



## Aplicação dos Métodos Sísmicos MASW e Tomografia de Refração para a Determinação das Propriedades Mecânicas do Solo: um estudo de caso no município de Caçapava do Sul/RS

David S. de Queiroz<sup>1</sup>, Marcus Vinicius A. G. de Lima<sup>1</sup>, José W. J. Rojas<sup>1</sup>, José E. P. Soares<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UNIPAMPA

<sup>2</sup>LabLitos/UnB

Copyright 2016, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

*Este texto foi preparado para a apresentação no VII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Ouro Preto, 25 a 27 de outubro de 2016. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VII SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.*

### Resumo

Knowledge of the dynamic behavior of elastic moduli of soils and rocks have various applications in engineering problems such as foundations of civil buildings, vibrations produced by vehicle traffic, changes in the degree of soil compaction due to load variations. Seeking to meet the requirements of civil and environmental safety, increasingly strict, new techniques have been developed in order to minimize errors and supplement the information obtained by others. In geotechnics, geophysical surveys have shown high profile, by characterizing the environment continuously, and reducing the occurrence of future problems caused by anomalous areas not identified through traditional methods. In this work were applied seismic methods known as refraction tomography and MASW. Then, to evaluate the elastic characteristics of the soil were combined seismic tomographic models and MASW surveys to SPT soundings. Our results show that each data set provides additional information on a specific character of the elastic behavior and structure of layers of subsurface. Thus it is expected that the integration of seismic data with measurements from geotechnical tests provide a more reliable interpretation of the geomechanical parameters of engineering projects.

### Introdução

Os projetos de engenharia, em particular os de engenharia civil, precisam ser elaborados de modo a considerar as tensões permanentes (intrínsecas a própria estrutura) e prováveis (fatores externos). No entanto, ambos fatores requerem o conhecimento prévio das propriedades dinâmicas e do comportamento elástico dos solos e rochas, principalmente no que se refere ao planejamento de fundações.

Os testes e procedimentos geotécnicos para caracterização do solo são normalmente executados com base em ensaios de campo ou de laboratório, cujas medidas permitem uma definição pontual (unidimensional) da resistência do subsolo, fornecendo uma estimativa da distribuição das propriedades geomecânicas dos materiais envolvidos (Schnaid, 2012).

Os ensaios mais empregados nestes estudos apresentam abordagem direta, como as sondagens SPT (*Standard*

*Penetration Test*) e o CPT (*Cone Penetration Test*), tendo estas em comum, a obtenção de informação apenas no ponto investigado.

A aplicação de métodos geofísicos combinada aos testes geotécnicos tradicionais permite reduzir as lacunas apresentadas pelos levantamentos convencionais, sendo os métodos sísmicos, os mais efetivos na determinação dos módulos elásticos dinâmicos. Em específico, a análise espectral de ondas superficiais tem se destacado na resolução de problemas geotécnicos, impulsionado pelo desenvolvimento da técnica MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) proposto por Park *et al.* (1999).

O método MASW permite mapear variações verticais e horizontais das velocidades de onda cisalhante determinadas pela inversão das ondas Rayleigh. O uso desta metodologia tem se mostrado eficiente na determinação do módulo de cisalhamento máximo (Barros *et al.*, 2012), na caracterização de solos inconsolidados (Ivanov *et al.*, 2000) e na obtenção de módulos elásticos em geral (Park *et al.*, 2015).

Neste trabalho integramos dados de sondagens SPT aos resultados obtidos por tomografia de refração sísmica e pela análise MASW a fim de obtermos uma melhor definição das propriedades dinâmicas do solo e do topo rochoso com vistas à solução dos problemas de engenharia civil.

### Localização e Geologia da Área de Estudo

A área de estudo está localizada no município de Caçapava do Sul/RS, nas dependências da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) onde está sendo construído o Prédio Acadêmico I do Campus Caçapava do Sul (retângulo vermelho na Figura 1).

