



Ensaio sísmico (refração utilizando ondas P e S e ensaio com ondas superficiais) na caracterização geotécnica de um aterro.

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

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12th 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 results of a seismic refraction survey (using shear and P waves) and Multi Channel Analysis of Surface Waves (MASW) carried out a landfill.

P-waves and shear waves velocities has allowed to get dynamic properties (Poisson's ratio) of the landfill.

The MASW survey has identified an inversion of shear wave velocity that can be related to the interface between the compacted landfill and the natural terrain situated below this.

Introduction

A utilização da onda cisalhante (onda S) em ensaios sísmicos, juntamente com a onda compressional (onda P) é uma tendência crescente em projetos de engenharia e geotecnia.

Em primeiro lugar porque, devido a uma de suas principais características, a onda S se propaga apenas pela porção sólida do solo, não sendo afetada pela saturação do terreno. Desta forma o seu emprego pode, a priori, identificar mudanças litológicas melhor do que a onda P, esta última bastante sensível à presença de fluidos que preenchem os vazios da matriz dos solos. Além do mais, os dados de velocidades das ondas P e das ondas S obtidos de forma conjunta permitem a obtenção dos módulos elásticos dinâmicos dos materiais geológicos, que são parâmetros de interesse em determinados projetos em obras de engenharia.

Estes parâmetros são utilizados em projetos onde o terreno estará sujeito a solicitações dinâmicas decorrentes da implantação de determinados tipos de obras civis e estruturas que causem vibrações (instalação de máquinas e motores, aerogeradores de energia eólica, etc.)

São diversos os ensaios dos quais podem ser obtidas as velocidades das ondas P e S. Quando estão disponíveis furos de sondagens poderão ser obtidas por meio dos ensaios *crosshole*, *downhole* ou *uphole*. A desvantagem dos ensaios que utilizam furos de sondagens é

justamente a necessidade da existência destes furos para a execução dos levantamentos.

Na ausência de furos de sondagens os ensaios em superfície passam a ter relevância, destacando-se a sísmica de refração. Trata-se de um método consagrado e de fácil execução no campo, apesar da dificuldade da geração da onda S em superfície (o mesmo não ocorrendo com a onda P, de fácil de geração e identificação nos registros sísmicos).

Outra maneira de se obter as velocidades das ondas S é por meio dos ensaios que utilizam ondas superficiais, particularmente o MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*).

Este trabalho apresenta os resultados de um ensaio de refração (utilizando ondas P e S) e MASW, visando a caracterização geotécnica de um aterro de pequena espessura.

Metodologia e ensaios de campo

Os ensaios de campo foram realizados em um aterro muito bem compactado e pouco espesso, disposto sobre um terreno natural. O material utilizado para a execução do aterro era o mesmo material existente no terreno original situado abaixo deste.

Esperava-se que, devido à compactação, o aterro apresentasse um valor de velocidade da onda sísmica maior em relação ao da camada subjacente do terreno, configurando uma típica situação onde ocorreria uma inversão de velocidade.

Para a execução dos ensaios da sísmica de refração foram utilizados geofones de componente vertical (frequência natural de 4,5 HZ), para detecção de ondas P, e geofones de componente horizontal (frequência natural de 28 HZ) para detecção da onda S polarizada horizontalmente (S_H).

Como fonte de ondas sísmicas foi utilizada uma marreta de 5 Kg. Para a geração da onda P o procedimento foi o impacto da marreta contra uma placa metálica posicionada sobre o solo. Para a geração da onda S, o impacto da marreta foi sobre duas faces opostas de um dormente de madeira, também disposto sobre o terreno. Este procedimento de geração da energia, invertendo-se o sentido do impacto, possibilita a geração de ondas S com polaridades inversas, facilitando a correta identificação do seu tempo de chegada nos sismogramas.

Para o registro das ondas sísmicas foi utilizado um sismógrafo de 24 canais, modelo Geode (Geometrics). O espaçamento entre geofones foi de 0,5 metros,

perfazendo um arranjo de aproximadamente 11 metros. A fonte foi posicionada a 1 metro do primeiro geofone e foi efetuado apenas um ponto de tiro, devido às características do aterro (pelo seu aspecto construtivo, pode ser muito bem aproximado por um modelo ideal de camadas plano-paralelas).

