

TÉCNICAS PARA DETERMINAÇÃO *IN SITU* DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA DE CORTE*

Techniques for *In Situ* Measurement of Shear Wave Velocity

por

LUÍS FIALHO RODRIGUES**

RESUMO – A velocidade de propagação das ondas de corte é um parâmetro importante no estudo do comportamento dinâmico das formações geológicas, exigindo a sua determinação *in situ*, ao contrário das ondas de compressão, a utilização de técnicas especiais envolvendo a fonte, equipamentos de registo e procedimentos de campo.

Este trabalho descreve as técnicas que têm sido utilizadas com sucesso na determinação *in situ* da velocidade de propagação da onda de corte.

Apresentam-se e discutem-se ainda os resultados obtidos nalguns dos locais onde foram realizados ensaios.

SYNOPSIS – Shear wave velocity is an important parameter for the study of the dynamic response of geological formations. Contrary to the determination of compression wave velocity the obtaining of such a parameter requires the use of specific techniques as concerns wave source, recording equipment and field procedures.

This work describes the techniques that have successfully been used for *in situ* measurement of shear wave velocity.

Results obtained at some test sites are also presented and discussed.

1 – INTRODUÇÃO

A velocidade de propagação de ondas de corte tem conhecido uma crescente aplicação em problemas de geologia de engenharia, principalmente na

* Trabalho apresentado no III International Congress of Engineering Geology. Madrid. September 1978.

** Geólogo. Estagiário para Especialista da Divisão de Prospeção do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. GEOTECNIA 28

caracterização mecânica de solos e rochas. Como se sabe, a velocidade de propagação das ondas de corte, juntamente com a das ondas de compressão, permite o cálculo dos módulos dinâmicos de elasticidade a partir das seguintes expressões:

$$G = \rho (V_s)^2 \quad (1)$$

$$E_d = 2G (1 + \nu_d) \quad (2)$$

$$\nu_d = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1} \quad (3)$$

ρ = massa volúmica

V_p = velocidade da onda de compressão

V_s = velocidade da onda de corte

G = módulo de rigidez dinâmico

E_d = módulos de Young dinâmico

ν_d = coeficiente de Poisson dinâmico

Os módulos dinâmicos de elasticidade são indicadores do comportamento mecânico de solos e rochas. Por outro lado, o módulo de rigidez dinâmico (G) é um parâmetro cuja aquisição é actualmente considerada indispensável em todas as teorias que tratam da análise da resposta de construções à excitação dinâmica das fundações, nomeadamente da resposta à acção de sismos, como por exemplo no caso de centrais nucleares, grandes barragens de terra, pontes, etc.

A velocidade de propagação da onda de corte pode ainda ser usada na caracterização mecânica de solos saturados por, ao contrário da onda de compressão, não ser influenciada pela presença da água.

As técnicas para determinação *in situ* da velocidade de propagação das ondas de compressão são relativamente simples e estão normalizadas. O mesmo não acontece com as ondas de corte, em que a determinação *in situ* da sua velocidade de propagação oferece bastantes dificuldades, derivadas principalmente da sua velocidade de propagação ser menor do que a da onda de compressão

e dos tempos envolvidos nos ensaios serem normalmente muito pequenos. Estes factos originam que, nos registos obtidos em ensaios correntes, a onda de corte apareça normalmente misturada com outros tipos de ondas, tornando-se assim bastante difícil a identificação do seu instante de chegada.

Na determinação *in situ* da velocidade de propagação da onda de corte têm sido usadas diversas técnicas especiais envolvendo a fonte, os receptores e os procedimentos de campo, com a dupla finalidade de privilegiar a sua produção e facilitar a sua identificação nos registos.

No presente trabalho descrevem-se algumas técnicas que têm sido utilizadas pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil na determinação *in situ* da velocidade de propagação da onda de corte e apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos nalguns dos locais onde foram realizados ensaios.

2 – TÉCNICAS USADAS NA DETERMINAÇÃO *IN SITU* DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA DE CORTE

2.1 – *Determinação ao longo de furos de sondagem*

Esta técnica consiste basicamente em originar ondas elásticas à superfície do terreno, próximo da boca de um furo de sondagem, e medir os seus tempos de propagação até diversos pontos ao longo desse furo.

Dois dos aspectos mais importantes a considerar quando se utiliza esta técnica prendem-se com o tipo de fonte, que deve ser rica na geração de ondas de corte, e com os geofones a utilizar para recepção das ondas, os quais devem permitir um bom acoplamento às paredes do furo. Para realização dos ensaios é preferível a utilização de furos não revestidos embora nos casos em que seja necessário um revestimento para aguentar as paredes do furo se possam obter bons resultados desde que se consiga um adequado acoplamento entre os receptores e o revestimento e entre este e o terreno circundante.