O contexto geológico regional pode ser representado pelo Complexo Granítico Caçapava do Sul (CGCS), descrito por Bitencourt (1983) como um corpo intrusivo aflorante com área aproximada de 250 km<sup>2</sup>.

O CGCS se apresenta bastante fraturado, sendo comum falhas normais de direção NW-SE. Na área de estudo, encontram-se neossolos constituídos por material mineral ou orgânico pouco espesso. Apresentam predomínio de características herdadas do material originário, sendo definido como solos pouco evoluídos e sem a presença de horizonte diagnóstico (Embrapa, 2006).

Levantamento geológico-geotécnico na área (Hansen e Albarnaz, 2010), seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 7250, identificaram basicamente 5 horizontes, classificados com boa plasticidade e boa consistência na análise tátil-visual, sendo observado o predomínio de argila de coloração amarelo avermelhada em contato com o saprólito.

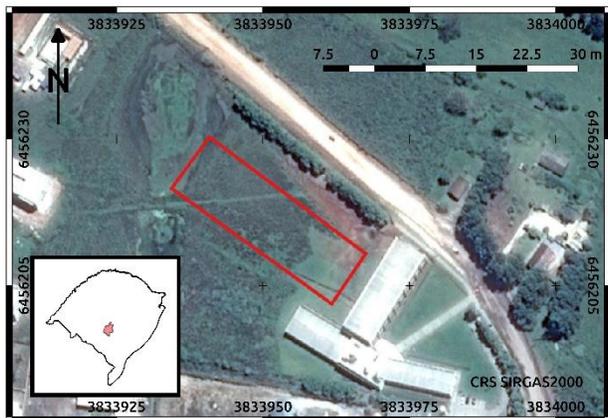


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.

**MASW e Tomografia Sísmica**

Os métodos sísmicos utilizados neste trabalho são tradicionalmente empregados na escala rasa de investigação e conhecidos por MASW e tomografia sísmica.

O método MASW utiliza a curva de dispersão proveniente da transformação bidimensional (*slant stack*) do registro multicanal das componentes verticais da energia gerada artificialmente por uma fonte sísmica. O objetivo principal da análise é explorar o caráter dispersivo das ondas superficiais em meios estratificados a fim de inferir variações nas propriedades elásticas da subsuperfície associadas às mudanças litológicas e/ou petrofísicas.

Segundo Park *et. al* (1999), o procedimento classicamente utilizado para obter um modelo de camadas em termos de Vs (velocidade da onda cisalhante) através da análise espectral de ondas superficiais envolve três etapas: aquisição do *groundroll*, construção da curva de dispersão (gráfico da velocidade de fase pela frequência) e inversão da curva de dispersão em perfis 1D de Vs.

Já a tomografia de refração sísmica utiliza os tempos de percurso das primeiras chegadas resultante de vários pontos de tiro dispostos ao longo de arranjos lineares para determinação de modelo bidimensional da distribuição de velocidade da onda sísmica compressional (Vp). O meio em subsuperfície é sistematicamente investigado pela transmissão de raios sísmicos refratados criticamente (Keary, 2009) cuja resolução dependerá da densidade de raios que atravessa determina porção do modelo.

**Sondagens SPT**

As linhas sísmicas foram projetadas de modo a atravessar os locais das sondagens SPT, tornando possível a comparação entre os parâmetros inferidos pelos levantamentos geofísicos com os resultados determinados pelo ensaio geotécnico. Os dados das sondagens SPT foram gentilmente cedidos pela empresa Estacas Brasil. Os parâmetros geotécnicos foram calculados com base nos modelos de Godoy (1972, apud Cintra, 2003) e Gibbs e Holtz (1957, apud Schnaid, 2012).

**Aquisição, Processamento e Inversão de Dados Sísmicos**

Para o levantamento de dados sísmicos foram utilizados: uma marreta de 5 kg, um sismógrafo de 24 canais da marca DMT modelo SUMMIT II Compact e 24 geofones

verticais de 14 Hz. Foram realizadas 3 linhas sísmicas, como indicado na Figura 2, com extensão máxima de 90 m, geofones distribuídos a cada 1 m, janela temporal de aquisição de 512 ms e taxa de amostragem 125 microssegundos.

