Caracterização geotécnica de solos e embasamento por sísmica de refração e MASW: Etapa de Implantação do Sítio de Investigação Geofísica, Geotecnia e Meio-Ambiente (SIGGMA) da UNIPAMPA

Frederick Karnal Johann Plesnik, Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima & José Waldomiro Jimenez Rojas

UNIPAMPA

Copyright 2024, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador, 08 a 10 de outubro de 2024. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do X 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

A caracterização geotécnica de solos e do embasamento é essencial para garantir a segurança e eficiência de projetos geotécnicos e estruturais. Ensaios tradicionais como o SPT (*Standard Penetration Test*) investigam apenas uma pequena fração do terreno, enquanto que os métodos geofísicos, tais como a refração sísmica e o MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), podem fornecer imagens detalhadas do substrato geológico. Neste sentido, foi concebido no âmbito do programa de extensão universitária denominado "Sítio de Investigação Geofísica, Geotecnia e Meio-Ambiente (SIGGMA)", a implantação de uma área destinada a simulação de problemas técnico-científicos sob condições reais e controladas, visando fornecer as melhores práticas e ferramentas metodológicas para solução de problemas em Geociências, Engenharia e Meio Ambiente. Este estudo concentrou-se na aplicação dos métodos sísmicos de refração e MASW no estudo de fundações, comparando seus resultados com os obtidos por sondagens geotécnicas. A integração e correlação de dados de ensaios geotécnicos com o modelo sísmico possibilitou a interpretação direta com a identificação das camadas de solo seco e saturado, bem como, do maciço rochoso fraturado e intacto, fornecendo informações mais precisas e confiáveis para os projetos de engenharia.

Introdução

A caracterização geotécnica de solos e do embasamento é uma tarefa complexa que exige a realização de uma série de ensaios para a obtenção de informações sobre as propriedades mecânicas do solo (Souza e Gandolfo, 2012). Essas informações são necessárias para a elaboração de projetos geotécnicos e estruturais mais seguros e eficientes. Dentre as técnicas de investigação mais difundidas na análise geotécnica do subsolo destacam-se a sondagem direta através de furos para amostragem de solo e realização de testes *in situ* ou laboratoriais.

Por razões práticas e financeiras, apenas uma fração muito pequena do volume de solo e rocha da área do projeto geralmente é amostrada e testada neste tipo de estudo. Neste contexto, o emprego de métodos geofísicos permite superar a baixa amostragem das técnicas convencionais, fornecendo a partir de seções transversais, imagens detalhadas do substrato geológico. Tais imagens oferecem, por exemplo, uma forma de avaliar se as condições do terreno nos furos de sondagem são representativas em outros pontos do local.

Mesmo assim, a despeito do amplo potencial de aplicação em problemas de engenharia e do custo relativamente baixo dos levantamentos geofísicos, ainda é limitada a contratação de serviços de Geofísica Aplicada em trabalhos de Geotecnia. A ausência de padronização por meio de normas técnicas específicas para execução das atividades de campo, desde a definição das técnicas de aquisição, das incertezas dos dados e precisão dos resultados, aliadas à ambiguidade inerente aos modelos geofísicos, tendem a elevar o grau de desconfiança dos engenheiros em relação a eficácia dos métodos.

Neste sentido, foi concebido o programa de extensão universitária denominado "Sítio de Investigação Geofísica, Geotecnia e Meio-Ambiente (SIGGMA)". O SIGGMA é um laboratório "a céu-aberto" de caráter multi e interdisciplinar, destinado a execução de ensaios e testes experimentais de campo relacionados às áreas de Geociências, Engenharia e Meio-Ambiente. O objetivo principal é simular problemas técnico-científicos sob condições reais e controladas em escala verdadeira, de modo a fornecer as melhores práticas e ferramentas metodológicas para solução destes problemas. Entre as variedades de exemplos de aplicação geofísica em problemas de Geotecnia, os estudos sísmicos são os que têm recebido atenção especial por estabelecer relações entre o comportamento dos módulos elásticos dinâmicos e estáticos. Especificamente, a análise de ondas superficiais tem se destacado nos estudos geotécnicos, impulsionada pelo desenvolvimento da técnica MASW (Análise Multicanal de Ondas Superficiais) por Park et al. (1999).

