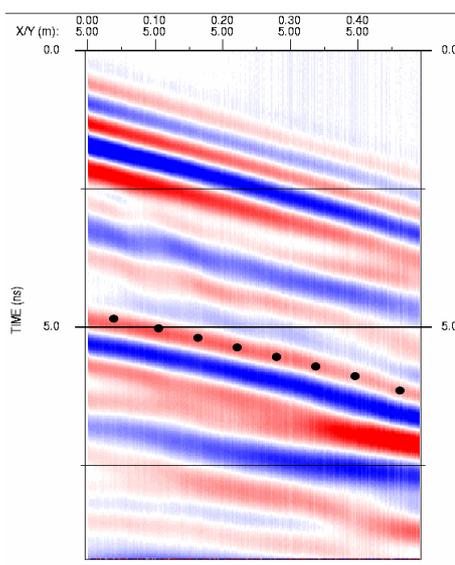
Tanto a onda R como a onda G podem ser usadas para estimativa da umidade do solo. É importante salientar, contudo, que as ondas descritas acima são obtidas do ensaio realizado com geometria tipo CMP. Ainda na figura 6, no quadro do lado direito, é apresentado o radargrama resultante do ensaio tipo CMP, com identificação das diferentes propagações da onda eletromagnética.

### 2.1.4 Métodos para determinação da velocidade de propagação da onda eletromagnética

A determinação da velocidade de propagação do pulso eletromagnético no solo é de grande importância para uma correta conversão do tempo em profundidade. O conhecimento da profundidade permite localizar possíveis anomalias identificadas a partir dos ensaios de afastamento

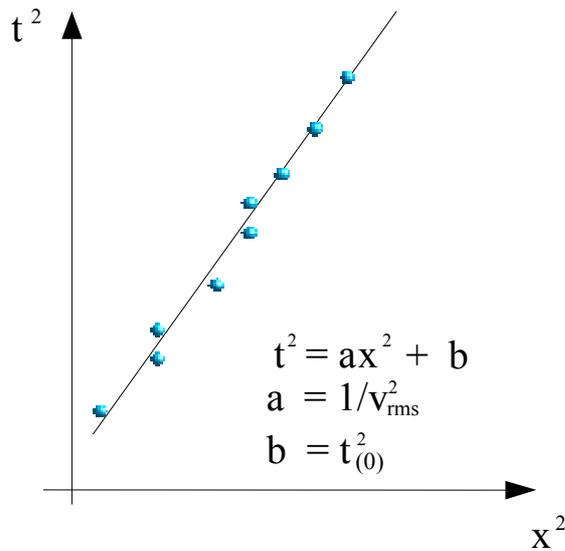
constante, bem como, definir espessuras de diferentes camadas do solo.

Os dados recolhidos por meio de ensaios tipo CMP podem ser processados por diferentes métodos de análise para determinação da velocidade de propagação da onda. São encontrados na literatura uma variedade de métodos para estimativa da velocidade de propagação da onda eletromagnética. Esses métodos são análogos aos métodos para análise de velocidade dos dados sísmicos (Yilmaz, 1987). Dentre eles pode-se citar o método de análise *semblance* e o método  $t^2 - x^2$ . O *semblance* baseia-se na correlação entre a máxima composição das amplitudes de cada refletor e a correta velocidade rms que descreve a reflexão do refletor com o objetivo de realizar a correção de NMO, o empilhamento dos traços da família CDP e a geração da seção empilhada. No método  $t^2 - x^2$ , empregado neste trabalho, os pontos de espaçamento entre as antenas ( $x$ ) e tempo de trânsito ( $t$ ) são coletados de uma determinada hipérbole no radargrama, conforme mostra a figura 7.



**Figura 7.** Pontos coletados da hipérbole.

Os pontos de  $t^2$  (quadrado do tempo de trânsito da energia refletida) versus  $x^2$  (quadrado do espaçamento das antenas) são plotados em um gráfico de acordo com a figura 8.



**Figura 8.** Reta obtida a partir do método  $t^2 - x^2$ .

A equação 7 define o comportamento do tempo de trânsito da energia refletida  $T(x)$  em função da velocidade ( $V$ ), da distância de afastamento das antenas ( $x$ ) e do tempo inicial ( $T_0$ ), que depende da profundidade do alvo.

$$T(x)^2 = T_0^2 + \frac{x^2}{V^2} \quad (7)$$

Ajustando-se os pontos plotados pelo método dos mínimos quadrados obtêm-se uma reta definida pela equação (8).

$$t^2 = a.x^2 + b \quad (8)$$

Na qual o coeficiente angular ( $a$ ) é numericamente igual ao inverso do quadrado da velocidade e o coeficiente linear ( $b$ ) corresponde ao quadrado do tempo de percurso da onda quando  $x = 0$  ( $T_0$ ). A velocidade obtida neste método é a  $V_{rms}$  (*root minimum square*) que corresponde a velocidade média de propagação da onda no meio situado acima do refletor que originou a hipérbole.

Na existência de vários refletores, as velocidades de cada trecho determinadas por este método corresponderão sempre à velocidade *rms*. Para se calcular a velocidade compreendida entre dois refletores consecutivos (que pode corresponder a velocidade em uma camada de solo), utiliza-se a

formulação de Dix (1995).

$$V_n = \sqrt{\frac{V_{m,n}^2 \cdot T_{total,n} - V_{m,n-1}^2 \cdot T_{total,n-1}}{T_{total,n} - T_{total,n-1}}} \quad (9)$$

Na equação 9,  $V_n$  corresponde à velocidade de propagação do pulso eletromagnético na camada  $n$ ,  $V_{m,n}$  corresponde à velocidade média de propagação até a base da camada  $n$ ,  $T_{total,n}$  corresponde ao tempo total de percurso, ida e volta, até a base da camada  $n$ .  $V_{m,n-1}$  e  $T_{total,n-1}$  têm significados análogos aos termos  $V_{m,n}$  e  $T_{total,n}$ , para o caso da camada  $n-1$ .

A espessura da camada  $n$ ,  $Z_n$ , é dada pela equação 10, apresentada a seguir.

$$Z_n = \frac{V_n \cdot (T_{total,n} - T_{total,n-1})}{2} \quad (10)$$

Conclui-se, portanto, que existem diferentes métodos para aquisição de dados de radar GPR, bem como, diversas maneiras para determinação da velocidade de propagação do meio investigado, sempre servindo-se das similaridades cinemáticas entre os métodos sísmicos e eletromagnéticos, para utilizar conceitos pré-existentes na teoria sísmica.

### **2.1.5 A influência da constante dielétrica na velocidade de propagação do pulso eletromagnético**

Conforme dito anteriormente, a reflexão do sinal eletromagnético emitido pelo radar é dependente dos contrastes dielétricos do solo. A grande diferença nos valores das constantes dielétrica relativas da água e do solo (ver tabela 2) faz com que a velocidade do sinal do radar seja fortemente dependente da umidade do solo (Davis e Annan, 1989). Desta forma, variações nas propriedades elétricas do meio são usualmente associados com mudanças na umidade volumétrica.

Dentre os que estudaram a umidade de solos a partir da avaliação da velocidade de propagação dos pulsos eletromagnéticos, destacam-se os trabalhos de Topp et al. (1985), Greaves et. al. (1996), Hagrey and Muller (2000) e Huisman et. al. (2001).

Topp et al. (1985) estudaram diversos solos e propuseram uma equação representada por uma série de potências para relacionar a umidade do solo com a constante dielétrica do meio.

$$\theta = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \cdot \epsilon_r - 5,5 \cdot 10^{-4} \cdot \epsilon_r^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \cdot \epsilon_r^3 \quad (11)$$

Na equação 11, a umidade volumétrica do solo,  $\theta$ , definida como a relação entre o volume de água e o volume total da amostra, é calculada em função da constante dielétrica relativa do meio.

Greaves et al. (1996) demonstraram que é possível estimar o conteúdo volumétrico de água da subsuperfície com dados de GPR. A aquisição dos dados seguiram a geometria CMP, e para o cálculo da velocidade intervalar foi utilizado a formulação de Dix (Dix, 1995). Neste trabalho utilizou-se as equações de CRIM (Complex Refractive Index Method) e as formulações de Hanai-Bruggeman para prever as respostas da constante dielétrica em meios trifásicos, correlacionando-se a constante dielétrica com a porosidade, umidade volumétrica e grau de saturação, mostrando a dependência da velocidade de propagação do sinal com estes índices físicos do solo. Não foram realizados ensaios laboratoriais para se fazer analogia com os dados teóricos obtidos. Contudo, os autores incentivam, desta forma, o desenvolvimento de sistemas com GPR capazes de adquirir dados com geometria CMP mais eficientes e demonstraram a possibilidade de estimar a umidade do solo a partir das velocidades intervalares. É importante salientar que Greaves, em seu trabalho, analisou a onda direta no solo, a qual, percorre a camada superficial (primeiros 20cm), diretamente de uma antena a outra, porém percorrendo a subsuperfície.

O trabalho de Hagrey e C. Muller (2000) estuda o efeito da saturação e salinidade da água em parâmetros como a velocidade e o coeficiente de reflexão dos pulsos de radar. Neste estudo, os experimentos foram realizados em modelos físicos muito bem controlados, para permitir avaliar os dados obtidos com as antenas de 500 e 900 Mhz. Hagrey e C. Muller (2000) estudaram, também, a amplitude dos traços dos sinais recolhidos com geometria de afastamento constante. Eles enterraram três tonéis contendo areia saturada com água pura, com água salobra e com água salina e uma placa metálica. Em seguida, realizaram ensaios de afastamento constante na superfície acima dos recipientes. Analisando as amplitudes dos traços gerados no radargrama das reflexões, referente aos recipientes enterrados, concluíram que a amplitude das reflexões aumenta com a salinidade da água. Realizando ensaios em laboratório utilizando antenas de 500 e 900 Mhz de frequência para medidas de umidade em areia eles concluíram, também, que a velocidade diminui com o aumento da umidade e da constante dielétrica.

Huisman et. al. (2001) mostraram uma revisão sobre diferentes métodos para estimar a umidade do solo utilizando o GPR. É possível estimar a umidade por meios de ensaios de radar com afastamento constante, utilizando aquisições de ponto médio comum CMP ou realizando ensaios de tiro comum WARR (*Wide Angle Reflection and Refraction*). Neste trabalho foi mostrado, também, a pouca divergência entre os resultados de umidade obtidos, utilizando a técnica de radar e a de TDR.

## **2.2 Algumas técnicas para medida da umidade do solo**

A determinação da umidade do solo é muito importante para auxiliar nos estudos de investigação do solo, seja na área da engenharia geotécnica, seja na área da agronomia ou em estudos hidrogeológicos. A monitoração contínua do índice de água do solo pode ser um item imprescindível para pesquisa na agricultura e estudos ambientais, podendo também auxiliar nas análises dos parâmetros de estabilidade de taludes e encostas naturais. Visando contribuir com mais uma ferramenta de campo para medida de umidade em subsuperfície, buscou-se no presente projeto desenvolver uma metodologia não destrutiva para medida de umidade em subsuperfície com o emprego da técnica de radar GPR.

A medida de umidade do solo pode ser feita diretamente, por meio de ensaios de campo e laboratório ou indiretamente, através de métodos nos quais se medem propriedades físicas do solo dependentes da umidade. O método direto mais simples é o gravimétrico que consiste na retirada de amostras deformadas para medida da umidade do solo, o que em algumas situações, pode não ser muito adequado por:

- i. favorecer o efeito da contaminação cruzada, quando tratar-se de estudos ambientais que envolvam contaminantes de alta toxicidade ou mobilidade;
- ii. alterar a exatidão dos valores devido aos trabalhos de amostragem (retirada da amostra, transporte e etc.);
- iii. demandar tempo para investigação de extensas áreas;
- iv. aumentar os custos para investigações em profundidade.

Por outro lado, as técnicas indiretas de medida de umidade traz algumas vantagens que podem ser decisivas para a escolha de um método adequado em determinada obra ou pesquisa de campo, como

por exemplo: possibilidade de realizar medidas repetidamente no mesmo local, estimar a umidade média em diferentes profundidades, realizar investigações em extensas áreas em curto espaço de tempo e não necessitar de amostragem.

Dentre os métodos indiretos para medida de umidade, os mais comuns são as técnicas nucleares, a tensiometria e os métodos eletromagnéticos. Pode-se dizer contudo, que todos os métodos, indiretos ou não, possuem vantagens e desvantagens e realizam medidas em diferentes escalas e precisões. Dentre os métodos nucleares, por exemplo, a sonda de nêutrons é a mais utilizada, sendo umas das limitações o uso de material radioativo e ao fato de não fornecer medidas precisas próximo a superfície e ao possível posicionamento incorreto da sonda dentro do tubo, o que pode causar erros na medida de umidade, dentre outros.

Uma alternativa mais barata e de fácil operação, no entanto, para medida de umidade, é a utilização de tensiômetros. Esta técnica fornece medidas de razoável precisão através da obtenção da curva característica do solo e tem como desvantagens a utilização de manômetros de mercúrio que favorecem a poluição ambiental, medida demorada e trabalhosa, etc. Vale ressaltar que os instrumentos mais novos empregam transdutores de pressão dispensando o uso de mercúrio e existem tensiômetros que podem ser empregados para altos valores de sucção, sem cavitação.

As técnicas para medida de umidade que se utilizam dos princípios eletromagnéticos se baseiam nas propriedades dielétricas do solo. Tanto a técnica de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) quanto a técnica de radar se utilizam destes princípios, porém a técnica TDR já é estabelecida na literatura. Diversas produções científicas podem ser citadas com relação ao monitoramento da umidade do solo se utilizando da técnica TDR (Topp et. al., 1985; Baker and Allmaras, 1990; Conciani et. al., 1996, entre outros).

Apesar de ser uma ferramenta muito utilizada para investigação do solo, o radar ainda é pouco usado como técnica para estimar a umidade do solo. Em trabalhos de caráter ambiental, onde se pretende estimar ou monitorar o conteúdo de água em extensas áreas e/ou dezenas de metros em profundidade, o GPR é uma das técnicas mais adequada (Davis e Annan, 1989). Além de propiciar ensaios não destrutivos, o GPR possui ainda facilidades operacionais como portabilidade dos equipamentos para aquisição dos dados, grande versatilidade do arranjo de campo das antenas e acessórios, similaridades das técnicas de processamento com aquelas utilizadas para tratamento de dados sísmicos já consagradas no meio geofísico e custo relativamente baixo. Como todas as outras técnicas geofísicas, contudo, a técnica de radar possui limitações. Enquanto em situações de baixa condutividade (a exemplo dos solos arenosos), o sinal de radar pode atingir profundidades superiores a 20 metros. Em solos argilosos, normalmente bons condutores, pode haver redução da penetração do sinal de radar a profundidades inferiores a 1 metro. Outro fator importante é a resolução dos sinais, sendo esta dependente da frequência das ondas eletromagnéticas. Ondas de comprimentos menores (maiores frequências) possibilitam uma melhor resolução nos sinais, atingindo contudo menores

profundidades (Davis e Annan, 1989).

---

## METODOLOGIA

Buscou-se neste trabalho realizar ensaios laboratoriais e de campo com o objetivo de verificar a potencialidade do equipamento de radar GPR para realizar medidas indiretas de umidade do solo. Os ensaios laboratoriais tiveram como finalidade calibrar o equipamento para medida de umidade em solos arenosos e com certo teor de argila, utilizando os mesmos princípios da técnica de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR). Já nos ensaios de campo procurou-se correlacionar os dados de umidade, obtidos com o radar, com as precipitações ocorridas em um determinado período. Para tanto, criou-se aparatos mecânicos para execução dos ensaios tipo CMP de laboratório e de campo, utilizando antenas de 1000 Mhz e de 200 Mhz. A figura 9 mostra as antenas utilizadas durante a pesquisa.

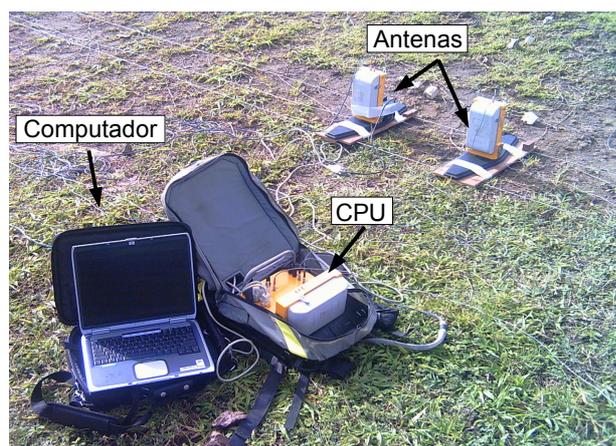


**Figura 9.** Antena com 1000 Mhz (a) e 200 Mhz (b) de frequência.

A figura 9a mostra a antena do radar GPR com 1000Mhz de frequência do tipo monoestática, na qual apenas uma antena é usada tanto como transmissora quanto receptora. A figura 9b apresenta a antena do radar com 200Mhz de frequência do tipo biestática, na qual duas antenas separadas são usadas, uma servindo como transmissora e a outra como receptora.

