



Ensaio *crosshole* e dilatométrico sísmico (SDMT) na investigação geotécnica de uma área

Otávio Coaracy Brasil Gandolfo* - Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo
Antônio Sérgio Damasco Penna - Damasco Penna Engenheiros Associados
Fernando Damasco Penna - Damasco Penna Engenheiros Associados

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

This paper presents the results of the crosshole tests and seismic dilatometer tests (SDMT) performed before the construction of two building, for design purposes. Four crosshole tests were carried out using five cased boreholes (20m depth). Each test was carried out using two boreholes. At the middle of the two boreholes used for the crosshole tests, SDMT tests were performed down to 13 meters depth. Crosshole test results were used as a “yard stick” for evaluating the accuracy of the V_S profile obtained from SDMT tests. Similar results were obtained and the data showed excellent agreement. Advantages and disadvantages of each of the two tests were briefly discussed.

1. Introdução

O ensaio sísmico *crosshole*, por ser realizado em furos de sondagem, é a técnica geofísica que fornece com maior precisão o perfil de velocidade das ondas sísmicas de cisalhamento (ondas S) e compressionais (ondas P) em função da profundidade.

Diversos trabalhos onde foram empregados métodos sísmicos de superfície como, por exemplo, os que utilizam as ondas de superficiais (SASW, MASW), comparam os resultados obtidos com os dados de ensaios *crosshole* (Anderson et al., 2007; Eikmeier, 2014, Gandolfo & Silva, 2013).

O ensaio SDMT (dilatométrico sísmico) é uma combinação do tradicional dilatômetro de Marchetti (DMT), equipamento comumente utilizado na investigação geotécnica de terrenos, com um módulo composto por dois sensores sísmicos instalados na sua ponteira de cravação.

O SDMT, desta forma, permite a obtenção dos parâmetros clássicos fornecidos pelo ensaio DMT e, adicionalmente, a determinação da velocidade de propagação das ondas sísmicas de cisalhamento (V_S).

Na geotecnia, particularmente em locais onde o nível d'água é raso, a utilização da onda S nos ensaios de campo torna-se quase obrigatória por sofrer influência mínima da saturação do maciço terroso.

A velocidade da onda S (V_S) é um parâmetro de grande interesse para a engenharia geotécnica e de fundações, pois tem ainda uma relação direta com o módulo de cisalhamento dinâmico (G_{max} ou G_0), dada pela seguinte expressão (eq.1):

$$G_{max} = \rho \cdot V_S^2 \quad (\text{eq.1})$$

onde ρ é a densidade ou massa específica do material.

Outro fato importante que desperta interesse na obtenção de V_S é a sua estreita correlação com o número de golpes em um ensaio SPT (N_{SPT}) executado nas sondagens de simples reconhecimento. Estas equações empíricas, geralmente exponenciais ou lineares, podem ser expressas por meio das seguintes formulações genéricas:

$$V_S = A \cdot N_{SPT}^B \quad (\text{eq.2})$$

$$V_S = A + B \cdot N_{SPT} \quad (\text{eq.3})$$

onde A e B são constantes empíricas.

O conhecimento da distribuição de V_S em profundidade é uma informação importante na fase de projeto, em uma etapa anterior à implantação de uma obra de engenharia.

2. Ensaio *crosshole*

O ensaio *crosshole*, conhecido como ensaio sísmico entre furos, consiste na geração de ondas sísmicas em um furo de sondagem e o seu registro em um ou dois furos adjacentes e pouco espaçados entre si. A fonte e os geofones devem estar posicionados na mesma cota de investigação. As medidas são geralmente realizadas em intervalos regulares de 1 metro.

O objetivo deste ensaio é a captação das ondas transmitidas diretamente entre a fonte e o geofone (evitando-se o registro de ondas refratadas, o que pode falsear os resultados obtidos), para determinar com precisão os valores das velocidades de propagação das ondas P e S no maciço investigado.

Para ensaios realizados em maciços terrosos, geralmente são utilizados espaçamentos entre furos em torno de 3 metros. Os furos devem estar o mais próximo possível da verticalidade, revestidos com tubo de PVC, tamponados na base e com espaço anelar preenchido com calda de cimento (Figura 1).

Informações mais detalhadas sobre o ensaio *crosshole* podem ser obtidas em ASTM 4428 (2007) e Prado (1994).

