

ONDAS SÍSMICAS SUPERFICIAIS: A SUA UTILIZAÇÃO NA CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

SEISMIC SURFACE WAVES: THEIR USE IN GEOTECHNICAL CHARACTERIZATION

Lopes, Isabel, *Centro e Departamento de Geologia da FCUL, Lisboa, Portugal,*
Isabel.Lopes@fc.ul.pt

Santos, Jaime A., *ICIST e Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura do IST, Lisboa,*
Portugal, jaime@civil.ist.utl.pt

Almeida, Isabel Moitinho, *Centro e Departamento de Geologia da FCUL, Lisboa, Portugal,*
moitinho@fc.ul.pt

RESUMO

O perfil de velocidade de propagação da onda de corte (V_S) é considerado como a informação mais relevante para a determinação da influência das condições geotécnicas locais nas características da acção sísmica. Os métodos sísmicos de superfície que recorrem à utilização de ondas superficiais como meio para obter o perfil de V_S , recorrendo a duas ou mais estações, são expeditos e permitem obter resultados com relação custo-benefício bastante apelativa. No entanto, a sua introdução em Portugal é recente e a possibilidade da sua utilização, em diversos enquadramentos geológico-geotécnicos, tem vindo a ser testada. Neste trabalho, apresenta-se o método das ondas sísmicas superficiais recorrendo a múltiplas estações. Realça-se a sua potencialidade de utilização em diversos contextos geológico-geotécnicos, apresentando resultados de duas campanhas de prospecção efectuadas sobre materiais aluvionares e solos residuais.

ABSTRACT

The shear wave velocity (V_S) profile is considered as the most relevant information to determine the influence of the local geotechnical conditions for the characterization of the seismic action. The surface seismic tests based on surface waves to obtain the V_S profile, using two or more stations, are fast and cost-effective. However, its implementation in Portugal is recent and the possibility of its use in different geologic-geotechnical environments is being tested. In this work, the multistation surface wave method is presented showing its potential for using in different geologic-geotechnical contexts, presenting test results in alluvial materials and residual soils.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com as recomendações do Eurocódigo 8 (prEN 1998-1, 2003), o perfil de velocidade de propagação da onda de corte é considerado como a informação mais relevante para a determinação da influência das condições geotécnicas locais nas características da acção sísmica. Deste modo, a utilização de ensaios sísmicos é fortemente recomendada.

Os ensaios sísmicos mais frequentes são os ensaios que recorrem a furos de sondagem (downhole, crosshole) mas que, apesar de proporcionarem resultados fiáveis, têm um custo elevado, associado à necessidade de execução dos furos. Estes ensaios entre e em furos têm

também como vantagem permitiriam observar os materiais que são atravessados pelas sondagens e, por conseguinte, conhecer as litologias que são atravessadas. No entanto, o volume de solo analisado é pequeno, não permitindo englobar a provável variabilidade litológica existente num maior volume de solo.

Os ensaios sísmicos de superfície de rápida execução, como a refacção sísmica, com custos mais reduzidos, permitem englobar nos resultados a variabilidade litológica local pela caracterização de um maior volume de solo. No entanto, normalmente estes ensaios recorrem à aquisição de ondas P, o que inviabiliza o seu interesse em locais em que o nível freático esteja próximo da superfície.

A utilização, na caracterização geotécnica, de métodos sísmicos de superfície, que recorrem à aquisição e processamento de ondas superficiais, como meio para obter V_s , tem vindo a aumentar desde a década de 80 do passado século, após a introdução do ensaio SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) pelo grupo de trabalho da Universidade de Austin no Texas (Nazarian & Stokoe, 1984). Estes métodos, usando duas ou mais estações, são métodos expeditos que permitem obter resultados em que a relação custo-benefício é bastante apelativa e têm vindo a ser utilizados nos mais variados tipos de obras. Com estes métodos é possível ultrapassar grande parte das desvantagens da refacção sísmica, quer de ondas P quer de ondas S, usando praticamente o mesmo equipamento de aquisição. No entanto, a sua introdução em Portugal é recente e a possibilidade da sua utilização em diversos enquadramentos geológico-geotécnicos tem vindo a ser testada (Lopes *et al.*, 2003; Lopes *et al.*, 2004a; Lopes *et al.*, 2004b; Lopes *et al.*, 2005; Lopes, 2005). Outros trabalhos recentes demonstram o interesse crescente nesta metodologia no nosso país (Ferreira, 2004; Fortunato, 2005).