Devido aos efeitos de campo próximo e remoto foram realizados vários pontos de tiro com diferentes afastamentos iniciais (*offset*) ao longo de cada linha. Após o levantamento foram realizadas análises do conteúdo espectral dos dados adquiridos, a fim de se identificar o melhor *offset* inicial. Os melhores *offsets* variaram conforme o posicionamento dos geofones em relação ao gabarito da obra, em geral sendo de 5 a 9 m.

A Figura 3 ilustra os sismogramas registrados para um tiro com afastamento inicial de 7 m.

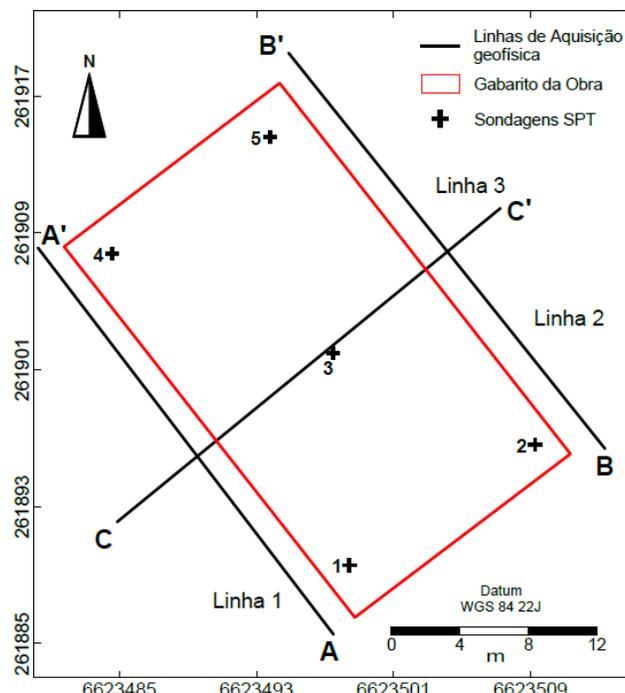


Figura 2 – Gabarito da obra com a posição das linhas sísmicas e dos ensaios SPT

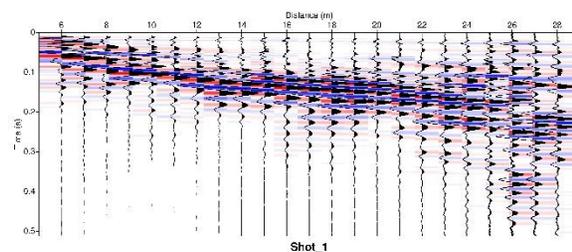


Figura 3: Sismograma com offset 7 m.

O processamento dos dados foi efetuado com o *software* Seismic Un\*x (Cohen e Stockwell, 2010) e consistiu basicamente de: conversão do formato de dados (SEG2 para SU), análise e filtragem de frequência, cortes em diferentes intervalos de tempo e espaço, normalização, ganhos e picagem das primeiras chegadas nos sismogramas.

As imagens e curvas de dispersão foram geradas através do software GEOPSY (Wathelet et al., 2004) (Figura 4). A inversão foi executada por meio do programa DINVER (pacote GEOPSY). Diferentes parametrizações e várias iterações foram necessárias, buscando reduzir a diferença entre a curva teórica referente ao modelo proposto e a observada, obtida a partir dos dados de campo (Figura 5).

