

O uso integrado dos métodos de sísmica de refração e de ondas superficiais visando à caracterização da subsuperfície rasa.

*Fabio Bordotti Schumann, IAG/USP, Brasil

Renato Luiz Prado, IAG/USP, Brasil

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

This paper presents the data analysis from two shallow seismic methods carried out in a sedimentary area. We used a combination of seismic refraction tomography and multi-channel analysis of surface waves – MASW techniques aiming to characterize the shallow subsurface. The seismic refraction tomography and MASW data were acquired simultaneously using the same hardware and field geometry, i.e., a Geode seismograph coupled with ninety six 14 Hz geophones spaced 2 meters apart and seventeen shot points spaced 12 meters apart along the entire spread. Two 2D sections, P wave velocity image (from refraction data) and S wave velocity image (from surface waves data) were analyzed and compared. Joining the data we derived a Poisson's ratio section aiming to infer strength characteristics of soils and sediments. This approach showed to be complementary to map geologic interfaces and suitable to infer mechanical properties of soils and sediments.

Introdução

Estudos geofísicos vêm sendo realizados na região de Bebedouro/SP onde há ocorrência de tremores de terra causados pela extração de água subterrânea por poços tubulares. Dentre outros métodos geofísicos, foram realizados ensaios sísmicos próximos às estações sismográficas instaladas na região, visando principalmente ao conhecimento do modelo de espessuras e velocidades sísmicas das camadas geológicas presentes sob essas estações. Esses modelos constituem vínculos importantes para a inversão de estruturas mais profundas a partir dos dados sismológicos registrados.

Os ensaios sísmicos foram programados prioritariamente para a obtenção de dados de sísmica de refração rasa com ondas P e posterior inversão com método tomográfico. Porém, os mesmos registros foram utilizados para a análise e interpretação das ondas superficiais visando à obtenção de modelo de velocidades das ondas S através do método de análise espectral de onda superficial. Neste caso empregando especificamente o método MASW (*multichannel analysis of surface waves*) proposto por Park et al. (1999).

A integração dos resultados obtidos pelos dois diferentes métodos a partir do mesmo registro é importante para o conhecimento do modelo elástico da subsuperfície rasa em estudos sismológicos e potencialmente de grande aplicação em estudos geotécnicos em projetos de engenharia.

Neste trabalho são apresentados os resultados dessa integração e discutidas as vantagens e limitações do seu emprego a partir das observações deste estudo de caso.

Área de Estudo

O ensaio foi realizado na região de Andes, distrito rural da cidade de Bebedouro, estado de São Paulo. O local situa-se sobre a Formação Bauru da Bacia Sedimentar do Paraná (Rocha, 2005), caracterizada por arenitos finos a muito finos e siltitos de origem fluvial. Sob esses sedimentos ocorre a Formação Serra Geral, composta por basaltos de origem toleítica (Figura 1).

Os dados foram coletados próximo à estação sismológica BEB4A (coordenadas UTM 22 K 7667200 N e 758361 E), distante aproximadamente um quilômetro de um poço tubular usado como referência para as profundidades dos contatos geológicos presentes na área.

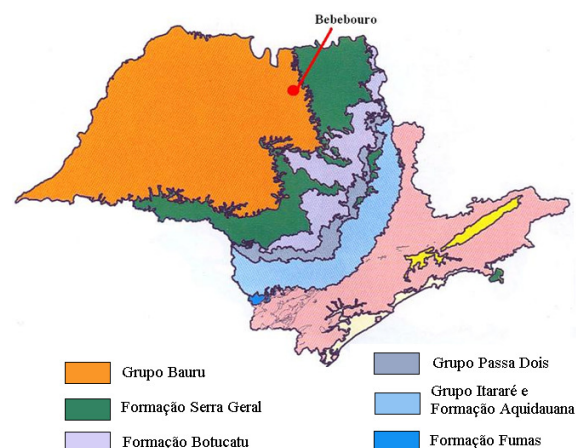


Figura 1 Mapa geológico do estado de São Paulo com a cidade de Bebedouro em destaque. (Rocha, 2005)

Métodos

O ensaio foi realizado com 96 geofones verticais de 14 Hz espaçados entre si de 2 metros. A energia foi gerada pelo impacto de uma marreta de aproximadamente 8 quilos sobre placa metálica assentada na superfície do terreno. Foram efetuados “tiros” nas extremidades do arranjo (a 2 m do primeiro e último geofones) e a cada

intervalo de 6 geofones (12 m) ao longo do arranjo (Figura 2), totalizando 17 “pontos de tiro”.

