

UTILIZAÇÃO DE RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO NA DETECÇÃO DE ESTRUTURAS ARTIFICIAIS RASAS NO SOLO

João Carlos DOURADO, CHANG Hung Kiang,
Walter MALAGUTTI FILHO, Antonio Celso de Oliveira BRAGA

Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP.
Avenida 24-A, 1515 - Bela Vista. Caixa Postal 178. CEP 13506-900. Rio Claro, SP.

Introdução
Metodologia
Características do Local dos Ensaios
Ensaios Realizados
Processamento
Discussão dos Resultados
 Escolha da Antena
 Análise dos Radargramas em Tempo
 Radargramas em Profundidade
Conclusões
Referências Bibliográficas

RESUMO: O ensaio de radar de penetração nos solos (GPR) foi utilizado para imagear estruturas artificiais (valas) escavadas. Estas valas foram construídas dentro do Projeto Biomarcadores, com a finalidade de formar canteiros onde seriam injetados agentes contaminantes. O objetivo principal do ensaio foi o de avaliar o uso do GPR para obter uma boa resposta nos experimentos a serem realizadas no local do projeto. Os radargramas obtidos no ensaio permitem concluir que o GPR produziu excelentes resultados para aquelas condições e que pode ser útil em diversas áreas de aplicação, tais como: geologia de engenharia e ambiental, geofísica forense e arqueologia.

Palavras-chave: Radar de Penetração no Solo (GPR); escavações superficiais; detecção de tubos enterrados.

ABSTRACT: *J.C. Dourado, Chang, H.K., W. Malagutti Filho, A.C. de O. Braga - Ground Penetrating Radar for the detection of artificially excavated structures.* Ground penetrating radar (GPR) survey was used to image artificially excavated structures (trenches). These trenches were constructed as part of a Biomarker Project, where contaminant fluids were to be disposed. The main objective of the survey was to evaluate the potential use of the GPR under the specified conditions of the experiment. The excellent radar images obtained from the survey confirmed the potential use of GPR not only for the experiment but for other applications in areas such as engineering geology, forensic geophysics and archeology.

Keywords: Ground Penetrating Radar (GPR); surface excavation; detection of trenches.

INTRODUÇÃO

A técnica GPR (*Ground Penetrating Radar*) teve seu início de aplicação no Brasil no começo da década de 90 (Porsani, 1999). Este início causou bastante expectativa na comunidade geocientífica brasileira, pois se vislumbrava uma técnica com um poder de resolução muito grande, aliada à rapidez e facilidade de aquisição de dados. Porém, como toda técnica de investigação, o GPR possui grandes vantagens e sérias limitações e, portanto, deve-se sempre que possível publicar os resultados dos trabalhos executados.

Em condições geológicas e geofísicas favoráveis, isto é, locais que possuam rochas com resistividades elétricas altas, o GPR tem se mostrado uma técnica realmente eficaz, como mostra o trabalho de Dourado et al. (2001).

Em locais onde as condições geológicas e ambientais não são muito favoráveis, como aquelas localizadas em ambientes urbanos com solo argiloso de baixa resistividade elétrica, como o da Cidade de São Paulo (Prado, 2000), os ensaios com GPR podem apresentar resultados ruidosos e, deste modo, a interpretação deve ser muito cuidadosa e sempre que possí-

vel acompanhada de dados de outros ensaios geofísicos ou de investigação direta.

Neste trabalho, realizado em 1999, o Laboratório de Geofísica Aplicada do Departamento de Geologia Aplicada (DGA) do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP – Campus Rio Claro, fez um levantamento de campo em uma área no bairro Betel, na cidade de Campinas, onde o Projeto Biomarcadores estava em fase de implantação.

Este projeto, que está sendo executado em parceria pela PETROBRÁS, UNICAMP, USP e INPE, tem por objetivo o estudo dos efeitos de contaminantes de hidrocarbonetos na vegetação e a possibilidade de se detectar esses efeitos através de sensoriamento remoto com as análises de imagens de satélite.