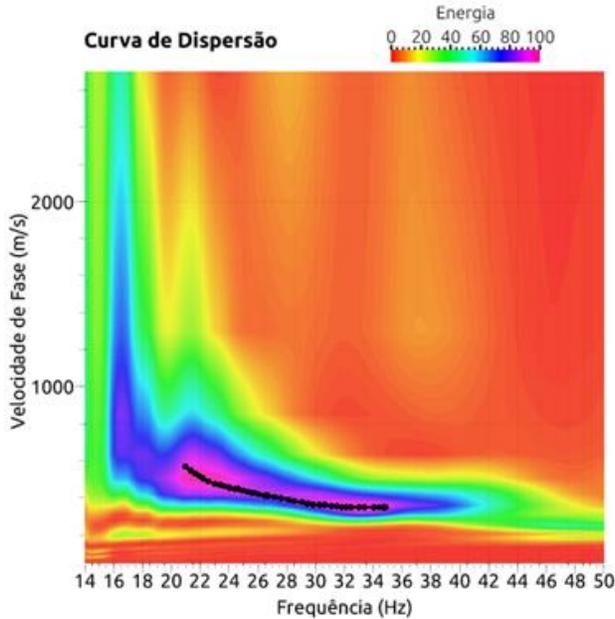


Figura 4 – Curva de Dispersão com offset de 6 m.

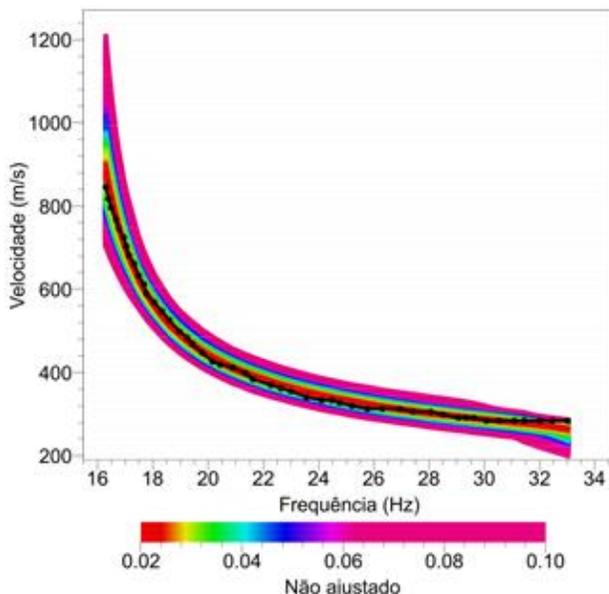


Figura 5 – Ajuste do modelo teórico (colorido) em relação a curva de dispersão observada (linha preta).

Para inversão tomográfica foi utilizado o software Ra2DTomo (Günther, 2007). Os modelos sísmicos resultantes da tomografia de refração sísmica forneceram também o modelo inicial de camadas necessário à inversão das curvas de dispersão das ondas superficiais.

## Resultados e Discussões

As Figuras 6, 7 e 8 apresentam, respectivamente, para as linhas sísmicas A-A', B-B' e C-C', os modelos tomográficos de  $V_p$ , sobrepostos pelos perfis 1D de  $V_s$  obtidos a partir da análise MASW. As profundidades máximas das sondagens SPT, registradas como impenetrável ao trépano, bem como os limites das diversas camadas amostradas de solo, estão fixados nestas figuras.

O primeiro aspecto verificado é que as sondagens SPT podem ser amarradas satisfatoriamente com as descontinuidades sísmicas.

Também pôde ser observado nos modelos sísmicos tomográficos, que os valores de  $V_p$  variaram em torno de 500 a 4500 m/s. A profundidade máxima atingida foi de 15 m. As sondagens MASW forneceram valores de  $V_s$  no intervalo de 200 a 2800 m/s, na mesma profundidade investigada.

Baseado nos valores de  $V_p$  da tomografia foi possível, portanto, reconhecer 3 intervalos: a)  $V_p$  entre 500 a 1500 m/s (cor roxa para azul escuro); b) 1500 a 2500 m/s (azul claro para verde) e c) acima de 2500 m/s (amarela para vermelho). Estes intervalos são diretamente correlacionados com o substrato geológico, interpretados como material inconsolidado (solo), manto de intemperismo (provavelmente granito alterado) e rocha sã (granito), respectivamente.

Porém, para fins de caracterização do comportamento dinâmico do solo, os valores de  $V_p$  não são adequados por serem altamente influenciados pelo grau de saturação do solo. Gradientes expressivos de  $V_p$  são geralmente relacionados com o nível d'água e não representam propriamente variações das suas propriedades geomecânicas.

