



Aplicação de métodos sísmicos na caracterização geotécnica de solos: um estudo no Sítio de Investigação Geofísica, Geotecnia e Meio-Ambiente (SIGGMA) do Campus Caçapava do Sul - Unipampa

Frederick Karnal Johann Plesnik

Geofísico, Universidade Federal do Pampa - Unipampa, Campus Caçapava do Sul, Caçapava do Sul, Brasil,
frederick.plesnik@gmail.com

José Waldomiro Jiménez Rojas

Professor, Universidade Federal do Pampa - Unipampa, Campus Caçapava do Sul, Caçapava do Sul, Brasil,
joserojas@unipampa.edu.br

Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima

Professor, Universidade Federal do Pampa - Unipampa, Campus Caçapava do Sul, Caçapava do Sul, Brasil,
marcuslima@unipampa.edu.br

RESUMO: O Standard Penetration Test (SPT) destaca-se como a ferramenta mais popular, rotineira e economicamente viável para investigação geotécnica em nível global. Este ensaio proporciona indicações sobre a compacidade de solos granulares, sendo também aplicável na identificação da consistência de solos coesivos e até mesmo em rochas alteradas. No âmbito da investigação do ambiente terrestre, a sísmica é reconhecida como um método geofísico clássico que trata da propagação de ondas elásticas em materiais geológicos. Essa característica está diretamente relacionada a diversas propriedades físicas dos materiais, como grau de consolidação/cimentação, alteração, compactação e saturação do maciço. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo realizar um comparativo entre os resultados de parâmetros geotécnicos obtidos através do ensaio SPT e através da tomografia de refração sísmica utilizando a técnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), a fim de analisar a eficácia de ambos os métodos de investigação em projetos geotécnicos. Os resultados obtidos permitiram identificar diferentes camadas de solo e do nível freático, obtenção de parâmetros de resistência do solo a partir do ensaio geotécnico e obtenção de parâmetros de resistência a partir de ensaios geofísicos. Com este trabalho conclui-se que a aplicação conjunta dos ensaios SPT, tomografia de refração sísmica e MASW, mostrou ser uma ferramenta muito eficaz em projetos de engenharia geotécnica.

PALAVRAS-CHAVE: levantamentos geofísicos, ensaios geotécnicos, parâmetros geotécnicos

ABSTRACT: The Standard Penetration Test (SPT) stands out as the most popular, routine, and economically viable tool for geotechnical investigation worldwide. This test provides information on the compactness of granular soils and is also applicable to identifying the consistency of cohesive soils and even weathered rocks. In terrestrial environmental investigation, seismic is recognized as a classic geophysical method that addresses the propagation of elastic waves in geological materials. This characteristic is directly related to several physical properties of the materials, such as degree of consolidation/cementation, alteration, compaction, and mass saturation. Therefore, this study aims to compare the results of geotechnical parameters obtained through the SPT test and through seismic refraction tomography using the MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) technique, in order to analyze the effectiveness of both investigation methods in geotechnical projects. The results allowed us to identify different soil layers and the water table, obtain soil resistance parameters from geotechnical testing, and obtain resistance parameters from geophysical testing. This work concludes that the combined application of SPT tests, seismic refraction tomography, and MASW has proven to be a very effective tool in geotechnical engineering projects.

KEYWORDS: geophysical surveys, geotechnical tests, geotechnical parameters



1 INTRODUÇÃO

A caracterização geotécnica de solos 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 testemunhos de solo e 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.

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 da 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.*, 2007; Tokeshi *et al.*, 2013).

A utilização de métodos geofísicos em conjunto com estudos geotécnicos tradicionais é capaz de preencher as lacunas encontradas nos levantamentos convencionais. Em particular, o uso de métodos sísmicos na caracterização geotécnica de solos vem se tornando cada vez mais relevante para a Engenharia Civil. A obtenção de informações precisas sobre as propriedades do solo é fundamental para o planejamento e execução de obras civis, garantindo sua segurança e eficiência (Souza e Gandolfo, 2012).

