



A OBTENÇÃO DE VELOCIDADES DA ONDA S POR DIFERENTES MÉTODOS SÍSMICOS

Otávio Coaracy Brasil Gandolfo - Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo - IPT

Ivo Vieira da Silva - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas - USP

Copyright 2013, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13th 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

Three seismic methods were used to acquire shear wave velocity at a test site: crosshole test, seismic refraction (using S waves, which are not used as frequently as P waves in seismic) and Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). These methods were comparatively evaluated. The crosshole data, considered to be more accurate than other methods data, were used as a “yard stick” for evaluating the accuracy of MASW shear wave velocity data. The results show a good agreement between the surface seismic methods data (seismic refraction and MASW) and the crosshole test data (performed in boreholes).

Introdução

O conhecimento das velocidades de propagação das ondas sísmicas é importante para a caracterização das propriedades físicas da subsuperfície em aplicações voltadas à geotécnica.

Diferentes métodos sísmicos, realizados tanto em furos de sondagens como em superfície, podem ser empregados visando a melhor caracterização do campo de velocidade das ondas sísmicas.

A onda de cisalhamento (onda S) possui algumas características vantajosas em relação à onda compressional (onda P). Primeiro, a sua insensibilidade à presença de fluidos no maciço terroso, acarretando que sua velocidade de propagação (V_s) sofra apenas influência das características da matriz sólida do meio. Segundo, a relação direta de V_s com um parâmetro de grande interesse para a engenharia geotécnica, que é o módulo de cisalhamento dinâmico ($G_{m\acute{a}x} = \rho V_s^2$).

O ensaio *crosshole* é o que oferece os resultados mais precisos quanto à distribuição das velocidades sísmicas com a profundidade, pois é realizado em furos de sondagens devidamente preparados para o ensaio e perfurados até a profundidade de interesse da investigação.

O MASW utiliza o registro das ondas superficiais para obtenção, por meio de processos matemáticos, da distribuição de V_s com a profundidade.

O método da refração sísmica com o emprego da onda S requer algumas modificações em relação à aquisição tradicional onde usualmente a onda P é utilizada. Para uma eficiente geração e captação da onda S é necessária a utilização de fonte e geofones adaptados para tal finalidade.

Ensaio sísmico que necessitam de furos de sondagens geralmente são caros, porém apresentam resultados mais precisos do que os ensaios realizados em superfície. Daí, a necessidade do emprego de outras técnicas adicionais para o estudo do comportamento da onda S em subsuperfície. Métodos de superfície (menos dispendiosos), desde que forneçam resultados satisfatórios, constituem alternativas aos ensaios em furos.

A possibilidade de serem efetuados de maneira integrada, tanto ensaios em superfície (refração sísmica e MASW) como ensaios em furos de sondagem (*crosshole*, *downhole*), é uma boa oportunidade para que os resultados obtidos possam ser analisados de forma comparativa.

Metodologia

O ensaio *crosshole* é realizado de acordo com a norma ASTM D4428/D4428M (2007). São utilizados três furos de sondagem alinhados e próximos entre si, nos quais em um deles é inserida a fonte de ondas sísmicas (que gere predominantemente onda S ou onda P) e nos furos adjacentes, os geofones. A fonte e os geofones ficam posicionados na mesma cota de investigação. Esta geometria é estabelecida com o objetivo de se obter o registro das ondas transmitidas diretamente o que permite, a princípio, o cálculo do valor verdadeiro da velocidade de propagação em cada cota investigada. O resultado do ensaio é um perfil da velocidade das ondas sísmicas com a profundidade, para cada nível ensaiado. Maiores informações sobre o ensaio *crosshole* podem ser obtidas em Prado (1994).

O método das ondas superficiais utilizando múltiplos receptores (MASW-*Multichannel Analysis of Surface Waves*) proposto por Park et al. (1999) e Xia et al. (1999) está fundamentado no caráter dispersivo das ondas Rayleigh em meios estratificados. É realizado utilizando um arranjo de geofones alinhados e com pequeno espaçamento entre eles. As ondas Rayleigh podem ser geradas por uma fonte do tipo impulsiva (marreta ou queda de peso) em um ponto externo ao arranjo de geofones. A distância deste ponto ao primeiro geofone é denominada “*offset mínimo*”, parâmetro importante a ser escolhido em um ensaio MASW.

A partir dos sismogramas adquiridos em campo procede-se uma transformada de domínio e, deste espectro é obtida uma curva de dispersão (velocidade de fase da onda Rayleigh em função da frequência) por meio da análise dos máximos de energia observados no espectro. A inversão da curva de dispersão resulta em um perfil 1D (variação de velocidade da onda S em profundidade), informação atribuída ao centro do arranjo de geofones.