O levantamento realizado teve por objetivo avaliar a aplicabilidade da técnica do radar de penetração no solo na detecção de estruturas construídas na área de estudo, como por exemplo, a delimitação dos canteiros e a tubulação de PVC que foi enterrada para ser utilizada na infiltração e no monitoramento dos contaminantes.

METODOLOGIA

A técnica GPR (*Ground Penetrating Radar*) ou Radar de Penetração no Solo ou Georadar - utiliza ondas eletromagnéticas de altas frequências (ondas de rádio), na faixa de 10 a 1000 MHz (Annan, 1992), para estudo de estruturas subsuperficiais.

Um pulso de energia de alta frequência é irradiado para o subsolo por intermédio de uma antena transmissora, sofrendo reflexões, refrações e difrações, sendo então parcialmente captado por uma antena receptora, como mostra a Figura 1A.

O sinal recebido é amplificado, digitalizado, visualizado e armazenado, podendo ser processado em uma etapa posterior. Os dados são apresentados na forma de seções semelhantes àquelas de reflexão sísmica. Cada posição de medida em superfície corresponde a um traço que representa o tempo duplo de percurso do sinal refletido, refratado ou difratado em discontinuidades presentes no subsolo. A rapidez com que a aquisição dos dados é realizada possibilita a coleta de um grande número de traços que produzem uma seção de alta definição denominada radargrama (Figura 1B).

A partir do radargrama obtêm-se os tempos das ondas refletidas e, desta maneira, as profundidades dos refletores podem ser determinadas, se forem conhecidas as velocidades de propagação da onda no meio. A frequência de operação é escolhida de forma a fornecer a relação mais vantajosa entre penetração e resolução. As antenas com frequências mais altas produzem um radargrama de alta resolução, porém baixa penetração, enquanto as com frequência mais baixas possuem maior penetração, porém geram radargramas de menor resolução.

O sistema GPR pode operar com diversos valores de frequências e, em geral, tanto o módulo transmissor como o receptor podem ser usados com um variado conjunto de antenas, cada qual correspondendo a um determinado valor de frequência. A escolha de qual

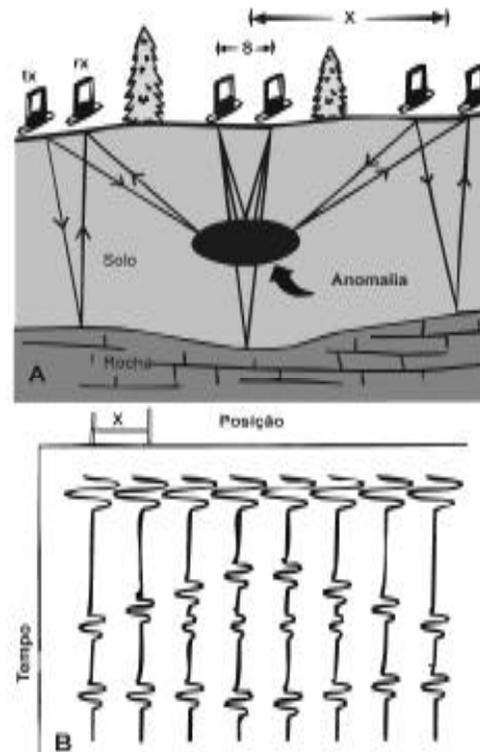


FIGURA 1. A - Esquema de execução do ensaio GPR, onde tx é a antena transmissora, rx antena receptora, S espaçamento (*offset*) entre as antenas e X a distância entre os pontos de amostragem em superfície. B - Registro (radargrama) obtido do modelo acima (modificado de Davis & Annan, 1989).

antena utilizar, além dos aspectos da relação resolução/profundidade, deverá levar em consideração aspectos operacionais importantes, tais como o acesso à área do levantamento e as condições locais existentes, pois o tamanho de uma antena varia muito de acordo com a sua frequência.

CARACTERÍSTICAS DO LOCAL DOS ENSAIOS

O local dos ensaios está situado no Bairro Betel, município de Campinas, na borda da Bacia Sedimentar do Paraná, onde ocorre um *sill* de diabásio.

