

**CARACTERIZAÇÃO DE ESTRATOS DA FORMAÇÃO SANTO ANASTÁCIO
(GRUPO CAIUÁ) PELO ENSAIO SÍSMICO CROSSHOLE**

Otávio Coaracy Brasil Gandolfo¹

Resumo - Foi realizado um ensaio sísmico *crosshole* em uma área localizada no município de Três Lagoas-MS. Pode ser estabelecida uma boa correlação entre os valores das velocidades das ondas sísmicas (V_P e V_S) dos diversos estratos (determinadas pelo *crosshole*) e as unidades geológico-geotécnicas identificadas por três sondagens mecânicas que foram realizadas para execução e preparação dos furos necessários para a realização do ensaio sísmico.

Abstract - A crosshole seismic test was carried out in an area located in the municipality of Três Lagoas-MS. A good correlation can be established between the values of the P-wave and S-wave velocities of the strata (determined by the crosshole test) and the geological-geotechnical units identified by three soundings that were carried out for the execution and preparation of the boreholes necessary to perform the seismic test.

Palavras-Chave - Ensaio *crosshole*; geofísica aplicada; Formação Santo Anastácio (Grupo Caiuá); Três Lagoas-MS.

¹

Geofísico, PhD, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, gandolfo@ipt.br

1. INTRODUÇÃO

O ensaio sísmico *crosshole*, curiosamente, é mais conhecido no meio técnico por engenheiros civis do que por geofísicos propriamente ditos. Por ser um ensaio que fornece resultados quantitativos e com uma boa resolução, independente da profundidade (pelo fato de ser realizado em furos de sondagens), possui uma grande aceitação por parte da engenharia geotécnica.

O *crosshole* é um ensaio que determina a velocidade de propagação das ondas sísmicas compressionais (ondas P) e de cisalhamento (ondas S) nos estratos geológicos, com uma resolução vertical da ordem de 1 m. Os resultados que este ensaio fornece para a caracterização dos maciços terrosos e rochosos são de grande utilidade, principalmente, para a engenharia de fundações.

As ondas sísmicas causam pequenas deformações no terreno ao se propagarem e, desta forma, permitem a avaliação dos maciços em seu estado “in situ”, sendo preservadas, por exemplo, as suas condições naturais de confinamento e umidade.

Em solos tropicais, particularmente em solos lateríticos, os ensaios sísmicos que determinam a velocidade da onda de cisalhamento (V_s), permitem identificar diferenças nos graus de cimentação, de alteração e de estruturação que, muitas vezes, não são identificados pelos tradicionais ensaios SPT, rotineiramente utilizados.

Este trabalho apresenta um estudo de caso de um ensaio *crosshole* realizado em estratos da Formação Santo Anastácio, do Grupo Caiuá. Pode ser estabelecida uma boa caracterização dos estratos geológicos da área, por meio de uma análise conjunta das velocidades sísmicas determinadas (V_p e V_s) com as informações disponíveis de três sondagens mecânicas que foram realizadas para a execução do ensaio *crosshole*.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

2.1. Caracterização geológica

A geologia da área é caracterizada por rochas pertencentes à Formação Santo Anastácio, do Grupo Caiuá. A Formação Santo Anastácio ocorre, sobretudo, nas calhas dos baixos afluentes do rio Paraná, assentada diretamente sobre basaltos da Formação Serra Geral.

Caracteriza-se por estratos arenosos tabulares, de aspecto maciço típico, com espessura decimétrica (até um metro) e raras intercalações de estratos de lamitos e argilitos. Constitui-se de arenitos quartzosos subarcoseanos, quase sempre maciços, finos a muito finos, pobremente selecionados, com fração de silte subordinada e pequena quantidade de matriz silto-argilosa. Os grãos são subarredondados, foscos, encobertos por uma película de óxido de ferro (Fernandes & Coimbra, 2000).