Um levantamento de refração sísmica com o objetivo de gerar e captar ondas S é relativamente diferente da tradicional aquisição na qual geralmente se utilizam as ondas do tipo P. O impacto de uma marreta nas faces opostas de um dormente de madeira constitui uma típica fonte de energia capaz de gerar ondas cisalhantes polarizadas horizontalmente (SH). Neste caso, devem ser utilizados geofones de componente horizontal. Mais detalhes sobre os procedimentos de aquisição e análise dos dados utilizando-se esta metodologia podem ser obtidos em U.S.Army Corps of Engineers (1995).

Aquisição dos dados

Os ensaios de campo foram realizados em uma área localizada no campus do IPT/SP. O ensaio *crosshole* (Figura 1) foi realizado em três furos com espaçamento entre eles igual a 3m. Foram efetuadas medidas de tempo a cada 0,5m a partir da profundidade igual a 1m até 8,5m. Foi utilizada uma fonte de furo que gera preferencialmente ondas de cisalhamento, geofones triaxiais de furo (frequência de 8Hz) e um sismógrafo modelo SmartSeis (*Geometrics Inc.*) de 12 canais.



Figura 1 - Ensaio *crosshole*, mostrando em primeiro plano a fonte de ondas S inserida no furo.

No levantamento MASW foi utilizado um sismógrafo modelo Geode (*Geometrics Inc.*), 48 geofones (frequência natural de 4,5Hz) espaçados de 0,3m e como fonte de energia sísmica, o impacto de uma marreta de 5kg contra uma placa metálica (Figura 2).

Na execução do ensaio MASW é recomendado que sejam adquiridos sismogramas utilizando-se diversos *offsets* mínimos, com a finalidade de se proceder a escolha do melhor registro das ondas Rayleigh.

A definição do ótimo afastamento mínimo está relacionada ao efeito de campo próximo, que diz respeito à distância mínima necessária para que a onda Rayleigh assuma uma frente de onda plana horizontal em sua trajetória, uma das premissas da metodologia. Neste levantamento foram testados seis diferentes *offsets* mínimos (1 a 6m).



Figura 2 - Levantamento MASW, realizado em um alinhamento perpendicular à direção dos furos do ensaio *crosshole*.

A refração sísmica foi realizada utilizando-se 24 geofones de componente horizontal (frequência natural de 28Hz) e espaçados de 0,55m. Foram efetuados 5 pontos de tiros internos ao arranjo



Figura 3 - Levantamento de refração sísmica para geração e captação de onda S, realizado nas proximidades dos furos do ensaio *crosshole*.

Resultados

A Tabela 1 apresenta os valores das velocidades da onda S determinados pelo ensaio *crosshole*. Dentre os três métodos sísmicos utilizados neste trabalho, como já foi dito, é o que fornece os resultados mais precisos. Assim sendo, o perfil de V_s do *crosshole* servirá de referência para os resultados obtidos dos levantamentos sísmicos de superfície (MASW e refração sísmica).

Tabela 1 - Resultados de V_s obtidos do ensaio *crosshole*.

Prof. (m)	V_s (m/s)
1,0	243
1,5	256
2,0	265
2,5	272
3,0	269
3,5	279
4,0	293
4,5	296
5,0	302
5,5	277
6,0	223
6,5	214
7,0	221
7,5	232
8,0	218
8,5	220

Os dados da refração sísmica foram processados com o software *Seis/mager*, utilizando a técnica da inversão por tomografia. A escolha de tal técnica de processamento teve por objetivo a determinação das variações gradativas de V_s com a profundidade. A seção 2D resultante do processamento, mostrando a distribuição das velocidades da onda S até a profundidade de 3m, é apresentada na Figura 4. Na seção, encontram-se representadas em linhas pretas as posições dos furos onde foi realizado o ensaio *crosshole* e os valores de velocidades obtidos por este ensaio até a profundidade de 3m, para que possa ser feita uma comparação dos resultados.

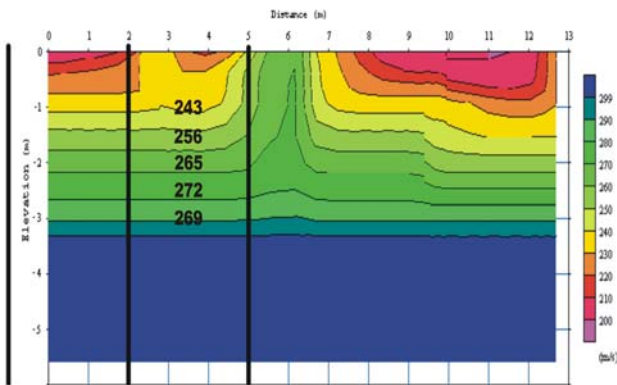


Figura 4 - Seção de refração sísmica processada mostrando a distribuição de V_s em profundidade. Adicionalmente, são mostradas as medidas obtidas do *crosshole*, até a profundidade de 3m.

As curvas de dispersão resultantes das aquisições com três *offsets* mínimos distintos (3m, 4m e 5m) do ensaio MASW são apresentadas na Figura 5. Em pontilhado está representada a média destas três curvas.