Na Fig. 1 estão esquematicamente representados a técnica e os equipamentos utilizados nos ensaios que têm sido realizados.

As ondas de corte são originadas por uma fonte colocada à superfície do terreno e que consiste numa placa de madeira em que se aplicam impulsos horizontais. Para reduzir os deslocamentos relativos entre a fonte e o terreno, os quais são fonte de perturbações que prejudicam a qualidade dos registos, exerce-se

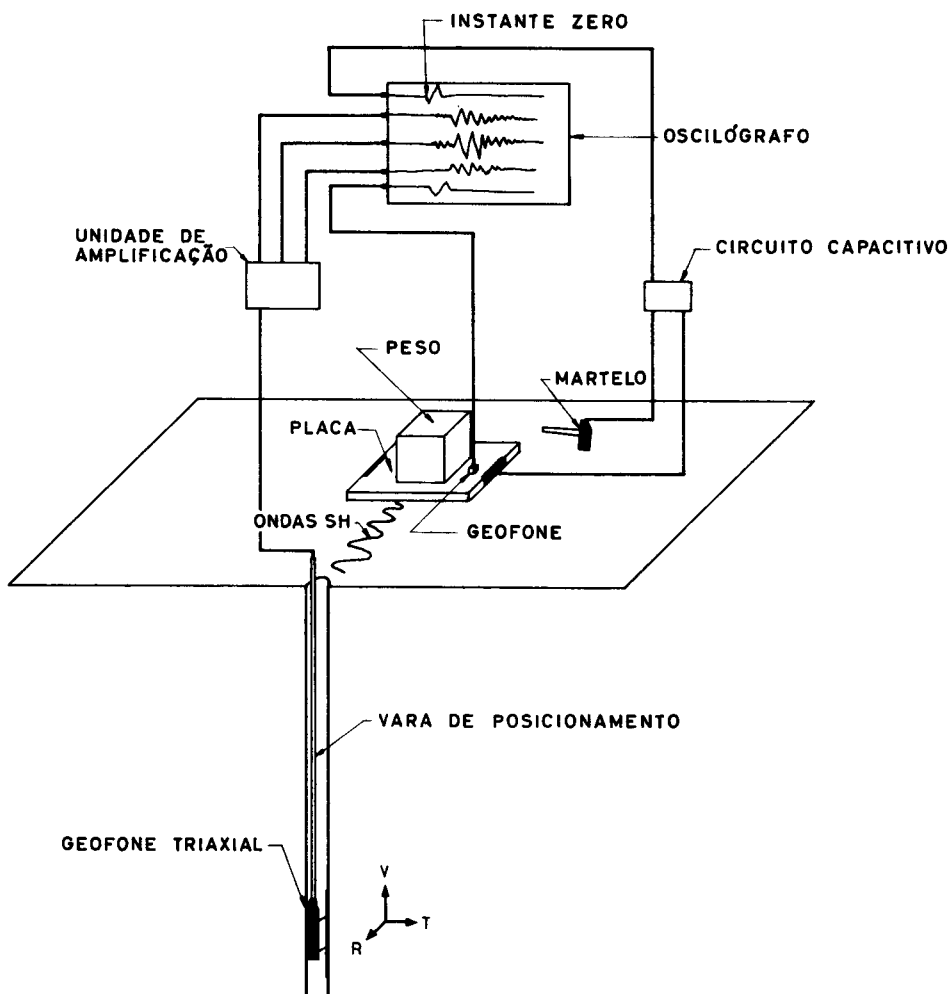


Fig. 1 – Esquema do método de medição ao longo de furos de sondagem (fonte à superfície)

uma força vertical sobre a tábua, que nas experiências que têm sido realizadas tem sido materializada pelo peso de uma viatura Land-Rover assente sobre a placa.

Uma fonte deste tipo produz fundamentalmente ondas de corte directas e polarizadas horizontalmente (ondas SH) as quais são recebidas num geofone triaxial, especialmente construído para o efeito, e no qual estão incorporados transdutores que registam as três componentes da velocidade de vibração das partículas:

vertical (V), radial (R) e transversal (T). O geofone é fixado às paredes do furo por meio de um dispositivo mecânico operado da superfície e é devidamente orientado por meio de varas metálicas suspensas no furo.

Para a execução de um ensaio procede-se geralmente do seguinte modo:

Uma vez colocado o geofone triaxial no furo e à profundidade desejada, aplica-se um impulso horizontal numa das extremidades da placa de madeira à custa de uma pancada com um martelo, gerando-se simultaneamente, e por meio de um circuito capacitivo, um sinal eléctrico que é recebido num dos canais do oscilógrafo e que dá a origem dos tempos.