A aplicação do MASW possibilita mapear variações verticais e horizontais das velocidades de onda cisalhante, determinadas por meio da inversão das curvas de dispersão das ondas superficiais Rayleigh e Love. Essa técnica tem demonstrado eficiência na determinação do módulo de cisalhamento máximo (Barros et al., 2012), na caracterização de solos inconsolidados (Ivanov et al., 2000; Lima Junior et al., 2013) e na obtenção dos módulos elásticos (Park et al., 2015; Tokeshi et al., 2013).

A finalidade desta pesquisa está direcionada ao estudo de fundações, nos quais foram realizadas análises

comparativas entre os resultados obtidos por tomografia de refração sísmica, MASW e sondagens geotécnicas. O objetivo é contribuir para a caracterização da subsuperfície através da determinação de propriedades sísmicas e a sua correlação com os parâmetros geotécnicos, de modo a complementar as informações necessárias para a realização de projetos de engenharia.

Localização e Contexto Geológico da Área de Estudo

A área de estudo localiza-se no município de Caçapava do Sul (RS) que está situado a sudoeste da capital Porto Alegre, distante cerca de 270 km via BR-290.

O SIGGMA está localizado no campus Caçapava do Sul da UNIPAMPA, entre os prédios Acadêmico I e Restaurante Universitário, ao lado de uma área úmida (banhado) conforme mostrado na Figura 1.

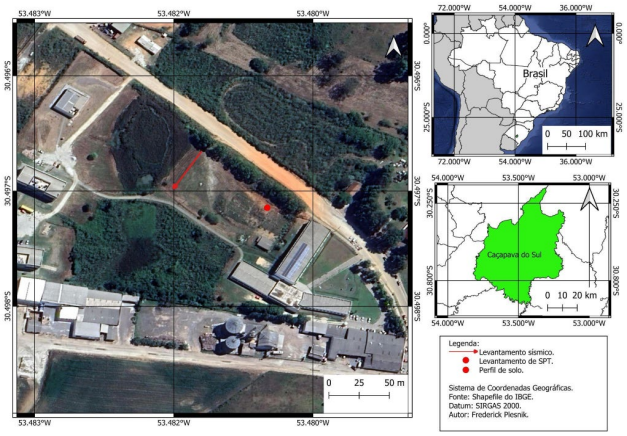

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo, disposição da linha de aquisição de dados sísmicos e os furos de sondagem SPT.

Do ponto de vista regional, a área de estudo está localizada sobre o Escudo Sul-Rio Grandense (ESRG), no qual é caracterizado pelo conjunto de rochas pré-cambrianas e cambrianas que compõem a parte sul da província Mantiqueira (ALMEIDA & HASUI, 1984). É constituído por rochas metamórficas, ígneas e sedimentares, vinculados aos estágios pré, sin e pós colisional da Orogênese Brasiliana no Neoproterozóico (HARTMANN *et al*., 2007).

No ESRG são amplamente conhecidas e estudadas as ocorrências de corpos intrusivos que tem importante contribuição ao arcabouço estrutural da região e as ocorrências minerais associadas. Dentre estas, próximo ao município de Caçapava do Sul, encontram-se a Suíte Granítica Caçapava do Sul (SGCS) e o Granito Santo Ferreira (GSF) (NARDI & BITENCOURT, 1989; REMUS, 1999 e RIBEIRO, 1970).

Na área de estudo, são identificados neossolos, caracterizados como solos compostos por material mineral ou orgânico pouco espesso, com deficiência na manifestação dos atributos diagnósticos que indicam os diversos processos de formação dos solos.

Tomografia Sísmica e MASW

O método de tomografia de refração sísmica utiliza os tempos de percurso das primeiras chegadas resultantes 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 (Kearey, 2009) cuja resolução dependerá da densidade de raios que atravessa determinada porção do modelo.

