

Estudo Comparativo entre a Eficiência de Sondagens SPT e Sísmica Rasa para Determinação de Parâmetros Geotécnicos em uma Área no Município de Caçapava do Sul, RS

Luisa Barbosa Pereira

Unipampa, Caçapava do Sul, Brasil, luisabarbosapereira@gmail.com

Pedro Cruz de Moura Lima

Unipampa, Caçapava do Sul, Brasil, pedrocruzgeofisica@gmail.com

David Silva de Queiroz

Unipampa, Caçapava do Sul, Brasil, david.queiroz1@hotmail.com

José Waldomiro Jimenez Rojas

Unipampa, Caçapava do Sul, Brasil, jose.rojas@unipampa.edu.br

Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima

Unipampa, Caçapava do Sul, Brasil, mvaglima@gmail.com

RESUMO: Nas últimas décadas a geofísica aplicada vem desempenhando um importante papel nos projetos de engenharia, entretanto, as empresas que gerenciam estes projetos desconhecem a diversidade de metodologias geofísicas disponíveis no mercado. Todavia, ressalta-se que a utilização de métodos geofísicos não implica no abandono dos métodos convencionais de investigação. Dados diretos, oriundos de sondagens serão sempre importantes para subsidiar o profissional na interpretação das informações geofísicas. O presente trabalho tem como objetivo realizar um comparativo entre os resultados de parâmetros geotécnicos obtidos através do ensaio SPT e através de levantamentos de sísmica rasa utilizando a técnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), a fim de analisar a eficácia de ambos os métodos em projetos geotécnicos. O trabalho foi realizado a partir de sondagens geotécnicas e levantamentos geofísicos. Os resultados obtidos foram: identificação das 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, eletrorresistividade, sísmica de refração rasa e MASW mostrou ser uma ferramenta muito eficaz em projetos de engenharia geotécnica, sendo possível correlacionar os resultados de todos esses métodos.

PALAVRAS-CHAVE: geotecnia, geofísica, prospecção do subsolo.

1 INTRODUÇÃO

A engenharia geotécnica tem uma grande necessidade de caracterizar as propriedades elásticas de solos e rochas. Para isso, são utilizados rotineiramente ensaios geotécnicos de campo como o SPT (Standard Penetration Test)

e sondagens rotativas. Por se tratarem de ensaios pontuais, onde as características observadas e as propriedades elásticas medidas se referem somente ao ponto analisado, tornou-se necessário o estudo da aplicabilidade de outro ensaio que permita a obtenção de

propriedades elásticas mais representativas em área.

Um ensaio que vem sendo bastante empregado com este propósito na engenharia geotécnica é a sísmica de refração, método geofísico que lida com a propagação das ondas elásticas nos materiais geológicos, característica que tem correlação direta com algumas propriedades físicas dos materiais, tais como, grau de consolidação/cimentação, alteração, compactação, saturação do maciço, entre outros.

Conhecendo as propriedades elásticas dos materiais geológicos e seus efeitos na propagação das ondas sísmicas, é possível obter os chamados módulos elásticos dinâmicos a partir dos valores das velocidades das ondas P, S e densidade dos materiais.

Através da técnica MASW é possível calcular a velocidade de propagação da onda S, que não é obtida de forma direta através dos ensaios tradicionais, e é de fundamental importância para o cálculo dos parâmetros geotécnicos.

Existem diversos estudos apresentando correlações empíricas entre os valores das velocidades de ondas sísmicas e parâmetros geotécnicos como número de golpes do ensaio SPT (Giacheti, 1991), grau de fraturamento (Turk e Dearman, 1987), ou fator de qualidade do maciço (Barton et al., 1974).

A integração bem elaborada de vários estudos no ramo da geotecnia possibilita a execução de uma caracterização geotécnica mais realista. Desta forma, no Brasil vem sendo cada vez mais comum o uso de sondagens diretas aliadas a levantamentos sísmicos, sendo possível determinar locais de potencial interesse ou pontos críticos que devem ser detalhados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

O objetivo geral do presente trabalho é realizar um estudo comparativo entre os resultados dos parâmetros geotécnicos obtidos através do ensaio SPT e através de levantamentos de sísmica rasa em conjunto com a técnica MASW

a fim de analisar a eficácia de ambos os métodos em projetos geotécnicos.