Um arranjo de pequena extensão, como o utilizado, prioriza a captação de ondas diretas. Eventualmente também podem ser captadas ondas refratadas em subsuperfície. A captação de ondas diretas, metodologia que apresenta ótimo desempenho em aterros, é denominada de técnica de captação direta (Dourado, 1984).

O ensaio MASW foi realizado com os mesmos geofones do ensaio da refração (4,5 Hz), espaçados de 0,5m, porém utilizando 48 canais do equipamento. As ondas superficiais foram também geradas a partir do impacto da maretta contra a placa metálica, procedimento que gera de forma eficaz as ondas Rayleigh (que são aquelas utilizadas para o processamento de dados de SASW). Tomou-se o cuidado de aumentar a janela de aquisição para o registro das ondas superficiais. Nos ensaios de campo foram ainda testados diferentes *offsets* (distância entre fonte e o primeiro geofone). A importância de testar diversos parâmetros de aquisição em um levantamento MASW foi discutida por Lima Jr & Prado (2010).

Maiores detalhes sobre o método MASW podem ser obtidos em diversas referências (Park et al., 1999; Xia et al., 1999).

Resultados

O elevado grau de compactação do aterro possibilitou uma eficiente propagação da energia sísmica, de tal modo que foram suficientes duas a três pancadas para obtenção de um registro de boa qualidade, tanto para os dados da refração (ondas P e S), como para o registro das ondas superficiais no ensaio MASW.

Os sismogramas com os registros das ondas P e S são apresentados, respectivamente, nas **Figs. 1 e 2**, mostrando a qualidade dos dados obtidos.

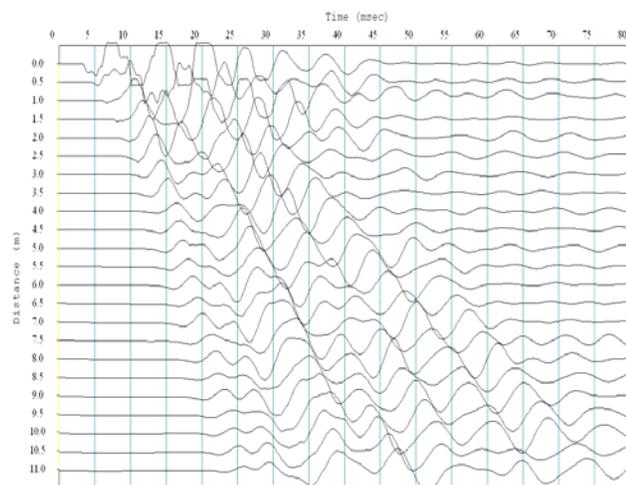


Figura 1 - Sismograma com o registro das ondas P.

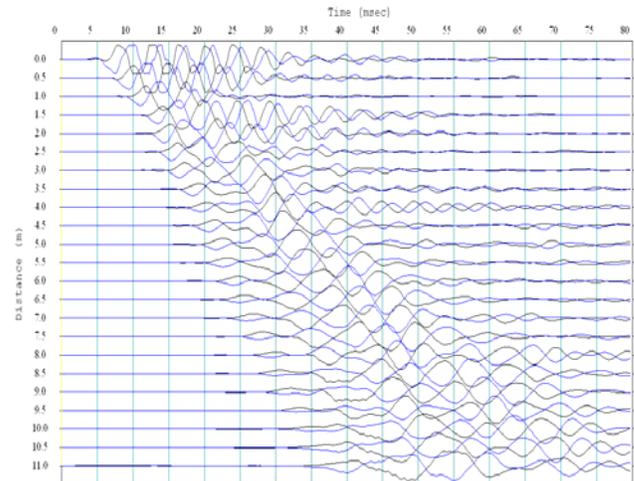


Figura 2 – Sismograma com o registro das ondas S (polarizadas horizontalmente, S_H).

O sismograma com o registro das ondas superficiais encontra-se na **Fig. 3**. O dado foi obtido com um *offset* igual a 3m.