Nesse contexto, o estudo realizado no Sítio de Investigação Geofísica, Geotécnica e Meio-Ambiente do Campus Caçapava do Sul da UNIPAMPA forneceu informações valiosas sobre as propriedades do solo na região. Esse conhecimento pode ser aplicado em futuros projetos de engenharia geotécnica, permitindo uma análise mais precisa e eficiente do solo, e consequentemente avaliando os riscos de falhas e acidentes.

Tendo em vista o exposto, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar o uso dos métodos sísmicos de tomografia de refração e MASW, para a caracterização do solo e embasamento 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 escolha da área de estudo foi motivada principalmente pela existência de estudos prévios e disponibilidade de sondagens SPT (*Standard Penetration Test*) realizadas no local. Desta forma, o desenvolvimento deste estudo permitirá verificar a eficácia do método sísmico, bem como, fornecer as diretrizes básicas às empresas prestadoras de serviços geofísicos na definição dos procedimentos mais adequados para atingir seus objetivos.

2 ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização e acesso

A área de estudo localiza-se no município de Caçapava do Sul (RS) que está situado a sudoeste da capital de 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.

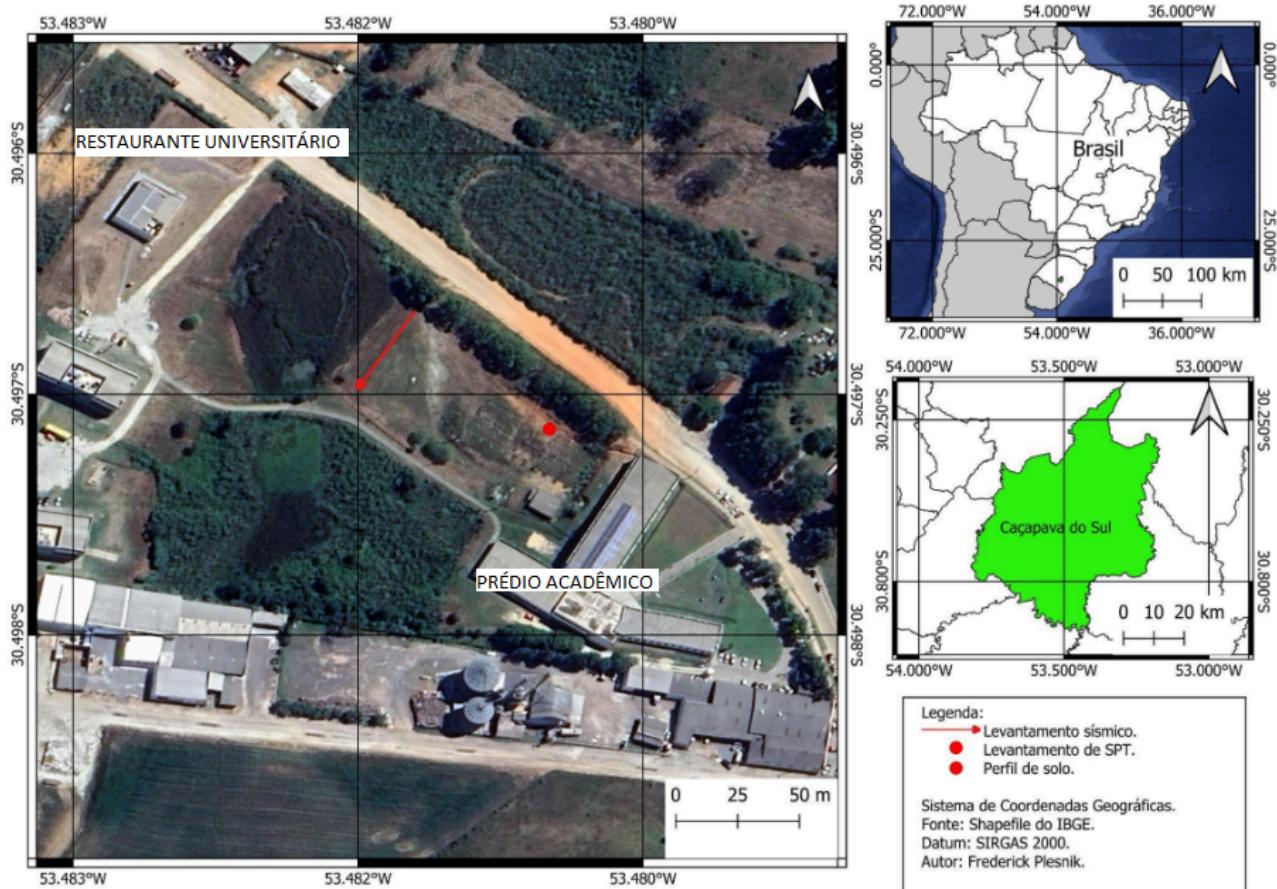


Figura 1. Localização da área de estudo.