Neste trabalho, pretende-se apresentar o método das ondas sísmicas superficiais recorrendo a múltiplas estações. Realça-se a sua potencialidade de utilização em diversos contextos geológico-geotécnicos, apresentando resultados de campanhas de prospecção efectuadas em diferentes locais do país, em materiais aluvionares na região de Lisboa e em solos residuais no Porto.

2. O MÉTODO DAS ONDAS SUPERFICIAIS

A aquisição, o processamento e a inversão são os 3 passos principais do método das ondas superficiais (Figura 1). Este método baseia-se no estudo do fenómeno da dispersão das ondas superficiais em meio verticalmente heterogéneo, isto é, diferentes frequências propagam-se com velocidades diferentes, designadas por velocidade de fase. Este fenómeno é usado como base para construir uma curva, que relaciona a velocidade de fase com a frequência (ou com o comprimento de onda), designada por curva de dispersão.

O objectivo principal do método é determinar a distribuição em profundidade da velocidade da onda de corte (ou do módulo de distorção). As ondas adquiridas são usualmente as ondas de Rayleigh, que correspondem a cerca de dois terços da energia produzida por uma fonte pontual (Richart *et al.*, 1970), e pode recorrer-se a diversas metodologias, fazendo variar, por exemplo, o número e tipo de receptores utilizados, o processo para obter a curva de dispersão e/ou o algoritmo de inversão (entre outros: Nazarian & Stokoe, 1984; Stokoe *et al.*, 1988; Kaynia & Hansteeem, 1997; Lai & Rix, 1998; Brown, 1998; Foti, 2000; Hebel, 2001; Svensson, 2001; Strobbia, 2003; O'Neill, 2004).

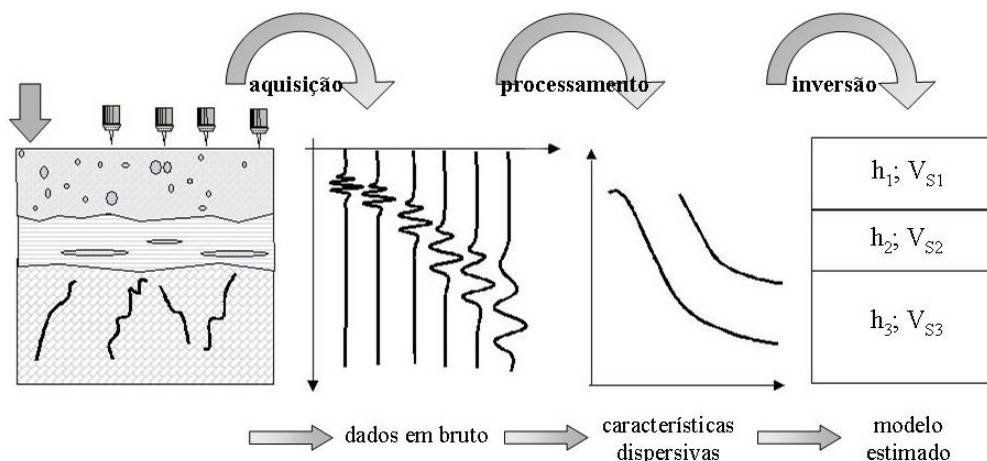


Figura 1 - Esquema dos três passos principais dos métodos das ondas superficiais com o respectivo resultado (in: Strobbia, 2003).

O método utilizado neste trabalho recorre à aquisição multicanal (Gabriels et al., 1987, Tselentis & Delis, 1998; Park et al. 1999, Foti, 2000). Apesar de no sinal adquirido, com uma fonte de impacto vertical, a energia estar maioritariamente associada às ondas de Rayleigh, a aquisição deve ser bem planeada, tendo em conta o enquadramento geológico do local em estudo. A energia pode distribuir-se por diversos modos de propagação e da aquisição resultar uma incorrecta definição dos modos, verificando-se sobreposição modal, que poderá induzir a erros de interpretação. Esta dificuldade pode ser reduzida com uma aquisição que tenha em conta o tipo de materiais e as características geológicas da área a ensaiar; é importante reconhecer situações como a presença de camadas de baixa velocidade e/ou a posição de um possível substrato rígido, para melhor adequar questões da aquisição como o comprimento da linha, o espaçamento entre geofones, as características temporais do registo, etc.