O solo observado na região é residual, gerado a partir da decomposição do diabásio, e pode ser classificado, segundo Prado (1997), como Latossolo Roxo ou Vermelho Escuro.

Para a realização do projeto citado na introdução deste trabalho, foram construídos quatro canteiros (Figura 2). Estes canteiros possuem aproximadamente 60 m de comprimento por 5 m de largura e profundidade em torno de 2 m, onde seriam plantados vários tipos de

vegetais. Em três canteiros o solo foi contaminado com diferentes tipos de hidrocarboneto, enquanto o quarto canteiro ficou sem contaminação. Este procedimento teve por objetivo comparar os possíveis efeitos entre os diferentes agentes poluidores na vegetação e também entre solos contaminados e sem contaminação.

Os canteiros foram preparados de acordo com a seguinte seqüência:

- abertura de uma cava com a remoção do solo superficial;
- colocação de um fundo impermeável na cava (lona plástica);

- preenchimento da cava com solo removido na primeira etapa, juntamente com a implantação de sistema de tubos de PVC.

O sistema de tubos foi construído com a finalidade de monitorar e injetar os fluidos contaminantes diretamente no solo, em profundidades controladas. Na Figura 2 é possível ver, em planta, a localização da “boca” destes tubos que afloram na superfície. Os tubos

de injeção encontram-se na borda das cavas, enquanto que os de monitoramento encontram-se no meio dos canteiros.

A colocação de um solo sobre um fundo impermeável teve por finalidade evitar que os agentes contaminantes se infiltrassem sem controle, causando impactos ambientais indesejáveis no solo e no aquífero da região.

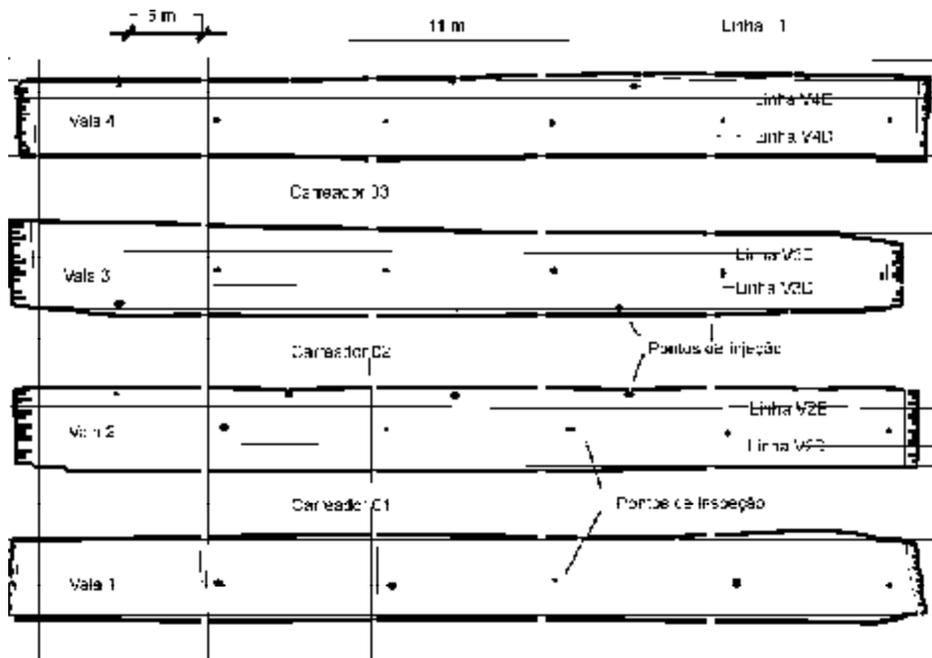


FIGURA 2. Croquis de localização das linhas ensaiadas com o GPR.

ENSAIOS REALIZADOS

Foram realizados ensaios nos três canteiros que receberiam os produtos contaminantes. Nestes canteiros, que correspondem às valas 2, 3 e 4, foram feitas seis linhas longitudinais, denominadas de V2D, V2E, V3D, V3E, V4D e V4E. Além destas, foi executada uma linha transversal cortando os quatro canteiros. Essa linha recebeu a denominação de T1 (Figura 2).