2.2 Dados Geotécnicos

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 Brasiliiana no Neoproterozóico (HARTMANN et al., 2007). Quanto à pedologia de Caçapava do Sul, 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.

Na área de estudo foram disponibilizados dados geotécnicos de 5 furos de sondagem de reconhecimento do subsolo (SP-01 ao SP-05), onde o mais próximo, SP-05 (Figura 2), está localizado aproximadamente a 40 m de distância do perfil sísmico.

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 descrita na 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.

A Figura 2 apresenta o perfil de sondagem SPT do ponto SP-05, com indicação de nível d'água (6 metros), profundidade de cada camada atravessada (até os 7 metros argila arenosa e antes do limite de sondagem 8,75 uma cada de silte arenoso com pedregulho), cotas em relação a um RN, descrição dos materiais encontrados de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), número de golpes necessários à cravação do amostrador padrão.

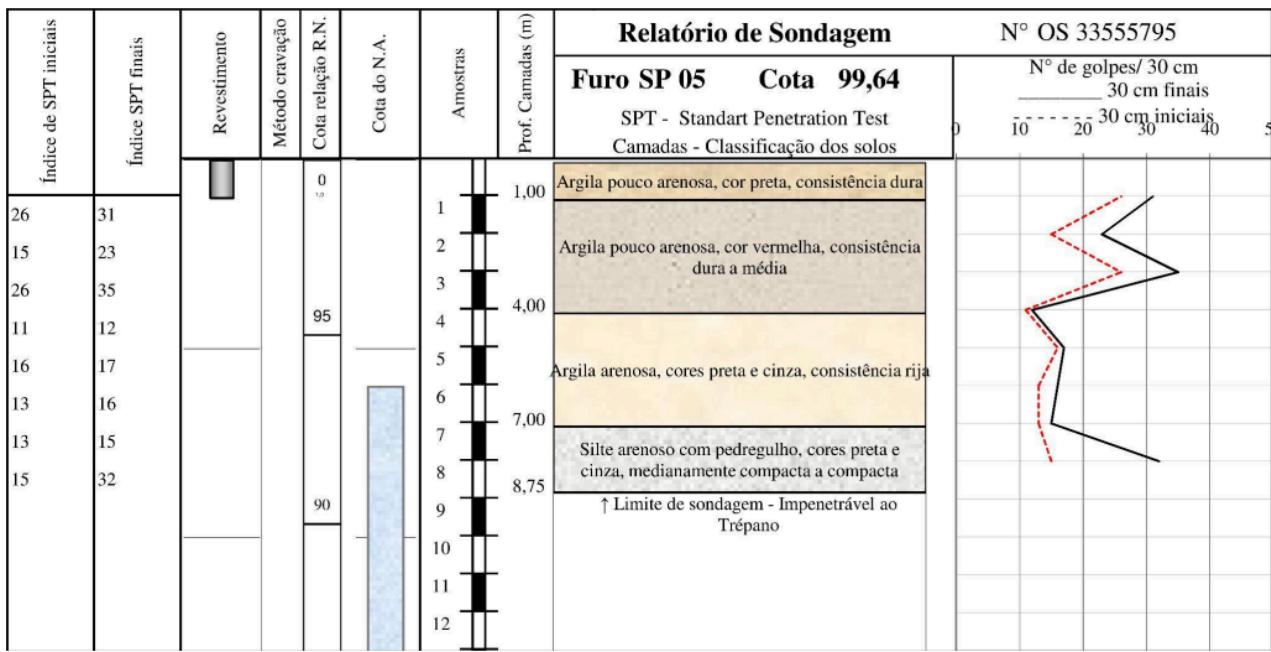


Figura 2. Perfil de sondagem SPT do ponto SP-05 - local de estudo.