A curva de dispersão experimental é construída pela identificação dos máximos energéticos para cada frequência, no domínio frequência – número de onda ($f-k$), que é resultante da aplicação de duas transformadas de Fourier consecutivas ao sinal tempo – distância ($t-x$) (Foti, 2000; Strobbia, 2003). O tipo de inversão, automática ou por tentativa e erro, é escolhido em função do tipo de curva de dispersão experimental (Strobbia, 2003; Lopes, 2005). Caso esta corresponda essencialmente ao modo fundamental poderá optar-se pela inversão automática, com base em modelos de propagação que consideram apenas o primeiro modo. Caso a energia se concentre em diversos modos de propagação ou corresponda a uma situação de sobreposição modal, é necessário recorrer a um processo de inversão mais cuidadoso, preferencialmente por tentativa e erro mas baseado num modelo multimodal de propagação das ondas.

A metodologia utilizada tem vindo a ser apresentada em trabalhos anteriores (Lopes *et al.*, 2003; Lopes *et al.*, 2004a; Lopes *et al.*, 2004b) e encontra-se descrita em detalhe em Lopes (2005).

3. CASOS DE ESTUDO

Para demonstrar a aplicabilidade do método serão apresentadas diversas linhas de aquisição efectuadas em diferentes enquadramentos geológico-geotécnicos, comparando-os sempre que possível com outros dados geológico-geotécnicos ou geofísicos.

Os dados resultantes do método das ondas superficiais, que irão ser apresentados de seguida, foram adquiridos utilizando um sismógrafo RAS-24 da Seistronix, 24 geofones verticais de 4.5 Hz da Geospace e uma fonte impulsiva, martelo (5 ou 10 kg) em chapa metálica. O

processamento e a inversão foram efectuados recorrendo ao código POLISURF (Strobbia, 2003). Em ambos os casos de estudo, os dados foram filtrados no domínio tempo-distância (t-x), retirando a parte do sismograma correspondente à propagação das ondas P.

3.1 Porto – Campo Experimental da FEUP

Por ocasião do congresso ISC'2 (Second International Conference on Site Characterization 2), que decorreu em Setembro de 2004 na FEUP (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto), a comissão organizadora do congresso criou um campo experimental, dentro da área da faculdade, onde foram efectuados extensos trabalhos de prospecção e caracterização.

O campo experimental da FEUP (Figura 2) está localizado numa zona de contacto entre o Complexo xisto-grauváquico e uma variedade de Granito do Porto, localmente designada por Granito de Contumil, descrito como um granito de grão médio a grosseiro com fenocristais de feldspato. As zonas de contacto entre as unidades metamórficas e as rochas ígneas são caracterizadas por uma auréola migmatítica que dificulta o estabelecimento de um limite cartográfico. Os granitos encontram-se em algumas zonas intensamente alterados mas, independentemente do seu grau de alteração, à superfície encontra-se sempre uma espessura variável de solos residuais (saprolíticos).

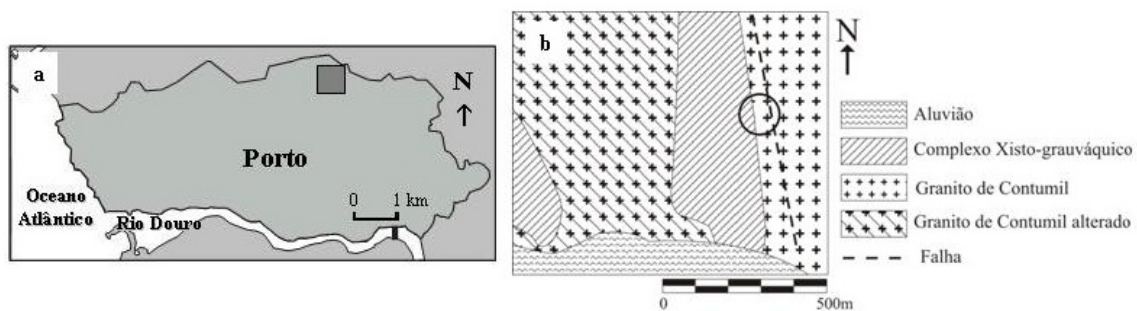


Figura 2 – Campo Experimental da FEUP: a) Localização aproximada da FEUP na cidade do Porto (□); b) Carta geológico-geotécnica da área envolvente da FEUP com localização do campo experimental (O) (adaptado de: Carta Geotécnica do Porto, 1994).

No campo experimental da FEUP foram efectuadas sondagens, ensaios geotécnicos *in situ* (SPT, CPT, PMT e DMT) e colhidas amostras indeformadas para posterior tratamento laboratorial (ensaios de caracterização, ensaios triaxiais em extensão e compressão, edómetro, coluna ressonante e bender elements) (Viana da Fonseca et al., 2004).