Em cada linha ensaiada foram utilizados dois conjuntos de antenas: 200 MHz e 400MHz, com o objetivo de determinar qual a melhor antena a ser utilizada na área.

O espaçamento utilizado entre a antena transmissora e a receptora foi de 0,60 m, e o intervalo entre

os pontos de aquisição foi de 0,20 m. Para a antena de 400 MHz utilizou-se uma frequência de amostragem de 4.417 MHz, sendo que cada traço foi digitalizado com 512 amostras em uma janela de tempo de 116 ns (nanossegundos). Cada traço foi empilhado 128 vezes. Na configuração da antena de 200 MHz a frequência de amostragem ficou estabelecida em 2.041MHz e a digitalização das 512 amostras dos traços foram feitas em janela de tempo de 248 ns. Para estas antenas foi feito um empilhamento idêntico ao da antena de 400 MHz.

Na Vala 2 foi realizado um ensaio CMP (*Common Mid Point*) com a finalidade de determinar a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no solo.

PROCESSAMENTO

Os radargramas foram processados com o *software* Gradix da Interpex Limited e o procedimento adotado teve como princípio preservar, o máximo

possível, as feições dos traços. Para tanto foi realizado um processamento básico, executado de acordo com os seguintes passos:

- Ganho: foi aplicado um ganho, visando compensar a perda da amplitude devido à divergência esférica e a atenuação. Foi escolhida a função de ganho que obedece a formulação da Equação 1:

$$g(t) = Vte^{(V\hat{a}t)} \quad (1),$$

onde: g é o ganho em função do tempo t , V é a velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio, \hat{a} é constante de atenuação e t é tempo de propagação da onda.

- Ajuste do tempo zero (*set time zero*): antes de se converter os radargramas em profundidade foi feito o ajuste do tempo zero em função da chegada da onda aérea.
- Conversão tempo-profundidade: foi utilizada a velocidade de propagação de 0,091 m/ns, obtida através do ensaio CMP, cujo radargrama é mostrado na Figura 3. Esta velocidade foi obtida pelo ajuste da hipérbole indicada através de uma função existente no programa utilizado. Esta hipérbole é formada pelas reflexões da onda eletromagnética no fundo Vala 2.

Após o processamento, os radargramas foram construídos de maneira a realçar a visualização das estruturas presentes nas valas. Desta maneira, optou-

se em plotar os traços na forma de densidade variável em escala de cinza.

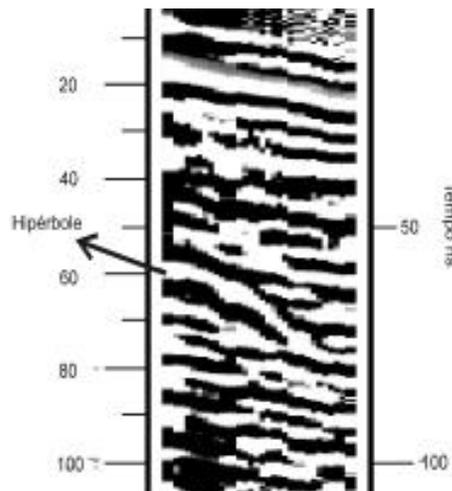


FIGURA 3. Radargrama do ensaio CMP. Notar a presença da hipérbole bem definida a partir de 60 ns (nanossegundos). A velocidade obtida, através da hipérbole é de 0,091 m/ns.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

ESCOLHA DA ANTENA

A análise dos radargramas obtidos permitiu, em primeiro lugar, determinar qual o tipo de antena que produz uma melhor imagem da subsuperfície alvo.

Comparando-se os dois radargramas de uma mesma linha (V2D) (Figuras 4 e 5), percebe-se que a imagem obtida com a antena 200 MHz apresenta-se

mais nítida, em função do fato de que no radargrama obtido com a antena de 400 MHz existe a presença de um forte ruído causado pela reverberação do sinal nas antenas (*ringing*). Este ruído está relacionado com o tipo de solo e o comprimento de onda utilizado. Portanto, para o tipo de solo da área estudada, esta antena não produz bons resultados, apesar da maior resolução obtida com sua utilização.