Para o controlo do instante de contagem dos tempos (tempo zero) está colocado na placa um geofone ligado directamente a um dos canais do oscilógrafo.

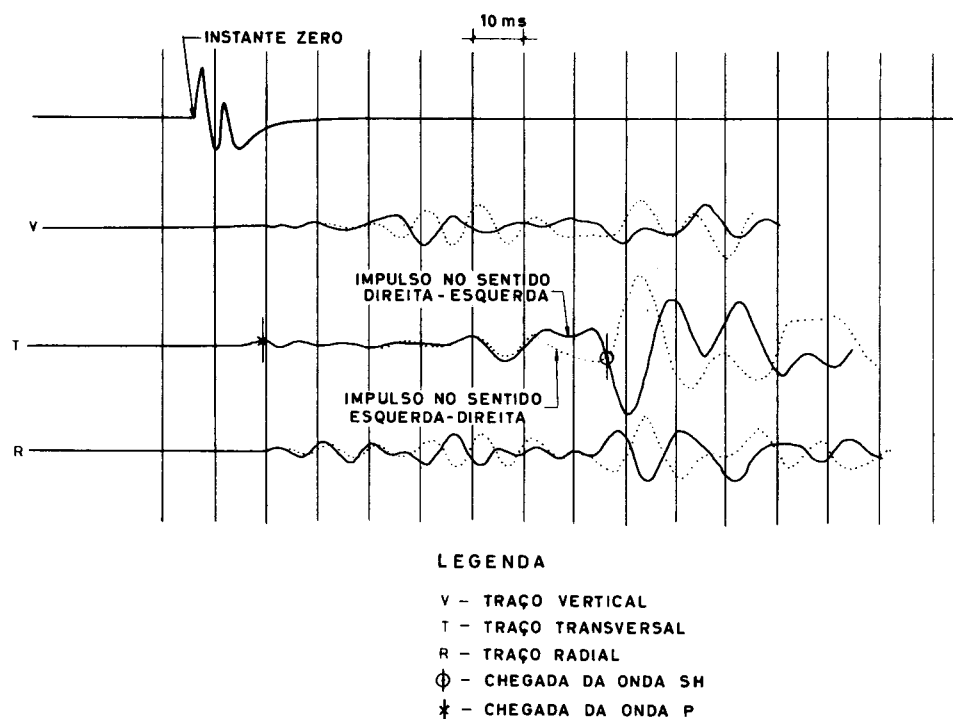


Fig. 2 – Registo oscilográfico obtido com o método de determinação da velocidade de propagação de ondas elásticas ao longo de furos de sondagem. (Desenho do original)

As ondas elásticas directas originadas por meio da pancada numa das extremidades da placa são recebidas no geofone triaxial e os sinais eléctricos originados nos transdutores são transmitidos, depois de devidamente amplificados, ao oscilógrafo, onde são registados. Depois de obtido um registo a partir da pancada numa das extremidades da placa, aplica-se um impulso horizontal na extremidade oposta de modo a inverter a fase do sinal e faz-se um novo registo. Completado este procedimento muda-se o geofone triaxial para outra profundidade e repete-se o ensaio.

Dado que a fonte utilizada produz fundamentalmente ondas do tipo SH a identificação de ondas de corte é feita principalmente a partir da análise das componentes horizontais dos registos e nomeadamente da componente transversal (T), onde, de acordo com o procedimento usado, deverá ser detectada a maior parte da energia produzida pela fonte. A inversão de fase do sinal, realizada à custa da pancada na extremidade oposta da placa, é também utilizada para melhor identificação da onda SH nas componentes horizontais dos registos, pois a sua chegada é caracterizada por uma inversão de fase da onda de 180° quando se inverte o sentido da pancada. Estas características das ondas SH foram aproveitadas para a sua identificação no registo apresentado na Fig. 2.

2.2 – Determinação entre furos de sondagem

Esta técnica de determinação da velocidade de propagação de ondas elásticas consiste basicamente em medir o tempo de percurso de ondas volumétricas directas entre dois pontos de um dado volume de terreno e ao longo de um trajecto suposto horizontal. As ondas volumétricas são produzidas por um impulso num furo de sondagem, sendo medidos os tempos de chegada a dois geofones colocados em furos adjacentes e ao mesmo nível em que se originou a perturbação no primeiro furo. Conhecendo as distâncias entre os dois furos, ao nível a que se faz o ensaio, calcula-se a velocidade de propagação das ondas dividindo a distância pelo respectivo tempo de percurso.