O equipamento de GPR utilizado durante o desenvolvimento do trabalho foi o Ramac/GPR, fabricado

pela Mala GeoScience. Este equipamento é constituído por 1 antena transmissora, 1 antena receptora, 1 unidade de controle (CPU) e 1 microcomputador portátil, conforme mostra a figura 10. Os parâmetros de operação necessários são ajustados por meio do microcomputador mediante um programa específico para o Ramac/GPR, no caso o *Ground Vision*. Foi utilizado, também, o programa *Gradix V* desenvolvido pela *Interpex*, que permite realizar análises de velocidade e aplicações de filtros e ganhos na imagem de radar.



**Figura 10.** Equipamento GPR utilizado na pesquisa.

### 3.1 Ensaios de Laboratório

Os ensaios de laboratório tiveram duas etapas, que consistiram na calibração do equipamento, realizada em uma caixa de acrílico de 0,5m<sup>3</sup> de volume contendo areia com umidade controlada, sendo a segunda etapa realizada em uma escavação com volume de 7m<sup>3</sup>, preenchida com areia com umidade controlada. Nestes ensaios utilizou-se antenas de 1000Mhz e 200Mhz, respectivamente, correlacionando-se a velocidade de propagação da onda eletromagnética do solo com a umidade gravimétrica medida em estufa.

Conforme dito anteriormente, pretendia-se realizar ensaios na caixa de acrílico em areia e em solos arenosos contendo certo teor de argila, porém, após concluídos os testes com areia uma das antenas de 1000Mhz de frequência apresentou problemas funcionais, impedindo a realização dos testes em

solo argiloso no âmbito desta pesquisa.

### 3.1.1 Ensaio utilizando antenas de 1000Mhz

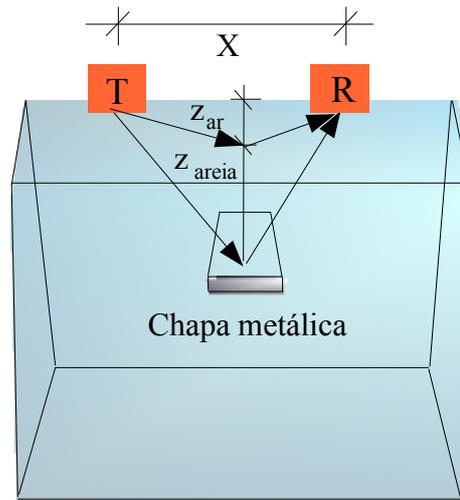
Para calibração do equipamento e realização dos testes em laboratório com antenas de 1000Mhz de frequência foi desenvolvido um equipamento auxiliar que consiste de uma caixa feita em acrílico com volume interno de aproximadamente  $0,5m^3$  e um sistema mecânico capaz de garantir o espaçamento equidistante das antenas transmissora e receptora para realização dos ensaios tipo CMP, os quais são mostrados na figura 11.



**Figura 11.** Equipamento desenvolvido para a realização de testes do tipo CMP em laboratório.

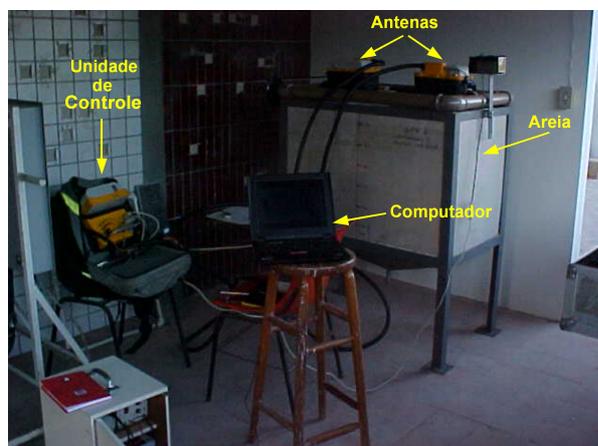
Esta caixa foi preenchida com areia seca e foi colocada a uma profundidade conhecida uma chapa metálica de 20 cm de largura e 50 cm de comprimento com o intuito de criar uma superfície refletora, a mais nítida possível, para melhorar a qualidade dos sinais refletidos, a partir dos quais foram feitas análises da velocidade de propagação do sinal no meio.

A figura 12 mostra uma representação da caixa construída com a disposição da chapa metálica na subsuperfície do solo, com a incidência dos sinais de radar e suas reflexões, tanto do contraste ar/areia quanto do contraste areia/chapa, e sua captação posterior pela antena receptora.

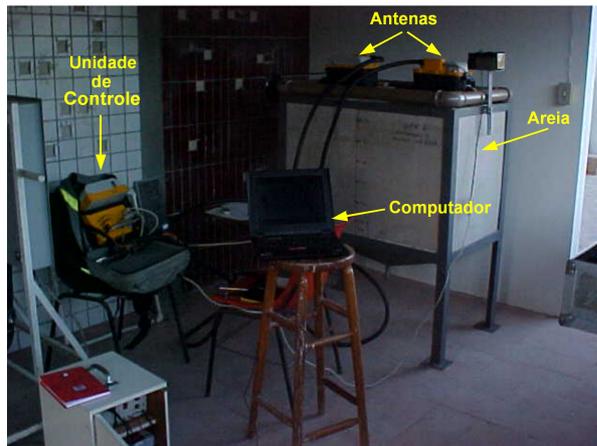


**Figura 12.** Esquema de funcionamento dos ensaios de radar do tipo CMP para execução em laboratório, com variações no teor de umidade.

A técnica de ensaio tipo CMP foi utilizada para a determinação da velocidade de propagação da onda em subsuperfície. Nesta técnica, as antenas receptora e transmissora são afastadas simetricamente de um ponto médio central, de modo que um ponto da interface entre duas camadas horizontais irá aparecer no radargrama de reflexão como uma hipérbole. No ensaio CMP, para cada posição onde o pulso eletromagnético é emitido pela antena transmissora, haverá um ponto na superfície simétrico em relação a antena receptora, que capta o sinal. A justaposição destes sinais (traços) originará uma hipérbole para cada refletor em subsuperfície. A figura 13 mostra o conjunto de equipamentos utilizado na realização do ensaio com o radar em laboratório.



**Figura 13.** Conjunto de dispositivos utilizados para



a realização dos ensaios tipo CMP em laboratório.

Pode-se observar, na figura, as antenas sobre a caixa contendo areia, um computador portátil e a CPU do radar. Os espaçamentos foram lidos por meio de um ôdometro de cordão. Os ensaios foram realizados para diferentes teores de umidade de água, visando obter curvas de umidade *versus* velocidade.

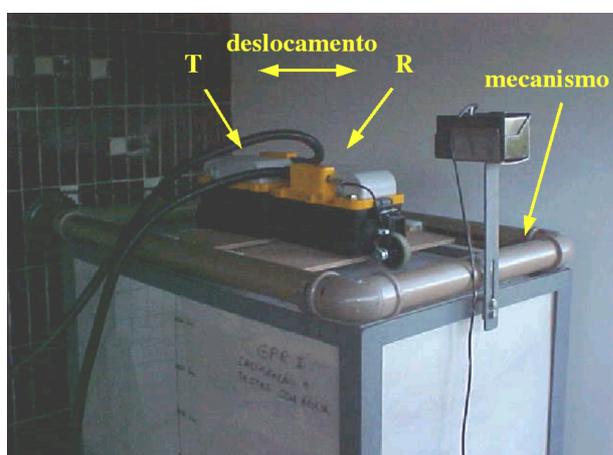
Inicialmente os ensaios foram realizados com a areia na umidade higroscópica. Em seguida adicionou-se um volume controlado de água e após 24hs (tempo necessário para que haja uma uniformização da umidade do solo) executou-se novo ensaio tipo CMP com o radar e coletou-se amostras de solo para medida de umidade em estufa. A hipérbole gerada pelo pulso de radar refletido na chapa foi usada para coletar os pontos do tempo de trânsito ( $t$ ) e espaçamentos entre a fonte e o receptor ( $x$ ). Os procedimentos descritos acima foram repetidos para cada teor de umidade até a saturação do solo. A velocidade de propagação da onda eletromagnética foi determinada conforme descrito no item 2.1.4, utilizando a formulação de Dix, que corresponde a equação 9, devido a existência dos dois contrastes mostrados na figura 12 (ar/areia e areia/chapa). Para cada ensaio tipo CMP na caixa obtém-se um ponto na curva de velocidade de propagação do pulso com a umidade do meio.

Para uma visualização adequada das hipérbolas gerada pela reflexão da chapa no eixo do tempo, utilizou-se uma janela de tempo em função do teor de umidade. Inicialmente foi usado uma janela de 9 ns para a areia na umidade higroscópica, chegando-se a 20 ns para a areia saturada. A janela de tempo teve que ser aumentada devido a diminuição da velocidade da onda com o aumento da

umidade do solo, o que é discutido nos resultados laboratoriais.

### 3.1.1.1 Descrição do mecanismo utilizado nos ensaios de laboratório com antenas de 1000Mhz de frequência

A figura 14 mostra a realização do ensaio tipo CMP em laboratório. A caixa com dimensões de (0,6 x 1,0 x 0,7)m possui um mecanismo desenvolvido para realizações de testes tipo CMP, acoplado na borda superior. Nestes ensaios foram utilizadas duas antenas monoestática, sendo uma servindo como transmissora (T) e outra como receptora (R), conforme indicado na figura 14.

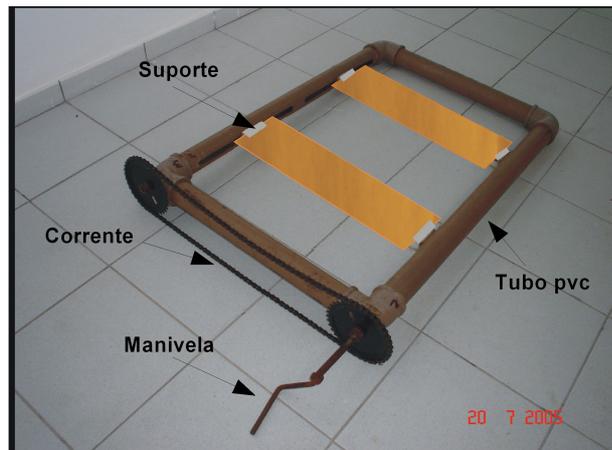


**Figura 14.** Realização do ensaio tipo CMP em laboratório.

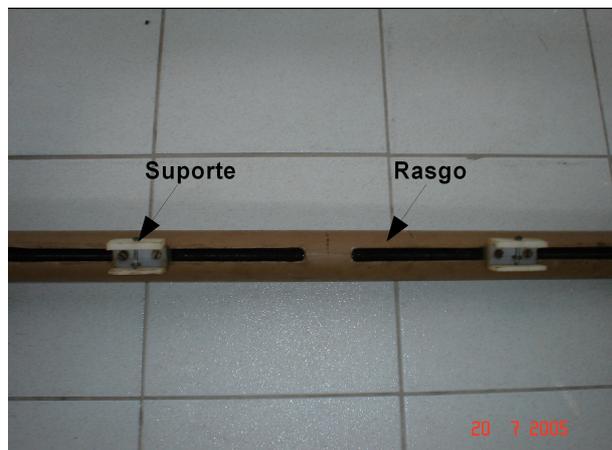
Na figura 15 são indicadas as peças principais do aparato mecânico. O funcionamento do mecanismo consiste em girar a manivela, a qual transmite movimento, por meio de uma corrente, para dois eixos localizados dentro do tubo de pvc.

Este tubo possui rasgos na lateral por onde passa um suporte (rosqueado no eixo) que sustenta as plataformas em madeira (ver figura 16). Os eixos possuem roscas invertidas que por sua vez deslocam as plataformas em sentidos contrários, com o giro da manivela.

Na figura 17 é mostrado as peças separadamente, utilizadas na montagem do mecanismo. Enquanto que o seu detalhamento pode ser observado na figura 18.



**Figura 15.** Mecanismo utilizado nos ensaios laboratoriais.



**Figura 16.** Peças utilizadas.



Figura 17. Peças utilizadas.

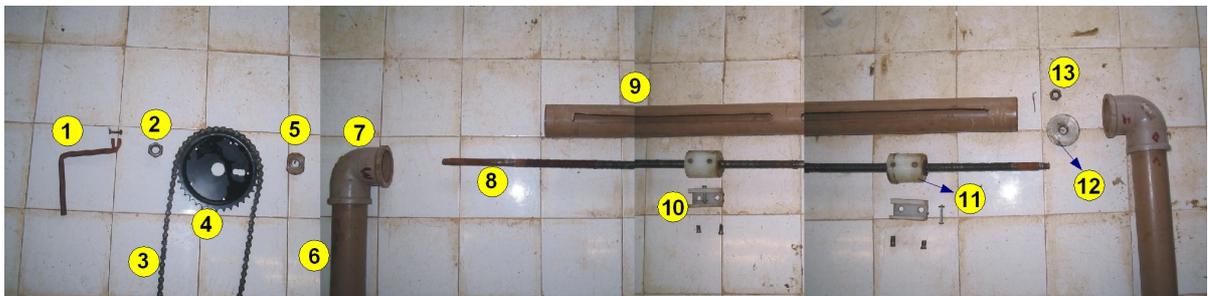


Figura 18. Detalhamento das peças.

As peças para montagem do aparato são numeradas na figura 18 e identificadas na tabela 3, seguindo a mesma numeração.

**Tabela 3.** Descrição das peças utilizadas no aparato mecânico.

<i>Item</i>	<i>Descrição</i>	<i>Quantidade</i>
1	Manivela de ferro	1
2	Porca	2
3	Corrente de transmissão	1
4	Coroa dentada	2
5	Porca de travamento	2
6	Tudo PVC Ø 75mm – parede 4mm	2
7	Joelho PVC Ø 75mm	4
8	Haste de ferro com rosca invertida 1/2"	2
9	Tudo PVC Ø 75mm – parede 4mm	2

10	Suporte em nylon	4
11	Tarugo em nylon Ø 75mm	4
12	Disco de aço	2
13	Porca	2

É recomendável, para melhor qualidade dos dados, manter o sistema lubrificado, evitando interrupção do movimento devido ao atrito, e girar a manivela lentamente a uma velocidade constante para evitar vibrações nas antenas.

### 3.1.2 Ensaios utilizando antenas de 200Mhz

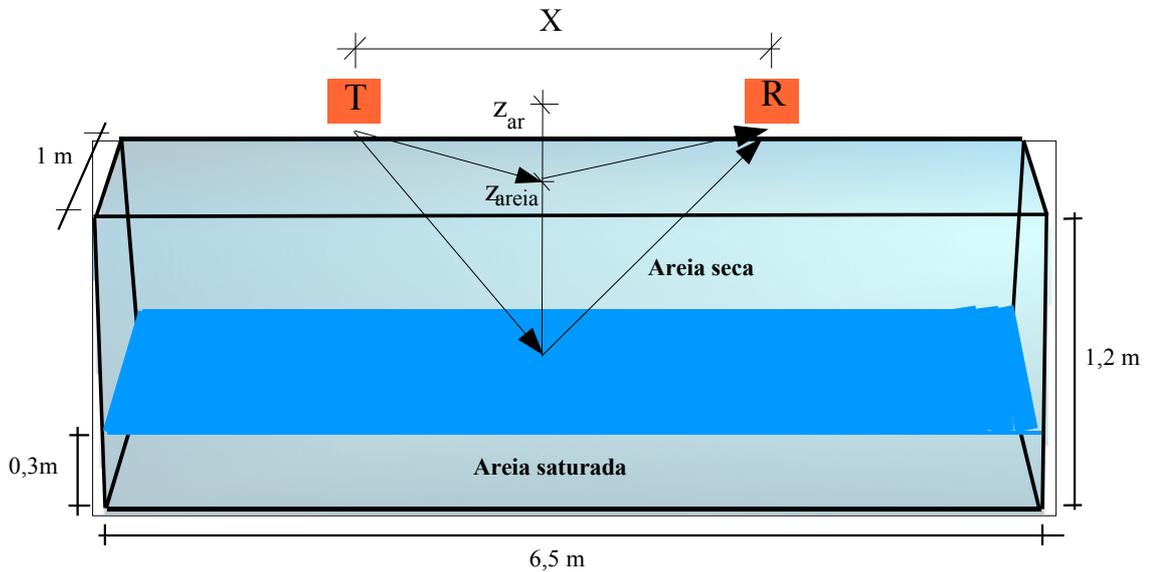
Para realização de testes com o radar para medidas de umidade do solo utilizando antenas de 200Mhz de frequência, com controle de umidade, executou-se uma escavação com volume de 7,8m<sup>3</sup>, cujas dimensões são indicadas na figura 19.