Além destes ensaios foram ainda efectuados ensaios geofísicos: crosshole e geofísica de superfície. A execução das diversas técnicas geofísicas de superfície (refracção sísmica P e S, reflexão sísmica S de elevada resolução, método das ondas superficiais, georadar, e resistividade eléctrica) foi organizada de forma a tentar verificar qual das técnicas obtinha melhores resultados perante as condições apresentadas. Dos vários ensaios geofísicos realizados resultaram 3 artigos que foram publicados nas actas da conferência (Lopes et al., 2004b; Carvalho et al., 2004, Almeida et al., 2004).

Das diversas linhas de aquisição do método das ondas superficiais, efectuadas na área do campo experimental, é apresentada apenas uma, representativa dos resultados obtidos naquele local. É de referir que os ensaios foram realizados e os dados processados sem ter acesso aos resultados dos restantes ensaios.

A linha de aquisição apresentada tem 36m de comprimento, 1m de espaçamento entre geofones e foi efectuada em duas aquisições, movimentando os geofones. Na Figura 3 é apresentado o sismograma filtrado, o espectro f-k e a curva de dispersão.

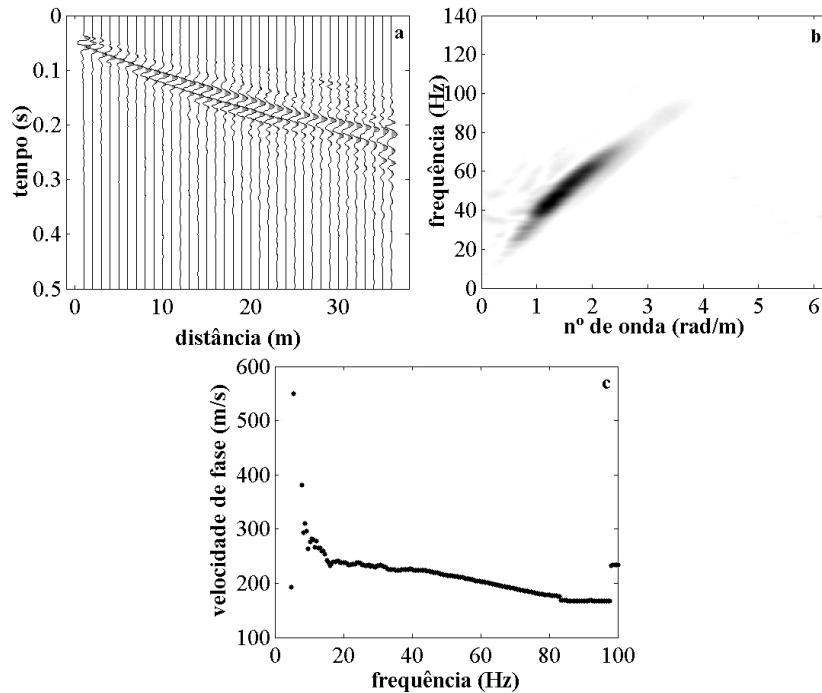


Figura 3 – Processamento f-k para uma aquisição de 36m no campo experimental da FEUP: a) Sismograma; b) Espectro f-k; c) Curva de dispersão experimental.

Como se pode verificar, é uma curva essencialmente monomodal e mostra um aumento progressivo da velocidade com a profundidade. A inversão foi efectuada, quer usando um modelo de inversão automática, quer por tentativa e erro, com base num modelo de propagação multimodal, e o melhor ajuste dos dados experimentais foi obtido por tentativa e erro (Figura 4, Quadro 1).