Os dados foram analisados e interpretados através do aplicativo Rayfract empregando o método tomográfico WET – Wavepath Eikonal Traveltime (Schuster & Quintus-Bosz 1993). O tratamento inicial consistiu na introdução da geometria de campo empregada e leitura dos tempos das primeiras chegadas das ondas. Neste último caso, o reconhecimento é feito semi-automaticamente pelo aplicativo com posteriores correções pelo intérprete. Após essa etapa foi realizada a inversão e obtida a seção sísmica 2D de variação da velocidade das ondas P com a profundidade.

A análise das ondas superficiais (obtenção da curva de dispersão) foi feita sobre os mesmos sismogramas do ensaio de sísmica de refração. O tratamento se iniciou pela “conversão” dos arranjos *split spread* para *in line offset* com a eliminação dos traços correspondentes ao menor lanço de cada registro de tiro. O método consiste na transformação dos conjuntos de tiro para o domínio da frequência e sua posterior integração no espaço com relação às diferentes velocidades aparentes previstas para esse tipo de ensaio. Os valores absolutos assim obtidos são plotados no domínio velocidade de fase versus frequência sendo que os pares de valores velocidades de fase-frequência que determinam a curva de dispersão são determinados pelos máximos de amplitudes.

O modelo de velocidades final é obtido da curva de dispersão por método de inversão não linear (método do gradiente e Monte Carlo). As inversões das curvas de dispersão foram realizadas com o aplicativo SurfSeis (Park et al., 1999).

De cada um dos 17 sismogramas analisados foi obtido ao final um modelo 1D de variação da velocidade da onda S com a profundidade atribuído ao centro do respectivo arranjo de geofones. Esses perfis foram interpolados para a obtenção de uma seção 2D de variação da velocidade da onda S.

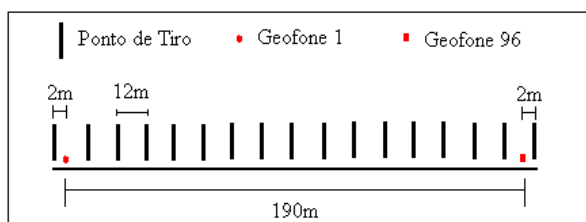


Figura 2 Esquema do arranjo utilizado no ensaio de sísmica rasa.

Resultados

O resultado obtido pela inversão com o método tomográfico é apresentado na Figura 3. Há duas interfaces principais, a primeira delas limitando os solos superficiais do arenito alterado do Grupo Bauru e a

segunda relativa ao contato arenito-basalto da Formação Serra Geral (ambas indicadas pelas linhas tracejadas na Figura 3). No método tomográfico parte-se de um modelo inicial de n camadas com gradiente contínuo de velocidade iniciando pela menor velocidade identificada nos gráficos tempo-distância (velocidade do solo superficial, neste caso da ordem de 500 m/s) e finalizando com a velocidade mais alta (velocidade no basalto, neste caso da ordem de 5600 m/s). As interfaces das camadas geológicas presentes são associadas às regiões da seção onde o gradiente de velocidades é mais acentuado. No modelo geológico obtido pelo método tomográfico as interfaces solo saprolítico-arenito alterado e arenito-basalto apresentam-se em profundidades aproximadas de 8 e 38 metros, respectivamente.

Na inversão das curvas de dispersão das ondas superficiais foram realizados testes empregando dois diferentes métodos. Um que considera apenas o modo fundamental de propagação (método do gradiente), e outro que incorpora os modos superiores (método Monte Carlo). O objetivo deste procedimento foi o de evitar possíveis erros na identificação dos diferentes modos, aspecto interpretativo de maior dificuldade no emprego do método.