2.2. Descrição geológica-geotécnica do maciço investigado

De maneira simplificada, são observadas as seguintes unidades litológicas na área de estudo (Tabela 1):

Tabela 1. Unidades litológicas encontradas na área.

Profundidades	Descrição da camada
0,0 m - 12,2 m	Argila arenosa, vermelha (depósito de terraço colúvio aluvionar, laterizado), com o nível d'água em torno de 7 m de profundidade
12,2 m - 14,2 m	Camada de seixos arredondados (depósito de antigo leito de rio)
14,2 m - 19,0 m	Arenito siltoso, avermelhado
19,0 m - 20,8 m	Argilito avermelhado
20,8 m - 25,0 m	Arenito avermelhado com estrutura maciça

Com base nas informações dos três furos de sondagens realizados para a execução do ensaio *crosshole*, foi elaborada uma seção geológico-geotécnica que será posteriormente utilizada para a correlação com os perfis das velocidades obtidos do ensaio sísmico (Figura 1). A Figura 2 ilustra as amostras obtidas em uma das sondagens (furo-1).

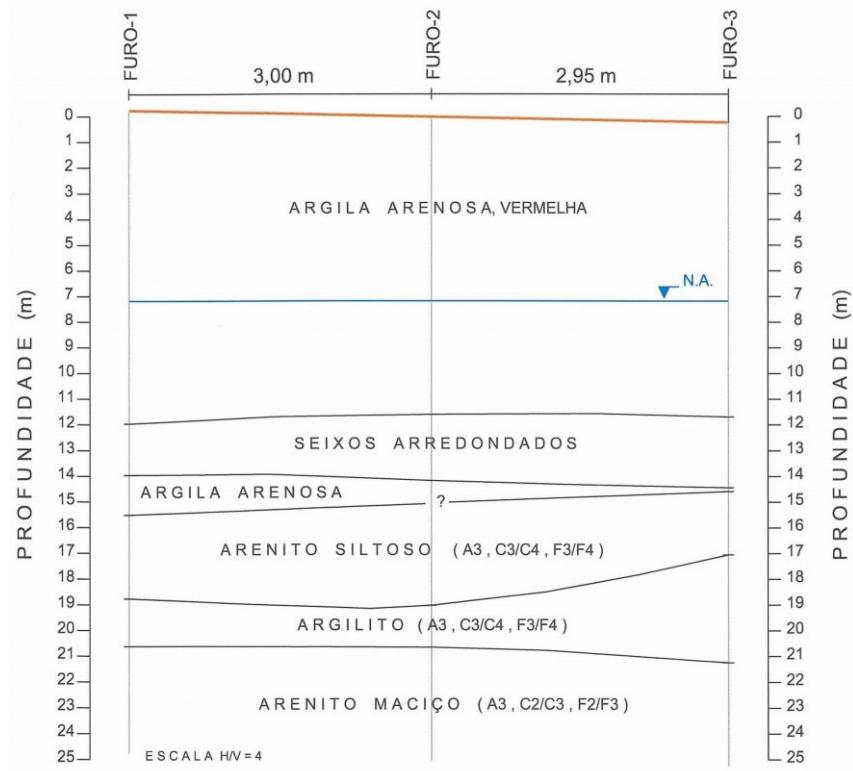


Figura 1. Seção geológico-geotécnica do local onde foi realizado o ensaio *crosshole*.