3 METODOLOGIA

3.1 Aquisição 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*.

A fonte de energia utilizada foi uma bateria automotiva de 12 V. Os parâmetros de aquisição adotados foram: espaçamento entre os geofones de 1 m num perfil de 48 m de extensão, com janela de tempo de 512 milissegundos e intervalo de amostragem de 125 microssegundos, e *stacking* de 10 disparos (marretadas) por tiro, com pontos de tiro a cada 10 m ao longo do perfil.

A Figura 3 apresenta o 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.

3.2 Processamento de dados sísmicos

O processamento dos dados foi realizado com o pacote de programas Seismic Un*x – SU (COHEN & STOCKWELL, 2010), *software* de licença acadêmica e código aberto, desenvolvido pelo *Center for Wave Phenomena (CWP)* da *Colorado School of Mines*.

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.



Figura 3. 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.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Tomografia de refração

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

A Figura 4 apresenta o modelo de velocidades de onda P obtido para os dados do perfil sísmico com ajuste RMS final de 4 milissegundos e qui-quadrado menor que 1.

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 abaixo 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.

Modelo Tomográfico (V_p)

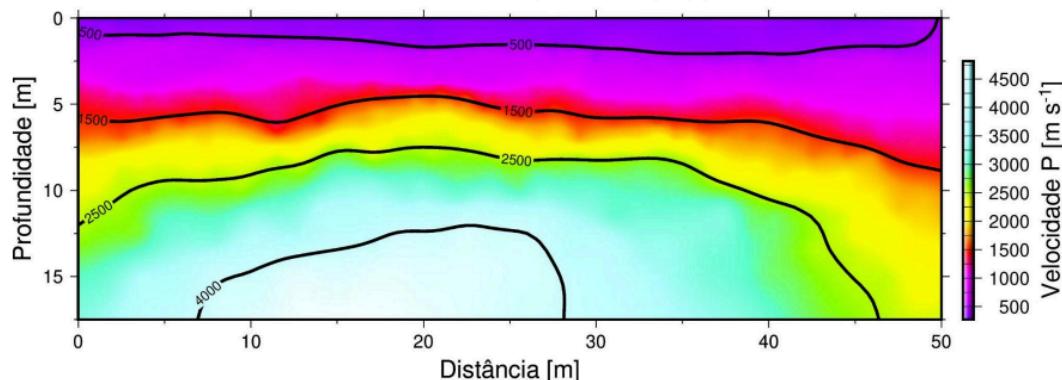


Figura 4. Modelo de velocidades de onda P obtido por inversão tomográfica de refração sísmica com as isolinhas de velocidade.

4.2 Método MASW (Análise Multicanal de Ondas Superficiais)

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) Para a inversão das curvas de dispersão foi utilizado o *evodcinv*, que consiste numa biblioteca Python desenvolvida para obter perfil de velocidades de onda S de camadas isotrópicas planas horizontais. A Figura 5 apresenta o perfil Vs obtido a partir do método MASW.