O afastamento entre os furos depende das condições geológicas do local onde se realizam os ensaios e deve ser tal que permita tempos de percurso mensuráveis pelos aparelhos de registo utilizados e ser suficientemente pequeno para permitir medir as velocidades reais de cada camadã. Para a execução dos ensaios devem ser usados furos não revestidos. No caso de ser necessário usar revestimento para sustentar as paredes dos furos deve garantir-se que os geofones

fiquem devidamente fixados às paredes do revestimento e que não fiquem vazios entre este e o terreno natural.

Dado que os intervalos de tempo normalmente medidos são muito pequenos torna-se necessário, para uma correcta determinação das velocidades, conhecer com exactidão as distâncias entre os furos às profundidades a que são executados os ensaios, devendo por isso a sua atitude ser convenientemente determinada.

Na Fig. 3 estão esquematicamente representados a técnica e os equipamentos que têm sido utilizados.

Para a execução de um ensaio procede-se geralmente do seguinte modo:

No fundo de um dos furos verticais coloca-se uma vara metálica e em dois furos adjacentes dois geofones triaxiais que têm incorporados transdutores do

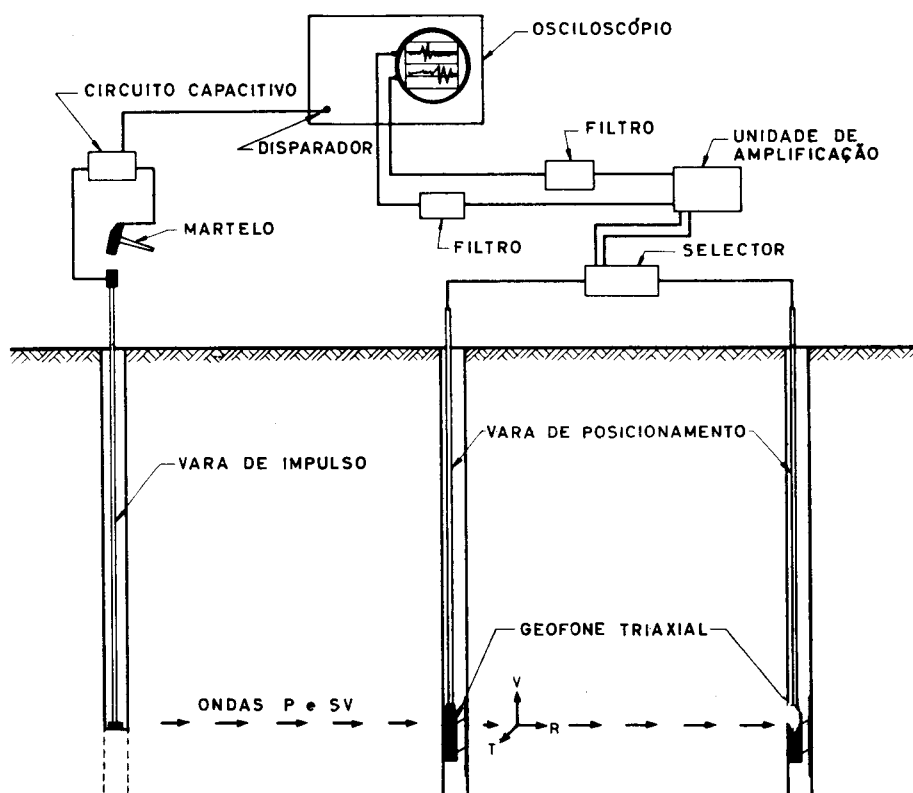


Fig. 3 – Esquema do método de medição entre furos de sondagem

tipo “velocity gage” que permitem registar as três componentes da velocidade de vibração das partículas: vertical (V), radial (R) e transversal (T). Os geofones são fixados às paredes dos furos por meio de um dispositivo mecânico operado da superfície e são devidamente orientados por meio de varas metálicas suspensas no furo. A utilização de geofones fixados às paredes dos furos permite que sejam perfurados de uma só vez os furos em que são recebidas as ondas e apenas o furo em que está colocada a fonte terá de ir sendo perfurado à medida que vão sendo realizados os ensaios, o que se traduz numa maior rapidez na execução dos ensaios e numa diminuição do seu custo.

Seguidamente, à custa de uma pancada com um martelo no topo da vara metálica, descarrega-se um circuito capacitivo que gera um sinal que dispara o osciloscópio. O impulso transmitido ao fundo do furo gera ondas volumétricas cujas chegadas aos geofones adjacentes produzem sinais eléctricos que, depois de amplificados, são projectados no osciloscópio e ao mesmo tempo fotografados. Como registador alternativo do osciloscópio tem sido utilizado um oscilógrafo de 12 canais.