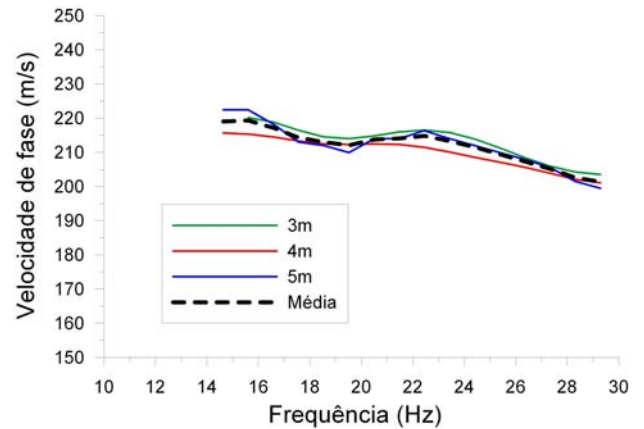


Figura 5 - Curvas de dispersão (ensaio MASW) correspondentes aos *offsets* mínimos, 3m, 4m e 5m.

O modelo de V_s com a profundidade, resultante da inversão da curva de dispersão “média”, é apresentado na Figura 6. Para fins comparativos, estes valores foram lançados sobre o perfil de V_s determinado pelo ensaio *crosshole*.

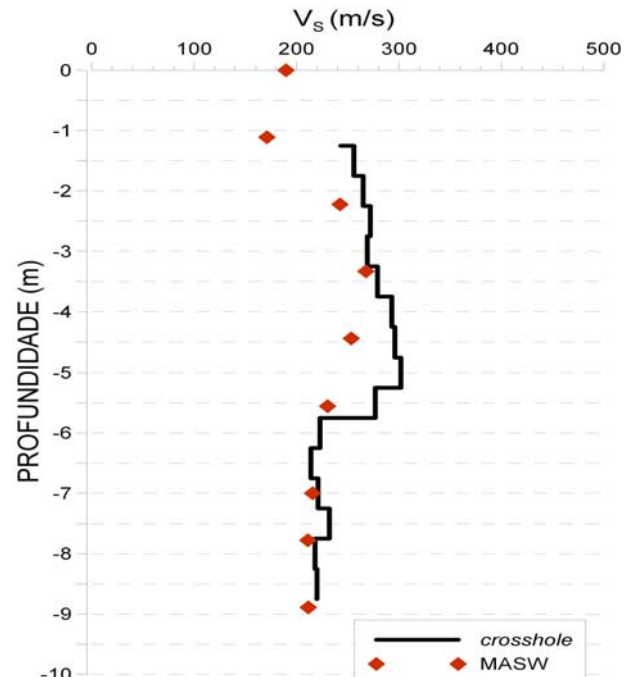


Figura 6 - Modelos de V_s x profundidade do ensaio *crosshole* (linha contínua em preto) e MASW (pontos discretos em vermelho).

Para se estabelecer uma comparação dos valores médios de V_S obtidos dos ensaios *crosshole* e MASW, foi utilizada a seguinte equação:

$$V_S = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{Si}}} \quad (1)$$

onde

i = índice que representa uma camada do modelo (1...n);
 V_{Si} = velocidade da onda S na i -ésima camada (m/s);
 d_i = espessura da i -ésima camada (m).

Os valores de V_S médios, calculados pela equação 1 são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de V_S médios calculados pela equação 1 para os ensaios sísmicos *crosshole* e MASW.

	CH	MASW
V_S (0-8,5m) =	252 m/s	223 m/s

Conclusões

Os valores de V_S médio calculados, assim como a distribuição de V_S com a profundidade resultante dos ensaios *crosshole* e MASW para a área investigada, mostraram-se coerentes (diferença inferior a 12%).

O método da refração com onda S, até o limite da sua investigação, apresentou também resultados compatíveis com aqueles obtidos pelo ensaio *crosshole*.

A utilização de métodos sísmicos de superfície que forneçam informações de V_S (parâmetro geofísico de interesse para a engenharia geotécnica) pode ser alternativa a ensaios que exijam furos de sondagens, desde que os níveis de precisão exigidos pelo projeto assim permitam.

Se realizados conjuntamente, os resultados podem ser comparados para aferição das técnicas empregadas.

Referências

ASTM. D4428/D4428M. 2007. Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing, 11p.

PARK, C. B. et al. 1999. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, v.64, n.3, p.800-808.

PRADO R. L. 1994. O ensaio sísmico entre furos ("crosshole") no estudo de maciços terrosos e rochosos. Dissertação de mestrado. IAG-USP. São Paulo, 123p.

U.S.ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1995. Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Investigations. Chapter 3 - Seismic Procedures. Manual No1110-1-1802. Disponível em: http://140.194.76.129/publications/engineering-manuals/EM_1110-1-1802_sec/EM_1110-1-1802.pdf

XIA, J. et al. 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, v.64, n.3. p.691-700.