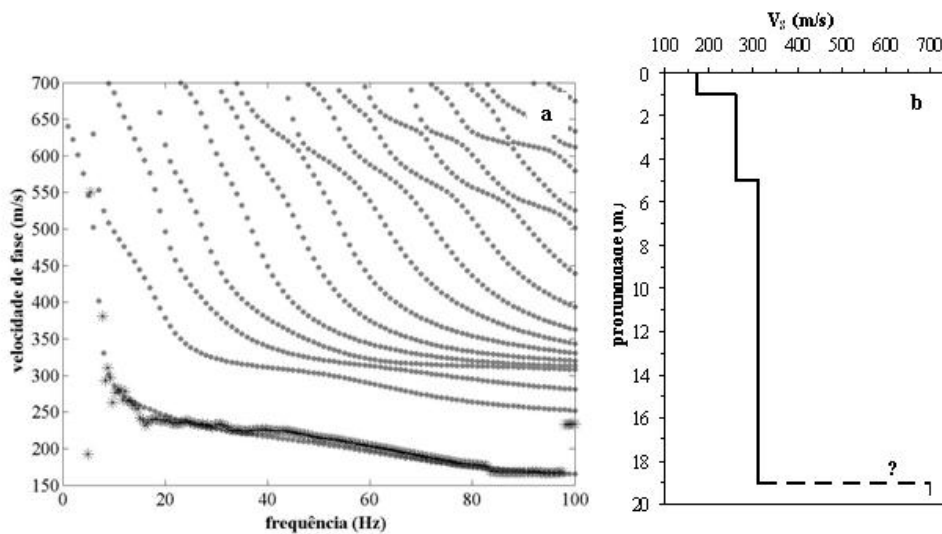


Figura 4 – Inversão por tentativa e erro (POLISURF): a) Ajuste da curva de dispersão experimental (asteriscos pretos) às curvas modais sintéticas (pontos cinzentos); b) Perfil de V_S obtido para o ajuste em a).

Quadro 1- Perfil de V_s para a linha de aquisição de 36m no campo experimental da FEUP

Espessura (m)	V_s (m/s)
1	170
4	260
14	310
∞	700 (?)

O perfil de solo obtido para este local pode ser considerado como um bom resultado da aplicação do método, como se pode verificar pela comparação com os resultados do ensaio de crosshole (Carvalho et al., 2004), efectuados entre sondagens localizadas aproximadamente no centro da linha de aquisição de 36 m (Figura 5).

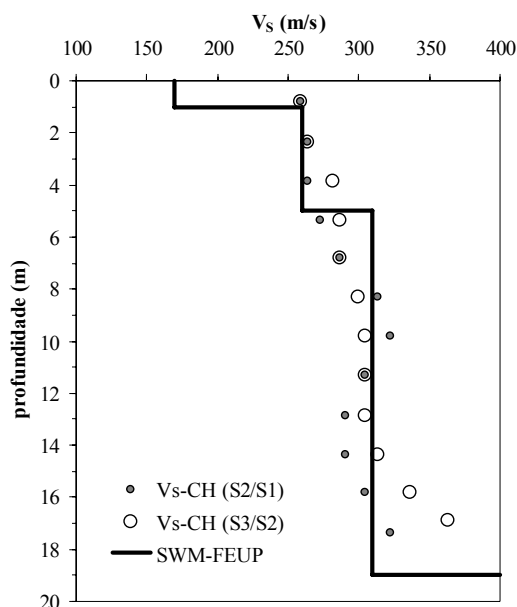


Figura 5 – Comparação entre o perfil de V_s obtido pelo método das ondas superficiais (SWM) e os ensaios de crosshole efectuados no campo experimental da FEUP.

3.2 Póvoa de Santa Iria – Marinhas do Mulato

Os resultados obtidos na região das Marinhas do Mulato (Figura 6a), na Póvoa de Santa Iria, a N de Lisboa, são outro exemplo da aplicação do método das ondas superficiais. Esta região (Figura 6b) corresponde a uma zona de depósitos aluvionares lodosos recentes sobre substrato miocénico arenoso e carbonatado. Na região envolvente encontram-se frequentemente na base das aluviões, depósitos de terraços quaternários constituídos por solos predominantemente arenosos ligeiramente sobreconsolidados.

Das linhas de aquisição realizadas neste terreno é apresentada neste trabalho apenas uma, de 48m de comprimento e 1m de espaçamento entre geofones. A aquisição foi efectuada em duas fases de aquisição, movimentando os geofones. Nesta área foi, ainda, realizado em 2002 o reconhecimento geotécnico para um loteamento (Teixeira Duarte S.A., 2002b), cujas sondagens se encontram localizadas na Figura 6a. Como o desenvolvimento do método era o objectivo principal, o estudo dos perfis de sondagem e dos ensaios SPT só foi efectuada depois de proceder à interpretação dos dados do método das ondas superficiais.

Na Figura 7 é apresentado o sismograma filtrado, o espectro f-k e a curva de dispersão. Ao contrário do que acontecia no caso de estudo apresentado anteriormente aqui a curva de dispersão experimental apresenta alguma sobreposição modal e alguns saltos de modo bem definidos. Este tipo de curvas de dispersão é frequente em situações em que há perfis com inversões de velocidade. As características da curva de dispersão limitam a obtenção de resultados fiáveis por métodos de inversão automática, sendo a inversão por tentativa e erro, usando um modelo de propagação multimodal a mais adequada. Os resultados da inversão são apresentados na Figura 8 e no Quadro 2.