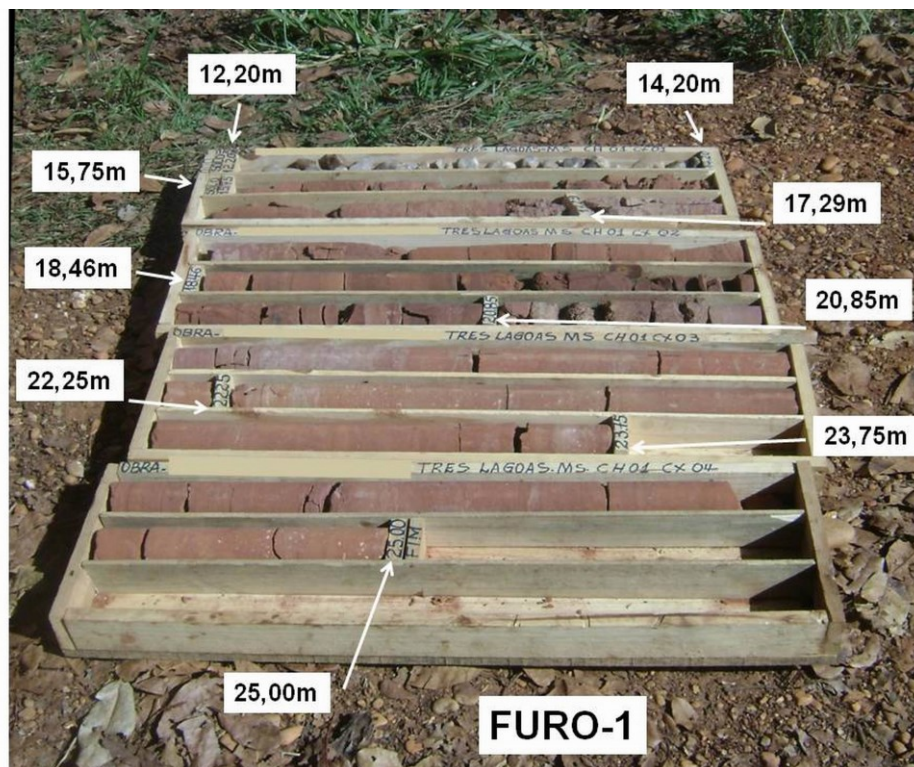


Figura 2. Amostras obtidas no furo-1 do ensaio *crosshole*.

3. O ENSAIO CROSHOLE

O ensaio sísmico *crosshole*, também conhecido como ensaio de “transmissão direta entre furos”, é empregado para a determinação precisa das velocidades de propagação das ondas sísmicas de cisalhamento (onda S) e compressional (onda P) nos maciços terrosos e rochosos. Consiste basicamente na geração de uma onda sísmica em um furo e o registro do seu tempo de chegada em um ou mais furos adjacentes.

São utilizados furos de sondagem devidamente preparados (revestidos com PVC e com o espaço anelar preenchido com calda de cimento, de modo a garantir um bom acoplamento com o solo) para que a fonte geradora de ondas e os receptores (geofones) possam percorrê-los livremente em toda a sua extensão. A fonte e os geofones são posicionados no mesmo nível em profundidade, nos horizontes de interesse para investigação. Busca-se sempre o registro das ondas transmitidas diretamente entre fonte e geofones evitando-se, assim, ondas refratadas em outros estratos sísmicos (Figura 3).

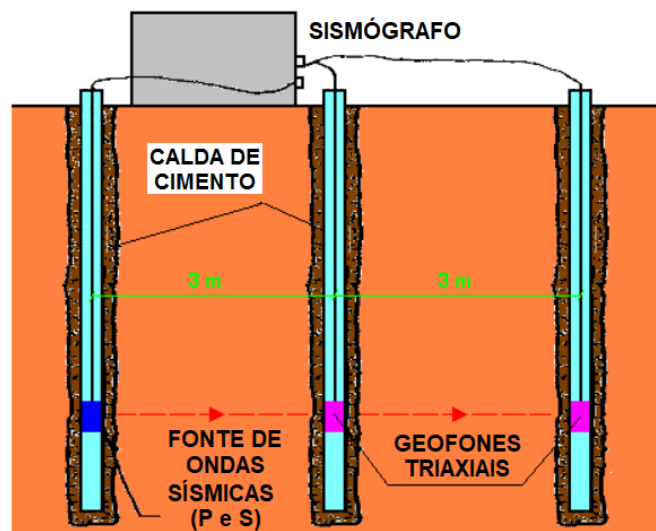


Figura 3. Ilustração do ensaio sísmico *crosshole* (SOUZA e GANDOLFO, 2021).