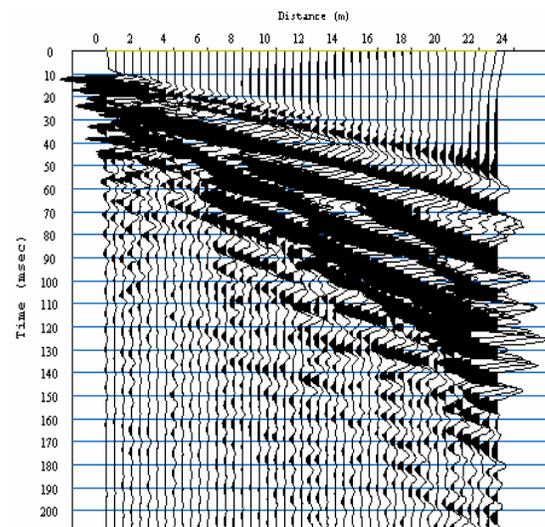


Figura 3 – Sismograma com o registro das ondas superficiais.

Para a interpretação dos dados da refração, foram simplesmente utilizadas as curvas tempo x distância ("dromocrônicas"), das quais puderam ser obtidas as velocidades sísmicas, juntamente com os parâmetros necessários para o cálculo das espessuras e profundidades dos estratos sísmicos identificados (*intercept-time* e distância de *cross-over*). A característica construtiva do aterro, aproximando-se idealmente de um modelo de camadas plano paralelas, valida este procedimento para a interpretação dos dados (Redpath, 1973).

Os modelos obtidos dos dados de refração para V_p e V_s (Fig. 4) apresentaram-se bem coerentes, com uma primeira camada de baixa velocidade ($V_p=0,34$ m/ms e $V_s=0,22$ m/ms) e espessura de 0,75m, sobreposta a uma segunda camada de velocidade mais alta ($V_p=0,71$ m/ms e $V_s=0,45$ m/ms). O coeficiente de Poisson resultou, respectivamente, em 0,14 e 0,16 para a primeira e segunda camada, valor compatível com o esperado para um maciço terroso (Mooney, 1977).

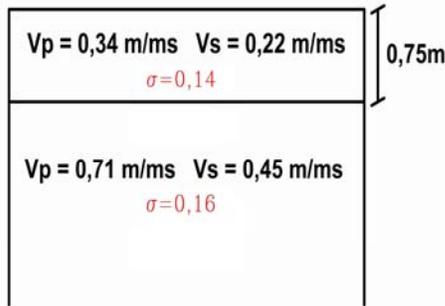


Figura 4 – Modelo de V_p e V_s obtidos a partir dos dados de sísmica de refração.

Os dados de MASW foram processados com o software SeisImager/SW (Geometrics, 2009).

A Fig. 5 apresenta a curva de dispersão obtida do sismograma da Fig. 3.

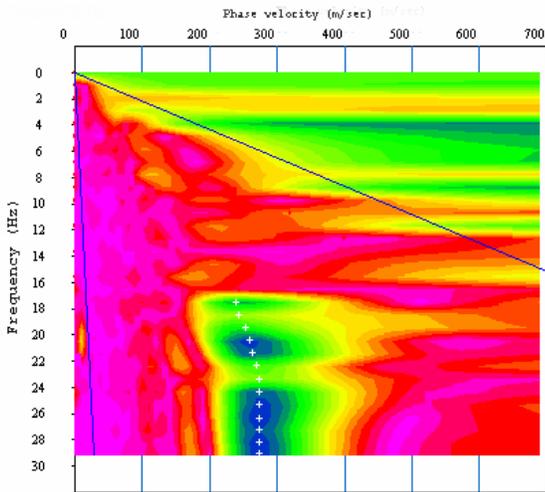


Figura 5 – Curva de dispersão correspondente ao sismograma da figura 3.

A inversão dos dados forneceu o modelo da velocidade da onda S (polarizada verticalmente, S_v) versus a profundidade, que é apresentado na Fig. 6.