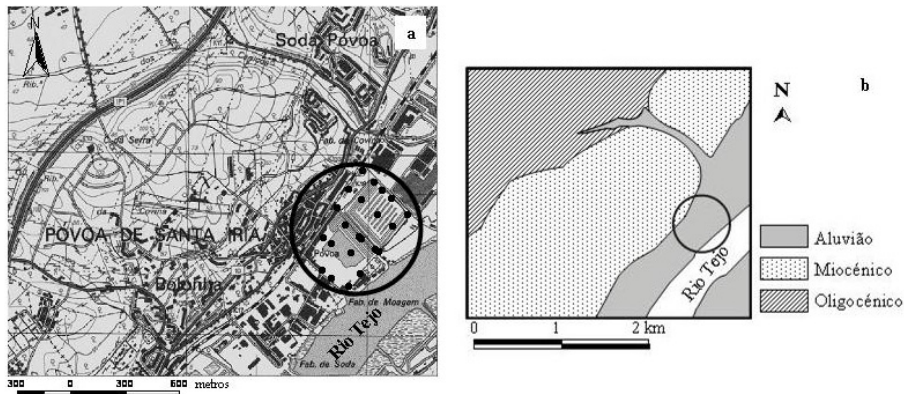


Figura 6 – Póvoa de Santa Iria – Marinhas do Mulato (O): a) Localização da área estudada com a identificação, com pontos, das sondagens realizadas na área (adaptado de: IGeoE, 1993); b) Carta geológica simplificada (adaptado de: SGP, 1981).

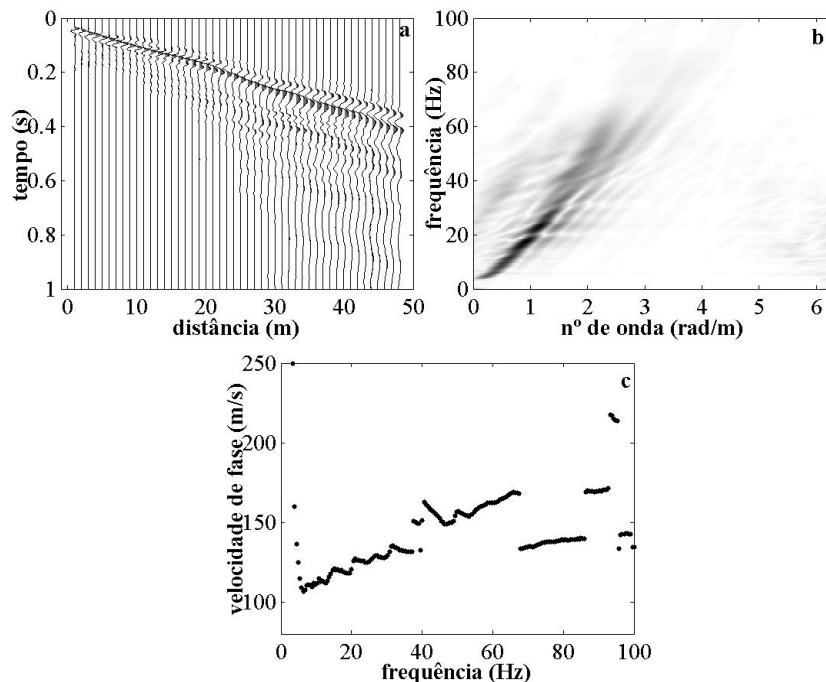


Figura 7 – Processamento f-k para uma aquisição de 48m nas Marinhas do Mulato: a) Sismograma; b) Espectro f-k; c) Curva de dispersão experimental.

Novamente, apesar de ser um perfil onde se verifica uma inversão de velocidade, indetectável por outros ensaios sísmicos de superfície expeditos, o método das ondas superficiais permitiu caracterizar adequadamente o perfil de solo local. Este facto pode ser confirmado pela comparação do perfil de V_s com as unidades geológicas e os resultados do ensaio SPT da sondagem mais próxima (Figura 9).