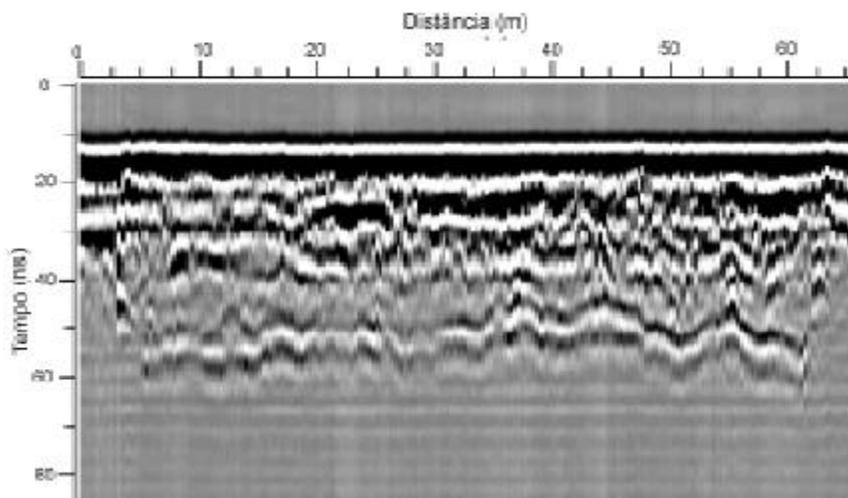


FIGURA 4. Radargrama da Vala 2 obtido na Linha V2D com antena de 200 MHz. Notar que a vala está bem caracterizada, com seu fundo bem caracterizado, em torno 50 ns (nanossegundos). Neste radargrama não foi feito o ajuste do tempo zero.

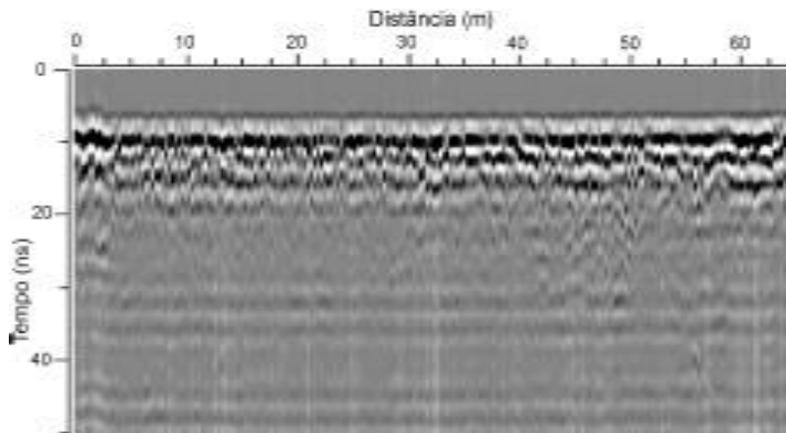


FIGURA 5. Radargrama obtido no mesmo local do radargrama da Figura 4, utilizando-se a antena de 400 MHz. Notar a presença de um forte ruído que mascara o sinal das ondas refletidas nas estruturas da vala. Neste radargrama não foi feito o ajuste do tempo zero.

ANÁLISE DOS RADARGRAMAS EM TEMPO

Após a escolha da antena, foi feita uma análise geral de todos os radargramas (em tempo) obtidos na área. De modo geral, todos os radargramas obtidos com a antena de 200 MHz apresentam bons resultados, mostrando imagens bem definidas da cava. Em alguns deles foi possível identificar a tubulação subsuperficial

de PVC, através da presença de pequenas feições hiperbólicas, formadas pela difração das ondas eletromagnéticas nestes materiais, que podem ser considerados pontuais na escala dos ensaios. Dentre estes radargramas destaca-se para este trabalho os registros da linha T1 (linha transversal aos canteiros) e da linha V3E, apresentados nas Figuras 6 e 7, respectivamente.