A utilização duma fonte da do tipo descrito leva a que sejam geradas principalmente ondas de corte polarizadas verticalmente (ondas SV), o que, de acordo com o procedimento seguido na realização dos ensaios, implicará que a maior parte da energia transmitida apareça nos registos distribuída principalmente pela componente vertical (V).

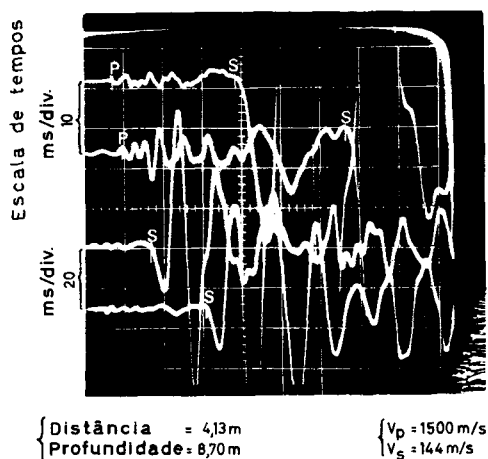


Fig. 4 – Registo obtido com o osciloscópio em ensaios entre furos de sondagem

Na Fig. 4 apresenta-se um registo que foi obtido utilizando o osciloscópio e no qual estão apenas representadas as componentes verticais das ondas chegadas aos geofones triaxiais. Dado que utilizando o osciloscópio se dispõe apenas de 2 canais, a selecção das componentes a registar é feita por um dispositivo adequado intercalado no sistema de registo (Fig. 3). Na Fig. 5 apresenta-se um registo obtido com o oscilógrafo no qual estão registadas as três componentes da onda e em que os ganhos relativos são os mesmos nos 3 canais. Neste registo está bem evidenciado que a maior parte da energia transmitida pela fonte está contida na onda SV, recebida principalmente na componente vertical. Assinala-se ainda que este registo foi obtido utilizando apenas um furo de sondagem para recepção das ondas transmitidas pela fonte, sendo o início de contagem dos tempos

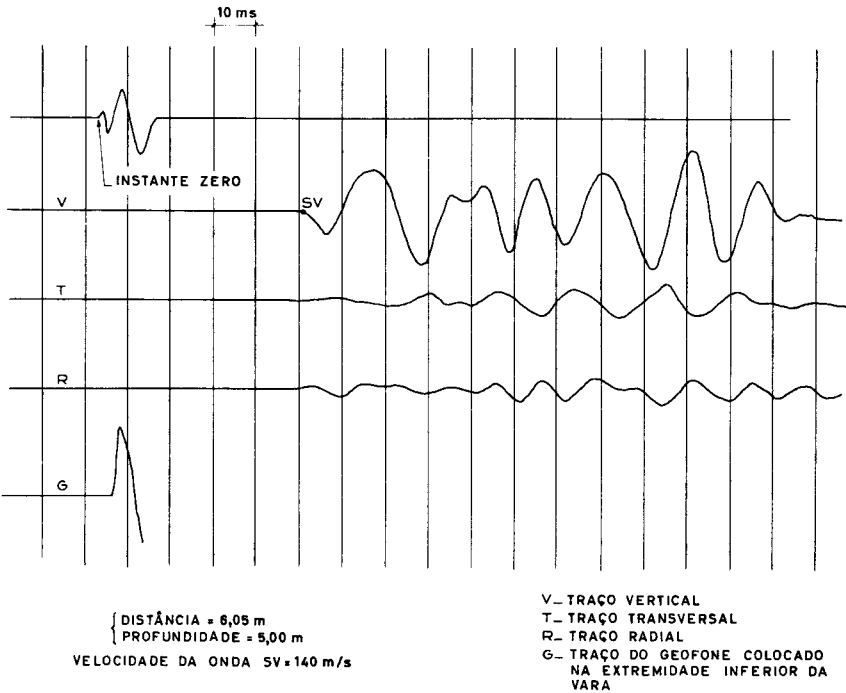


Fig. 5 – Registo oscilográfico obtido com o método de medição entre furos de sondagem. (Desenhado do original)

(tempo zero) dado pelo instante de chegada da onda transmitida ao longo da vara metálica a um geofone, que está directamente ligado a um dos canais do oscilógrafo.

3 – RESULTADOS OBTIDOS

Utilizando as técnicas descritas no capítulo 2 o LNEC tem determinado a velocidade de propagação de ondas de corte em diversos locais, apresentando-se seguidamente os resultados obtidos em algumas das experiências realizadas.

3.1 – *Local do Ferrel*

Trata-se do local previsto para implantação de uma central nuclear. Foram realizados ensaios de determinação da velocidade de propagação de ondas volumétricas utilizando a técnica de medição entre furos de sondagem.