**Figura 19.** Escavação utilizada para realização dos testes de laboratório com antenas de 200Mhz.

As paredes da cavidade foram totalmente forradas com lona plástica para evitar perda de água. Uma altura de 30cm da base da escavação foi preenchida com areia saturada e sua superfície coberta para criar um contraste com a areia seca colocada acima, conforme representação gráfica da figura

20.



**Figura 20.** Esquema de funcionamento dos ensaios de radar do tipo CMP com controle de umidade utilizando antenas de 200Mhz.

Este contraste tem como finalidade gerar uma superfície refletora para uma melhor qualidade das hipérboles utilizadas para determinação da velocidade da onda eletromagnética, semelhante a chapa metálica usada nos ensaios laboratoriais realizados na caixa de acrílico. As reflexões devido aos contrastes ar/areia e areia seca/areia saturada são mostrados na figura 20.

Na figura 21 pode-se observar a escavação preenchida com areia e a lona plástica que evita o contato da areia com o solo local e impede a perda de água.

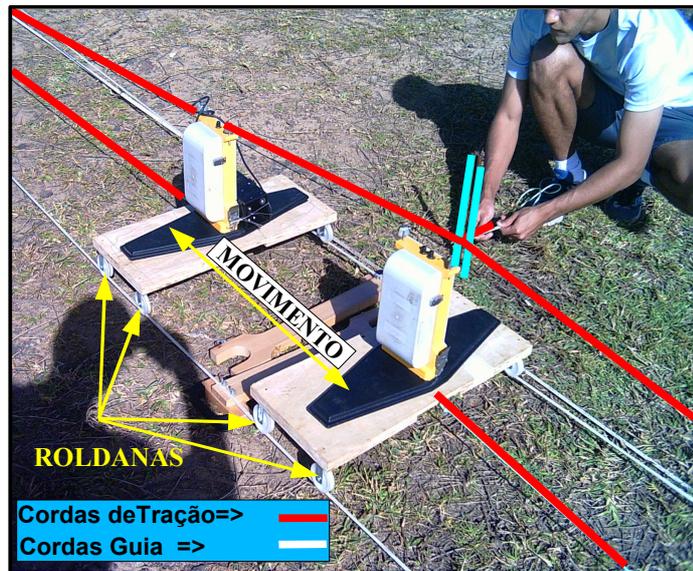


**Figura 21.** Escavação preenchida com areia seca.

Nas aquisições de dados utilizando ensaios tipo CMP é comum utilizar o teclado do computador para acionar a emissão do pulso eletromagnético no solo, neste caso, as antenas são deslocadas manualmente a uma mesma distância em relação ao eixo central, e então, é emitido o pulso a cada nova posição das antenas. Os levantamentos realizados desta forma não tiveram boa resolução dos radargramas, dificultando a visualização das hipérbolas e mostrando-se muito custosos em termos de tempo quando se adota espaçamentos da ordem de centímetros. Desta forma, nos ensaios tipo CMP realizados com antenas de 200Mhz de frequência foi necessário desenvolver um mecanismo capaz de garantir o espaçamento equidistante das antenas transmissora e receptora de forma dinâmica e a emissão contínua dos pulsos.

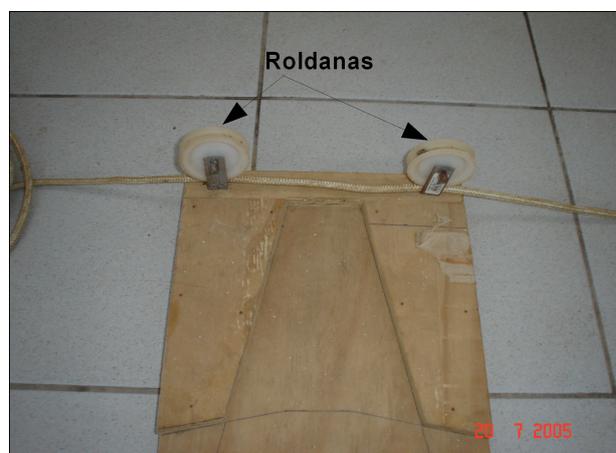
### **3.1.2.1 Descrição do mecanismo utilizado nos ensaios de laboratório e de campo com antenas de 200Mhz de frequência**

A figura 22 mostra a realização de um dos testes utilizando o mecanismo desenvolvido para a realização dos testes de campo e laboratório com a antena de 200Mhz.



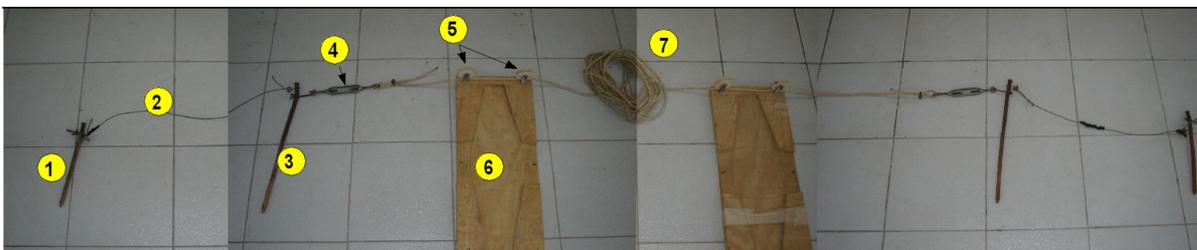
**Figura 22.** Dispositivo mecânico desenvolvido para realização dos ensaios tipo CMP em campo e laboratório, com antena de 200Mhz.

Este mecanismo foi usado tanto nos ensaios realizados na escavação quanto nos ensaios de campo. Neste dispositivo as antenas são apoiadas em plataformas de madeira, as quais, são conduzidas por um sistema de roldanas (ver figura 23) suspensas sobre cordas guias presas às hastes cravada no solo em suas extremidades. As cordas de tração são usadas para movimentar as antenas de forma equidistante, no sentido indicado na figura 22. Ao puxar a corda de tração as antenas se deslocam, permitindo a realização do ensaio tipo CMP em campo.

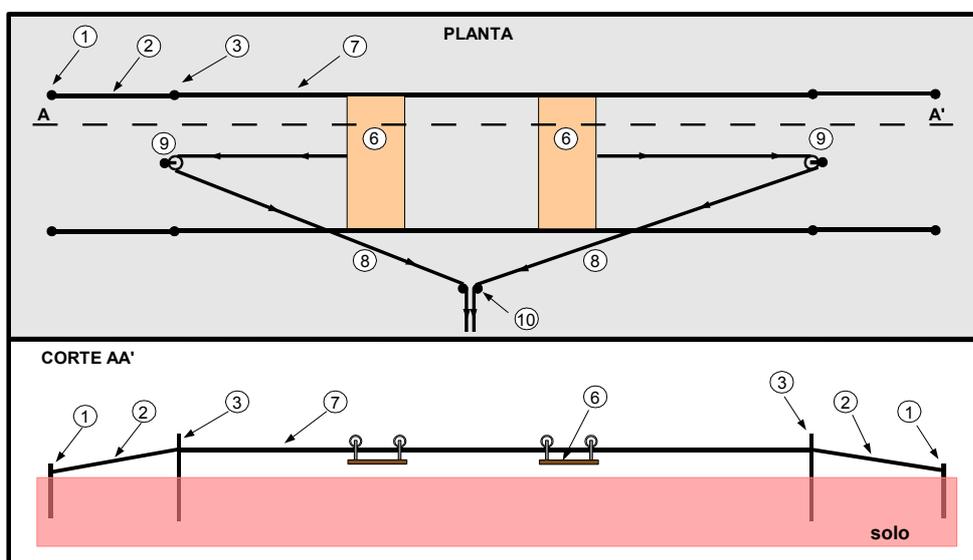


**Figura 23.** Sistema de roldanas.

As principais peças utilizadas no mecanismo são mostradas na figura 24. As figuras 24, 25 e 26 seguem a mesma numeração das peças que são descritas na tabela 4. A representação gráfica em planta e em corte do mecanismo é mostrada na figura 25.



**Figura 24.** Peças do mecanismo.



**Figura 25.** Representação gráfica do dispositivo mecânico utilizado em campo.

Conforme se pode observar na figura 25, as cordas de tração correspondem ao item de número 8 e o sentido do movimento da corda é indicado na figura. As plataformas (número 6) que sustentam as antenas se movimentam de forma equidistante puxadas pelas cordas de tração. Na figura 26 observar-se uma melhor visualização das hastes 1, 3, 10 e 9 representadas em planta e em corte na figura 25.



**Figura 26.** Hastes utilizadas no aparato.

**Tabela 4.** Descrição das peças utilizadas no aparato mecânico para antenas de 200Mhz.

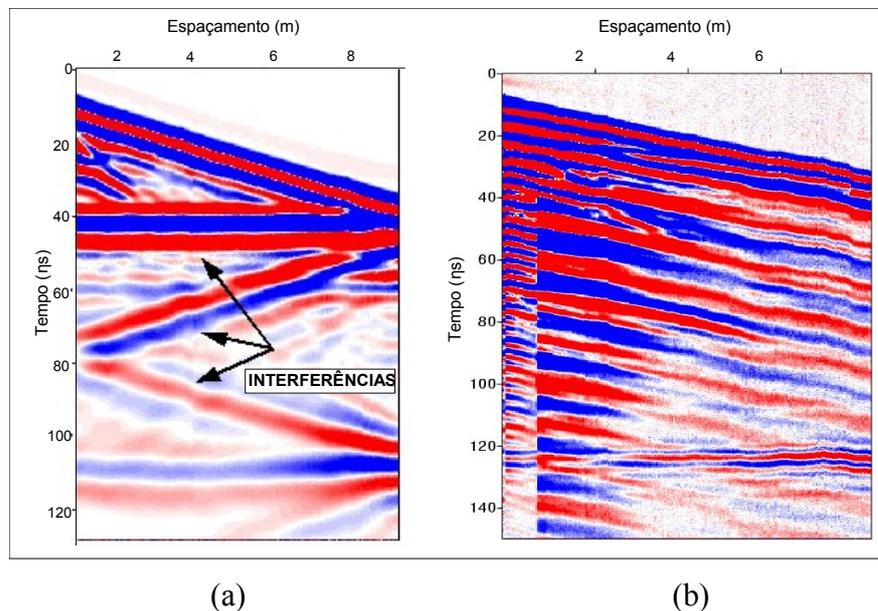
<i>Item</i>	<i>Descrição</i>	<i>Quantidade</i>
1	Haste de cobre – 20 cm	4
2	Cabo de aço - 100cm	4
3	Haste de cobre – 30 cm	4
4	Esticador de cabo de aço	4
5	Roldanas - Ø 5cm	10
6	Tábuas de madeira - 20mm	2
7	Cordas de seda – 10m – Ø 8mm (guia)	2
8	Cordas de seda – 12m - Ø 4mm (tração)	2
9	Haste com roldana	2
10	Haste de cobre - 30cm	2

Nestes ensaios foi usado o odômetro de cordão para efetuar as leituras dos espaçamentos entre as antenas. O odômetro de cordão é preso a uma das antenas, conforme mostrado na figura 27. A medida que as antenas se deslocam são lidos os espaçamentos entre elas e emitidos pulsos eletromagnéticos a cada espaçamento predefinido no programa *Ground Vision*. Utilizou-se tanto nos experimentos realizados na escavação, como nos experimentos de campo 4cm de espaçamento para emissão dos pulsos, enquanto que nos experimentos realizados na caixa de acrílico, descritos anteriormente, foram utilizados 2mm de espaçamento.



**Figura 27.** Odômetro de cordão.

Inicialmente utilizou-se cabos de aço com a função de cordas guia, mas isto gerou interferências nos dados de radar. A alta condutividade elétrica do metal fez com que parte da energia eletromagnética emitida fosse transferida para o cabo de aço, gerando interferências no radargrama. A figura 28a mostra o radargrama obtido no ensaio realizado com as cordas guia de aço, apontando essas interferências. Em vista das interferências observadas com o uso de cabo de aço é que foram utilizadas as cordas de seda, apesar de sua maior deformabilidade.



**Figura 28.** radargramas obtidos do ensaio tipo CMP realizado em campo, utilizando cordas guia de aço (a) e cordas guia de seda (b).

O uso de cordas de seda no lugar de cabos de aço melhorou muito a qualidade dos radargramas. Pode-se observar as formações das hipérboles nitidamente no radargrama da figura 28b.

Este dispositivo permitiu realizar levantamentos com espaçamentos de 4 cm, lidos por odômetro de cordão, e emissão automática do pulso eletromagnético no solo, melhorando a qualidade dos radargramas. A cada ensaio com o radar executado na escavação eram retiradas amostras do solo para medida da umidade. Em seguida adicionou-se um volume extra de água e executou-se um novo ensaio tipo CMP com o GPR.

A hipérbole gerada pelo pulso de radar refletido do contraste com a areia saturada foi usada para coletar os pontos do tempo de trânsito ( $t$ ) e espaçamentos entre a fonte e o receptor ( $x$ ). Os procedimentos descritos acima são repetidos para cada teor de umidade até a saturação do solo. A velocidade de propagação da onda eletromagnética é determinada conforme descrito no item 2.1.4, utilizando a formulação de Dix, que corresponde a equação 9, devido a existência dos dois contrastes mostrados na figura 20 (ar/areia insaturada e areia insaturada/areia saturada). Para cada ensaio tipo CMP na escavação obtém-se um ponto na curva de velocidade de propagação do pulso com a umidade do meio.

## **3.2 Ensaio de Campo**

Os ensaios de campo foram realizados em um único local, utilizando o dispositivo descrito no item anterior, no período de agosto de 2004 a fevereiro de 2005 e tiveram como objetivo principal avaliar o potencial de uso do GPR na monitorização da umidade do solo em subsuperfície.

### **3.2.1 Escolha do local e procedimentos utilizados**

Para realização dos ensaios de campo foi necessário escolher uma área piloto na qual o sinal de radar tivesse uma penetração satisfatória no solo para a realização das investigações. Quando se deseja realizar levantamentos com o GPR, deve-se levar em conta algumas limitações quanto ao ambiente de investigação. As propriedades condutivas do solo, por exemplo, podem limitar completamente a sua utilização. Características do solo, tais como, homogeneidade, ausência de pedregulhos e pouca parcela de argila, ajudam na obtenção de bons resultados. É importante salientar, também, que não somente as propriedades físicas do meio, mas também a frequência da

antena condicionam a resolução da imagem de radar. A resolução está diretamente relacionada com o comprimento de onda, uma vez que quanto menor o seu comprimento maiores detalhes serão fornecidos na leitura de suas amplitudes. O comprimento de onda, no entanto, é inversamente proporcional a frequência da antena.

Desta forma, para escolha da área piloto realizou-se ensaios com o radar GPR em diferentes locais onde, não só houvesse uma boa penetração do sinal, como também se pudesse frequentemente ter acesso para realização dos ensaios e facilidade de instalação de um pluviômetro para a realização de medidas de pluviosidade diária.

Os testes para escolha da área piloto foram realizados nas áreas onde havia suspeitas de encontrar solos com as características favoráveis a um bom desempenho do radar. Os testes concentraram-se ao redor da Escola Politécnica da UFBA, nas proximidades do shopping Iguatemi e próximo do Aeroclube Plaza Show, localizado no bairro da Boca do Rio, todos situados na cidade de Salvador-Ba. A figura 29 mostra a execução dos ensaios de radar para escolha da área piloto realizadas próximo ao shopping Iguatemi.



**Figura 29.** Realização dos ensaios para escolha de área piloto nas proximidades do shopping Iguatemi.

Feitos os testes preliminares, os resultados mostraram-se mais satisfatórios nas proximidades do Aeroclube Plaza Show, localizado na orla marítima. A figura 30 mostra o local da área piloto escolhida

para realização dos ensaios de campo.