A Figura 4 apresenta o espectro de velocidades de fase de um dos registros, onde podem ser observadas com linhas pontilhadas as duas curvas finais do processo de inversão empregando conjuntamente os modos fundamental e primeiro de propagação. Houve convergência entre os modelos de velocidades obtidos após a inversão com um e outro método (Figura 5). A seção de velocidades das ondas S foi então gerada pelo algoritmo de inversão que considera apenas o modo fundamental de propagação (Figura 6). O modelo final obtido permitiu identificar duas interfaces a aproximadamente 6 e 15 metros atribuídas a variações das propriedades mecânicas do solo e arenito.

Uma vez que as velocidades das ondas P e S são controladas por diferentes propriedades elásticas buscou-se integrar as informações obtidas com o método de refração e das ondas superficiais visando uma melhor caracterização da subsuperfície. A análise qualitativa dessa integração foi feita interpretando-se a seção da Figura 7 que apresenta os valores dos coeficientes de Poisson em subsuperfície. A seção foi obtida integrando os valores numéricos dos grids obtidos das seções das Figuras 3 e 4.

Identificou-se uma interface a aproximadamente 3 metros de profundidade, que separa os solos superficiais arenosos pouco coesivos (Poisson $\leq 0,27$) dos solos mais coesivos, e outra a aproximadamente 14 metros de profundidade (Poisson $> 0,46$). Esta última é de interpretação ambígua, uma vez que está próxima ao nível d'água local o que justifica os valores dos coeficientes obtidos. Porém, também coincide com a interface identificada para as ondas S (Figura 6). Neste caso a interface estaria indicando mudanças nas propriedades elásticas da estrutura do sedimento.

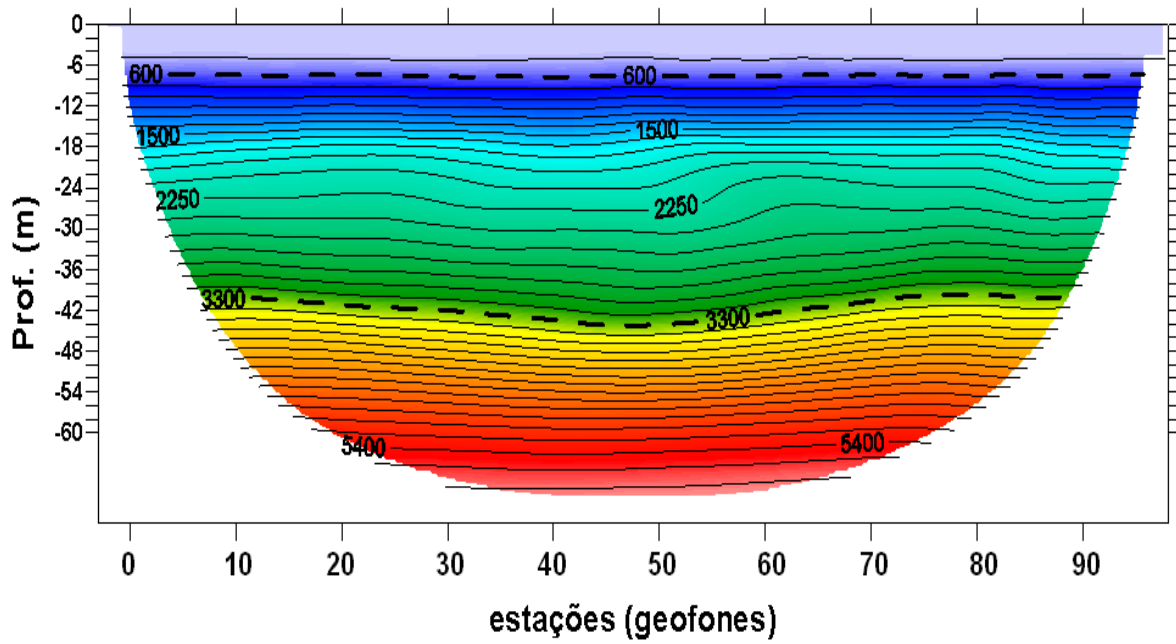


Figura 3 Resultado tomográfico para BEB4A. Velocidades da onda P em m/s.