Já o método MASW baseia-se no estudo do fenômeno da dispersão das ondas superficiais em meio verticalmente heterogêneo, isto é, diferentes frequências propagam-se com velocidades diferentes, designadas por velocidade de fase. Estes parâmetros são utilizados como base para construir uma curva que relaciona a velocidade de fase com a frequência, designada por curva de dispersão. O objetivo principal do método é determinar a distribuição em profundidade da velocidade de propagação das ondas S.

As ondas superficiais adquiridas são normalmente as ondas de Rayleigh (ondas presentes unicamente na componente vertical do registo sísmico), que correspondem a cerca de dois terços da energia produzida por uma fonte pontual (Richart *et al*., 1970). São conhecidas diversas metodologias, em que se faz variar, por exemplo, o número, o tipo de geofones utilizados, a geometria do arranjo e o processo para obter a curva de dispersão e/ou o algoritmo de inversão (Stokoe et al., 1994; Park et al., 1999; Xia et al., 1999). Após o processamento, são criados os modelos 1D de velocidades das ondas S.

Dados Geotécnicos

Foram disponibilizados dados geotécnicos de 5 furos de sondagem de reconhecimento do subsolo (SP-01 ao SP-05), onde o mais próximo do perfil sísmico, SP-05, está descrito na Figura 2.

As perfurações foram executadas inicialmente com o auxílio de um trado-cavadeira, prosseguindo com circulação d'água e protegidas por revestimento de 2" ½, conforme metodologia NBR 6484/01. A coleta das amostras foi feita pela penetração do amostrador padrão modelo SPT, com diâmetro interno de 1" 3/8 (35 mm) e externo de 2" (50,8 mm). A resistência à penetração do amostrador de percussão é obtida através do número de golpes de um peso de 65 kg, caindo em queda livre de 75 cm de altura, fornecendo assim a indicação de compacidade dos solos arenosos e siltosos ou a consistência dos solos argilosos.

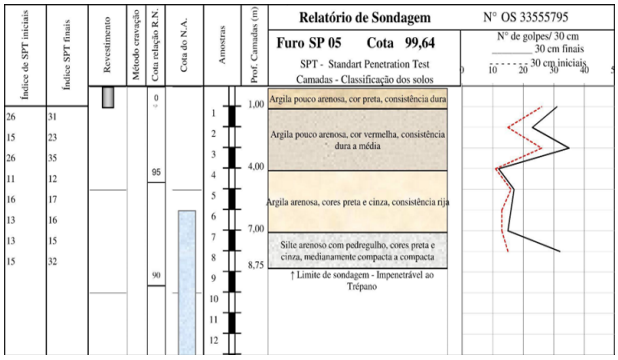

Figura 2 - Perfil de sondagem SPT do ponto SP-05, com indicação de nível d'água, profundidade de cada camada atravessada, cotas em relação a um RN, descrição dos materiais encontrados de acordo com as normas NBR 6502/95 e NBR 7250/82 da ABNT, número de golpes necessários à cravação do amostrador padrão, e demais informações necessárias.

Aquisição, Processamento e Inversão de Dados Sísmicos

Os equipamentos utilizados na etapa de aquisição de dados sísmicos foram: uma marreta sísmica, dois sismógrafos de 24 canais modelo SUMMIT II Compact, fabricado pela empresa DMT Group, 24 geofones verticais e um notebook.

Os parâmetros de aquisição adotados foram: espaçamento entre os geofones de 1 m num perfil de 48 m de extensão, janela de tempo de 512 milissegundos e intervalo de amostragem de 125 microssegundos e pontos de tiro a cada 10 m ao longo do perfil com *stacking* de 10 disparos (marretadas) por tiro, conforme mostrado na Figura 2.