Por outro lado, os perfis de  $V_s$  trazem exclusivamente informação sobre a rigidez e a densidade dos materiais (ou compactação). Neste sentido foi possível observar que os perfis 1D MASW indicaram para a camada de solo pequenas variações nos valores de  $V_s$ , porém significativas variações de espessura do pacote. As variações mais pronunciadas de  $V_s$  nos modelos estão relacionadas com as regiões que marcam a transição entre a camada de solo e o manto de intemperismo, e deste com a rocha sã, como evidenciado nos 3 perfis da linha A-A' (Figura 6).

Na linha B-B' (Figura 7), o modelo sísmico sugere a presença de matacões na porção central da linha. O MASW, por sua vez, não foi capaz de identificar estas feições, devido ao diâmetro relativamente reduzido dos blocos rochosos e da resolução espacial do método.

De qualquer forma, nas 3 linhas sísmicas, foi possível estabelecer uma boa correlação das marcações obtidas pela classificação dos solos amostrados durante o ensaio SPT com o modelo sísmico  $V_p$ . Porém, supostas estruturas indicadas pelo aumento de ambas as medidas, SPT e tomografia sísmica, que implicariam num aumento da resistência do material à sobrecarga, ficaram "transparentes" aos perfis de  $V_s$ . Isto pode significar que embora um material possua uma proeminente resistência mecânica (ou elástica) no eixo vertical, não significa que

este material apresentará de forma correspondente, resistência ao cisalhamento.

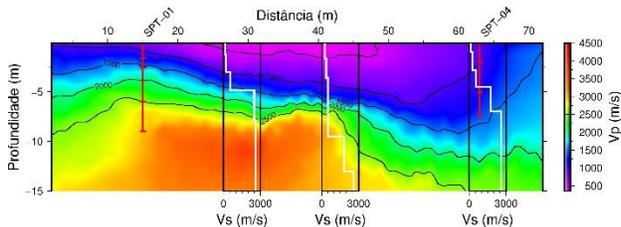


Figura 6 – Imagem sísmica tomográfica do perfil A-A'.

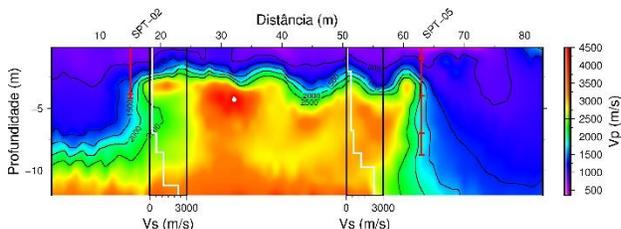


Figura 7 – Imagem sísmica tomográfica do perfil B-B'.

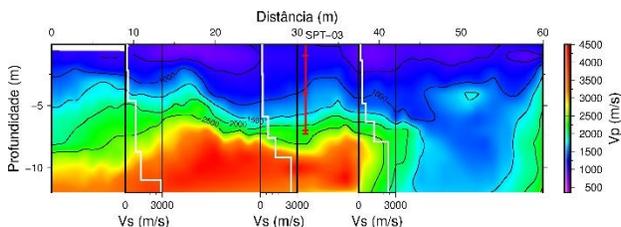


Figura 8 – Imagem sísmica tomográfica do perfil C-C'.

### Conclusões

A análise MASW realizada através da inversão da curva de dispersão de ondas Rayleigh combinada com a tomografia de refração sísmica, mostrou-se ser uma ferramenta poderosa nas investigações geotécnicas convencionais, reduzindo a ambiguidade na interpretação dos perfis geotécnicos e fornecendo uma caracterização mais realista dos maciços, através de uma abordagem complementar aos ensaios de prospecção in situ.

Além de fornecer alto nível de detalhamento do substrato geológico, conforme apresentado, também permitiu diferenciar e identificar estruturas aparentemente resistentes verticalmente, cujas medidas SPT reproduziriam falsos parâmetros elásticos, induzindo a uma solução de fundação não compatível com o comportamento mecânico do solo.