Os ensaios foram realizados em 6 conjuntos de 3 furos verticais afastados de 4 metros entre si e que foram revestidos usando tubagem de ferro. Para garantir que não ficassem eventuais vazios entre o revestimento e o terreno procedeu-se à injeção de calda de cimento. Para determinação correcta das distâncias entre os furos às profundidades a que foram realizados os ensaios determinou-se a sua atitude, tendo sido utilizado para o efeito um inclinómetro. Este levantamento mostrou que o fundo dos furos chega a apresentar desvios de 1,80 metros em relação à sua posição teórica, o que demonstra a necessidade de se proceder ao levantamento da atitude dos furos em que são realizados os ensaios sempre que se necessite de um conhecimento exacto das velocidades de propagação de ondas volumétricas, determinadas com base na utilização da técnica de medição das velocidades entre furos de sondagem.

Utilizando esta técnica foram realizados ensaios de determinação das velocidades até cerca de 50 metros de profundidade.

As formações ocorrentes no local são constituídas principalmente por uma alternância de areias siltosas, médias a grosseiras, com seixo e siltitos argilosos.

Os valores de velocidades de propagação das ondas de corte medidos variam entre cerca de 300 a 1200 m/s, apresentando a velocidade, de uma maneira geral, um aumento com a profundidade. As velocidades de propagação das ondas

de corte nas areias siltosas, com seixo e nos siltitos argilosos não são muito diferentes, apresentando valores médios de 585 e 715 m/s, respectivamente.

As velocidades de propagação das ondas de compressão oscilam entre cerca de 1300 e 2200 m/s, com um valor médio de 1800 m/s e foram influenciadas pelo facto de as formações se encontrarem saturadas (a velocidade de propagação das ondas P na água é de 1500 m/s) devido à ocorrência de um nível freático relativamente próximo da superfície.

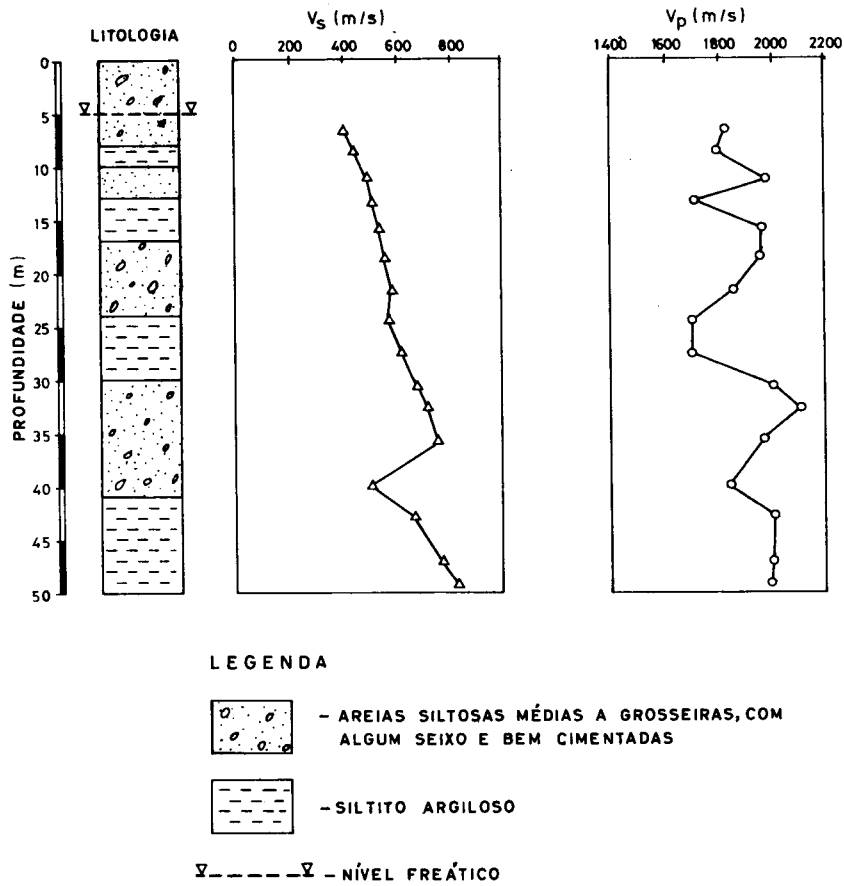


Fig. 6 – Ferrel – Velocidades de propagação de ondas de corte e de compressão entre furos de sondagem

Na Fig. 6 apresenta-se um perfil tipo da litologia das formações ocorrentes no local e nela estão igualmente representados valores típicos de velocidades de propagação de ondas de corte e de compressão determinados nos ensaios realizados.

3.2 – *Local de Castro Marim*

Trata-se do local previsto para a construção de uma ponte internacional sobre o rio Guadiana.