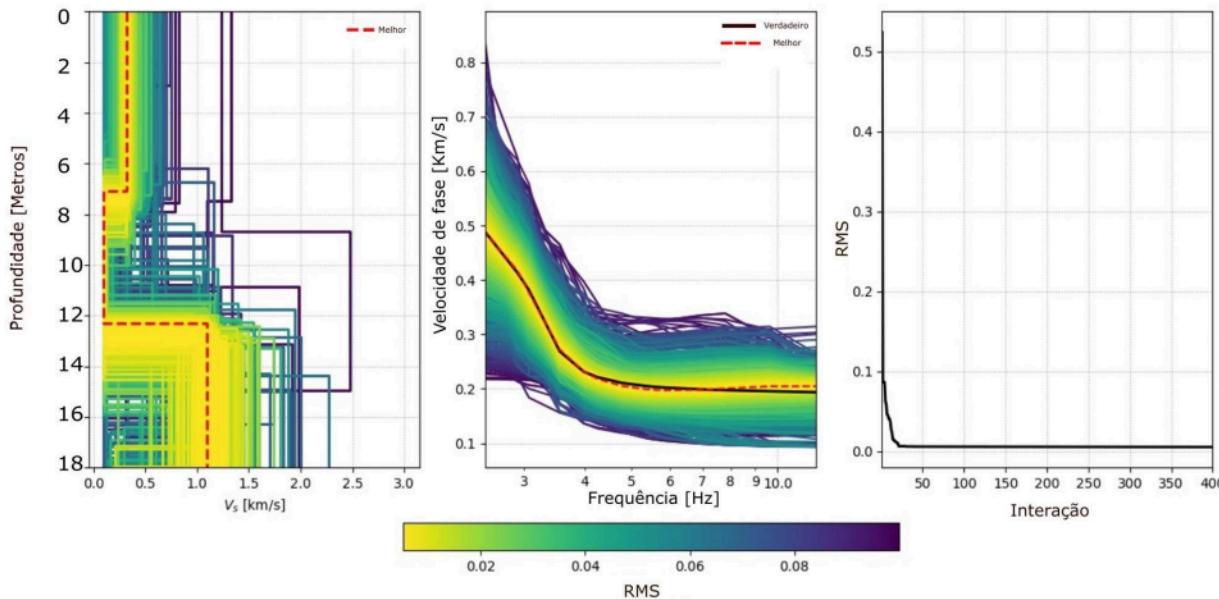


Figura 5. Perfil de Vs em (a); curva de dispersão ajustada em (b); e (c) ajuste RMS em função das iterações.

O perfil Vs indica 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.

5 INTEGRAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A Figura 6 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, 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.

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.

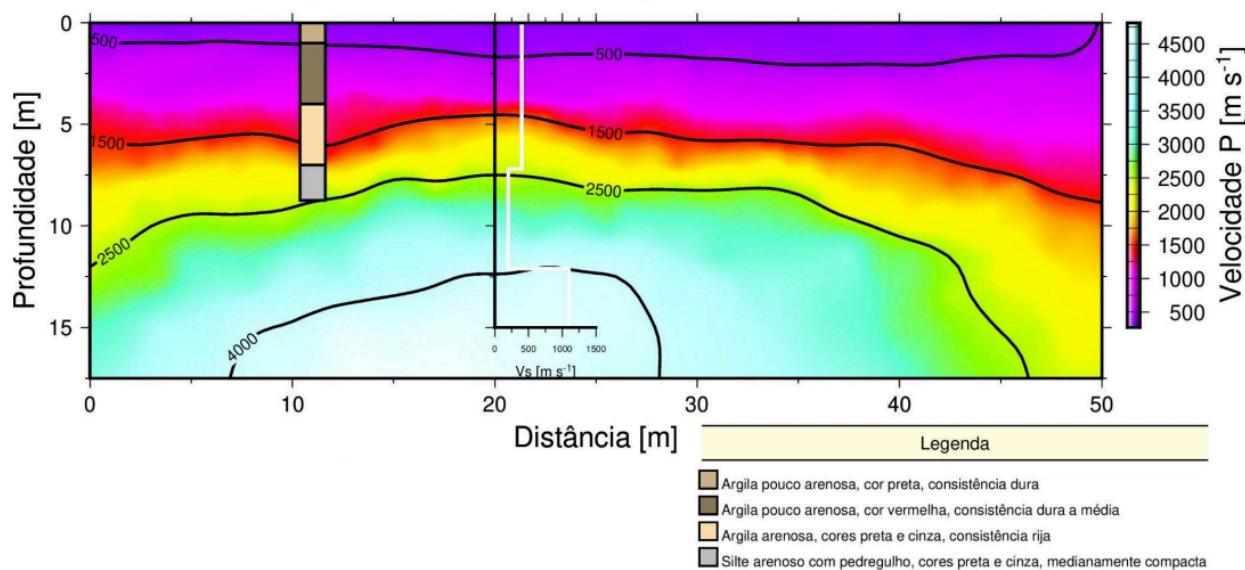


Figura 6. Integração de dados geotécnicos do furo de sondagem SPT (SP-05) com os modelos sísmicos de Vp e Vs.