No ensaio *crosshole* devem ser empregados dois diferentes tipos de fontes geradoras de ondas sísmicas: uma que produza preferencialmente ondas P e outra que gere esforços cisalhantes, produzindo preferencialmente ondas do tipo S (Figura 4). Esta última deve, ainda, permitir a variação do sentido do impacto, para que se observe a inversão de polaridade da onda S registrada no sismograma, facilitando a correta visualização do tempo da sua chegada.



Figura 4. Fonte geradora de ondas cisalhantes, ondas S (martelo).

Os receptores (geofones) devem ser do tipo triaxiais, cujas componentes são dispostas ortogonalmente entre si (duas horizontais e uma vertical). O sinal sísmico captado pelos geofones é registrado em um sísmógrafo (Figura 5)

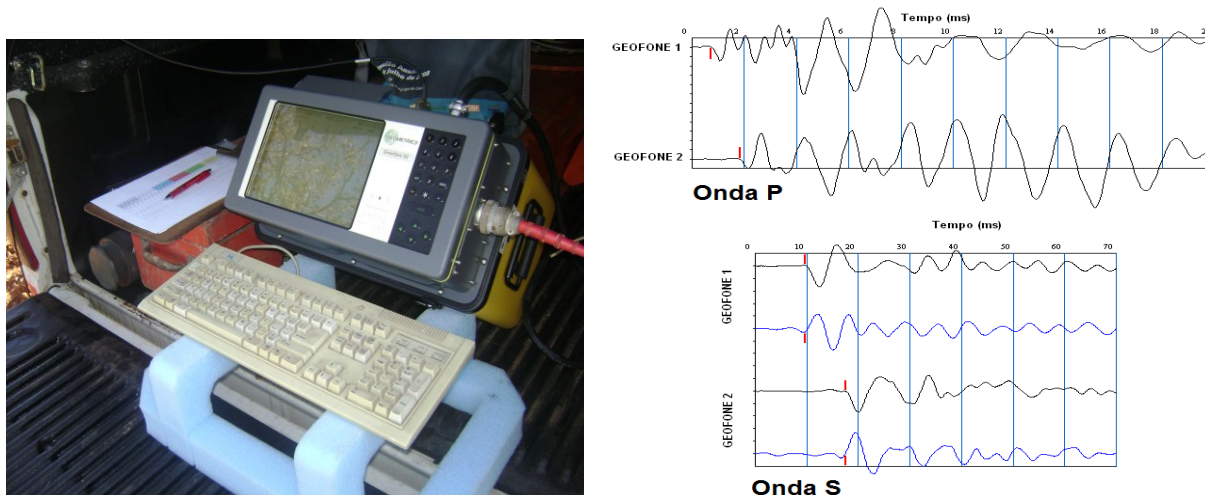


Figura 5. Sísmógrafo (à esquerda) e típicos registros sísmicos obtidos no ensaio *crosshole*, mostrando o tempo de chegada das ondas P e S (traços em vermelho). À direita e acima, o registro da onda P. À direita e abaixo, o registro da onda S, mostrando a inversão de sua polaridade.

4. DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE CAMPO

Os três furos utilizados para a execução do ensaio *crosshole* foram realizados e devidamente preparados segundo as orientações da norma técnica ASTM D 4428 (2007). Foram perfurados até a profundidade de 25 m e revestidos com tubo de PVC (de parede grossa e com diâmetro interno igual a 3 polegadas), sendo que os espaços anelares entre as paredes do furo e o revestimento foram preenchidos com calda de cimento. As coordenadas UTM dos furos encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2. Localização dos furos onde foi realizado o ensaio *crosshole* (*datum* WGS 84, zona UTM 22)

Furo	E (m)	N (m)	Cota (m)
FURO-1	436.716,267	7.722.186,443	313,16
FURO-2	436.719,339	7.722.184,825	312,91
FURO-2	436.722,015	7.722.183,429	312,69

Na execução do ensaio *crosshole* a fonte geradora de energia sísmica foi posicionada no furo-1, enquanto que os geofones triaxiais foram posicionados nos furos adjacentes (furo-2 e furo-3). As medidas foram realizadas entre as profundidades de 1 m e 24 m, com leituras efetuadas em intervalos regulares de 1 m.