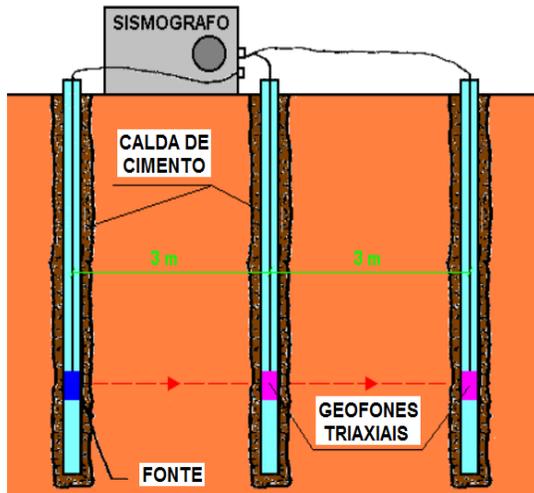


Figura 1 - Ensaio crosshole.

3. Ensaio SDMT

O dilatômetro de Marchetti (DMT) é um equipamento desenvolvido com a finalidade de obter parâmetros geotécnicos de solos em investigações de campo. O seu princípio de funcionamento consiste em aplicar pressões ao solo, através de uma membrana metálica instalada na face lateral de uma lâmina muito delgada de aço inoxidável e de altíssima resistência.

Com a aplicação da pressão, a membrana se expande contra o solo até atingir um valor máximo de deslocamento que pode ser medido na superfície do terreno.

Aplicar uma pressão e medir a correspondente deformação no solo equivale a obter informações relativas ao comportamento “tensão x deformação”, permitindo a determinação dos índices dilatométricos e a avaliação de numerosos parâmetros geotécnicos.

Em conjunto com os ensaios DMT podem ser realizados ensaios sísmicos por meio de um módulo adaptado ao sistema tradicional. Este módulo tem dois geofones espaçados de 50cm que registram o tempo de propagação da onda S gerada na superfície (Figura 2).

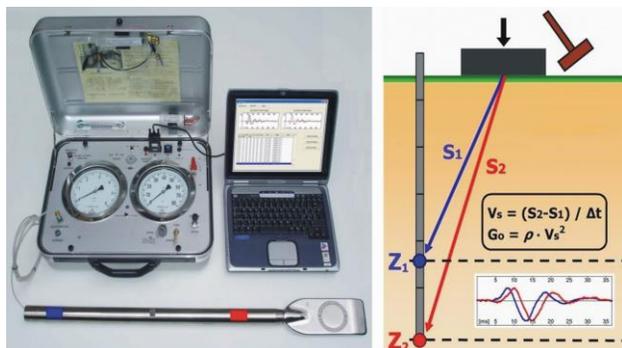


Figura 2 - Equipamento SDMT e a execução do ensaio.

Alguns ensaios geotécnicos convencionais vêm incorporando sistemas para aquisição de ondas sísmicas em suas ferramentas. O modo de aquisição dos dados muito se assemelha ao conhecido ensaio sísmico downhole (ASTM D7400, 2008). Dois exemplos destes ensaios são o piezocone sísmico (SCPT) e o dilatométrico sísmico (SDMT), abordado neste trabalho.

4. Levantamentos de campo

Os levantamentos de campo foram realizados em um terreno localizado no município de Santo André (região metropolitana de São Paulo-SP), antes da construção de dois edifícios, a pedido de um consultor/engenheiro de fundações.

Na primeira etapa foram realizados os ensaios crosshole em um conjunto composto por 5 furos com 20 metros de profundidade cada. Os furos estavam dispostos segundo uma geometria ortogonal, formando um quadrado, com um furo localizado no seu centro e os demais furos nas suas arestas. A distância entre os furos era de aproximadamente 3 metros (Figura 3).

Na realização do ensaio crosshole foi utilizado apenas o registro da onda S, o que permitiu uma comparação direta com os resultados do ensaio SDMT.

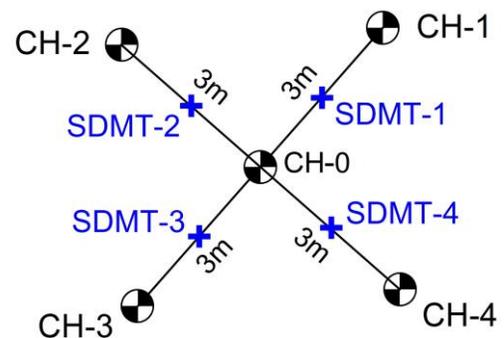


Figura 3 - Geometria dos furos dos ensaios crosshole (CH) e a localização dos pontos dos ensaios SDMT.