Neste sentido, com base no modelo integrado de dados sísmicos e geotécnicos pode-se obter o modelo interpretado conforme apresentado na Figura 7.

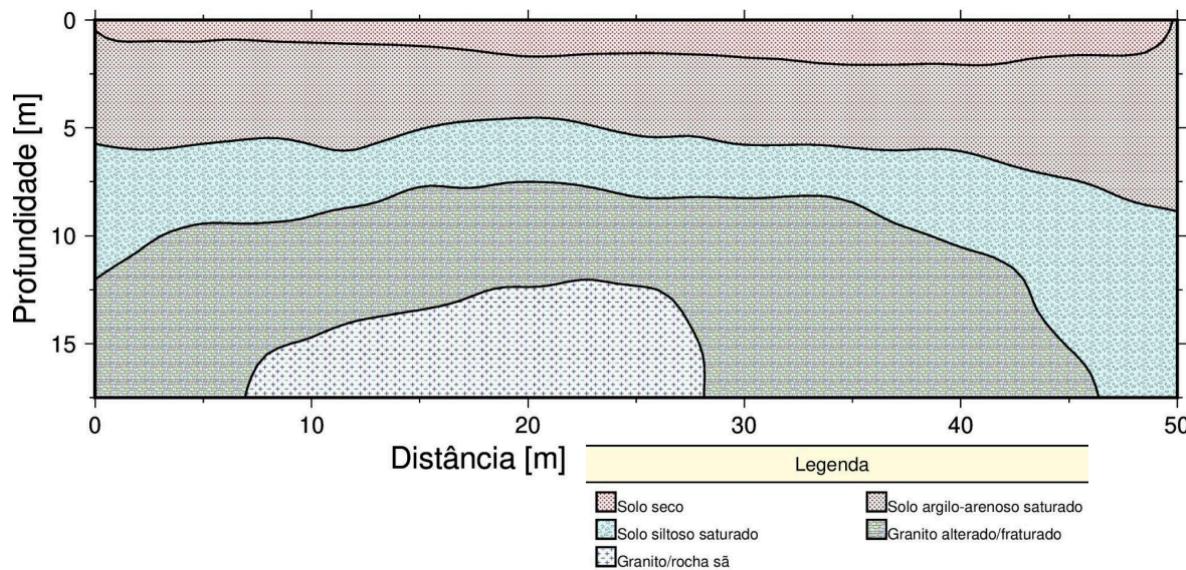


Figura 7. Modelo sísmico-geotécnico interpretado a partir de integração de informações geotécnicas e sísmicas.



6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F. F. M.; Hasuí, Y. (1984). *O pré-cambriano do Brasil*. São Paulo: Edgard Blücher.
- Barros, J.M.C.; Gandolfo, O.C.B.; Rocha, R. (2012). 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, 8 p.
- Cohen, J. K.; Stockwell, Jr. J. W. (2010). *Cwp/Su: Seismic Un*x Release N°. 42: an open source software package for seismic research and processing*. Center of Wave Phenomena, Colorado School of Mines.
- Hartmann, L. A.; Chemale Jr, F.; Philipp, R. P. (2007). *Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no Precambriano*. Ianuzzi R. & Frantz JC.(Org.), v. 50, 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.
- Lima Júnior, S.B.; Prado, R.L.; Borges, W.B.; Martins, J.A.; Branco, R.M.G.C.; Pedrosa Júnior, N.C.; Amorim, A.N. (2013). *Inversão conjunta de Ondas Rayleigh através da técnica MASW na avaliação de áreas suscetíveis a deslizamentos de terra*. Revista de Geologia, v. 26, p. 31-47.
- Park, C.B.; Miller, R.D.; Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, v. 64, n. 3, p. 800-808.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (MASW) active and passive methods. *The Leading Edge*, 26(1), 60-64.
- Souza, L. A. P. & Gandolfo, O. C. B. (2012). Métodos geofísicos em geotecnia e geologia ambiental. *Revista Brasileira de Geologia e Engenharia e Ambiental*, v. 2, n. 2, p. 10-27.
- Tokeshi, K., Leo, C. J., Liyanapahirana, S. (2013). *Comparison of ground models estimated from surface wave inversion using synthetic microtremors*, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 49, 19–26.