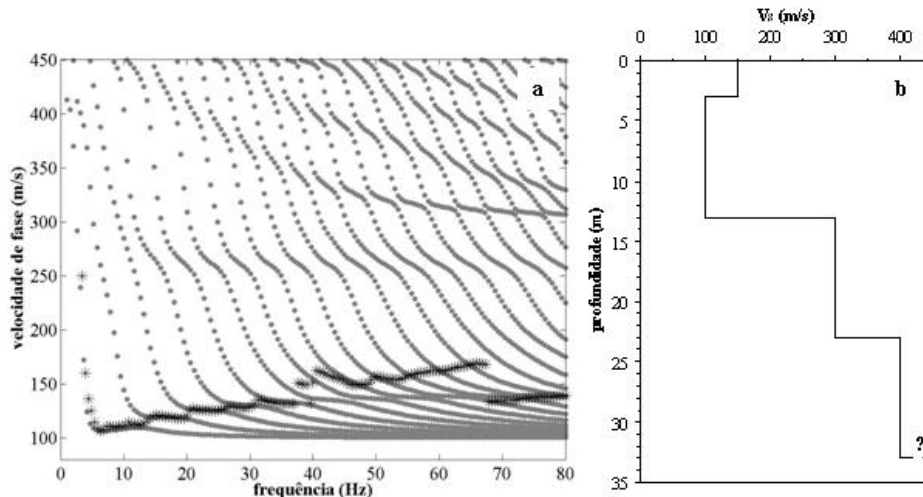


Figura 8 – Inversão por tentativa e erro (POLISURF): a) Ajuste da curva de dispersão experimental (asteriscos pretos) às curvas modais sintéticas (pontos cinzentos); b) Perfil de V_s obtido para o ajuste em a).

Quadro 2- Perfil de velocidade da onda de corte para a linha de aquisição de 48m nas Marinhas do Mulato

Espessura (m)	V_s (m/s)
3	150
10	100
10	300
10	400
∞	450 (?)

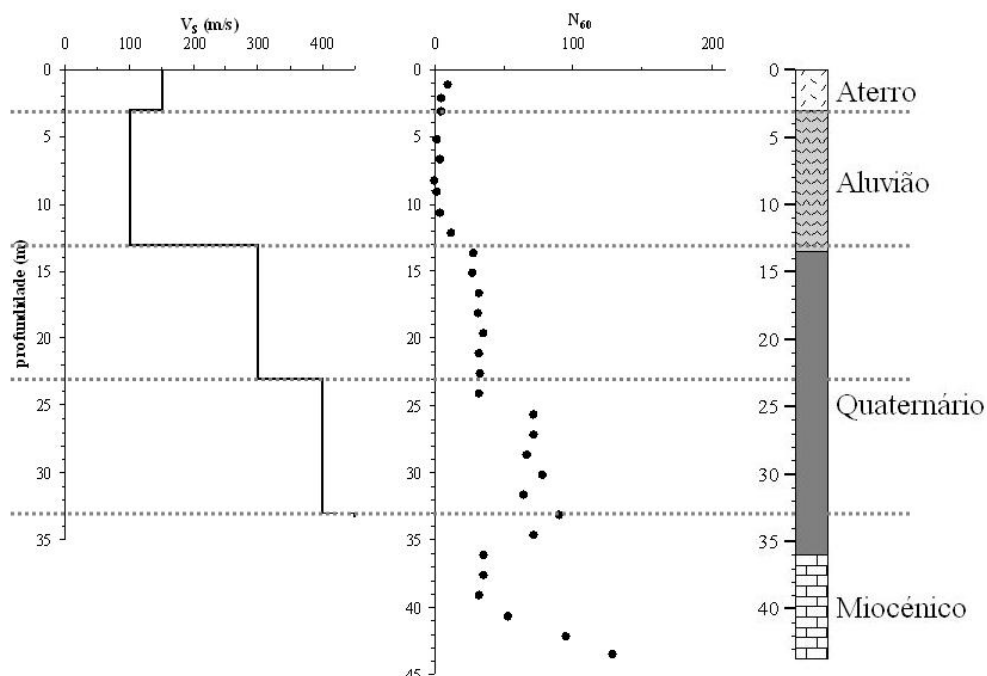


Figura 9 – Comparação entre o perfil de V_s obtido pelo método das ondas superficiais (SWM) e a sondagem mais próxima e os resultados do ensaio SPT efectuados nessa sondagem nas Marinhas do Mulato.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método das ondas superficiais aqui apresentado é um ensaio expedito, de rápida execução no campo e que, com um correcto planeamento da aquisição, considerando o enquadramento geológico da área, permite caracterizar adequadamente os locais estudados. Este facto pode ser verificado pelos resultados dos diversos ensaios realizados em diferentes enquadramentos geológico-geotécnicos. Este método permite caracterizar adequadamente locais em que o perfil de solo apresenta situações de inversão de velocidade, onde o ensaio de refração sísmica não é adequado.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa pela cedência de parte do equipamento sísmico necessário à aquisição dos dados.