A fonte de ondas sísmicas foi posicionada no furo central (CH-0) e os geofones nos demais furos (CH-1, CH-2, CH-3 e CH-4). Portanto, com esta geometria puderam ser realizados quatro ensaios crosshole em direções ortogonais entre si, em uma típica configuração formada por dois furos, com a fonte em furo e o geofone no furo adjacente. As medidas em profundidade foram obtidas em intervalos de 1 metro.

Para a geração da onda S foi utilizada uma fonte mecânica direcional e reversível, capaz de provocar esforços cisalhantes gerados em sentidos contrários, especialmente fabricada para operação em furos de sondagem (martelo de furo).

Para a recepção da onda foram utilizados geofones de 8Hz, providos de mecanismo pneumático para fixação nas paredes do furo (Figura 4). Os dados foram registrados em um sismógrafo de 12 canais, modelo SmartSeis (Geometrics, Inc.)



Figura 4 - Fonte de onda cisalhante (esquerda); geofone triaxial de furo (direita).

Os ensaios *SDMT* foram realizados em quatro pontos posicionados na metade da distância entre a fonte e o receptor de cada um dos quatro ensaios *crosshole* (Figura 3).

Desta forma, os resultados dos dois ensaios puderam ser efetivamente comparados, pois o volume investigado pelo ensaio *crosshole* abrange o material compreendido entre os dois furos, onde se encontravam posicionados a fonte e o geofone. A Figura 5 apresenta um típico registro obtido do ensaio *crosshole*.

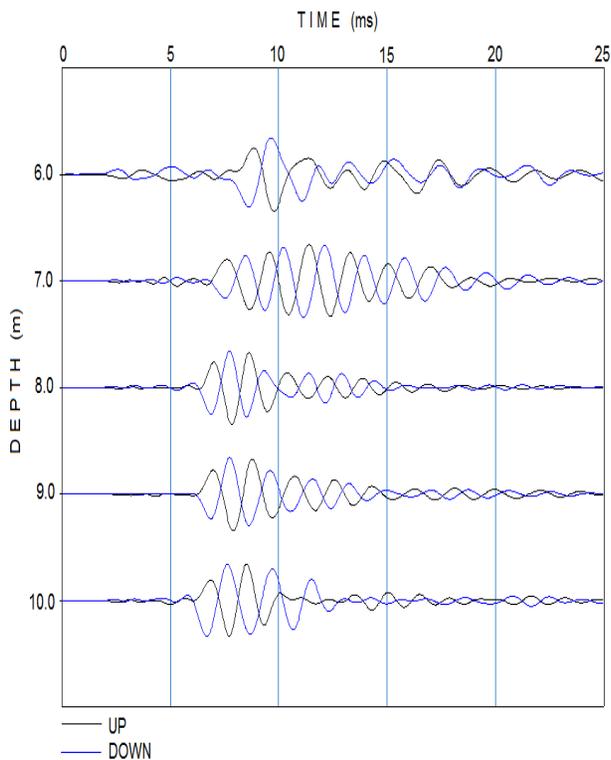


Figura 5 - Registros da onda S obtido do ensaio *crosshole* (CH-4, profundidades: 6m a 10m).

As medidas com o ensaio *SDMT* foram obtidas em intervalos de 0,5m, desde a superfície do terreno até a profundidade na qual o sistema de cravação encontrou suficiente resistência à penetração da ferramenta, impedindo o seu avanço. No *site* investigado foram alcançadas penetrações até a profundidade de 13 metros. A Figura 6 apresenta alguns registros de campo do ensaio *SDMT*.