**Figura 30.** Local de realização dos ensaios de campo com o radar.

Nesta área executou-se ensaios de radar tipo CMP no período de agosto de 2004 a fevereiro de 2005, totalizando 10 ensaios, os quais foram acompanhados pela instalação de pluviômetro próximo ao local para efetuar leituras das precipitações diárias ocorridas durante o período de ensaio. Em todos os ensaios de campo foi utilizado uma janela de tempo de 150ns, o que possibilitou investigar, com resolução razoável, uma profundidade média de 6 metros. Realizou-se, também, ensaios de caracterização do solo e de permeabilidade em campo utilizando-se o permeâmetro de Guelph.

Nos radargramas obtidos dos ensaios de campo foram aplicado filtros e ganhos em função do tempo para uma melhor definição da imagem e coleção dos pontos das hipérbolas geradas pelas reflexões por meio do programa *Gradix* (fabricado pela Interpex).

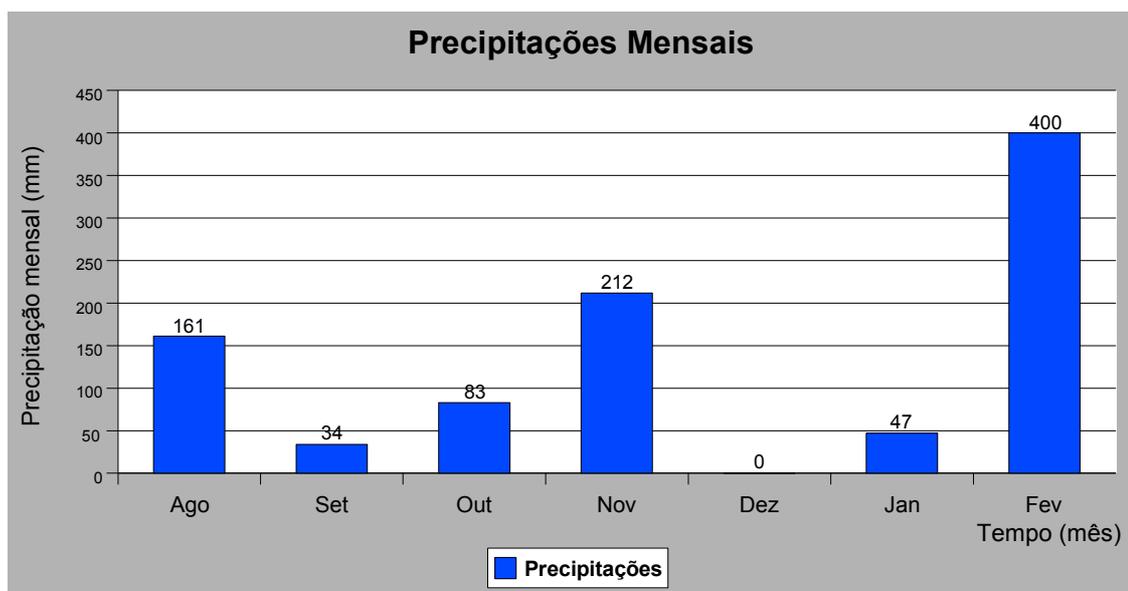
As antenas transmissora e receptora nos ensaios tipo CMP utilizando o dispositivo mecânico, apresentado anteriormente na figura 22, percorrem a superfície do terreno a uma altura de aproximadamente 20 cm. Esta camada de ar existente entre a plataforma que sustenta as antenas e a superfície gera um primeiro evento que corresponde a reflexão do contraste ar/solo.

Uma parte dos ensaios de campo foi realizado em um período de fortes chuvas e outra parte no período de estiagem, visando verificar a sensibilidade do equipamento em campo, com diferentes umidades do solo.

Todos os dias às 7:00hs da manhã foram feitas leituras no pluviômetro, sendo estas anotadas em uma planilha, para acompanhamento das precipitações diárias ocorridas no local. A grande maioria

dos ensaios foi realizada, também, no primeiro horário do dia, tomando-se o cuidado para se repetir sempre a mesma massa de solo envolvida.

Na figura 31 são apresentadas as precipitações mensais que foram coletadas por meio do pluviômetro instalado durante todo o período de realização dos ensaios de campo.



**Figura 31.** Representação das precipitações mensais referente aos meses de ago/2004 a fev/2005.

Pelo gráfico de barras da figura 31 observa-se que no mês de dezembro não houve precipitação, enquanto que no mês de fevereiro ocorreram fortes chuvas. Esta variação de precipitações mensais possibilitou uma melhor análise dos dados de campo.

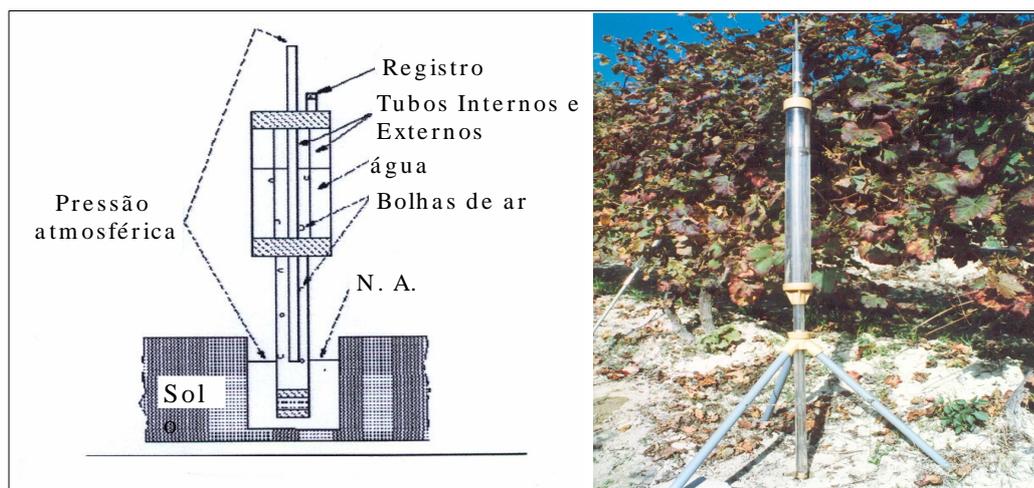
### 3.2.2 Determinação da permeabilidade saturada de campo

A permeabilidade do solo foi determinada em campo utilizando o permeâmetro de Guelph, que consiste de um dispositivo, desenvolvido por Reynolds et al. (1983), para a execução de ensaios de infiltração de campo, a carga constante, o qual utiliza o princípio do tubo de Mariotte para a aplicação

das cargas hidráulicas. Foram realizados 4 ensaios de permeabilidade em campo utilizando o permeâmetro de Guelph nas proximidades da linha de realização dos ensaios com o radar.

### 3.2.2.1 Descrição do permeâmetro de Guelph

A figura 32 mostra uma foto do equipamento instalado em campo e sua representação gráfica. O tubo de Mariotte é responsável por manter a pressão ao nível da ponteira sempre igual à pressão atmosférica, regulando o valor de H. A taxa de infiltração de água no solo, Q, é obtida a partir da taxa de variação do nível de água no reservatório interno (utilizado para o caso de solos finos) ou no reservatório externo (solos grossos). O valor do diâmetro do furo, assim como a regularidade da geometria, são condicionados pelas ferramentas de escavação. A duração dos ensaios varia normalmente entre  $\frac{1}{2}$  e 2 horas.

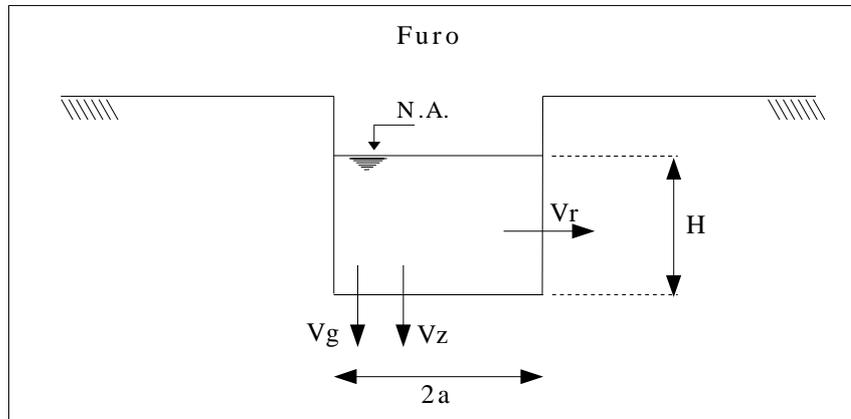


**Figura 32.** Esquema ilustrativo e foto do equipamento de Guelph.

### 3.2.2.2 Fundamentos teóricos do permeâmetro de Guelph

O fluxo abaixo do nível da água é dividido em três componentes de velocidade: uma componente radial, que atua na parede lateral do furo e é função do gradiente de energia radial (igual ao gradiente radial da parcela de energia de pressão) e duas componentes verticais que atuam na base do furo, uma devido ao gradiente vertical da parcela de energia gravitacional ( $V_g$ ) e outra devido ao gradiente

vertical da parcela de energia devida à pressão atuando no fluido ( $V_z$ ), conforme indicados na figura 33.



**Figura 33.** Desenho do furo com indicação dos fluxos de água  $V_r$ ,  $V_z$  e  $V_g$ .

Para aplicação deste método são admitidas as hipóteses abaixo:

- Meio poroso rígido homogêneo e isotrópico;
- Fluxo em equilíbrio constante (fluxo estacionário);
- Domínio de fluxo em um semi-espaço infinito.

E empregada a lei de Darcy, de modo que os fluxos lateral e de base são definidos conforme equações:

$$v_z = -K_{fs} \frac{(\partial \psi_p)}{(\partial z)} \cdot \hat{k} \quad (12)$$

$$v_r = -K_{fs} \frac{(\partial \psi_p)}{(\partial r)} \cdot \hat{r} \quad (13)$$

$$v_g = -K_{fs} \frac{(\partial \psi_z)}{(\partial z)} \cdot \hat{k} \quad (14)$$

Onde  $\psi_p$  corresponde a carga de energia de pressão de água e  $\psi_z$  à carga de energia gravitacional.

O fluxo total é definido segundo a equação:

$$Q_t = \int_{A_p}^0 v_r \cdot dA_p + \int_{A_b}^0 v_z \cdot dA_b + \int_{A_b}^0 v_g \cdot dA_b \quad (15)$$

Onde a equação 16 é o diferencial da área da parede do furo.

$$dA_p = 2\pi a \cdot dz(\hat{r}) \quad (16)$$

E a equação 17 o diferencial da área da base do furo.

$$dA_b = 2\pi r \cdot dr(-\hat{k}) \quad (17)$$

Substituindo a equação e simplificando temos:

$$Q_t = \pi K_{fs} \left[ -2a \int_0^H (\partial \psi_p) / (\partial r) \cdot dz + 2 \int_0^a (\partial \psi_p) / (\partial z) \cdot r \cdot dr + a^2 \right] \quad (18)$$

Usando variáveis adimensionais:

$$r' = r/a \quad (19)$$

$$z' = z/H \quad (20)$$

$$\psi'_p = \psi_p/H \quad (21)$$

Chega-se a equação 22, a qual é utilizada para o cálculo da permeabilidade saturada de campo,  $K_{fs}$ :

$$K_{fs} = \frac{Q_t}{\left[ 2\pi H^2 \left[ -\int_0^1 (\partial \psi'_p) / (\partial r') \cdot dz + \left(\frac{a}{H}\right)^2 \int_0^1 (\partial \psi'_p) / (\partial z') \cdot r \cdot dr + \frac{1}{2} \left(\frac{a}{H}\right)^2 \right] \right]} \quad (22)$$

ou ainda,

$$K_{fs} = \frac{Q_t \cdot C}{\left[ 2\pi H^2 \left( 1 + \frac{C}{2} \left(\frac{a}{H}\right)^2 \right) \right]} \quad (23)$$

Onde C corresponde a equação:

$$C = \frac{1}{\left[ -\int_0^1 (\partial \psi'_p) / (\partial r') \cdot dz' + \left(\frac{a}{H}\right)^2 \int_0^1 (\partial \psi'_p) / (\partial z') \cdot r' \cdot dr' \right]} \quad (24)$$

A figura 34 ilustra a variação de C em função da relação de H/a, para diferentes tipos de solos.

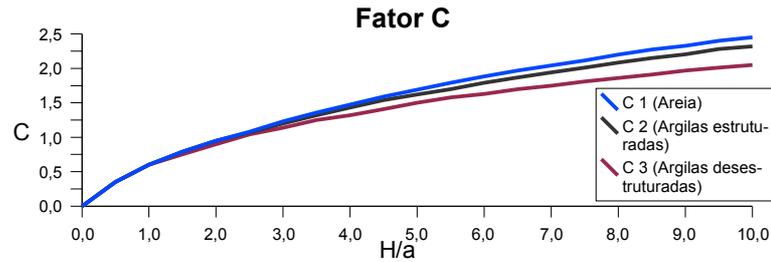


Figura 34. Variação de C em função de H/a.

Machado et. al. 2004 utilizaram o permeâmetro de Guelph para estudo da condutividade hidráulica de solos residuais de granulito. A permeabilidade do solo determinada em campo por este método, neste trabalho, foi de  $k = 3,73 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ , conforme será mostrado adiante.

### 3.3 Cálculo da umidade a partir da velocidade de propagação dos pulsos de radar - ensaios de campo e laboratório

Existem trabalhos na literatura que estabelecem relações entre velocidade de propagação do pulso de uma onda, sísmica ou eletromagnética, com diferentes propriedades do material em estudo (Greaves, et. al., 1996; Parkhomenko, 1967; Wyllie, 1958).

Wyllie (1958), por exemplo, estabeleceu uma relação entre a velocidade de propagação da onda acústica em um meio bifásico (solo saturado) com a porosidade ( $n$ ).

$$\frac{1}{V} = \frac{n}{V_w} + \frac{1-n}{V_s} \quad (25)$$

Na equação 25,  $n$  corresponde à porosidade do material,  $V_w$  corresponde à velocidade de propagação do pulso na água e  $V_s$  corresponde à velocidade de propagação do pulso nas partículas sólidas. Conforme se pode observar, trata-se da adoção da média harmônica das velocidades dos trechos

percorridos pelo pulso eletromagnético, através das partículas sólidas e da água intersticial.

A equação de CRIM (Complex Refractive Index Method) é uma equação semi-empírica que relaciona a constante dielétrica de um meio não saturado com a sua porosidade,  $n$ , e grau de saturação,  $Sr$ :

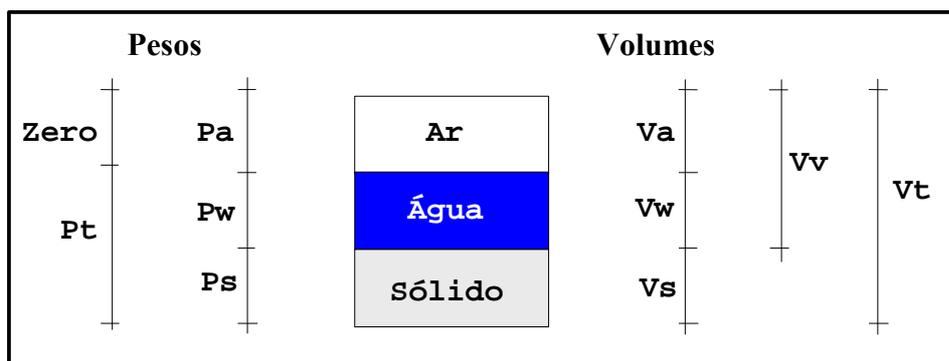
$$\sqrt{\epsilon_r} = n \cdot Sr \cdot \sqrt{\epsilon_{rw}} + (1-n) \cdot \sqrt{\epsilon_{rs}} + n(1-Sr) \cdot \sqrt{\epsilon_{rar}} \quad (26)$$

Onde  $\epsilon_r$ ,  $\epsilon_{rw}$ ,  $\epsilon_{rs}$  e  $\epsilon_{rar}$ , são, respectivamente, a constante dielétrica relativa do meio, a constante dielétrica relativa da água, a constante dielétrica relativa das partículas sólidas e a constante dielétrica relativa do ar. Considerando  $\epsilon_{rar} = 1$ , têm-se:

$$\sqrt{\epsilon_r} = n \cdot Sr \cdot \sqrt{\epsilon_{rw}} + (1-n) \cdot \sqrt{\epsilon_{rs}} + n(1-Sr) \quad (27)$$

Neste trabalho para prever a velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas em meios porosos parcialmente saturados com água, foi utilizado procedimento semelhante ao de Wyllie (1958), cujo desenvolvimento é apresentado a seguir.