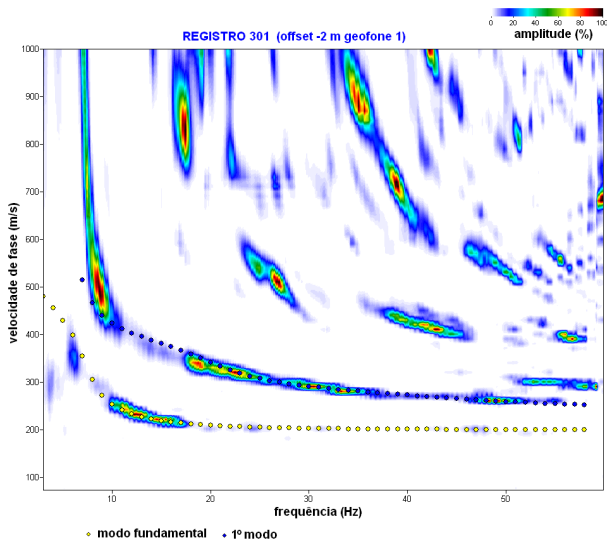


Figura 4 Espectro de velocidades de um dos registros obtidos e curvas de dispersão extraídas (modo fundamental e primeiro modo).

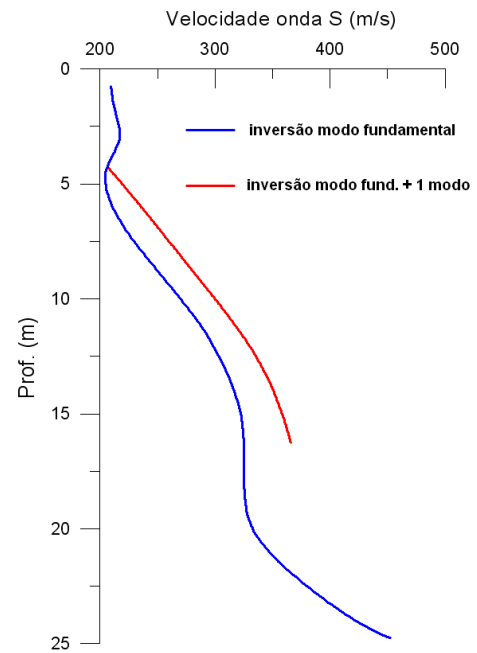


Figura 5 Modelos 1D de velocidades da onda S obtidos para um dos registros com dois diferentes métodos de inversão.

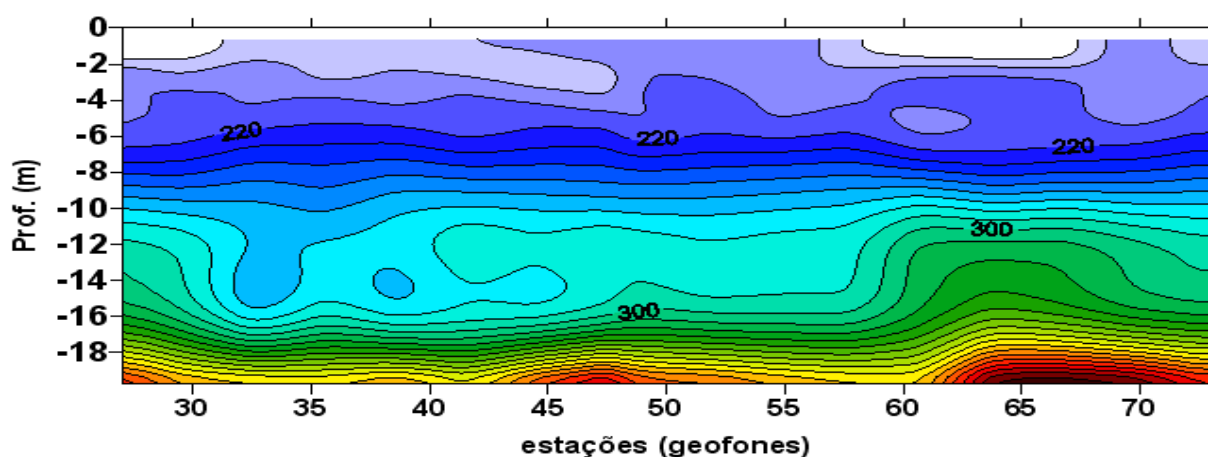


Figura 6 Seção de velocidades das ondas S em m/s obtidas com o método das ondas superficiais.