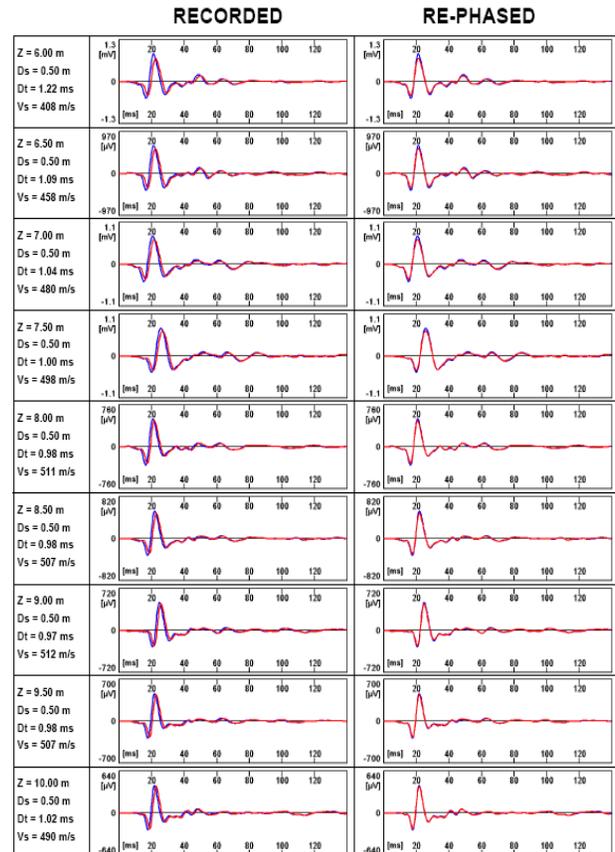


Figura 6 - Registros da onda S obtido do ensaio *SDMT* (SDMT-4, profundidades: 6m a 10m).

5. Resultados

Os resultados dos ensaios *crosshole* e *SDMT* são apresentados graficamente, mostrando os valores de V_s em função da profundidade (Figura 7). Verifica-se uma excelente concordância dos dados, o que demonstra a qualidade do ensaio *SDMT* para obtenção de parâmetros sísmicos do terreno.

Observa-se um progressivo aumento dos valores de V_s até aproximadamente 7m, seguida de uma tendência de estabilização, após esta profundidade.

O horizonte situado entre 7m e 11m, onde foram verificados os maiores valores de V_s ao longo do perfil, corresponde a uma camada de argila rija a dura, com N_{SPT} médio em torno de 30. Neste intervalo de profundidades foram assentadas as fundações dos edifícios.

A partir de 15m de profundidade, os perfis de três ensaios *crosshole* (CH-1, CH-3 e CH-4) mostram uma tendência de queda de V_s , indicando a ocorrência de uma camada de menor rigidez em relação à camada sobrejacente.

Este tipo de situação, conhecido na geofísica como “inversão de velocidade”, é um problema difícil de ser identificado por qualquer outro ensaio sísmico de superfície. Daí a importância de ensaios realizados em furos de sondagens (*crosshole* e *downhole*), em investigações geotécnicas onde pode ocorrer este tipo de situação.

O ensaio *SDMT*, por sua vez, possui um aspecto muito positivo em relação ao *crosshole* ou ao *downhole*. O perfil de V_s , com resultados bastante confiáveis conforme mostrado neste trabalho, pode ser obtido sem a necessidade de um furo previamente preparado para a realização do ensaio.

A desvantagem do *SDMT* está no seu desempenho em terrenos que oferecem elevada resistência ao sistema de cravação do equipamento, como em solos com elevada rigidez ou com a presença de blocos de rocha. Neste caso, a investigação deve contar com os tradicionais ensaios *crosshole* ou, opcionalmente, o *downhole*.

6. Conclusões

Os ensaios *crosshole* e *SDMT* realizados neste trabalho apresentaram uma excelente concordância nos respectivos perfis de V_s versus profundidade.

A investigação dos ensaios *SDMT* alcançaram 13m, pois o sistema de cravação encontrou elevada resistência à penetração nesta profundidade.

Com o ensaio *crosshole*, realizados em furos com 20 metros de profundidade, foi possível identificar a presença de uma camada de baixa velocidade, um problema de difícil solução para outros métodos sísmicos de superfície (a refração, por exemplo). Entretanto, é um ensaio com custo relativamente elevado, pois requer a execução (e preparação) de pelo menos dois furos.

O ensaio *SDMT*, que não requer furos de sondagens previamente preparados para a sua execução, mostrou ser uma excelente alternativa para obter, com precisão, os perfis de V_s em profundidade.

7. Agradecimentos

A empresa Damasco Penna, por disponibilizar os resultados dos ensaios *SDMT* que, juntamente com os dados dos ensaios *crosshole* obtidos pelo IPT, possibilitaram a elaboração deste artigo.

8. Referências bibliográficas

- Anderson, N., Thitimakorn, T., Ismail, A., Hoffman, D. 2007. A comparison of four geophysical methods for determining the shear wave velocity of soils. *Environmental & Engineering Geoscience*, v.13, n.1, p.11-23.
- ASTM-D4428. 2007. Standard Test Methods for Crosshole Seismic Testing, 11p.
- ASTM-D7400. 2008. Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing, 11p.
- Eikmeier, C.N. 2014. Emprego do método MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) em área urbana: um estudo na cidade de São Paulo. Monografia (Trabalho de Graduação) - IAG-USP, São Paulo, 41p.
- Gandolfo, O.C.B; Silva, I.V. 2013. A obtenção de velocidades da onda S por diferentes métodos sísmicos. In:13º International Congress of The Brazilian Geophysical Society - Expanded Abstracts (CD-ROM), Rio de Janeiro-RJ.
- Prado, R.L. 1994. O ensaio sísmico entre furos (“crosshole”) no estudo de maciços terrosos e rochosos. Dissertação (Mestrado) - IAG-USP, São Paulo, 123p.