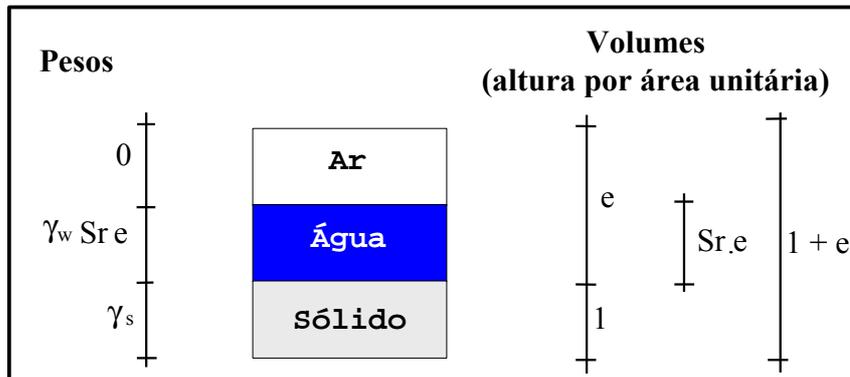
Considerando o diagrama de fases apresentado na figura 35, as diferentes fases constituintes do solo como ar, água e partículas sólidas são representadas separadamente. Nesta figura  $V_a$ ,  $V_w$ ,  $V_s$ ,  $V_v$  e  $V_t$  representam os volumes de ar, água, sólidos, de vazios e total do solo, respectivamente.  $P_s$ ,  $P_w$ ,  $P_a$  e  $P_t$  são os pesos de sólidos, água, ar e total.



**Figura 35.** Representação esquemática das fases constituintes do solo.

As relações entre pesos ou entre volumes, por serem adimensionais, não serão modificadas caso os

volumes de água, ar e sólidos sejam divididos por um determinado fator, conservado constante para todas as fases. Este fator pode ser escolhido, por exemplo, para que o volume de sólidos se torne unitário (divisão dos termos pelo volume de sólidos). Deste modo, utilizando-se de alguns índices físicos do solo, chega-se ao diagrama de fases apresentado na figura 36.



**Figura 36.** Relações entre volumes e entre pesos e volumes adotando-se um volume de sólidos unitário.

Na figura 36  $e$  é o índice de vazios do solo, dado pela equação 28,  $S_r$  é o seu grau de saturação, dado pela equação 29,  $\gamma_w$  é o peso específico da água, adotado como sendo igual a  $10 \text{ kN/m}^3$  e  $\gamma_s$  é o peso específico médio das partículas sólidas, dado pela equação 30.

A umidade do solo pode ser calculada através da equação 31, enquanto que a densidade relativa das partículas sólidas,  $G$ , é dada pela equação 32.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (28)$$

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (29)$$

$$\gamma_s = \frac{P_s}{V_s} \quad (30)$$

$$w = \frac{P_w}{P_s} = \frac{\gamma_w \cdot S_r \cdot e}{\gamma_s} \quad (31)$$

$$G = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (32)$$

Ainda no diagrama da figura 36, pode-se observar que para uma área de solo unitária o volume (termo  $1 + e$ ) torna-se numericamente igual à profundidade. Desta forma, teremos a representação das distâncias relativas percorridas pela onda no solo para fase ar, água e sólidos, respectivamente igual a  $(e - S_r \cdot e)$ ,  $(S_r \cdot e)$  e  $1$ . Estes termos podem ser escrito também em função da umidade e da densidade relativa das partículas sólidas como sendo  $(e - w \cdot G)$ ,  $(w \cdot G)$  e  $1$ .

A velocidade média de propagação de uma onda é igual ao quociente da distância percorrida pelo intervalo de tempo gasto. Para o caso da onda percorrendo o solo representado pelo diagrama de fases da figura 36, a distância total é igual a espessura da camada de solo percorrida pela onda e o tempo total de percurso, ao somatório dos intervalos de tempo para cada fase, conforme equação 33:

$$V = \frac{d_{total}}{t_{ar} + t_w + t_s} \quad (33)$$

Substituindo o tempo em função da distância percorrida para cada fase obtemos a equação 34:

$$V = \frac{d_{total}}{\frac{d_{ar}}{c} + \frac{d_w}{V_w} + \frac{d_s}{V_s}} \quad (34)$$

Onde,  $c$  corresponde a velocidade da luz no vácuo adotada como sendo igual a  $30 \text{ cm}/\eta\text{s}$ . Escrevendo as distâncias de percurso da onda em função dos índices físicos do solo correspondente a cada fase, a equação para o cálculo da velocidade de propagação do pulso eletromagnético é reescrita da seguinte forma:

$$V = \frac{1 + e}{\frac{e - G \cdot w}{c} + \frac{G \cdot w}{V_w} + \frac{1}{V_s}} \quad (35)$$

Na equação 35, as distâncias relativas percorridas pela onda estão indicadas com base no índice de vazios ( $e$ ) do solo e em sua umidade gravimétrica ( $w$ ). Por outro lado, admitindo-se a propagação de um pulso eletromagnético através de um meio de baixa condutividade e levando-se em conta que a permeabilidade magnética relativa dos materiais da crosta terrestre gira em torno da unidade, a velocidade para cada fase do solo pode ser calculada através da equação 5. Substituindo-se a equação 5 na equação 35 chega-se a equação 36, onde a velocidade de propagação média da onda

no solo é estimada em função das proporções relativas de cada componente e das suas características eletromagnéticas.

$$V = \frac{1+e}{\frac{e-G \cdot w}{c} + \frac{G \cdot w}{\frac{c}{\sqrt{\epsilon_{rw}}}} + \frac{1}{\frac{c}{\sqrt{\epsilon_{rs}}}}} \quad (36)$$

Reorganizando a equação 36 chegaremos a equação 37:

$$V = \frac{(1+e) \cdot c}{(e-G \cdot w) + G \cdot w \cdot \sqrt{\epsilon_{rw}} + \sqrt{\epsilon_{rs}}} \quad (37)$$

A equação 37 foi estabelecida por Machado et. al. (2004) para prever a velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas em meios porosos parcialmente saturados com água, a partir de seus índices físicos. Este desenvolvimento consta no Relatório de Atividades do Grupo de Geotecnia Ambiental da Sub-Rede PROAMB (2003). Esta formulação é de grande utilidade para análise de dados de radar, podendo também, ser utilizada para o caso da existência de diferentes fluidos no solo, bastando apenas acrescentar mais termos na equação, referente a parcela do fluido em questão. Tal procedimento foi utilizado por Botelho et. al. (2003) para avaliar a influência de diferentes fluidos (óleo diesel e hidrocarbonetos em geral), presentes no solo, na velocidade de propagação do pulso eletromagnético.

A equação 37 também foi utilizada neste trabalho para estimar a umidade do solo em campo a partir da velocidade de propagação da onda eletromagnética obtida das análises das hipérboles dos ensaios realizados. Desta forma, foi reescrita segundo a equação:

$$w = \frac{c \cdot (1+e) + V \cdot (e + \sqrt{\epsilon_{rs}})}{V \cdot (G \cdot \sqrt{\epsilon_{rw}} - G)} \quad (38)$$

Nesta equação os valores adotados para as constantes dielétricas relativas da água ( $\epsilon_{rw}$ ) e das partículas sólidas ( $\epsilon_{rs}$ ) adotados foram, respectivamente iguais a 80 e 4,2, os quais podem ser considerados como constantes para fins práticos.

### **3.4 Metodologia Utilizada em Campo**

Buscou-se nos ensaios de campo correlacionar os dados de umidade obtidos com o radar, com os dados das precipitações ocorridas no local durante o período de realização dos ensaios com o GPR. Para tanto foi necessário desenvolver uma metodologia para obtenção dos valores das precipitações que estariam influenciando em diferentes profundidades de solo.

#### **3.4.1 Cálculo do tempo de influência das precipitações no meio poroso, utilizado no caso dos ensaios de campo**

Nos ensaios de campo correlacionou-se os dados de umidade, obtidos com o radar, com as precipitações ocorridas em um determinado período. É importante observar que o tempo de influência de uma determinada precipitação em campo será função da espessura da massa de solo envolvida na hipérbole analisada (espessura de solo acima do topo da hipérbole) e da condutividade hidráulica do solo. Em havendo uma precipitação no local a água demorará um certo tempo até atingir a profundidade do refletor analisado (profundidade do topo da hipérbole). Apesar de se tratar de um evento de infiltração na zona vadosa ou não saturada do solo, onde tanto a condutividade hidráulica quanto os potenciais de energia da água são funções de sua umidade, em um fenômeno normalmente transiente, adotou-se um gradiente unitário de energia e o valor da permeabilidade saturada do solo como representativa do processo de infiltração em campo. Neste caso, a velocidade de infiltração da água será numericamente igual ao valor da permeabilidade saturada do solo e o tempo de percurso da água poderá ser calculado por meio da equação 39.

$$\Delta t = \frac{z}{k} \quad (39)$$

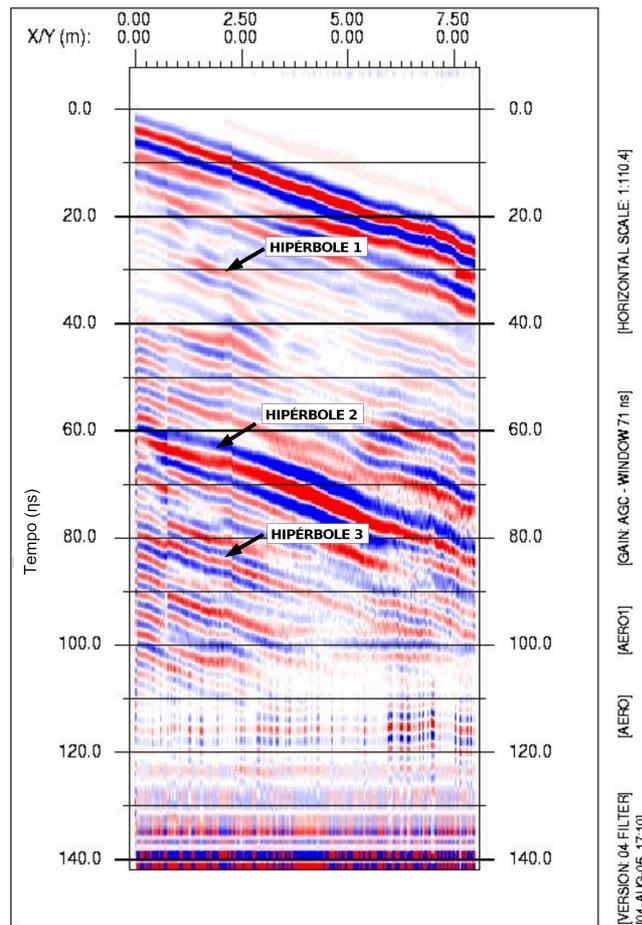
Onde  $z$  é a profundidade do solo e  $k$  a sua permeabilidade saturada. Na equação 39, o tempo de influência ( $\Delta t$ ) calculado (convertendo o tempo de segundos para dias) corresponde ao número de

dias anteriores ao dia de realização do ensaio a ser considerado no cálculo das precipitações acumuladas, que corresponde ao somatório das precipitações diárias coletadas no local. Sendo este tempo dependente da profundidade, têm-se para cada hipérbole do radargrama um tempo de influência diferente.

### **3.4.2 Metodologia de campo – Exemplo ilustrativo**

Para uma melhor apresentação da metodologia utilizada na análise dos dados, será usado como exemplo o ensaio realizado no dia 18 de agosto de 2004 na área piloto, mostrado na figura 37.

Observa-se no eixo horizontal da figura 37 o comprimento total do perfil, ou seja, o espaçamento entre as antenas transmissora e receptora, de aproximadamente 8m e no eixo vertical os tempos de trânsito de ida e volta da onda, em nanosegundos. Pode-se notar, também, que a partir de 100ns o sinal perde resolução, impossibilitando realizar leituras dos pontos da hipérbole acima deste tempo. Coletou-se os pontos das hipérboles cujo topo se situa a 26ns, a 62ns e a 76ns, indicadas na figura 37 respectivamente como 1, 2 e 3, resultantes de reflexões naturais na subsuperfície. Em cada radargrama procurou-se coletar hipérboles em torno dos mesmos pontos, para obter informações das mesmas profundidades em cada experimento.



**Figura 37.** radargrama obtido no ensaio realizado em 18 de agosto de 2004 na área piloto.

Os dados obtidos em cada experimento de campo foram tratados conforme ilustrado na tabela 5. São listadas, na tabela, os tempos iniciais e as profundidades dos refletos das três últimas hipérboles, referentes ao radargrama da figura 37, bem como, as chuvas acumuladas para essas profundidades, a velocidade intervalar calculada pela formulação de Dix (1995) e a umidade do solo determinada em função dos seus índices físicos, das constantes dielétricas relativas de cada fase e da velocidade intervalar (ver equação 38).

Para o cálculo da velocidade utilizou-se a formulação de Dix com o intuito de subtrair o percurso da onda no ar correspondente a distância entre a tábua (que serviu de apoio para as antenas) e a superfície do solo.

Ainda na tabela 5, para o cálculo da profundidade (referente a espessura de solo acima do topo da hipérbole) é usado o somatório da diferença entre os tempos iniciais das hipérboles dividido por dois, ou seja, o somatório das profundidades obtidas pela equação 10. A divisão por dois se deve ao fato da leitura do tempo, no eixo vertical do radargrama, ser de ida e volta, este somatório pode ser melhor

representado pela equação 40.

$$Z = \sum \left( \frac{V_n \cdot (T_{total,n} - T_{total,n-1})}{2} \right) \quad (40)$$

Na equação 40,  $V_n$  corresponde à velocidade de propagação do pulso eletromagnético na camada  $n$ ,  $V_{m,n}$  corresponde à velocidade média de propagação até a base da camada  $n$ ,  $T_{total,n}$  corresponde ao tempo total de percurso, ida e volta, até a base da camada  $n$ .  $V_{m,n-1}$  e  $T_{total,n-1}$  têm significados análogos aos termos  $V_{m,n}$  e  $T_{total,n}$ , para o caso da camada  $n-1$ .

**Tabela 5.** Dados de chuvas acumuladas, velocidade intervalar e a umidade medida com o radar GPR para cada hipérbole do radargrama da figura 37.

<i>Hipérbole</i>	<i><math>T_0</math> (<math>\eta s</math>) (Radargrama)</i>	<i>Profund. (m) (Eq. 40)</i>	<i>Chuvas Acumuladas (mm) (Pluviômetro)</i>	<i>Velocidade Intervalar (cm/<math>\eta s</math>) (Eq. 09)</i>	<i><math>w</math> (Eq. 38)</i>
1	26	2,25	32	17,27	0,029
2	62	4,38	106	11,83	0,113
3	76	5,14	107	10,66	0,143

A coluna referente a chuvas acumuladas, na tabela 5, foi determinada pela soma das leituras diárias obtidas no pluviômetro, considerando-se o tempo de influência correspondente a profundidade do refletor que gerou a hipérbole, calculado conforme a equação 39.

Na tabela 6, têm-se os dados de chuvas coletados diariamente, os dados de chuvas acumulados e a profundidade obtida da multiplicação da permeabilidade do solo pelo tempo decorrido até o dia de execução do ensaio apresentado na figura 37. Tendo em vista que as anotações das precipitações são realizadas às 7:00hs de cada dia, é considerado a data de ensaio como decorrido 1 dia.

**Tabela 6.** Dados de chuvas e profundidade.

<i>Data</i>	<i>Chuvas Diárias (mm)</i>	<i>Chuvas Acumuladas (mm)</i>	<i>Profund. (m) (Eq. 39)</i>
<b>Data do Ensaio</b> 18/08/04	2	2	0,32
17/08/04	0	2	0,65

	<i>Data</i>	<i>Chuvas Diárias (mm)</i>	<i>Chuvas Acumuladas (mm)</i>	<i>Profund. (m) (Eq. 39)</i>
	16/08/04	20	22	0,97
	15/08/04	3	25	1,29
	14/08/04	2	27	1,61
	13/08/04	0	27	1,94
<b>Hipérbole 1</b>	<b>12/08/04</b>	<b>5</b>	<b>32</b>	<b>2,26</b>
	11/08/04	10	42	2,58
	10/08/04	0	42	2,9
	09/08/04	2	44	3,23
	08/08/04	10	54	3,55
	07/08/04	15	69	3,87
	06/08/04	27	96	4,2
<b>Hipérbole 2</b>	<b>05/08/04</b>	<b>10</b>	<b>106</b>	<b>4,52</b>
<b>Hipérbole 3</b>	<b>04/08/04</b>	<b>1</b>	<b>107</b>	<b>4,84</b>
	03/08/04	0	107	5,16

Os resultados apresentados na tabela 5 e 6 mostram que 2,25m de profundidade, onde ocorre a hipérbole 1, o tempo máximo de influência, obtido da divisão da profundidade pela permeabilidade do solo, é de 7 dias, sendo a precipitação acumulada de 32mm. Com os dados de chuva e o cálculo da umidade do solo com a equação 38 (medida com o radar a partir da velocidade de propagação do pulso) pode-se construir os gráficos de umidade ( $w$ ) *versus* precipitação ( $\Delta i$ ), conforme se verá adiante.