O ensaio foi executado em duas etapas. Na primeira etapa, com o furo seco, foram realizadas as medidas do tempo de chegada da onda S, utilizando como fonte sísmica o martelo (Figura 4, anteriormente apresentada). Em seguida, com o furo preenchido com água, foram efetuadas as medidas do tempo de chegada da onda P, utilizando como fonte sísmica um canhão de ar comprimido (*air-gun*).

A Figura 6 apresenta uma visão da área onde foi realizado o ensaio *crosshole*. O levantamento de campo ocorreu em maio de 2010.

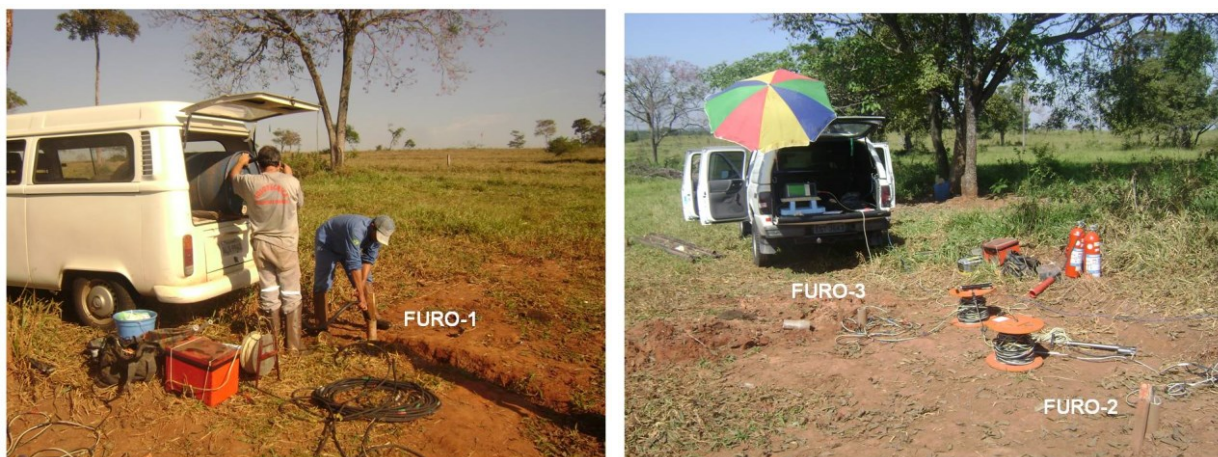


Figura 6. Ensaio *crosshole* realizado no município de Três Lagoas-MS (maio de 2010).

5. RESULTADOS

Na Figura 7 são apresentados os perfis de V_P e de V_S versus profundidade, resultantes do ensaio *crosshole*.