2.2 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos deste estudo salientam-se:

- Analisar ensaios SPT e os parâmetros geotécnicos obtidos através deste ensaio.
- Analisar dados de levantamento sísmico raso e os parâmetros geotécnicos obtidos através deste.
- Analisar a eficácia de ambos os ensaios e a presença de correlações qualitativas entre eles, de modo que forneçam dados suficientes para subsidiar dimensionamento de obras geotécnicas.

3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo trata-se de uma obra localizada na Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul, na Avenida Pedro Anunciação, número 111, Bairro Vila Batista (Figura 1). Está inserida entre as coordenadas 261965 W 6623507 S; 261960 W e 6623496 S; 261924 W e 6623530 S; 261918 W 6623507 S e seu acesso se dá através da Avenida Presidente Kennedy e RS 357.

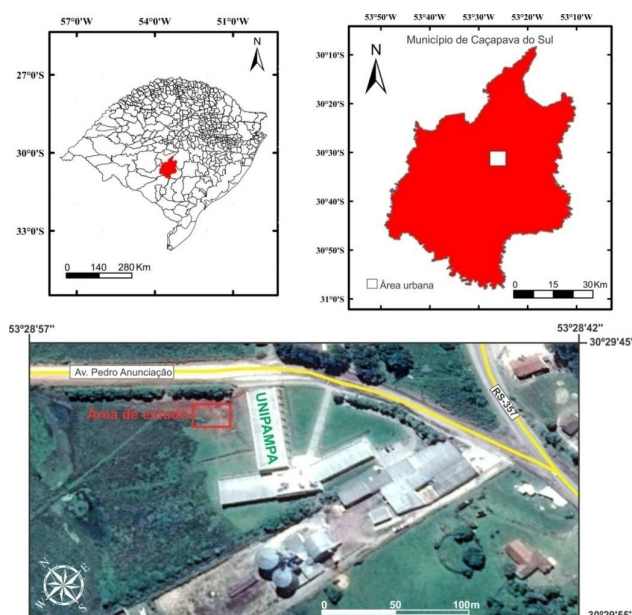


Figura 1. Mapa de situação e localização da área de estudo

3.1 Geologia local

A suíte granítica Caçapava do Sul, no qual a área de estudo esta inserida, segundo Bitencourt (1983) consiste de um corpo com dimensões de 25 km x 12 km, tem uma forma ovalada e está orientado segundo uma direção N-S. Sua idade magmática é de aproximadamente 550 Ma, com datação por isocrônica Rb/Sr (SARTORI e KAWASHITA, 1985).

Esta unidade (Figura 2) foi mapeada na escala 1:25.000 (BITENCOURT et al., 1998) onde dois contrastantes blocos delimitados por estruturas tendendo a NW podem ser reconhecidos. No norte desta estrutura, leucogranitos (principalmente sienogranitos) são muito abundantes, particularmente sobre topografias altas. Já ao sul das falhas, os leucogranitos estão praticamente ausentes, porém granitóides biotita (monzogranitos, granodioritos e porções diorítica) aparecem bastante. De acordo com COSTA et al. (1995), estudos gravimétricos indicaram que na porção norte a suíte granítica atinge espessuras de até 4 km.