A utilização de ensaios geotécnicos mais modernos como o CPT, seria mais adequado no estudo comparativo com os métodos sísmicos como o MASW, por fornecer parâmetros dependentes das ondas cisalhantes.

### Agradecimentos

À SBGf pela concessão da bolsa de iniciação científica.

### Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. NBR 7250: Identificação e descrição de amostras de solo obtidas em sondagem de simples reconhecimento dos solos. Rio de Janeiro, 1982.

BARROS, J.M.C.; GANDOLFO, O.C.B.; ROCHA, R. A determinação do módulo de cisalhamento máxima pelo método MASW. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2012, Porto de Galinhas. Anais, São Paulo, 2012. 8 p.

BITENCOURT, M. F. A. S. Metamorfitos da região de Caçapava do Sul, RS - Geologia e relações com o corpo granítico. In: I Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, 1983, Porto Alegre. Atas. Porto Alegre, 1983.

CINTRA, J.C.A.; AOKI, N.; ALBIERO, J.H. Tensão admissível em fundações diretas. São Carlos: Editora Rima, 2003. 135 p.

COHEN, J. K.; STOCKWELL, Jr. J. W. CWP/SU: Seismic Un\*x Release No. 42: an open source software package for seismic research and processing. Center of Wave Phenomena, Colorado School of Mines, 2010.

GIBBS, H.J., HOLTZ, W.G. Research on Determining the Density of Sands by Spoon Penetration Testing. International Conference Soil Mechanics Foundation Engineering, p. 35-39, 1957

GÜNTHER, T. e C. RÜCKER. A new joint inversion approach applied to the combined tomography of dc resistivity and seismic refraction data, 19th SAGEEP, Seattle (USA), 2006.

HANSEN, M.A.F, ALBARNAZ, L.D.T. SILVEIRA, R.L. Relatório Geológico-Geotécnico Campus: Alegrete, Caçapava do Sul, Dom Pedrito, Itaqui, São Borja, São Gabriel. Caçapava do Sul, Brasil, 2010

Ivanov, J., Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., 2000. Mapping Poisson's ratio of unconsolidated materials from a joint analysis of surface wave and refraction events. In: Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2000), Arlington, Va., February 20–24, pp. 11–19

LIMA JÚNIOR, Sérgio Bezerra. Emprego das Ondas Rayleigh Visando à Caracterização Geotécnica de Solos superficiais de Encosta numa Área Teste em Ubatuba/SP. 2007, pp. 81. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

PARK, C.B.; MILLER, R.D.; XIA, J. Multichannel analysis of surface waves. Geophysics, v. 64, n. 3, p. 800-808, 1999.

PARK, C.B.; MILLER, R.D.; XIA, J, IVANOV, J. Seismic Characterization of Geotechnical Sites. Kansas Geological Survey, p. 1-15, 2015.

Richart, FE; Hall, JR e Woods, RD. 1970. Vibrations of soils and foundations. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, p. 414.

REYNOLDS, J. M. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Chichester, Inglaterra: John Willey & Sons, 2011.

SCHNAID, Fernando. Ensaios de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações. São Paulo. Oficina de Textos, 2012.

Stokoe, K.H.; Wright, S.G.; Bay, J.A.; Roesset, J.M., 1994. Characterization of geotechnical sites by SASW method. Technical Review: Geophysical Characterization of Sites, ISSMFE Technical Committee 10, Oxford Publishers, New Delhi, 15-25.

TEIXEIRA, A. H.; GODOY, N. S. Análise, projeto e execução de fundações rasas. In: HACHICH et. al. (eds.). Fundações: teoria e prática. São Paulo: PINI, 1996.

XIA, J., MILLER, R. D., and PARK, C. B. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave. Geophysics, v. 64, p. 691-700, 1999

Wathelet, M., D. Jongmans, and M. Ohrnberger. Surface wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements, Near Surface Geophysics 2, 211 – 221, 2004.