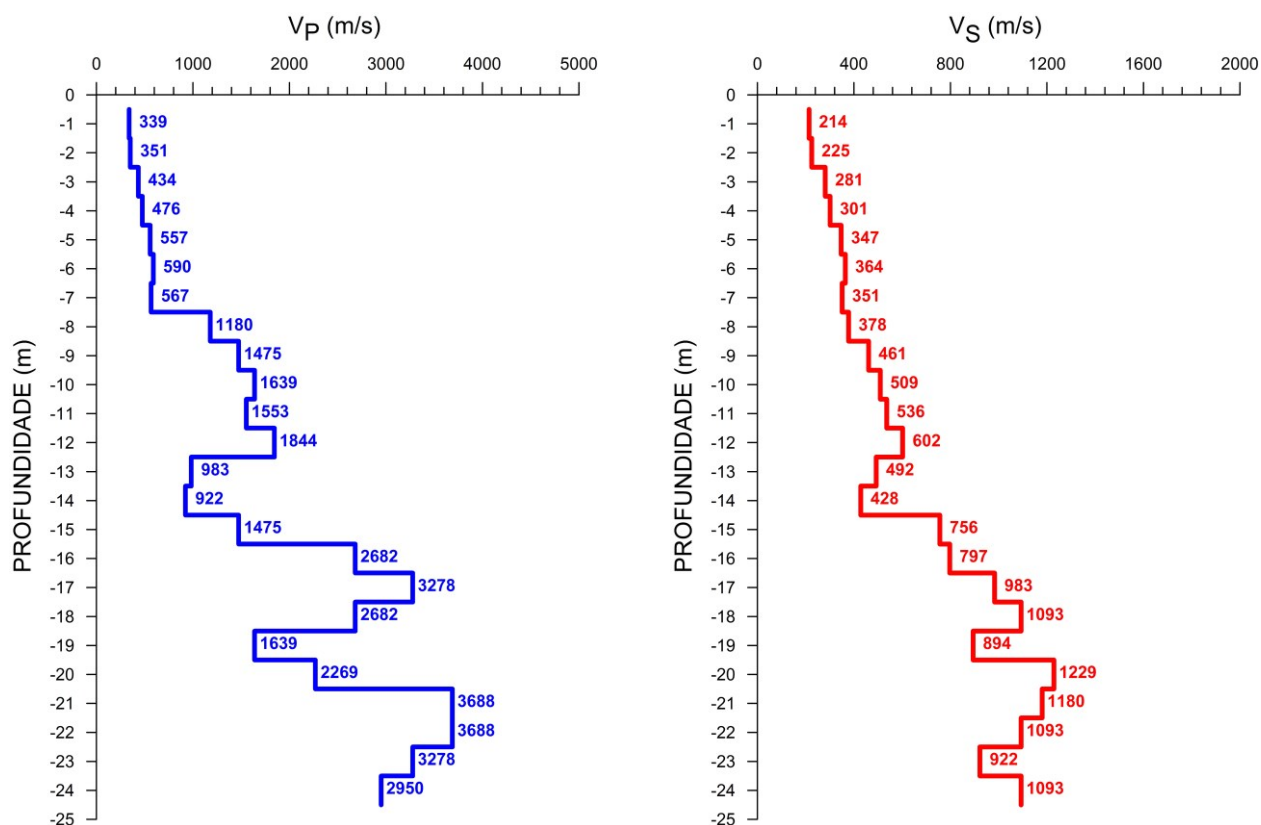


Figura 7. Perfis de velocidades sísmicas versus profundidade determinados pelo ensaio *crosshole*: V_P (à esquerda) e V_S (à direita).

Na zona não saturada do maciço terroso, V_S e V_P apresentaram valores crescentes com a profundidade. Abaixo do nível d'água, embora esta tendência permaneça, observam-se inversões de velocidade em alguns trechos ensaiados, mostrando uma clara estratificação geológico-geotécnica do maciço.

Os valores de V_S para a camada de solo (argila arenosa vermelha), que ocorre até a profundidade de 12,2 m, variam de 214 m/s a 602 m/s. Observa-se que V_S não sofre influência da saturação do terreno, ao contrário do que ocorre com V_P . Na zona de transição entre o solo e a rocha arenítica (entre 12,2 m e 14,2 m), constituída pela camada de seixos arredondados, verificou-se um pequeno decréscimo nos valores de V_S . A partir dessa

profundidade, embora ocorram pequenas oscilações entre os vários níveis ensaiados, V_S continua aumentando com a profundidade, variando de 756 m/s (caracterizando uma zona de transição) a valores acima de 1000 m/s, correspondendo ao maciço rochoso arenítico. A camada de argilito intercalada (entre 19,0 m a 20,8 m) apresenta valores de velocidades menores em relação aos arenitos sobre e subjacentes.