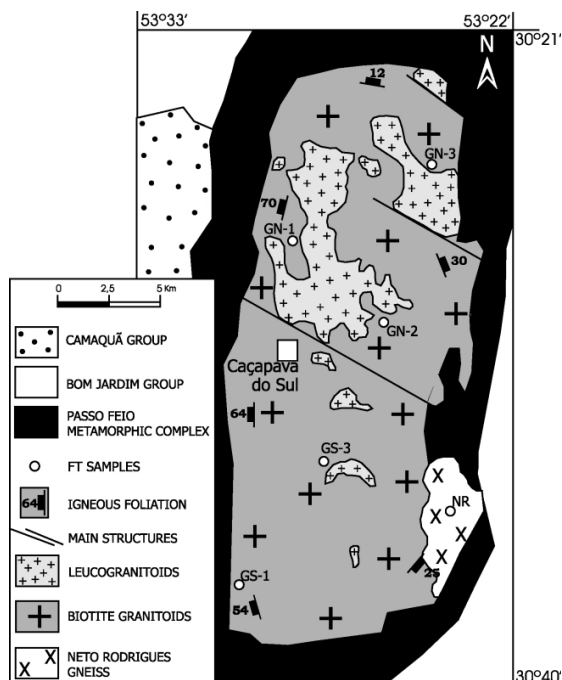


Figura 2. Mapa geológico da região de Caçapava Sul, mostrando as fácies do Complexo Granítico Caçapava do Sul, as estruturas que tendem a NW e que controlam a subdivisão do corpo intrusivo, e o local onde foram coletadas amostras para fazer termocronologia em apatita (Borba et al., 2002)

3.2 Pedologia

Na área de estudo encontram-se Neossolos, que são solos constituídos por material mineral ou por material orgânico pouco espesso, com insuficiência de manifestação dos atributos diagnósticos que caracterizam os diversos processos de formação dos solos, seja em razão de maior resistência do material de origem ou dos demais fatores de formação (clima, relevo ou tempo) que podem impedir ou limitar a evolução dos solos. Apresentam predomínio de características herdadas do material originário, sendo definido como solos pouco evoluídos e sem a presença de horizonte diagnóstico (Embrapa, 2006).

A Figura 3 representa um perfil de solo característico da área de estudo, onde é possível observar, geotecnica, que existem três camadas que se destacam: no topo o horizonte O (orgânico), logo abaixo um solo bastante intemperizado e na base um saprólito, todas evoluídas a partir da Suíte Granítica Caçapava do Sul.

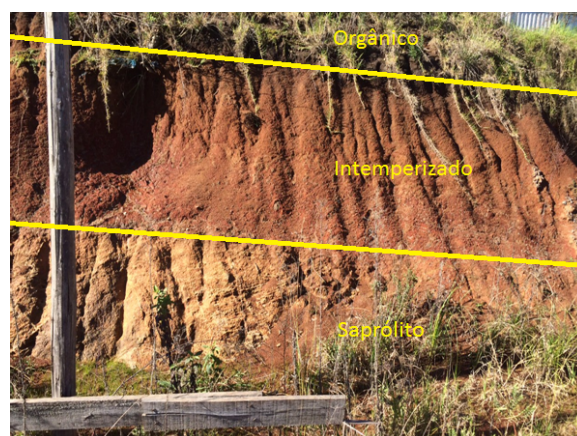


Figura 3. Perfil de solo da área de estudo

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia estabelecida tem dois objetivos fundamentais, o primeiro constitui em analisar sondagens geotécnicas do tipo SPT, a fim de conhecer o subsolo da área e utilizar os valores de N_{SPT} para calcular parâmetros geotécnicos do solo. O segundo procedimento metodológico foi à realização de ensaios geofísicos na mesma área onde foi realizado o ensaio geotécnico.

4.1 Métodos

A análise geotécnica consistiu de cinco ensaios de SPT realizados na Universidade, tendo como objetivo observar em cada relatório de sondagem o nível freático, os índices de resistência a penetração (N_{SPT}) e a classificação e profundidade das camadas de solo.

Na análise geofísica foram utilizados resultados numéricos obtidos com o processamento dos dados do levantamento geofísico de Sísmica de Refração Rasa e Eletrorresistividade, onde foram analisados: as velocidades de propagação da onda P e da onda S a fim de determinar as camadas do subsolo do terreno, modelo de resistividade do terreno para a determinação da profundidade do nível freático e valores dos parâmetros elásticos das camadas de solo e rocha.

A análise dos resultados consistiu de um comparativo entre os resultados obtidos com ambas as análises citadas anteriormente, tendo como propósito observar a eficácia de ambos os métodos e se de alguma forma possuem correlações qualitativas entre eles.