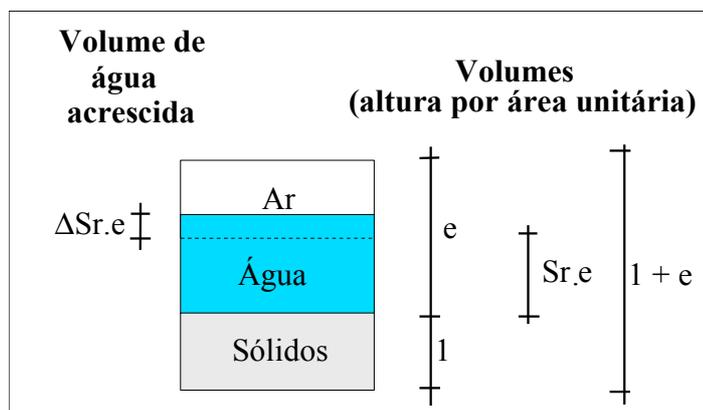
Para cada experimento realizado com o radar foi obtido um radargrama no qual foram coletadas as hipérboles e repetida a metodologia descrita acima para o radargrama da figura 37.

### 3.5 Desenvolvimento de Formulação Teórica para Cálculo da Umidade

Visando confrontar os dados de umidade do solo obtidos dos experimentos com o radar em campo, desenvolveu-se uma formulação, a partir dos diagramas de índices físicos, na qual, a umidade do solo é função da precipitação, medida no local por meio de pluviômetro, e da profundidade do refletor utilizado na geração da hipérbole analisada.

Sabe-se que muitos fatores favorecem ou dificultam a passagem de água no solo, como por exemplo, a vegetação, a inclinação do terreno, a condição da superfície do solo, o tempo de infiltração e outros. Para monitoração da umidade de campo utilizando o radar considerou-se inicialmente que as precipitações sobre a superfície do solo são diretamente relacionadas com a quantidade de água infiltrada, desprezando-se os processos de escoamento e evaporação.

Em sua condição natural, o solo não saturado possui nos seus vazios determinadas parcelas de água e ar. Considerando uma profundidade (Z) o solo possuirá um volume d'água indicado no diagrama de fases apresentado na figura 38 como sendo igual a  $Sr \cdot e$ , adotando um volume de sólidos unitário. Desta forma, uma dada precipitação acrescentará um volume de água de  $(\Delta Sr \cdot e)$  neste pacote de solo.



**Figura 38.** Representação esquemática das fases constituintes do solo indicando o acréscimo de água devido a precipitações.

Sendo a relação entre a profundidade (Z) com o volume total de solo (1+e) igual a relação entre as precipitações acumuladas ( $\Sigma i$ ) em um determinado período com o acréscimo de água ( $\Delta Sr \cdot e$ ) para uma área de solo unitária, teremos que:

$$\frac{Z}{(1+e)} = \frac{\Sigma i}{\Delta Sr \cdot e} \quad (41)$$

A equação 41 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\Delta Sr \cdot e = \frac{(1+e) \cdot \Sigma i}{Z} \quad (42)$$

A umidade do solo é definida pela equação 31 a partir das análises da figura 36. Considerando uma variação da umidade no solo a equação 31 seria expressa como:

$$\Delta w = \frac{\gamma_w \cdot \Delta Sr \cdot e}{\gamma_s} \quad (43)$$

Substituindo a equação 42 na equação 43, teremos:

$$\Delta w = \frac{\gamma_w \cdot (1+e) \cdot \Sigma i}{\gamma_s \cdot Z} \quad (44)$$

Onde,  $\Sigma i$  é a quantidade de chuva acumulada ocorrida no período de influência calculado. Desta forma, têm-se como prever o incremento de umidade em função da quantidade de chuva acumulada ( $\Sigma i$ ) para a profundidade do refletor ( $Z$ ) que gerou a hipérbole. Esta equação foi utilizada para avaliar os dados obtidos experimentalmente a partir dos ensaios realizados em campo com a técnica de radar. É importante notar que esta função leva em consideração que toda a precipitação infiltra no solo, o que não ocorreu em campo, conforme veremos adiante.

A análise dos dados foi realizada plotando-se em um gráfico valores de  $w$  e  $\Sigma i$  e ajustando-se os valores obtidos a uma reta, pelo método dos mínimos quadrados, conforme ilustrado na equação 45.

$$w = w_0 + a_i \cdot \Sigma i \quad (45)$$

Onde:

$w_0$  = umidade residual do solo em condições de baixa precipitação;

$a_i$  = coeficiente angular do ajuste obtido, o qual, teoricamente, deve ter o valor indicado pela equação 46.

$$a_i = \frac{\gamma_w \cdot (1+e)}{\gamma_s \cdot Z} \quad (46)$$

Para avaliar a precisão da estimativa de umidade realizada com o GPR, seria necessário utilizar

técnicas de medida da evaporação e do escoamento de água em campo. Estas técnicas não foram utilizadas nesta pesquisa, no entanto, visando quantificar a água que não infiltrou no solo, seja devido ao escoamento, seja pela evaporação, foi proposta uma fórmula de cálculo para o coeficiente de escoamento, que corresponde a diferença entre o coeficiente angular da reta teórica e o coeficiente angular da reta ajustada aos dados experimentais, de acordo com a equação:

$$CE = \frac{a_{i(teo)} - a_{i(exp)}}{a_{i(teo)}} \quad (47)$$

O mesmo valor de  $w_0$  foi adotado tanto para os dados experimentais quanto para os resultados previstos.

# 4

---

## RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios laboratoriais e de campo, bem como, as análises dos dados obtidos.

## **4.1 Resultados laboratoriais**

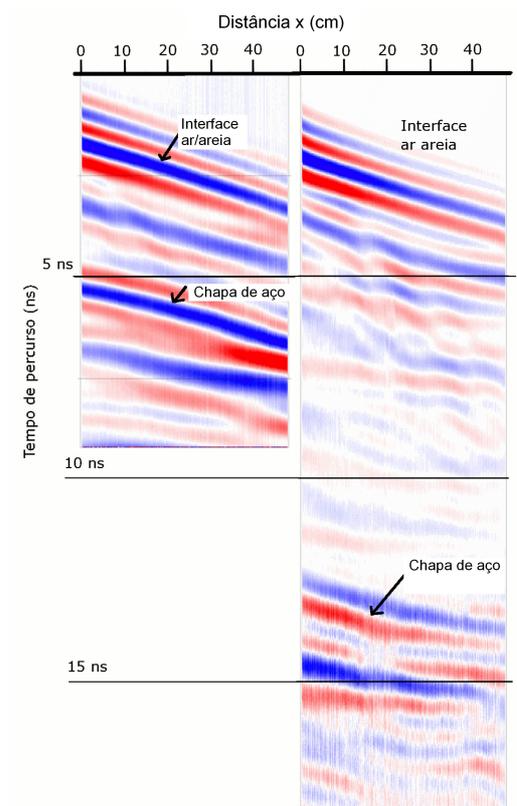
Os resultados laboratoriais estão dispostos nos itens a seguir de acordo a frequência da antena utilizada.

### **4.1.1 Resultados laboratoriais utilizando antenas com 1000Mhz**

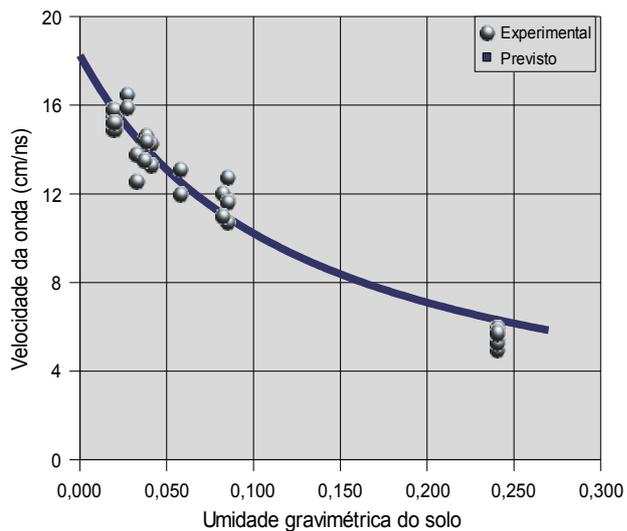
A figura 39 apresenta dois radargramas obtidos de ensaios de laboratório com o GPR realizados em areia na umidade higroscópica e saturada. Pode-se observar claramente na figura 39 que a chapa metálica colocada na caixa foi percebida nos dois radargramas em valores de tempo diferentes, isto porque a velocidade média é inversamente proporcional ao tempo, mantida fixa a distância. A velocidade de propagação do pulso eletromagnético determinada no radargrama, obtido para a condição de areia seca ao ar foi de 16 cm/ηs, caindo de cerca de 6 cm/ηs, para a condição de areia saturada.

Realizados os ensaios em laboratório com areia para calibração do equipamento, os dados obtidos de velocidade da onda eletromagnética para diferente teores de umidade foram plotados no gráfico ilustrado na figura 40. As velocidades de propagação da onda dos dados experimentais foram obtidos pelo método  $t^2 - x^2$ , a partir dos ensaios tipo CMP e ajustados pela equação 8.

São também apresentados na figura 40 os valores previstos com o uso da equação 37. Os valores adotados para o ajuste foram  $e = 0,602$ ,  $G = 2,65$ ,  $e_{rs} = 4,2$  (constante dielétrica relativa do quartzo),  $e_{rw} = 80$  (constante dielétrica da água). Estes valores são coerentes com o material ensaiado e, a não ser para o caso do índice de vazios do solo, todos os outros valores devem variar pouco em torno dos valores médios adotados, para o caso de outros solos.



**Figura 39.** radargramas obtidos para a areia na umidade higroscópica (à esquerda) e de saturação.

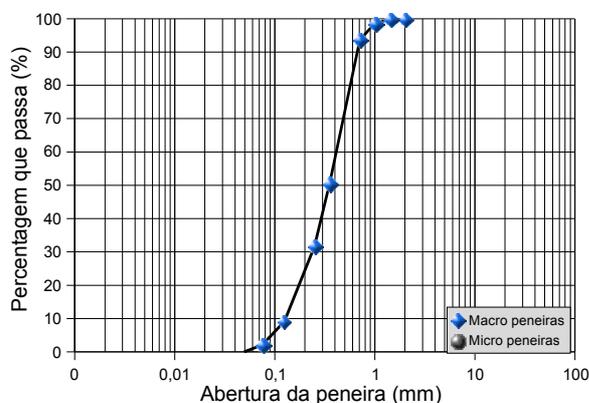


**Figura 40.** Variação da velocidade de propagação da onda em função da umidade gravimétrica do solo. Valores experimentais e previstos pela equação 37.

Observa-se pelo gráfico que há um bom ajuste dos resultados experimentais com os resultados previstos.

#### 4.1.2 Resultados dos ensaios utilizando antenas com 200Mhz

O solo ensaiado na escavação é uma areia bem graduada e possui a curva granulométrica apresentada na figura 41.



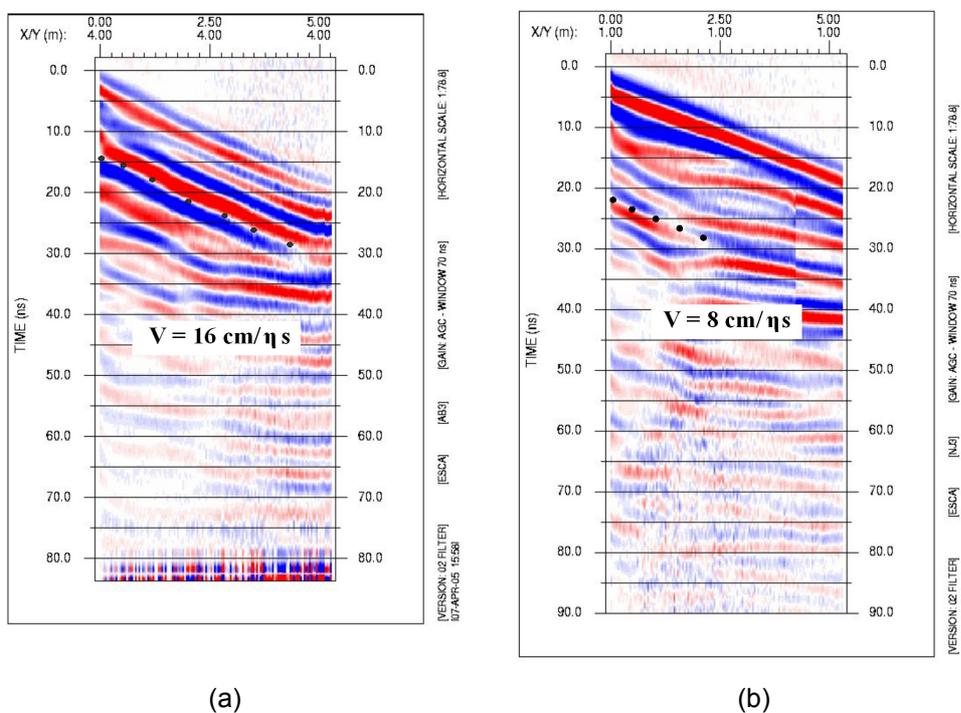
**Figura 41.** Curva granulométrica obtida para a areia ensaiada.

O índice de vazios obtido para o solo ensaiado foi de 0,64, considerando-se um peso específico das partículas sólidas de  $\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3$  e um peso específico seco de  $\gamma_d = 15,7 \text{ kN/m}^3$ , medido a partir de amostras de solo coletadas na caixa. Nestes ensaios, a velocidade de propagação dos pulsos eletromagnéticos para a areia com umidade de 5% foi de 16 cm/ηs. Caindo para 8cm/ηs para a areia saturada com umidade de 25%, conforme mostra a figura 42.

Os radargramas das figuras 42a e 42b foram obtidos dos ensaios realizados na escavação com antenas de 200 Mhz de frequência. Nestes ensaios foi utilizado uma janela de tempo de 87ηs, que corresponde a menor janela de tempo possível, para ensaios realizados com antenas de 200Mhz de frequência.

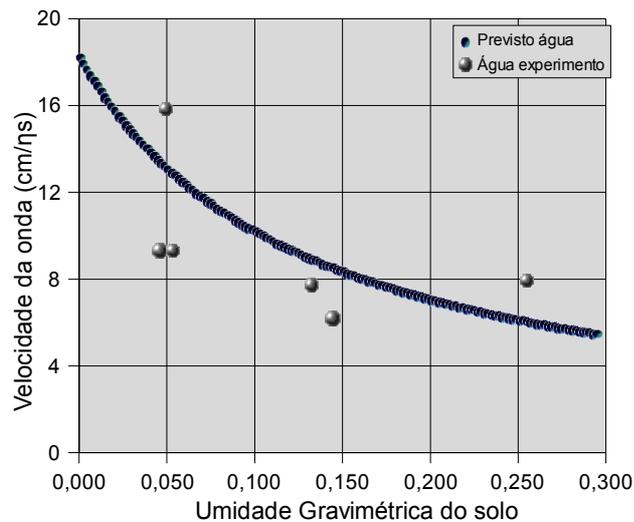
Os radargramas resultantes dos ensaios realizados na escavação, apresentaram-se com baixa qualidade das hipérbolas, dificultando inclusive a escolha da hipérbole para cálculo da velocidade. Em algumas dessas hipérbolas só foi possível coletar os pontos até metade do radargrama, como foi o

caso do radargrama exibido na figura 42b. Isto foi atribuído, em parte, pelo fato de que quanto maior a frequência, melhor a resolução da imagem de radar. De acordo com a equação 1, quanto maior a frequência menor o comprimento de onda e maior a resolução dos dados obtidos. Para uma antena de 1000Mhz, por exemplo, o comprimento de onda do pulso varia entre 6 a 30 cm, enquanto que para uma antena de 200Mhz de 30 a 150cm. Desta forma, a profundidade da caixa, para certos teores de umidade do solo, pode não ter sido suficiente para permitir a viagem de ida e volta completa do pulso, conseqüentemente tornando os dados mais dispersos. Outro fator que pode ter contribuído para a má qualidade dos radargramas foi o ricocheteamento dos pulsos de radar nas paredes da cava.