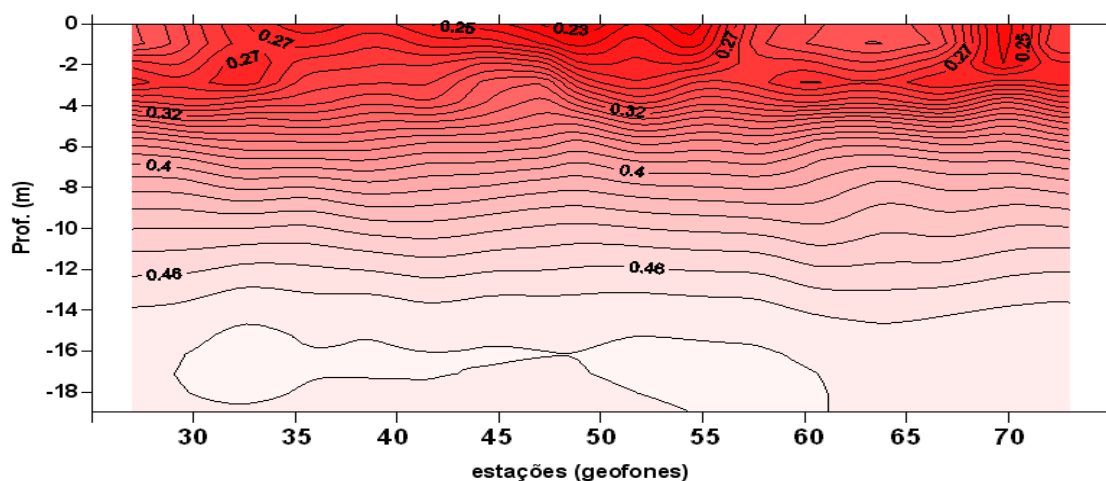


Figura 7 Seção do coeficiente de Poisson obtida da integração dos dados das Figuras 3 e 6.

Conclusões

O trabalho mostrou ser possível extrair informações de caráter interpretativo a partir da análise das ondas superficiais registradas em dados obtidos em ensaios convencionais de sismica de refração. Em ensaios de sismica de refração rasa esse evento é considerado "ruído" coerente e se possível eliminado nas etapas de processamento. Essa possibilidade permite ainda integrar as informações dos dois métodos, ou seja, o campo de velocidades das ondas P e S nos estratos rasos e assim inferir características geotécnicas. Todavia, as profundidades investigadas por um e outro método são diferentes, ficando esta integração normalmente restrita aos estratos mais superficiais.

Para se obter uma seção integrada é importante uma boa densidade de dados e que os dados de refração sejam invertidos por método tomográfico.

Pelas características dos métodos de inversão aplicados tanto na sismica de refração (tomografia) quanto com as

ondas superficiais (inversão da curva de dispersão), o resultado da integração dará melhores resultados em meios onde haja aumento gradativo das velocidades com a profundidade.

Em relação aos métodos aplicados, as maiores limitações se referem, no caso da tomografia, à dificuldade de definir as interfaces geológicas presentes, uma vez que o método assume gradiente constante de velocidade com a profundidade. Em relação ao método das ondas superficiais, a maior dificuldade é com relação à identificação dos modos de propagação das ondas nas imagens de dispersão geradas. Neste caso, erros de identificação resultarão em modelos de velocidades incorretos.

A integração dos métodos resultando na caracterização de parâmetro elástico dinâmico pode ser de grande utilidade nas investigações geotécnicas de fundações e obras subterrâneas rasas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do CNPq (bolsa PIBIC) e FAPESP (realização dos ensaios)

Referências Bibliográficas

Hagedoorn, J. G. 1959. The Plus-Minus Method of Interpreting Seismic Refraction Sections EAGE Geophysical Prospecting, volume 7, pp. 158-182

Park, C.B.; Miller, R.D.; Xia, J. 1999. Multichannel analysis of surface waves. Geophysics, v.64, n.3, p.800-808.

Rocha, G. 2005. Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. DAEE, IG, IPT, CPRM.. 119 p.

Schuster, G.T.; Quintus-Bosz, A. 1993. *Wavepath eikonal travelttime inversion : Theory*. Geophysics, volume 58, pp. 1314-1323.