Os ensaios sísmicos realizados tiveram como finalidade a caracterização dinâmica *in situ* das formações aluvionares que ocorrem no local, as quais chegam a atingir espessuras de cerca de 80 metros e que constituem 2 complexos litológicos principais: um complexo areno-lodoso, englobando areias finas a médias, por vezes muito lodosas e lodos arenosos, e um complexo grosseiro formado por areias grosseiras com seixos e calhaus.

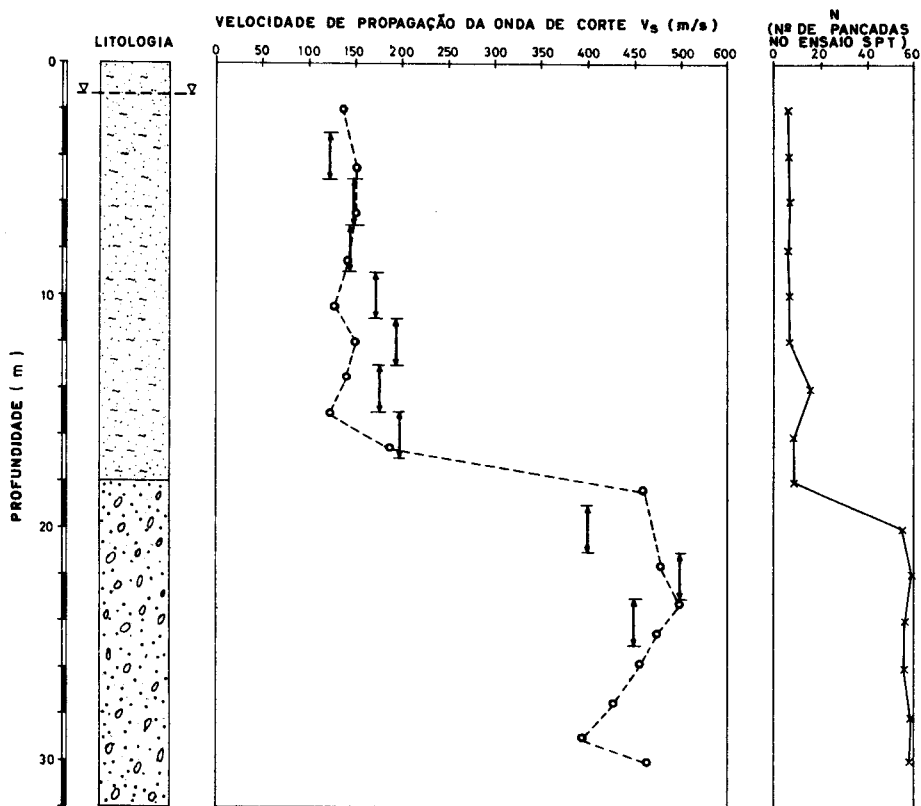
Neste local foram realizados ensaios de determinação da velocidade de propagação de ondas volumétricas utilizando as técnicas de medição entre furos e ao longo de furos de sondagem, e de acordo com os procedimentos descritos no capítulo 2.

Dadas as fracas características geotécnicas das formações aluvionares, os furos utilizados para os ensaios tiveram de ser revestidos tendo sido utilizadas tubagens de ferro e de plástico PVC rígido de parede fina. Em qualquer dos casos se obtiveram resultados aceitáveis utilizando a técnica de medição entre furos de sondagem. Na determinação das velocidades ao longo de furos de sondagem obtiveram-se melhores resultados usando tubo PVC como revestimento. A atitude dos furos foi igualmente determinada a partir do seu levantamento inclinométrico.

Foram assim executados ensaios de determinação das velocidades de propagação de ondas elásticas até cerca de 32 metros de profundidade.

As velocidades de propagação de ondas longitudinais que foram medidas apresentam um valor médio de 1500 m/s nas areias finas, lodosas, e de 1700 m/s nas areias grosseiras, com seixos e calhaus, tendo os valores obtidos sido influenciados pelo facto de as formações se encontrarem saturadas devido à existência de um nível freático muito próximo da superfície.

As velocidades de propagação das ondas de corte medidas no local variam entre cerca de 120 e 200 m/s nas areias finas a médias, lodosas, e entre cerca de 400 e 500 m/s nas areias grosseiras com seixos e calhaus, portanto cerca de 3 vezes superiores.