**Figura 42.** Radargramas obtidos para a areia com umidade de 5% (a) e 25% (b).

O gráfico apresentado na figura 43 exibe os pontos experimentais da velocidade de propagação do pulso eletromagnético em função da umidade gravimétrica da areia, bem como a curva ajustada, obtida pela equação 37.



**Figura 43.** Variação da velocidade de propagação da onda em função da umidade gravimétrica do solo. Valores experimentais e previstos pela equação 37.

Os valores adotados para o ajuste foram  $\epsilon = 0,64$ ,  $G = 2,65$ ,  $\epsilon_{rs} = 4,2$  (constante dielétrica relativa do quartzo),  $\epsilon_{rw} = 80$  (constante dielétrica da água).

Os dados experimentais apresentaram-se relativamente próximos a curva teórica, porém, os resultados experimentais, obtidos dos ensaios realizados com antenas de 1000Mhz de frequência, mostraram um melhor ajuste com a curva teórica (ver figura 40) em relação aos resultados dos ensaios obtidos com antenas de 200Mhz apresentados na figura 43.

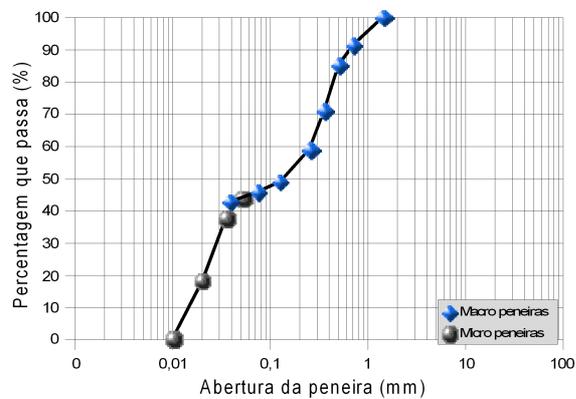
## 4.2 Resultados dos ensaios de campo

### 4.2.1 Caracterização do solo da área piloto

A tabela 7 apresenta as características do solo da área piloto. Conforme se pode observar, trata-se de uma areia siltosa, segundo a NBR 6502, que se baseia nos resultados do ensaio de granulometria do solo apresentado na figura 44. A curva granulométrica da figura classifica-se como não uniforme apresentando coeficiente de uniformidade maior que 15. O peso específico das partículas sólidas do solo ( $\gamma_s = 27,0 \text{ kN/m}^3$ ) foi obtido por meio de ensaio realizado segundo a NBR 6508.

**Tabela 7.** Resultados obtidos dos ensaios de caracterização do solo.

<b>Granulometria</b>	
Pedregulho	0%
Areia	55,5%
Silte	44,5%
Argila	0%



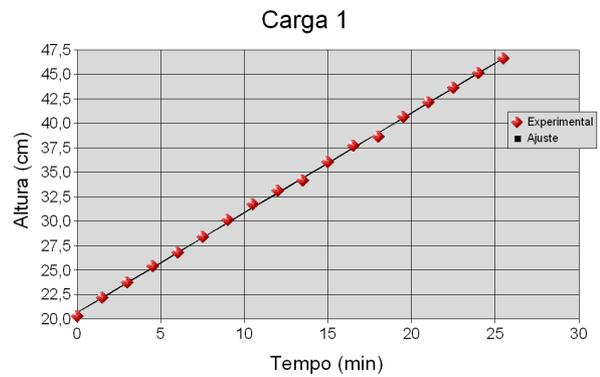
**Figura 44.** Curva granulométrica obtida para a amostra de solo ensaiada.

#### 4.2.2 Dados dos ensaios de permeabilidade

Foram realizados 04 ensaios de permeabilidade de campo utilizando o permeâmetro de Guelph na área piloto. Para obtenção do parâmetro de permeabilidade do solo,  $k_{fs}$ , os ensaios foram realizados utilizando-se valores de carga hidráulica de 5 cm e 10 cm. O coeficiente de permeabilidade foi obtido a partir da inclinação da curva posição do nível de água no reservatório *versus* tempo, considerando-se a utilização do tubo interno ou de toda a seção do reservatório superior de água. As figuras 45, 46, 47 e 48 ilustram a obtenção do coeficiente de permeabilidade do solo para os 04 testes realizados em campo.

$H = 5 \text{ cm}$

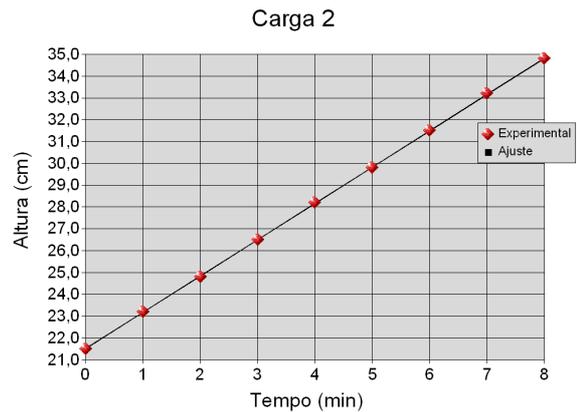
Tempo (min)	Experimental	Ajuste
0	20,3	20,69
1,5	22,2	22,21
3	23,7	23,74
4,5	25,4	25,27
6	26,8	26,8
7,5	28,4	28,32
9	30,1	29,85
10,5	31,7	31,38
12	33,1	32,91
13,5	34,1	34,44
15	36,0	35,96
16,5	37,7	37,49
18	38,6	39,02
19,5	40,6	40,55
21	42,1	42,08
22,5	43,6	43,6
24	45,1	45,13
25,5	46,6	46,66



(a)

$H = 10 \text{ cm}$

Tempo (min)	Experimental	Ajuste
0	21,5	21,51
1	23,2	23,17
2	24,8	24,84
3	26,5	26,5
4	28,2	28,17
5	29,8	29,83
6	31,5	31,5
7	33,2	33,16
8	34,8	34,83



(b)

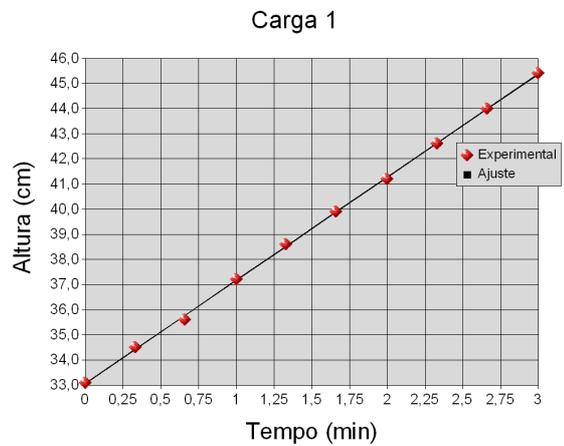
Resultados – Método Geral		
K	1,41E-04	(cm/seg)
K	1,63E-04	(cm/seg)
$K_{\text{médio}}$	1,52E-04	(cm/seg)
$\phi_{m1}$	1,41E-02	(cm <sup>2</sup> /seg)
$\phi_{m2}$	1,63E-02	(cm <sup>2</sup> /seg)
$\phi_{\text{médio}}$	1,52E-02	(cm <sup>2</sup> /seg)
$\alpha$	1,00E-02	(cm <sup>-1</sup> )

(c)

**Figura 45.** Obtenção do valor de permeabilidade do solo a partir da realização de ensaios com cargas hidráulicas de 5 (a) e 10 cm (b).

$H = 5 \text{ cm}$

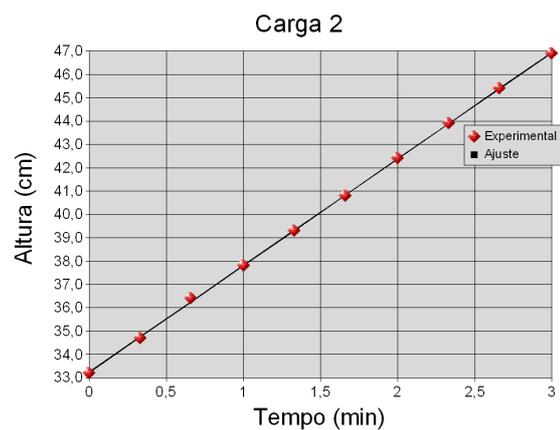
Tempo (min)	Experimental	Ajuste
0	33,1	33,07
0,33	34,5	34,42
0,66	35,6	35,78
1	37,2	37,17
1,33	38,6	38,53
1,66	39,9	39,88
2	41,2	41,27
2,33	42,6	42,63
2,66	44,0	43,98
3	45,4	45,37



(a)

$H = 10 \text{ cm}$

Tempo (min)	Experimental	Ajuste
0	33,2	33,25
0,33	34,7	34,75
0,66	36,4	36,26
1	37,8	37,81
1,33	39,3	39,32
1,66	40,8	40,82
2	42,4	42,38
2,33	43,9	43,88
2,66	45,4	45,39
3	46,9	46,94



(b)

**Resultados – Método Geral**

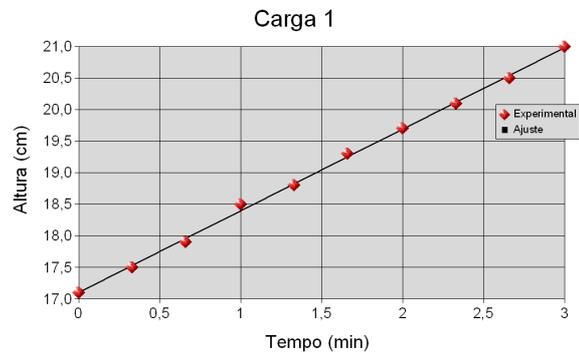
K	5,68E-04	(cm/seg)
K	5,02E-04	(cm/seg)
$K_{\text{médio}}$	5,35E-04	(cm/seg)
$\phi_{m1}$	5,68E-02	(cm <sup>2</sup> /seg)
$\phi_{m2}$	5,02E-02	(cm <sup>2</sup> /seg)
$\phi_{\text{médio}}$	5,35E-02	(cm <sup>2</sup> /seg)
$\alpha$	1,00E-02	(cm <sup>-1</sup> )

(c)

**Figura 46.** Obtenção do valor de permeabilidade do solo a partir da realização de ensaios com cargas hidráulicas de 5 (a) e 10 cm (b).

$H = 5 \text{ cm}$

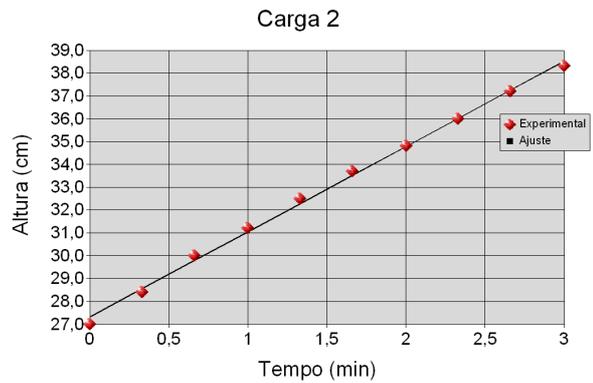
Tempo (min)	Experimental	Ajuste
0	17,1	17,1
0,33	17,5	17,53
0,66	17,9	17,96
1	18,5	18,4
1,33	18,8	18,82
1,66	19,3	19,25
2	19,7	19,69
2,33	20,1	20,12
2,66	20,5	20,55
3	21,0	20,99



(a)

$H = 10 \text{ cm}$

Tempo (min)	Experimental	Ajuste
0	27	27,32
0,33	28,4	28,55
0,66	30	29,79
1	31,2	31,05
1,33	32,5	32,29
1,66	33,7	33,52
2	34,8	34,79
2,33	36	36,02
2,66	37,2	37,25
3	38,3	38,52



(b)

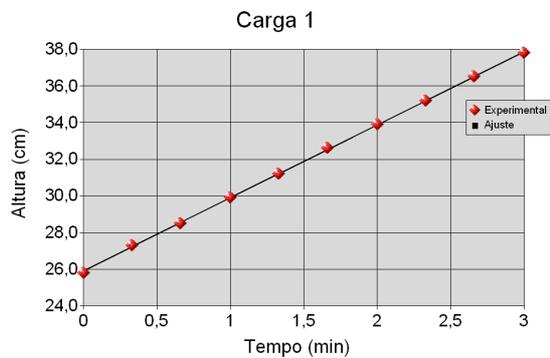
Resultados – Método Geral		
K	1,79E-04	(cm/seg)
K	3,66E-04	(cm/seg)
$K_{\text{médio}}$	2,73E-04	(cm/seg)
$\phi_{m1}$	1,79E-02	(cm <sup>2</sup> /seg)
$\phi_{m2}$	3,66E-02	(cm <sup>2</sup> /seg)
$\phi_{\text{médio}}$	2,73E-02	(cm <sup>2</sup> /seg)
$\alpha$	1,00E-02	(cm <sup>-1</sup> )

(c)

**Figura 47.** Obtenção do valor de permeabilidade do solo a partir da realização de ensaios com cargas hidráulicas de 5 (a) e 10 cm (b).

$H = 5 \text{ cm}$

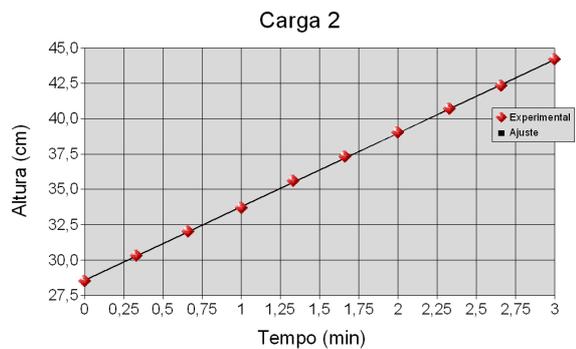
Tempo (min)	Experimental	Ajuste
0	25,8	25,9
0,33	27,3	27,22
0,66	28,5	28,53
1	29,9	29,89
1,33	31,2	31,2
1,66	32,6	32,52
2	33,9	33,88
2,33	35,2	35,19
2,66	36,5	36,51
3	37,8	37,86



(a)

$H = 10 \text{ cm}$

Tempo (min)	Experimental	Ajuste
0	28,5	28,56
0,33	30,3	30,28
0,66	32	32
1	33,7	33,77
1,33	35,6	35,49
1,66	37,3	37,21
2	39	38,98
2,33	40,7	40,7
2,66	42,3	42,42
3	44,2	44,19



(b)

Resultados – Método Geral		
K	5,52E-04	(cm/seg)
K	5,11E-04	(cm/seg)
$K_{\text{médio}}$	5,32E-04	(cm/seg)
$\Phi_{m1}$	5,52E-02	(cm <sup>2</sup> /seg)
$\Phi_{m2}$	5,11E-02	(cm <sup>2</sup> /seg)
$\Phi_{\text{médio}}$	5,32E-02	(cm <sup>2</sup> /seg)
$\alpha$	1,00E-02	(cm <sup>-1</sup> )

(c)

**Figura 48.** Obtenção do valor de permeabilidade do solo a partir da realização de ensaios com cargas hidráulicas de 5 (a) e 10 cm (b).

A tabela 8 apresenta os valores dos coeficientes de permeabilidade obtidos dos testes realizados em campo. Conforme se pode observar, foi obtido um valor de permeabilidade médio de  $3,73 \cdot 10^{-4}$  cm/s.