4.2 Materiais e equipamentos

4.2.1 SPT

Foram executados na obra 5 furos de sondagem de reconhecimento do subsolo (SPT 01 ao SPT 05) e seus respectivos deslocamentos, totalizando 45,02 metros de perfuração (Figura 4). As perfurações foram executadas inicialmente com o auxílio de um trado-cavadeira, prosseguindo com circulação d'água e protegidas por revestimento de 2"½. A coleta das amostras foi feita pela penetração do amostrador tipo Raymond, com diâmetro interno de 1" 3/8 (35 mm) e externo de 2" (50,8 mm). A resistência à penetração do amostrador à percussão (N_{SPT}) 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.

4.2.2 Sísmica de refração rasa

A aquisição dos dados foi realizada utilizando o sismógrafo Summit II Compact de 24 canais, da marca DMT, com espaçamento entre os geofones de 1 metro horizontal, utilizando 24 geofones de frequência natural de 14 Hz e como fonte de energia sísmica foi utilizada uma marreta de 5 Kg batida sobre uma chapa metálica. Foram realizados cerca de 2 a 4 tiros em cada perfil, sendo cada um deles composto por 10 impactos da marreta sobre a chapa metálica. Foram realizados três perfis de sísmica de refração (Figura 4), de forma a abranger os pontos onde foram executados furos de sondagem.

4.2.3 Eletrorresistividade

No levantamento de eletrorresistividade foi realizada a técnica de caminhamento elétrico (CE) e o arranjo do tipo dipolo-dipolo com espaçamento entre os eletrodos de corrente (A-B) e de potencial (M-N) de 1 metro. Foi utilizado o resistivímetro da Iris Instrumento, de fabricação francesa, modelo Syscal Pro com operação em 10 canais de saída e potência de 250 watts. Da mesma forma que no levantamento sísmico, também foram realizados três perfis (Figura 4).

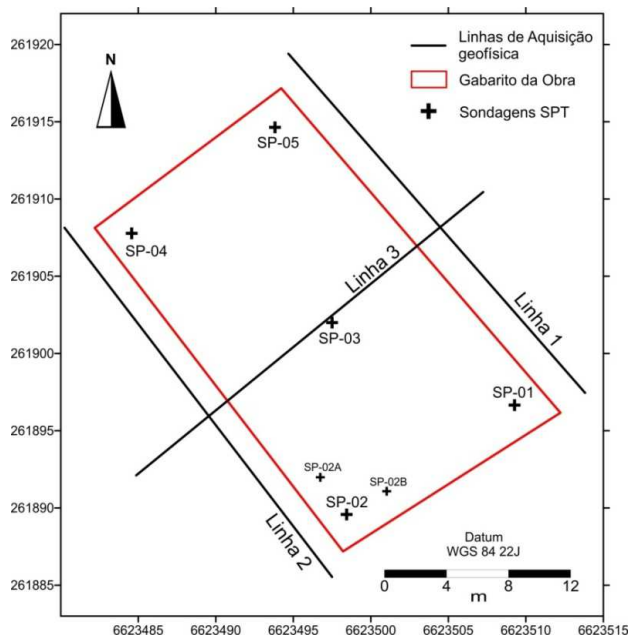


Figura 4. Planta de localização dos furos de sondagem e dos perfis geofísicos executados

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 SPT

Através dos relatórios de sondagem de cada SPT foram realizadas as descrições detalhadas e o cálculo dos parâmetros geotécnicos para cada camada de solo. Como se trata da análise de cinco ensaios de SPT, abaixo será mostrado os resultados obtidos em apenas um dos ensaios, o mais representativo.