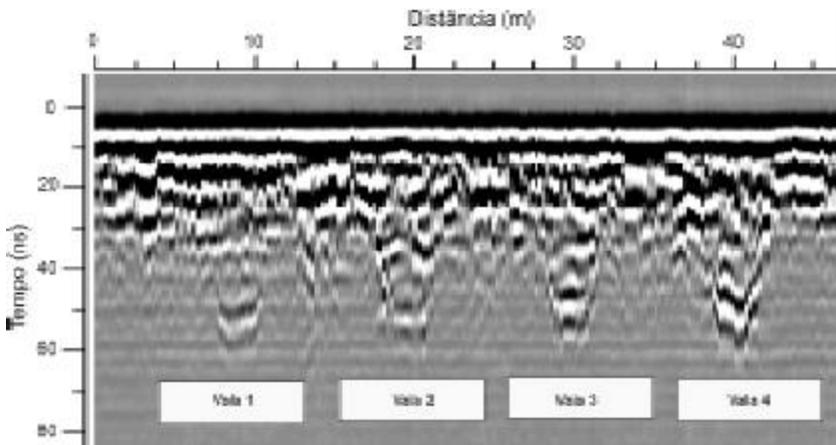
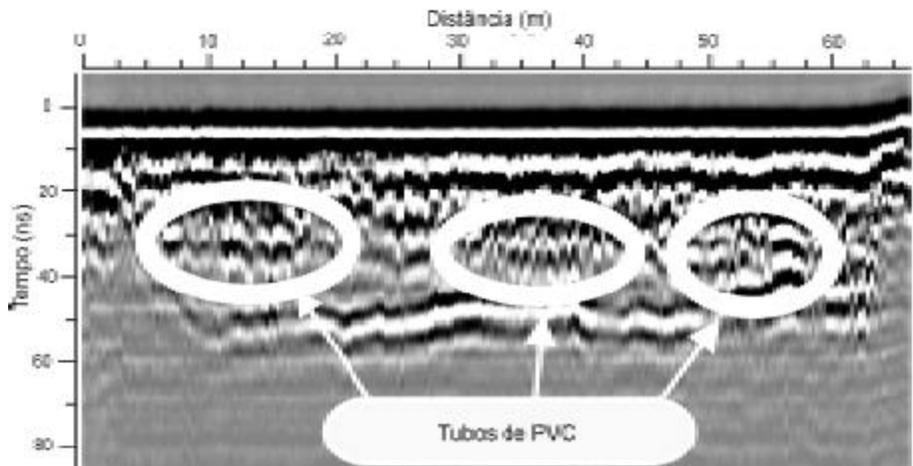


FIGURA 6. Radargrama da Linha T1, transversal às valas. Notar a boa definição das escavações.

FIGURA 7. Radargrama obtido na Linha V3E da Vala 3. Este radargrama traz muito bem definido os contornos da vala. Notar também a presença de pequenas hipérboles alinhadas e que estão apontadas na figura. Estas hipérboles representam as difrações sofridas pelas ondas eletromagnéticas no tubo de PVC de 1/2”.



RADARGRAMAS EM PROFUNDIDADE

Posteriormente, os radargramas foram transformados em profundidade, conforme procedimento descrito no item anterior. É apresentada na Figura 8 a seção em profundidade da Linha V4E.

As variações existentes nas profundidades obtidas devem estar relacionadas com a distribuição não uniforme da umidade que se acumulou na base da escavação, impermeabilizada com plástico, e pela própria desestruturação do solo durante as escavações.