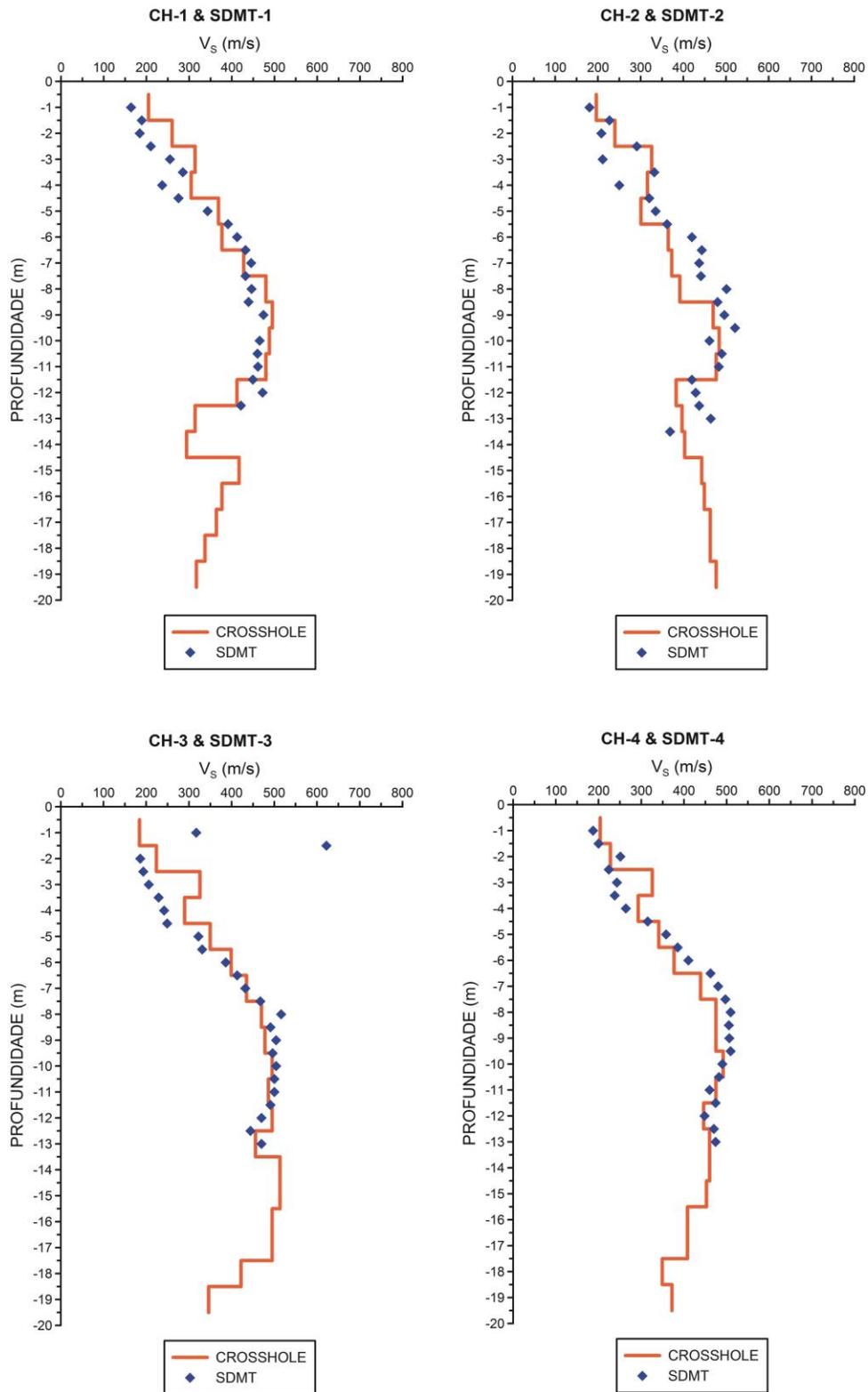


Figura 7 - Perfis de velocidade da onda S em função da profundidade, resultante dos ensaios *crosshole* (traço contínuo em laranja) e SDMT (pontos em azul).