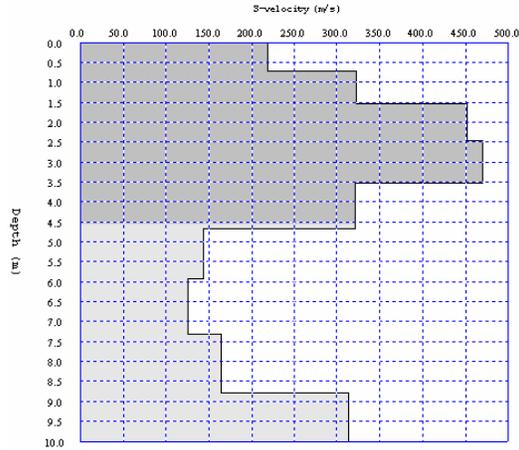


Figura 6 – Modelo de V_s versus a profundidade, obtido pela inversão dos dados.

Informações de um furo a trado realizado neste local permitiram correlacionar a primeira camada com uma camada de reforço e a segunda camada com o aterro propriamente dito. A base do aterro não pôde ser identificada pelo método da refração.

Entretanto, os resultados da inversão dos dados de MASW identificaram uma inversão de velocidade em torno de 4,5m e que poderia estar relacionada à profundidade da base do aterro (contato da base do aterro com o solo natural).

A Fig. 7 apresenta a integração dos dados (refração das ondas S, MASW e furo a trado), mostrando uma boa correlação entre eles. O ponto do perfil (variação de V_s com a profundidade) interpretado como a base do aterro está apontado na figura pela seta em preto.

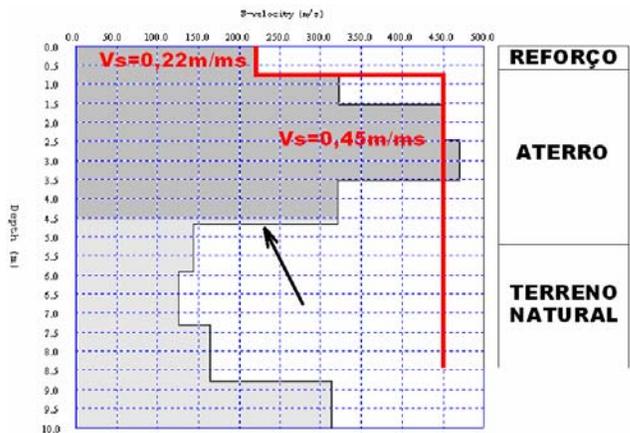


Figura 7 – Integração dos resultados (sísmica de refração com onda S, MASW e furo a trado).

Conclusões

É notória a dificuldade para a geração da onda S em superfície, de forma a se obter energia suficiente para que o sinal seja bem identificado em geofones situados a grandes distâncias. No presente estudo, o ensaio realizado (utilizando um arranjo curto, em torno de 11m) garantiu a obtenção de resultados satisfatórios. A qualidade de um registro de onda S e de ondas superficiais está fortemente relacionada às características do sítio investigado.

A obtenção de dados de V_p e V_s por refração sísmica é importante, pois, além da obtenção dos parâmetros elásticos dinâmicos do maciço terroso, permite uma correlação das velocidades da onda S obtida por meio do método da refração com os resultados de um ensaio de MASW.

Referências

Dourado, J. C. 1984. A utilização da sísmica na determinação de parâmetros elásticos de maciços rochosos e terrosos "in situ". Publicações de artigos técnicos da ABGE, n.8. São Paulo, 12p.

Geometrics. 2009. SeisImager/SW Manual v.3.0. 314p.

Lima Jr., S. B.; Prado, R. L. Testes para seleção de parâmetros de aquisição do método MASW realizados em um estudo em Ubatuba/SP. In: IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2010, Brasília/DF. Anais do IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2010.

Mooney, H. M. 1977. Handbook of engineering geophysics. Bison Instruments. Minneapolis, 186p.

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

Redpath, B.B. 1973. Seismic refraction exploration for engineering site investigations. Technical Report E-73-4, Livermore, California.

Xia, J.; Xia, J.; Miller, R.D.; Park, C.B. 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. Geophysics, v.64, n.3. p.691-700.