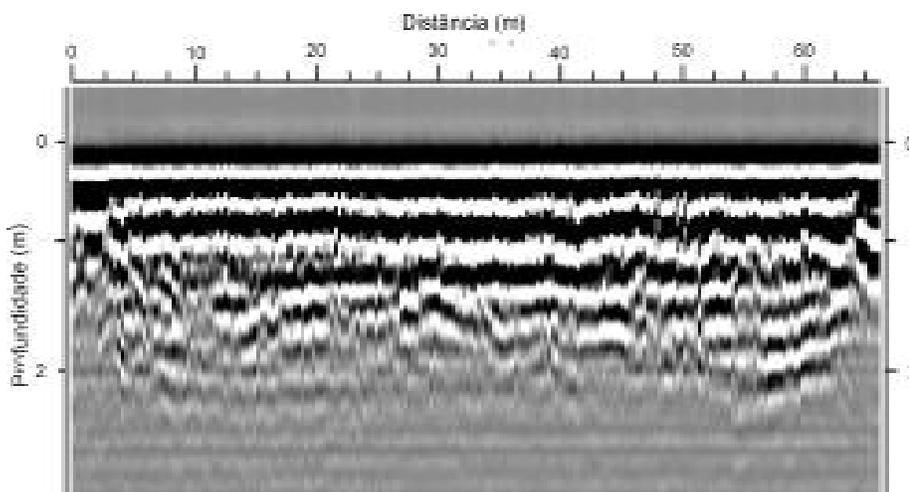


FIGURA 8. Radargrama em profundidade da Linha V4E da Vala 4. As profundidades da vala, mostradas na seção, situam-se próximas dos 2 m.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho mostram que, para as condições do local ensaiado, o GPR é uma técnica muito eficiente para detecção de escavações rasas. Ressalta-se que o solo de diabásio, que constitui os canteiros citados, encontrava-se superficialmente seco no período do ensaio.

As reflexões obtidas no fundo das valas foram, provavelmente, causadas por águas de chuvas que se infiltraram e se acumularam sobre o material impermeável que reveste a vala. A presença da água em um solo de diabásio causa dois efeitos que interferem diretamente na propagação das ondas eletromagnéticas:

- grande diminuição na resistividade elétrica do material, tendo em vista que os solos de diabásio são muito argilosos;
- aumenta a constante dielétrica do solo.

O contraste entre a constante dielétrica do solo seco e do solo úmido vai transformar a interface entre estes dois materiais em uma ótima superfície refletora,

enquanto a baixa resistividade elétrica do solo com água vai causar uma maior dissipação da energia eletromagnética, bloqueando praticamente a propagação das ondas para profundidades maiores. Por este motivo não se visualiza interfaces abaixo do fundo da vala.

Dentre as diversas áreas de aplicações, onde este tipo estrutura de escavação pode ocorrer, estão a Geologia Ambiental - na detecção de material enterrado (lixo, rejeitos industriais, tambores etc.), a Geologia de Engenharia - na detecção de interferências subsuperficiais, como por exemplo, tubulações de água e esgoto, fiação subterrânea etc., na Geofísica Forense e na Arqueologia - onde o GPR pode ser útil na localização de alicerces, construções subterrâneas ou soterradas e mesmo na localização de corpos.

Ressalta-se ainda que, devido à grande diversidade de tipos de solos e de condições de ensaios, uma campanha de GPR deve sempre ser iniciada com testes básicos para se certificar da aplicabilidade da técnica para determinada situação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANNAN, A.P. **Ground Penetrating Radar – Workshop Notes**. Sensors e Software, Inc., Internal Report, 1992, 130 p.
2. DAVIS, J.L. & ANNAN, A.P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, v. 37, n. 5, p. 531-551, 1989.
3. DOURADO, J.C.; MALAGUTTI FILHO, W.; BRAGA, A.C.O.; NAVA, N. Detecção de cavidades utilizando gravimetria, eletrresistividade e GPR. **Revista Brasileira**

- de Geofísica**, v. 19, n. 1, p. 19-32, 2001.
4. PORSANI, J.L. **Ground Penetrating Radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológicos-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado - SP.** Rio Claro, 1999. 145 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
 5. PRADO, H. **Os solos do Estado de São Paulo: mapas pedológicos.** Piracicaba: EMBRAPA, 1997, 205 p.
 6. PRADO, R.L. **A sísmica de reflexão rasa e o radar de penetração no solo na investigação geológico-geotécnica em ambientes urbanos. Um estudo na cidade de São Paulo - SP, Brasil.** Rio Claro, 2000. 174 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.