Para o processamento dos dados sísmicos foi realizado com o pacote de programas Seismic Un*x – SU (COHEN & STOCKWELL, 2010). As etapas de processamento consistiram de: a) configuração da geometria de aquisição, incluindo a posição dos geofones e dos tiros nos traços sísmicos; b) normalização dos traços pela máxima amplitude; c) e picagem das primeiras chegadas das ondas registradas no sismograma. A picagem é a etapa final do processamento, gerando como saída um banco de dados contendo os tempos de percurso das primeiras quebras (ondas direta e refratada) para cada um dos traços de cada tiro do perfil conforme mostrado na Figura 3.

A inversão tomográfica foi realizada utilizando o software Ra2dTomo. Este software utiliza o banco de dados gerado a partir da leitura das primeiras quebras identificadas nos sismogramas coletados, a fim de obter o modelo de velocidades da subsuperfície.

Para o método MASW foram utilizados dois *softwares*, ambos de código aberto: 1) Geopsy (Wathelet *et al.*, 2004), desenvolvido durante o projeto Europeu SESAME, para a obtenção das curvas de dispersão; 2) evodcinv para a inversão das curvas de dispersão (disponível em https://github.com/keurfonluu/evodcinv), que consiste numa biblioteca Python desenvolvida para obter perfil de velocidades de onda S de camadas isotrópicas planas horizontais.

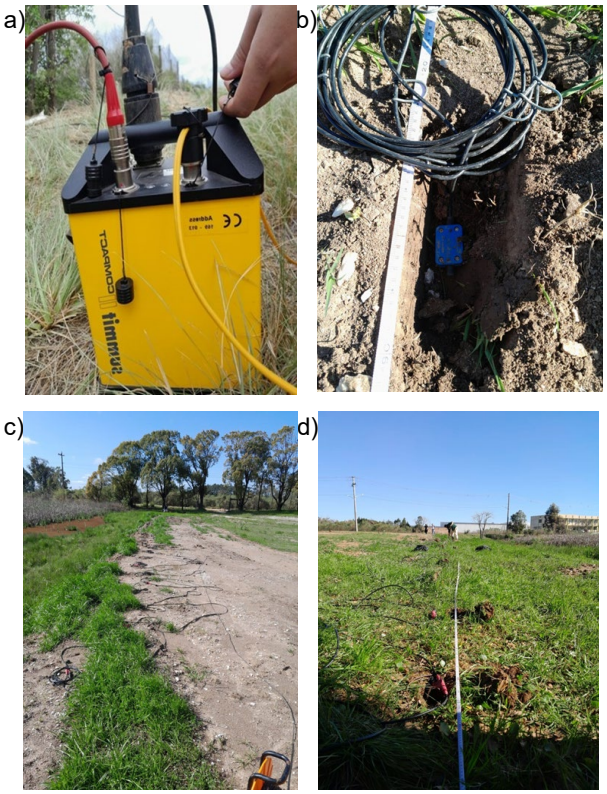

Figura 2 - Mosaico de fotos da aquisição de dados de campo; em (a) sismógrafo SUMMIT II Compact; (b) geofone enterrado; (c) vista do início do perfil sísmico; e (d) vista do final do perfil.

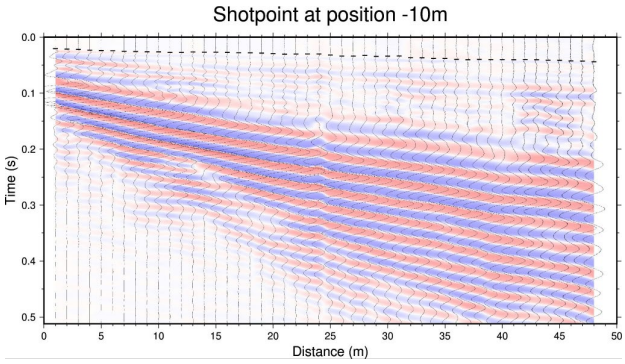

Figura 3 - Sismograma processado do ponto de tiro situado na posição -10m com a identificação (picagem) das primeiras chegadas (traços horizontais pretos).

Resultados e Discussões

A Figura 4 apresenta o modelo de velocidades de onda P obtido a partir da inversão tomográfica de primeiras chegadas do perfil sísmico com ajuste RMS final de 4 milissegundos e qui-quadrado menor que 1.