LEGENDA

-  — AREIAS LODOSAS, FINAS A MÉDIAS
-  — AREIAS GROSSEIRAS, COM SEIXO
- o — VELOCIDADE DA ONDA DE CORTE DETERMINADA ENTRE FUROS DE SONDAGEM
- I — VELOCIDADE DA ONDA DE CORTE DETERMINADA AO LONGO DE FUROS DE SONDAGEM
- — NÍVEL FREÁTICO

Fig. 7 – Castro Marim – Velocidades de propagação da onda de corte entre furos e ao longo de furos de sondagem

Na Fig. 7 apresenta-se um perfil tipo da litologia das formações aluvionares ocorrentes no local e nela está igualmente representada a variação com a profundidade das velocidades de propagação das ondas de corte determinadas com as duas técnicas já citadas.

Os valores obtidos com as duas técnicas foram da mesma ordem de grandeza; assim, utilizando a técnica de medição entre furos de sondagem as ondas de corte apresentam valores médios da velocidade de propagação de 145 m/s nas areias finas a médias, lodosas, e de 455 m/s nas areias grosseiras, com seixo e calhau, sendo os valores médios nas mesmas formações respectivamente de 165 e 433 m/s quando foi utilizada a técnica de medição ao longo de furos de sondagem. No entanto a utilização desta última técnica tornou-se muito difícil para profundidades superiores a 25 metros, devido à grande atenuação sofrida pelas ondas S e à sua contaminação nos registos por outros tipos de ondas, nomeadamente do tipo onda de Stonelley.

Na Fig. 7 está ainda representada a variação com a profundidade dos resultados dos ensaios SPT, mostrando os valores de N (número de pancadas obtidas na 2.^a fase do ensaio SPT), a mesma tendência de variação da velocidade de propagação da onda de corte. Assim, aos mais baixos valores de N, inferiores a 10 pancadas, obtidos nas areias fina a médias, lodosas, correspondem valores de V_s inferiores a 200 m/s; para valores de N superiores a 50 e obtidos nas areias grosseiras, com seixo e calhau, os valores de V_s são superiores a 400 m/s. Lembrando que as velocidades de propagação médias da onda de compressão são de 1500 m/ nas areias finas, lodosas e de 1700 m/s nas areias grosseiras, com seixo e calhau, e portanto praticamente da mesma ordem de grandeza, é de salientar o importante papel que as ondas de corte poderão desempenhar na caracterização de formações sedimentares saturadas.

4 – CONCLUSÕES

Na caracterização de formações sedimentares saturadas é fundamental a determinação da velocidade de propagação de ondas de corte as quais, ao contrário das ondas de compressão não são influenciadas pela presença da água.

A velocidade de propagação de ondas de corte *in situ* foi obtida usando quer a técnica de medição entre furos de sondagem quer a técnica de medição ao largo de furos de sondagem, tendo sido efectuadas medições até cerca de 50 metros de profundidade.

O uso de geofones triaxiais, que permitem registrar as 3 componentes de vibração das partículas, é indispensável para a correcta identificação de ondas de corte quando se utiliza para a sua produção uma fonte à superfície e se faz o seu registo ao longo de furos de sondagem. Quando se utiliza a técnica de medição entre furos de sondagem o uso de geofones triaxiais fixados às paredes dos furos aumenta a rapidez de execução dos ensaios e diminui o seu custo.

A técnica de medição ao longo de furos de sondagem necessita apenas de um furo enquanto que a técnica de medição entre furos de sondagem necessita de pelo menos 2 furos de sondagem. No entanto e principalmente em formações aluvionares, devido aos altos coeficientes de absorção das ondas de corte e à contaminação dos registos por outros tipos de ondas, principalmente do tipo de onda de Stonelley, a identificação de ondas S para profundidades superiores a 25 metros, tornou-se muito problemática dada a má qualidade dos registos obtidos. Por sua vez, o uso da técnica de medição entre furos de sondagem permitiu a obtenção de registos de boa qualidade até cerca de 50 metros de profundidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALLARD, F. R. and McLEAN, F. G. – “Seismic field method for *in situ* moduli”. Miscellaneous paper S-75-10, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg. April, 1975.
- CHERRY, J. – “The azimuthal and polar radiation pattern from a horizontal stress applied at the surface of an elastic half space”. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 52, pg. 27-36. 1962.
- JOLLY, R. N. – “Investigations of shear waves”. Geophysics, Vol. 21, No. 4, pg. 905-938. October, 1956.
- MOONEY, H. M. – “Seismic shear waves in engineering”. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. No. 618, pg. 905-921. August, 1974.
- SHIMA, E. and OHTA, Y. – “Experimental study on generation and propagation of S waves: I. Designing SH – wave generator and its field tests”. Bulletin of Earthquake Research Institute of Tokyo, Japan, vol. 45, pg. 19.31. 1967.
- STOKOE, K. H. and WOODS, R. D. – “*In situ* shear wave velocity by crosshole method”. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, vol. 98, No. SM 5, pg. 443-453. May, 1972.