Com relação aos valores de V_P , que apresentam valores que variam de 339 m/s a 567 m/s no solo (argila arenosa vermelha), a primeira mudança forte no gradiente de velocidade ocorre na profundidade de 7 m, decorrente da presença do nível d'água, onde os valores se aproximam de 1500 m/s a 1600 m/s.

Assim como para V_S , observa-se também uma queda dos valores de V_P na camada onde ocorrem os seixos arredondados, embora mais acentuada. Dessa profundidade em diante, V_P volta a ter um comportamento crescente com a profundidade, com valores que variam de 2269 m/s a 3688 m/s, compatíveis com um arenito (Tabela 3).

Tabela 3. Velocidade de propagação das ondas sísmicas compressoriais (V_P) em alguns materiais (SOUZA e GANDOLFO, 2021).

MATERIAL	V_P (m/s)
Solos, sedimentos não consolidados	200 - 500
Solos consolidados secos, argilas compostas	600 - 1200
Solos saturados	1500 - 1900
Sedimentos inconsolidados saturados	1500 - 2000
Rochas seimentares sãs, não fraturadas	2000 - 4500
Rochas ígneas/metamórficas altamente fraturadas ou alteradas, arenitos alterados e/ou fraturados	1900 - 2800
Rochas ígneas/metamórficas pouco alteradas e/ou fraturadas, arenito são	2900 - 3900
Rochas ígneas/metamórficas sãs, não fraturadas	4200 - 6000
Aço	5500 - 5800
Concreto	3500 - 4500
Água	1450 - 1550
Ar	340

Obs.: Nesta tabela, rochas "sedimentares sãs/arenito são" correspondem às rochas sedimentares resistentes, classificadas como coerentes a muito coerentes na geologia de engenharia; "arenitos alterados" correspondem a rochas fráveis, pouco coerentes.

A Figura 8 apresenta a curva de V_P e V_S com a profundidade, lançada sobre a seção geológico-geotécnica apresentada anteriormente na Figura 1, permitindo uma melhor visualização das correlações anteriormente estabelecidas.

6. CONCLUSÕES

O ensaio *crosshole* realizado na área investigada permitiu uma boa correlação entre os valores determinados para as velocidades das ondas sísmicas V_P e V_S com as unidades geológico-geotécnicas identificadas nas sondagens (solo argilo-arenoso, camada de seixos arredondados e arenito com intercalação de argilito).

Na camada correspondente ao solo (argila arenosa vermelha), V_S variou de 214 m/s a 602 m/s e V_P apresentou valores que variaram de 339 m/s a 567 m/s (na zona não saturada do terreno), podendo ser classificado como um material escavável. A presença do nível d'água, a aproximadamente 7 m, causou forte mudança no gradiente de V_P . Na camada de seixos arredondados, foi observada uma diminuição das velocidades de ambas as ondas sísmicas (V_S e V_P).

Na rocha arenítica, V_S apresentou valores acima de 1000 m/s, e V_P , valores que variaram de 2269 m/s a 3688 m/s, compatíveis com este tipo de litologia. Foi também observada uma queda de valores de V_P no intervalo ensaiado entre 19,0 m a 20,8 m, na camada de argilito intercalada entre os arenitos.

O conhecimento dos parâmetros V_P e V_S nos estratos, juntamente com o valor da massa específica (densidade) dos materiais permite, ainda, a determinação dos módulos elásticos dinâmicos dos maciços terrosos e rochosos ensaiados, quais sejam: módulo de Young (E), coeficiente de Poisson (ν), módulo de rigidez ou cisalhamento (G) e módulo de compressibilidade (K), por meio de equações matemáticas simples que relacionam estes parâmetros.