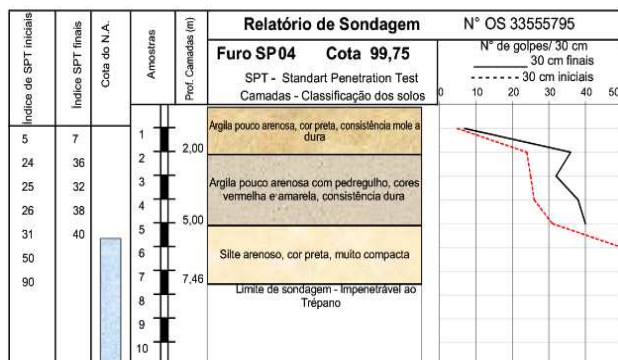


Figura 5. Relatório de Sondagem do SPT 04

No relatório de sondagem SPT 04 (Figura 5) foram descritas três camadas de solo e a cota do nível de água é de 5,5 metros de profundidade. Até 2 metros de profundidade ocorre a primeira camada, que consiste de uma argila pouco arenosa de cor preta e consistência mole a dura, de 2 a 5 metros ocorre a segunda camada, que consiste de uma argila pouco arenosa com pedregulhos de cores vermelha e amarela e consistência dura e a última camada ocorre de 5 a 7,46 metros sendo composta por silte arenoso muito compacto de cor preto.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos calculados para as camadas do SPT 04

SPT 04				
Camada	E (MPa)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
1	6,3	17	25-50	-
2	32,4	21	>200	-
3	36	20	-	43,3
Camada	ν	D _r	S _u	m _v (m ² /MN)
1	0,4-0,5	1,6	28	1890
2	0,4-0,5	1	144	9720
3	0,3-0,5	2,3	-	10800

A Tabela 1 apresenta os parâmetros geotécnicos calculados a partir do N_{SPT} para cada uma das camadas descritas anteriormente. O módulo de elasticidade dos solos (E), a densidade relativa (D_r), a resistência não-drenada (S_u) e coeficiente de variação volumétrica (m_v) foram calculados através de equações encontradas em SCHNAID (2000), o peso específico dos solos (γ) e o ângulo de atrito (ϕ) através de equações de CINTRA et al. (2003), a coesão (C) através da equação proposta por ALONSO (1983) e o coeficiente de Poisson (ν) através da equação de TEIXEIRA e GODOY (1996).

5.2 Sísmica de refração rasa e MASW

Através dos valores de V_p, V_s e densidade das camadas obtidos através do levantamento de sísmica de refração rasa e MASW, foram calculados os parâmetros elásticos coeficiente de Poisson (ν), módulo de Young ou de elasticidade (E), módulo de rigidez ou de cisalhamento (G) e módulo de volume ou incompressibilidade (K) para cada uma das camadas.

Em relação aos resultados obtidos com o levantamento geofísico, será mostrado somente os resultados do Perfil 2 (perfil que engloba o SPT 04 descrito no tópico acima), devido à grande quantidade de resultado obtido com este estudo.

Tabela 2. Dados obtidos e calculados a partir do Tiro 1 do Perfil 2 (entre o SPT 02 e SPT 04)

Tiro 1				
H (m)	D (m)	V _p (m/s)	V _s (m/s)	Rho (kg/m ³)
2,83	2,83	390,90	193,50	1717,00
4,15	6,98	470,30	202,00	1786,70
1,56	8,54	1474,12	520,30	2037,06
2,68	11,22	2590,51	1144,66	2140,97
-	-	5838,11	2342,90	2289,33
H (m)	ν	G (GPa)	E (GPa)	K (Pa)
2,83	0,34	0,06	0,17	0,18
4,15	0,39	0,07	0,20	0,30
1,56	0,43	0,55	1,58	3,69
2,68	0,38	2,81	7,74	10,63
-	0,40	12,57	35,29	61,27

Na tabela 2, H representa a espessura de cada camada, D a profundidade, Vp a velocidade de propagação da onda P, Vs a velocidade de propagação da onda S e Rho a densidade das camadas.

Foi possível identificar cinco camadas, que de acordo com as suas velocidades e densidades podem ser interpretadas do topo para a base como: uma primeira camada de solo, uma segunda camada de areia seca, logo abaixo uma camada de areia saturada, seguida por um granito muito alterado e na base um granito pouco alterado.

5.3 Eletorresistividade

Os perfis de caminamento elétrico deste trabalho foram realizados com o intuito principal de identificar e caracterizar o comportamento do nível freático da área estudada, comparando e amarrando os resultados dos dados geofísicos com dados diretos adquiridos através dos ensaios de SPT.