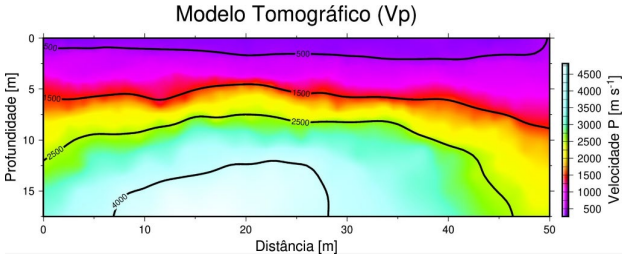

Figura 4 - Modelo de velocidades de onda P obtido por inversão tomográfica de refração sísmica com as isolinhas de velocidade.

Os valores de velocidade de onda P do modelo sísmico variaram de 270 m/s a 4.870 m/s, com profundidade máxima atingida de 17,5 metros. Neste modelo são observadas 3 faixas bem definidas de velocidade, a primeira com velocidade inferior a 1.500 m/s até aproximadamente 8 m de profundidade, a segunda entre 1.500 e 2.500 m/s e a última com velocidade acima de 2.500 m/s em torno de 10 m de profundidade.

Os valores de velocidade de onda P das duas primeiras faixas ou camadas são típicos de material inconsolidado, no qual valores superiores a 500 m/s correspondem ao solo saturado, com aumento da compactação e consequentemente aumento da resistência à compressão vertical. Os valores superiores a 2.500 m/s correspondem ao maciço rochoso, com o topo fraturado/alterado.

Para o método MASW foi obtido o modelo 1D de Vs indicando a existência de basicamente 3 camadas até a profundidade de 18 m. A camada mais superficial com espessura de aproximadamente 7 m e velocidade Vs de 400 m/s. A segunda camada com velocidade de onda S de 200 m/s sobreposta a uma camada descrita por Vs de 1.100 m/s.

As camadas com velocidades de 200 e 400 m/s caracterizam materiais com baixa rigidez que estão geralmente associadas a resistência mecânica de solos ou rochas com alto grau de fraturamento. A camada com velocidade acima de 1.000 m/s refere-se a uma camada de rocha sã.

A Figura 5 apresenta a integração dos dados da sondagem SPT e os modelos sísmicos de velocidade de onda P e S. A partir da sobreposição dos resultados na imagem, é possível observar a correlação da primeira camada do perfil de Vs com as camadas de solo e silte, conforme descritas no perfil geotécnico. Da mesma forma, pode-se estabelecer uma relação direta entre as três camadas mais superficiais do modelo de Vp com o perfil de Vs e geotécnico.

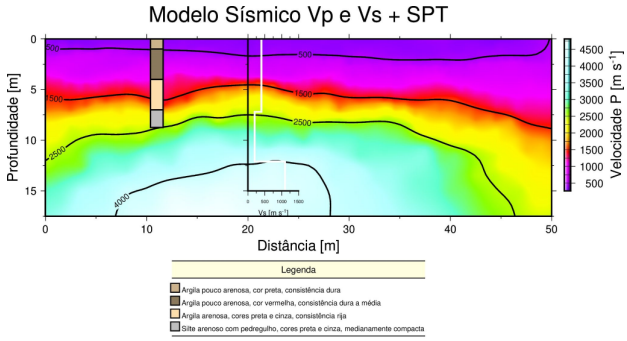

Figura 5 - Integração de dados geotécnicos do furo de sondagem SPT (SP-05) com os modelos sísmicos de Vp e Vs.

A camada indicada pela variação de Vp entre 2.500 e 4.000 m/s está associada a uma redução de velocidade no perfil de Vs. Apesar do aumento de Vp, a diminuição da Vs implica na redução da rigidez do meio. Esta configuração diametralmente oposta, ou seja, alto Vp e baixo Vs, pode ser explicada pela existência de rocha fraturada provavelmente percolada por água.

O aumento concomitante de Vp e Vs no modelo sísmico indicam a presença de rocha sã, localmente caracterizada por rochas graníticas.