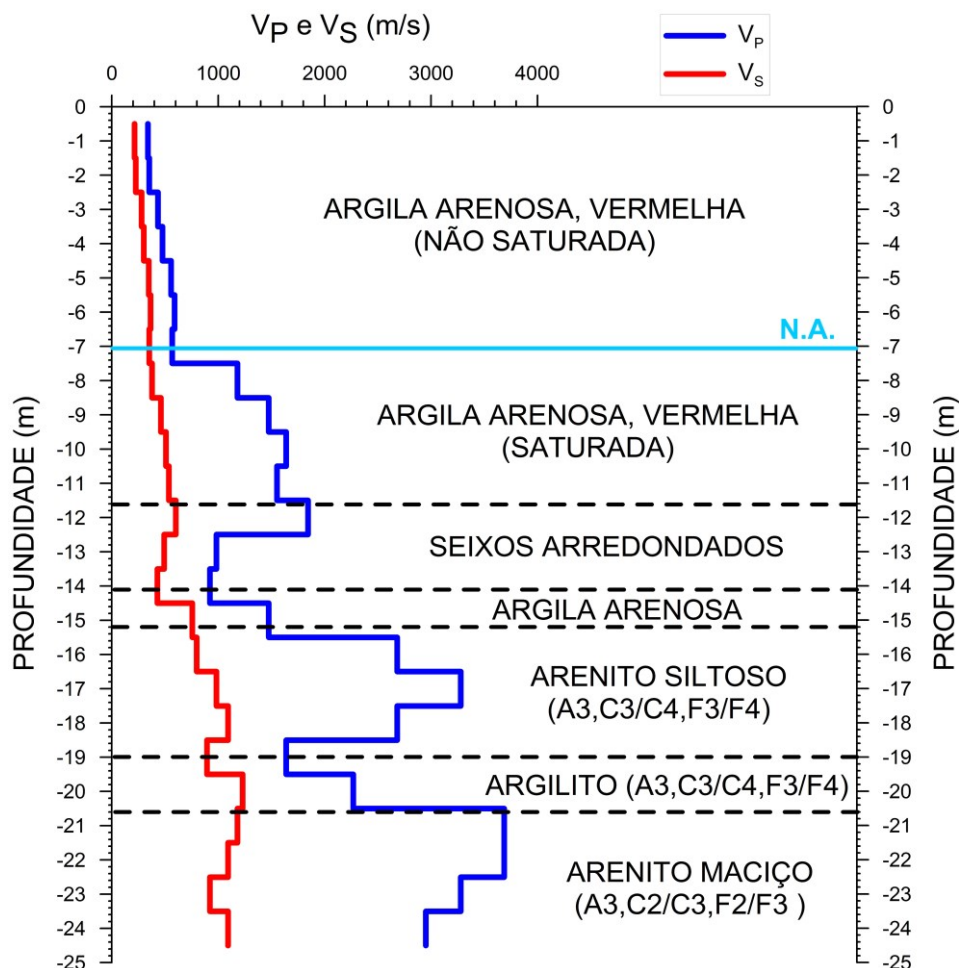


Figura 8. Perfis de V_P (em azul) e V_S (em vermelho) versus profundidade, juntamente com a seção geológico-geotécnica do local onde foi realizado o ensaio sísmico *crosshole*.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a empresa SOLOTÉCNICA pela execução/preparação dos furos e pela disponibilização das informações das sondagens.

REFERÊNCIAS

- ASTM D4428. *Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing*, 2007. 11p.
- FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. (2000). "Revisão Estratigráfica da Parte Oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo)" in Revista Brasileira de Geociências, nº 30, Vol. 4, p.717-728.
- SOUZA, L.A.P., GANDOLFO, O.C.B. *Geofísica aplicada à geologia de engenharia e meio ambiente: manual de boas práticas*. São Paulo: ABGE, 2021. 155p.