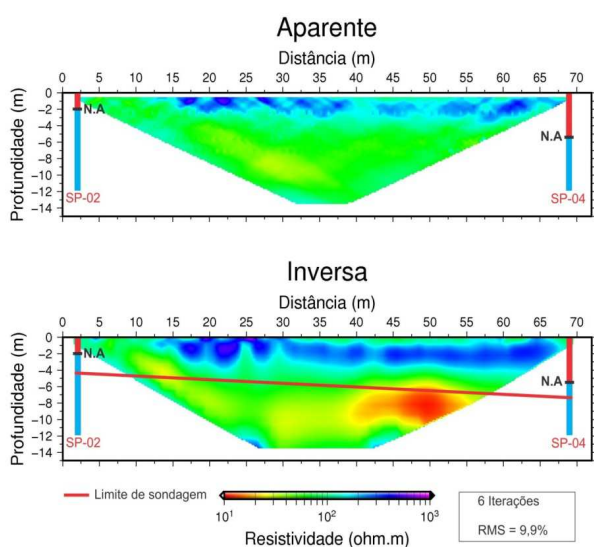


Figura 6. Perfil 2 de Eletorresistividade

O Perfil 2, realizado entre o SPT 02 e SPT 04 (Figura 6) parece apresentar uma camada até dois metros de profundidade de alta resistividade, possivelmente ocasionada pela presença de uma camada de concreto, uma vez que o ensaio foi realizado após as obras de fundações, ou de uma camada aerada no solo. Também podemos notar uma camada com

valores inferiores a 100 ohms metro, que coincide com as profundidades encontradas para o nível d'água nas sondagens SPT, aparecendo no SPT 02 por volta de 2 metros e no SPT 4 a 5,5 metros de profundidade. Os valores encontrados abaixo desta profundidade também indicam a presença de água. Na base do perfil começam a aparecer valores mais resistivos, indicando a presença de um material com menos umidade que estaria sustentando essa camada de aquífero livre, mas não a presença de uma rocha sã e sim de um material bem alterado.

5.4 Comparativo entre os resultados do ensaio de SPT, sísmica de refração rasa e masw

Para atestar a aplicabilidade do ensaio sísmico de refração na identificação das camadas do solo, foi realizada uma comparação entre perfis que mostram a variação na velocidade da onda P, variação na velocidade da onda S e variação do N_{SPT} .

Na Figura 7 as mudanças nas velocidades Vp e Vs coincidem com as variações no N_{SPT} . À medida que aumenta o número de golpes necessário para penetrar o amostrador no solo, aumenta também Vp e Vs, mostrando que, à medida que aumenta a profundidade dos ensaios é possível identificar materiais mais densos e de maior resistência.

A 2 metros de profundidade observa-se um aumento brusco no N_{SPT} , que também coincide com o aumento de Vp e Vs, sendo possível distinguir claramente duas camadas de diferentes densidades e resistências. Em 7,46 metros de profundidade foi determinado através do ensaio de SPT como impenetrável ao trépano e o que se observa nos perfis de Vp e Vs é que, a partir desta profundidade, ambas as velocidades aumentam bastante, apresentando valores bem característicos de um corpo granítico.

É possível afirmar que esta seção da área de estudo apresenta um corpo granítico sã ou pouco alterado a aproximadamente 10 metros de profundidade, também identificado um pouco mais profundo no Perfil 2 de eletorresistividade.