**Tabela 8** – Valores de permeabilidade obtido de cada ensaio realizado.

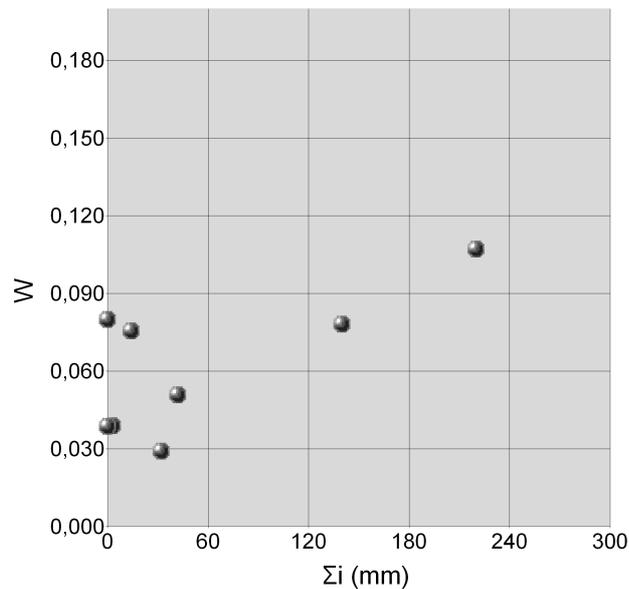
<i>Ponto</i>	<i>Permeabilidade</i> <i>(cm/s)</i>
P1	$1,52 \cdot 10^{-4}$
P2	$5,35 \cdot 10^{-4}$
P3	$2,73 \cdot 10^{-4}$
P4	$5,32 \cdot 10^{-4}$
<i>K médio</i>	= $3,73 \cdot 10^{-4}$

Estes resultados estão em concordância com os resultados obtidos dos ensaios de caracterização realizados.

#### **4.2.3. Resultados dos Dados de Campo**

Nos radargramas obtidos dos ensaios de campo realizados em períodos com diferentes precipitações ocorridas no local, foram analisadas as hipérboles localizadas nas profundidades médias de 2,5 e 4,5m.

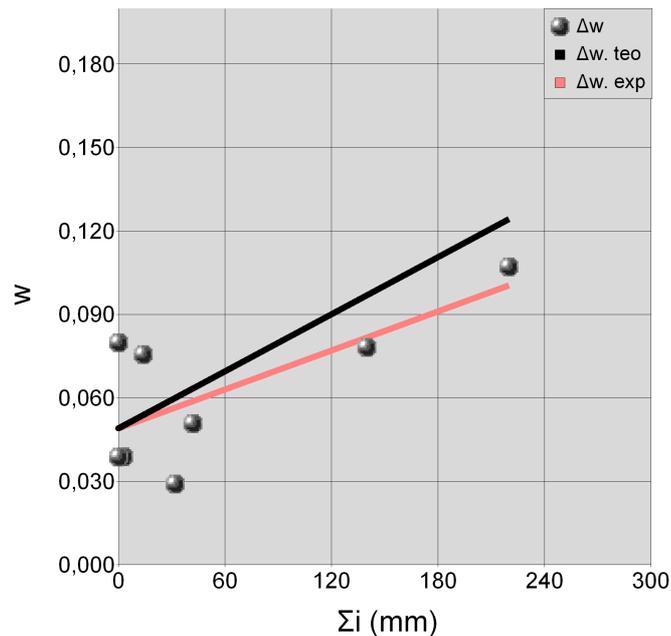
A figura 49 apresenta o gráfico da umidade *versus* precipitação dos dados experimentais para profundidade média de 2,5m.



**Figura 49.** Dados experimentais de campo de variação de umidade em função das precipitações acumuladas para 2,5m de profundidade de solo.

Os dados experimentais de umidade ( $w$ ) foram obtidos por meio da equação 38, a partir das análises de velocidade das hipérbolas localizadas, no radargrama, a uma profundidade média de 2,5m. Os valores adotados, na equação 38, para o solo estudado foram  $e = 1,27$ ,  $G = 2,7$ ,  $\epsilon_{rs} = 4,2$  (constante dielétrica relativa do quartzo) e  $\epsilon_w = 80$  (constante dielétrica da água). Os valores de precipitações acumulada foram obtidos pelo somatório das precipitações diárias em um certo período, que corresponde ao tempo de influência para profundidade analisada.

Na figura 50, além dos resultados experimentais obtidos, estão apresentados os resultados previstos pela equação 45, considerando-se os valores de  $a_i$  obtidos do ajuste de uma reta aos dados experimentais e com o uso da equação 46 e o mesmo valor de  $w_0$ .

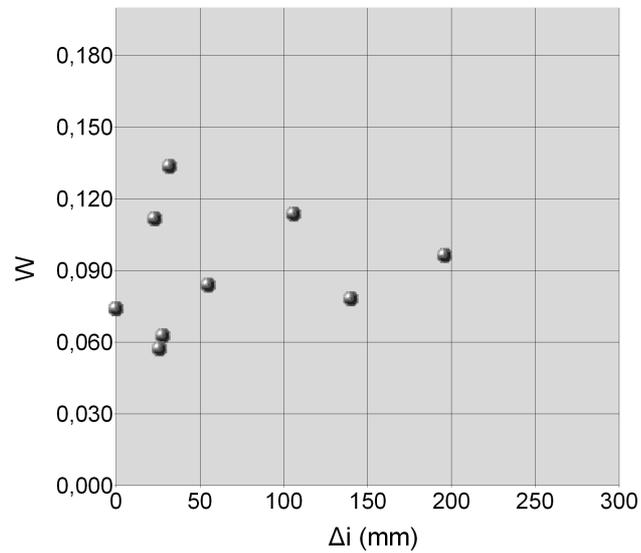


**Figura 50.** Variação da umidade em função das precipitações acumuladas para 2,5m de profundidade de solo. Valores experimentais e previstos pela equação 45.

Observa-se pelo gráfico da figura 50 que para profundidade de 2,5m a curva teórica apresentou uma maior inclinação em relação a curva de ajuste dos dados experimentais. Isto é explicado pelo fato de se considerar, nos dados teóricos obtido pela equação 44, que toda a precipitação infiltrou no solo, o que não ocorre em campo, pois parte da água precipitada é perdida pela evaporação e pelo escoamento superficial. Nesta pesquisa não foi medida a intensidade da chuva, mas é sabido que, toda vez que esta excede a capacidade de infiltração do solo a água escoar superficialmente.

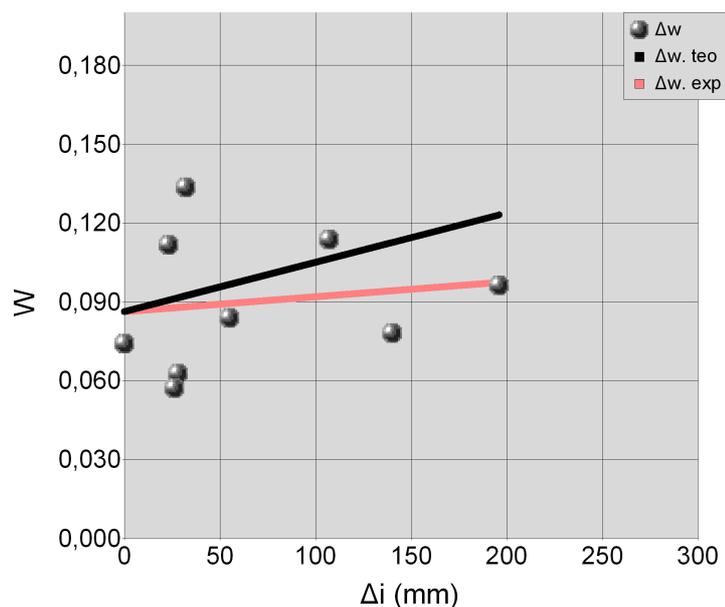
A determinação do coeficiente de escoamento, com o uso da equação 47, para os valores apresentados no gráfico da figura 50 foi de 32%. Isto significa que apenas este percentual de toda precipitação não infiltrou no solo.

Na figura 51 é apresentado um gráfico com os valores experimentais de umidade *versus* precipitação para uma profundidade média de 4,5 m. Os dados experimentais de umidade ( $w$ ) foram obtidos de modo análogo à profundidade de 2,5m.



**Figura 51.** Dados experimentais de campo de variação de umidade em função das precipitações acumuladas para 4,5 m de profundidade de solo.

Na figura 52, além dos resultados experimentais obtidos, estão apresentados os resultados previstos pela equação 45, considerando-se os valores de  $a_i$  obtidos do ajuste de uma reta aos dados experimentais e com o uso da equação 46 e o mesmo valor de  $w_0$ .



**Figura 52.** Variação da umidade em função das precipitações acumuladas para 4,5m de profundidade de solo. Valores experimentais e previstos pela equação 45.

Esta figura apresenta os dados de umidade e precipitação para a profundidade média de 4,5m. Observa-se pelo gráfico da figura 52 uma menor inclinação das curvas dos dados teóricos e experimentais em relação aos dados expostos na figura 50 para 2,5m de profundidade. Analisando os dados obtidos para profundidade de 4,5m têm-se um percentual menor de infiltração de água no solo. Isto é demonstrado pelo coeficiente de escoamento para este gráfico de 70%, ou seja, apenas 30% de toda precipitação infiltrou. Em todos os ensaios realizados o solo apresentou uma umidade mínima em torno de 5%.

Os dados experimentais de umidade do solo obtidos por meio do radar GPR tiveram resultados bastante condizentes com a condição do solo, tanto para períodos chuvosos quanto para estiagem, demonstrando a grande capacidade do equipamento para o cálculo de umidade.





---

# CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho é apresentado a construção de mecanismos para realizações de ensaios tipo CMP em laboratório e em campo. Estes mecanismos tornaram os ensaios mais dinâmicos e práticos, melhorando, bastante, a qualidade dos dados obtidos. A seguir são dadas algumas recomendações para utilização deste mecanismo.

- É importante a lubrificação das peças para redução do atrito entre as mesmas, visando evitar vibrações durante a execução do ensaio.
- Aproximar o máximo as antenas do solo.
- Realizar o deslocamento das antenas de forma lenta.
- Tensionar, bastante, as cordas guia, no caso do ensaio de campo.
- Utilizar peças, na montagem, com resistência suficiente capaz de suportar cerca de 6Kg, que corresponde a massa, aproximadamente, das antenas e baterias.

Já existem na literatura alguns trabalhos, citados anteriormente, que apontam o GPR como uma ferramenta geofísica de sucesso para pesquisas relacionadas com o solo, e evidenciam, também a sua grande potencialidade para medidas de umidade. Nesta pesquisa, diferente dos trabalhos citados, os dados para cálculo da umidade foram obtidos a partir da onda refletida em diferentes profundidades e tiveram resultados bastante condizentes com a condição do solo. Nos dados experimentais de umidade realizados em laboratório, por exemplo, com antenas de 1000Mhz, foi obtido valores de umidade muito próximos dos dados obtidos em estufa, demonstrando uma boa resposta na utilização do GPR para cálculo de umidade do solo a partir das análises realizadas das reflexões de ondas eletromagnéticas.

Em relação aos dados experimentais de campo, os resultados de umidade obtida com o radar mostraram-se em acordo tanto para períodos chuvosos quanto para estiagem, ou seja, as

velocidades das ondas eletromagnéticas diminuíram de valor para o período de fortes chuva e aumentaram para os períodos de pouca chuva, de forma prevista. Isto mostra a grande potencialidade do equipamento para estudos de monitoramento de umidade do solo em campo.

Estes experimentos servem, também, para incentivar estudos futuros com medidas de escoamento e de evaporação das precipitações visando avaliar a precisão dos dados de medida de umidade em campo obtidos com a técnica de radar GPR.

---

## REFERÊNCIAS

- ANNAN, A. P. e DAVIS, J. L. **Impulse Radar Soundings in Permafrost: Radio Science**, v. 11, pp. 383 – 394, 1976.
- ANNAN, A. P. **Ground Penetration Radar – Workshopping Notes**, p.192, September, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Rochas e Solos - Terminologia**; NBR 6502, 18p., 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Análise Granulométrica**; NBR 7181, 13p, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação da Massa Específica**; NBR 6508, 8p, 1984.
- BAKER, J. M. e ALLMARAS, R. R. **System for Automating and Multiplexing Soil Moisture Measurement by Time-Domain Reflectometry**. Soil Science of America Journal: v. 54, n. 1, p. 1-6, 1990.
- BOTELHO, M. A. B.; MACHADO, S. L.; DOURADO, T. C.; AMPARO, N. S. **Experimentos laboratoriais com GPR (1 Ghz) em corpos arenosos para analisar a influência da água e de hidrocarbonetos na sua velocidade de propagação**. In: CONGRESS OF THE BRASILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 8. Rio de Janeiro, 2003.
- CONCIANI, W.; HERRMANN, PSP; MACHADO, SL; SOARES, MM. **O uso da técnica de reflectometria no domínio do tempo (TDR) para determinação da umidade do solo *in situ***. Solos e Rochas, São Paulo, v. 19, n. 3, p. 189-199, 1996.
- DANIELS, J. J. **Ground Penetrating radar for the detection of liquid contaminants**. Journal of Applied Geophysics, v. 33: p. 195 – 207, 1995.
- DAVIS, J.L. e ANNAN, A.P. **Ground Penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy**. Geophysical Prospecting, v. 37: 531-551, 1989.
- DIX, C. H. **Seismic velocities from surface measurements**. Geophysics: 20 (1) pp. 68-86, 1995.
- GRANDJEAN, G., GOURRY, J. C., BITRI, A. **Evaluation of GPR. techniques for civil-engineering applications: study on a teste site**. Journal of Applied Geophysics: v. 45: p. 141-156, 2000.
- GREAVES, R. J., LESMES, DP; JM LEE; MN TOKSOZ.. **Velocity variations and water content estimated from multi-offset, ground-penetrating radar**, Geophysics; v. 61, p. 683-695, 1996.
- HAGREY, S. A., e MÜLLER, C. **GPR study of pore water content and salinity in sand**. Geophysical

Prospecting, v. 48, p. 63-86, 2000.

HUISMAN, J.A.; SPERL, C.; BOUTEN, W.; VERSTRATEN. **Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground penetrating radar.** Journal of Hydrology: 245, p. 48-58, 2001.

MACHADO, S. L.; BOTELHO, M. A. B.; CAVALCANTE, R. F.; AMPARO, N. S. **Contaminação por metais pesados em Santo Amaro da Purificação-BA - Uso de métodos geofísicos em geotecnia ambiental** In: V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental - REGEO 2003, Porto Alegre-RS, 2003.

MACHADO, S. L. ; CARVALHO, M. F. ; MOTTA, A. R. P. ; DELGADO, C. W. C. ; ANJOS, J. A. S. A. ; RIBEIRO, L. D. ; FIRST, A. K. ; SANCHEZ, L. **Relatório de atividades do Grupo de Geotecnia Ambiental da Sub-Rede PROAMB – Protocolos de Avaliação e Recuperação de Ambientes Impactados por Atividades Petrolíferas**, 2003. p. 71. Relatório – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

MACHADO, S. L. ; CARVALHO, M. F. ; MATTA, B. **Utilização do permeômetro Guelph para estudo da condutividade hidráulica de solos residuais de granulito da cidade de Salvador-BA.** In: V Simpósio Brasileiro de solos não saturados, v1, 2004, São Carlos-SP.

MACHADO, S. L., BOTELHO, M. A. B, AMPARO, N. S., DOURADO, T. C. **Utilização do radar de penetração do solo, GPR, para medidas de teores de água no solo.** In: V Simpósio Brasileiro de solos não saturados, 2004, São Carlos-SP. V Simpósio Brasileiro de solos não saturados, 2004. v. 1.

NAKASHIMA, Y.; ZHOU, H. AND SATO, M.. **Estimation of ground water level by GPR in an area with multiple and ambiguous reflections.** Journal of Applied Geophysics: v. 47, p. 241 – 249, 2001.

PARKHOMENKO, E. I. **Electrical properties of rocks.** Plenum Press. New York. 1967.

REYNOLDS, W.D., ELRICK, D.E., TOPP, G.C. **A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table.** Soil Sci. 136-4, 250- 268, 1983.

SMEMOE, C. M. **Processing and visualization of ground penetrating radar data for assessing natural hydrogeologic conditions.** Term Paper - Civil and Environmental Engineering 540. Department of Civil Engineering – Brigham Young University. p. 39, 2000.

TOPP, G.C. e DAVIS, J.L. **Measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR). A Field Evaluation.** Journal of American Soil Science Society: 49. pp. 19-24, 1985.

TOPP, G.C. . **The application of the time domain reflectometry (TDR) to soil water content measurement.,** 1987.

TOSHICA., T., TSUCHIDA, T., SASAHARA K. **Application of GPR to detecting and mapping cracks in rock slopes:** Journal of Applied Geophysics, 33, 119-124, 1985.

YILMAZ, O. Seismic data processing. SEG Investigations in Geophysics 2. **Society of Exploration Geophysicists**, Tulsa, OK., 1987.

WYLLIE, M. R. J.; GREGORY, A. R.; GARDNER, G. H. F. . An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media. **Geophysics:** 23(3), p. 459-493, 1958.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)