Neste sentido, com base no modelo integrado de dados sísmicos e geotécnicos pode-se obter o modelo interpretado conforme apresentado na Figura 6.

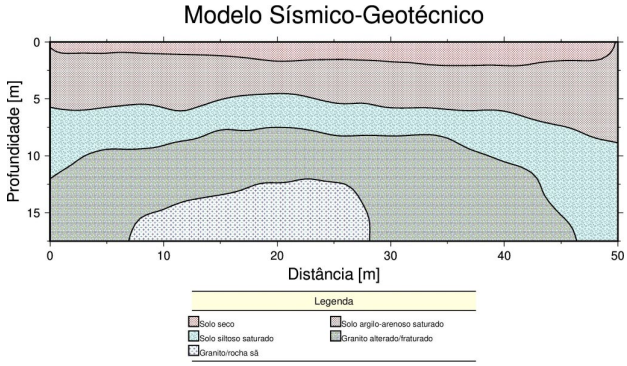

Figura 6 - Modelo sísmico-geotécnico interpretado a partir de integração de informações geotécnicas e sísmicas.

Conclusões

O presente trabalho permitiu avaliar o uso dos métodos sísmicos de tomografia de refração e MASW na caracterização do solo e maciço rochoso na área designada como Sítio de Investigação Geofísica, Geotecnia e Meio-Ambiente (SIGGMA) do Campus Caçapava do Sul da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA).

A partir deste estudo foi possível inferir as propriedades geomecânicas da subsuperfície com base nas velocidades das ondas sísmicas compressivas (Vp),

obtidas por Tomografia Sísmica de Refração, e cisalhantes, determinadas por inversão das curvas de dispersão as ondas Rayleigh, obtidas pelo método MASW.

A integração e correlação de dados de ensaios geotécnicos com o modelo sísmico possibilitou a interpretação direta com a identificação das camadas de solo seco e saturado, bem como, do maciço rochoso fraturado e intacto.

Em suma, o desenvolvimento deste estudo demonstrou a aplicabilidade dos métodos sísmicos, a partir da comparação com dados de ensaios geotécnicos, na caracterização geotécnica-geológica dos projetos de engenharia.

Agradecimentos

À SBGf pela concessão da bolsa de iniciação científica.

Referências

ALMEIDA, F. F. M.; HASUÍ, Y. **O pré-cambriano do Brasil**. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.

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

Hartmann, L. A., Chemale Jr., F. & Philipp, R. P. 2007. **Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. In: Ianuzzi, R., Frantz, J. C. (eds.). 50 anos de Geologia no Rio Grande do Sul: Instituto de Geociências. Contribuições. 1 ª ed**. Porto Alegre, Editora Comunicação e Identidade, CIGO, IG-UFRGS, v. 1, p. 97-123.

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.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **Geofísica de exploração.** São Paulo: Oficina de textos, 2009.

Nardi, L. V. S., Bitencourt, M. F. (1989). **Geologia, petrologia e geoquímica do Complexo Granítico de Caçapava do Sul, RS**. Revista Brasileira de Geociências, 19(2), 153-169.

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

Richart, F.E. Jr., Wood, R.D., Hall, J.R. Jr., 1970. **Vibration of Soils and Foundations, pp.414, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.**

SOUZA, L. A. P. & GANDOLFO, O. C. B. **Métodos geofísicos em geotecnia e geologia ambiental.** Revista Brasileira de Geologia e Engenharia e Ambiental, v. 2, n. 2, p. 10-27, maio, 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.

Tokeshi, K., Leo, C. J., and Liyanapahirana, S.: **Comparison of ground models estimated from surface wave inversion using synthetic microtremors, Soil Dyn. Earthq**. Eng., 49, 19–26, 2013

Wathelet, M., Chatelain, J.-L., Cornou, C., Giulio, G.D., Guillier, B., Ohrnberger, M. & Savvaidis, A., 2020. **Geopsy: a user-friendly open-source toolset for ambient vibration processing, Seismol**. Res. Lett., 91(3), 1878–1889.