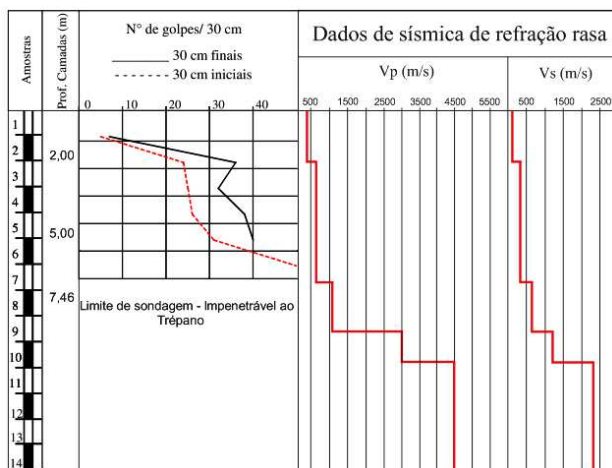


Figura 7. Comparação entre os resultados do SP 04 e do Tiro 2 do Perfil 2

6 CONCLUSÕES

A aplicação conjunta dos ensaios SPT, eletrorresistividade, sísmica de refração rasa e MASW, mostrou ser uma ferramenta muito eficaz em projetos de engenharia geotécnica, sendo possível correlacionar os resultados de todos esses métodos buscando uma caracterização cada vez mais realista do subsolo do terreno.

Os resultados de sísmica de refração rasa foram fundamentais para a identificação de seções maiores, como por exemplo, o contato entre solo e rocha. Contudo, as variações no solo foram mais bem identificadas através dos resultados de MASW.

Através de ambos os métodos foi possível estimar o nível d'água em alguns perfis, entretanto é válido ressaltar que analisando somente V_p e V_s não é possível identificar com precisão o nível freático do terreno. É de fundamental importância comparar estas estimativas com as interpretações realizadas através dos perfis de eletrorresistividade, uma vez que este método tem maior resolução para identificar corpos d'água.

Os parâmetros geotécnicos calculados através do N_{SPT} se mostraram bastante condizentes com os encontrados na literatura, confirmando assim a importância dos ensaios de SPT para o dimensionamento de fundações. Os parâmetros elásticos calculados através dos valores de V_p , V_s e densidade, obtidos através

da sísmica de refração rasa e MASW, também apresentaram valores que condizem com os tipos de solos e rochas encontradas na área, apesar de não ter sido realizada nenhuma comparação com valores encontrados em literaturas.

REFERÊNCIAS

- Alonso, U. R. *Exercício de fundações*. São Paulo: Editora Edgar Blucher Ltda., 1983, 202 p.
- Barton, N., Lien, R. e Lunde, J. (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, Vol. 6, No. 4, pp. 189-236.
- Bitencourt, M. F. A. S. (1983) 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.
- Bitencourt, M. F., Philipp, R. P., Dillenburg, S., Lisboa, N. A., Porcher, C. C. e Sommer, C. A. (1998) Mapa Geológico 1:25.000 das Folhas Caçapava do Sul, Passo do Salsinho, Durasnal e Arroio Santa Bárbara, RS, Porto Alegre.
- Borba, A. W., Vignol Lelarge, M. L. M., Mizusaki, A. M. P. (2002) Uplift and denudation of the Caçapava do Sul granitoids (southern Brazil) during Late Paleozoic and Mesozoic: constraints from apatite fission-track data. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 15, n. 2, p. 683-692.
- Cintra, J. C. A., Aoki, N., Albiero, J. H. *Tensão admissível em fundações diretas*. São Carlos: Editora Rima, 2003. 135 p.
- Costa, A. F. U. et al. (1995) Modelamento Gravimétrico 3D do Complexo Granítico de Caçapava do Sul, RS. In: *4º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica*, 1995, Rio de Janeiro, Vol. 2, pp. 753-758.
- Embrapa (2006) *Sistema brasileiro de classificação de solos*, Rio de Janeiro, 2º ed.
- Giacheti, H. L. (1991) *Estudo Experimental de Parâmetros Dinâmicos de Alguns Solos tropicais do Estado de São Paulo*. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 232 p.
- Sartori, P. L. P. e Kawashita, K. (1985) Petrologia e Geocronologia do Batólito Granítico de Caçapava do Sul, RS. In: *II Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia*, Florianópolis, pp. 102-107.
- Schnaid, F. *Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.
- 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. cap. 7, p. 227-264.
- Turk, N. e Dearman, W. R. (1987) Assessment of grouting efficiency in a rock mass in terms of seismic velocities, *Int. Assoc. Eng. Geol.*, Vol. 36, p. 101-108.