Este trabalho foi parcialmente suportado pelo programa plurianual da FCT (ICIST e Centro de Geologia da Universidade de Lisboa) e por uma bolsa de doutoramento da FCT (SFRH/BD/2962/2000).

6. REFERÊNCIAS

- [1] Almeida, F.; Hermosilha, H.; Carvalho, J. M.; Viana da Fonseca, A. & Moura, R. (2004) “ISC’2 experimental site investigation and characterization – Part 2: from SH waves high resolution shallow reflection to shallower GPR tests” Proceedings ISC’2 on Geotechnical and Geophysical characterization, Viana da Fonseca & Mayne (eds), Porto, Milpress, Vol.1, pp. 419-426.
- [2] Brown, L. T. (1998) “Comparison of V_s profiles from SASW and borehole measurements at strong motion sites in southern California”, Master Thesis, The University of Texas at Austin, 211 p.
- [3] Carvalho, J. M.; Viana da Fonseca, A.; Almeida, F. & Hermosilha, H. (2004) “ISC’2 experimental site investigation and characterization – Part I: conventional and tomographic P and S waves refraction seismics vs. electrical resistivity”, Proceedings ISC’2 on Geotechnical and Geophysical characterization, Viana da Fonseca & Mayne (eds), Porto, Milpress, Vol.1, pp. 433-441.
- [4] Carta Geotécnica do Porto (1994) Câmara Municipal do Porto, FCUP, COBA.
- [5] Ferreira, J. N. V. S. (2004) “Modelação da excitação dinâmica superficial do subsolo. Aplicação à análise espectral das ondas de superfície”. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Engenharia de Estruturas pelo Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.
- [6] Fortunato, E. M. C. (2005) “Renovação de Plataformas Rodoviárias. Estudos relativos à capacidade de carga” Dissertação elaborada no LNEC para a obtenção do grau de doutor em Engenharia Civil pela Universidade do Porto, 577 p.
- [7] Foti, S. (2000) Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves. Dottorato di Ricerca in Ingegneria Geotecnica. Politecnico di Torino, 229 p.
- [8] IGeoE (1993) Carta Militar de Portugal 1:25.000, nº 403,. Instituto Geográfico do Exército.
- [9] Gabriels, P.; Snieder, R. & Nolet, G. (1987) “In situ measurements of shear-wave velocity in sediments with higher-mode Rayleigh waves”, Geophysical Prospecting 35, pp. 187-196.
- [10] Hebler, G. L. (2001) “Site characterization in Shelby County, Tennessee, using advanced surface wave methods” Master Thesis, Georgia Institute of Technology, 149 p.
- [11] Kaynia, A. M. & Hansteem, O. E. (1997) “Upgrading Surface Wave Seismic Technique. SASW: Theory, Practice and Automated Inversion” NGI Report nº 514055-1, Norwegian Geotechnical Institute.

- [12] Lai, C. G. & Rix, G. J. (1998) "Simultaneous Inversion of Rayleigh Phase Velocity and Attenuation for Near-Surface Site Characterization", Georgia Institute of Technology, NSF and USGS, 258p.
- [13] Lopes, I.; Strobbia, C.; Santos, J. & Almeida, I. (2003) "O estudo das ondas sísmicas superficiais como método de caracterização dinâmica de solos", VI Congresso Nacional de Geologia, Ciências da Terra (UNL), Lisboa, nº esp V, CD-ROM, pp G38-G41.
- [14] Lopes, I.; Santos, J.; Almeida, I.; Brito, T. (2004a) "O método das ondas sísmicas superficiais na caracterização geotécnica local – caso de estudo", 9º Congresso Nacional de Geotecnia, Vol.1, pp. 277-286.
- [15] Lopes, I.; Strobbia, C.; Almeida, I. Teves-Costa, P.; Deidda, G.P.; Mendes, M.; Santos, J.A. (2004b) "Joint acquisition of SWM and other seismic techniques in the ISC'2 experimental site", Proceedings ISC'2 on Geotechnical and Geophysical Characterization, Viana da Fonseca & Mayne (eds), Porto, Milpress, Vol.1, pp. 521-530.
- [16] Lopes, I.; Santos, J.A.; & Almeida, I. (2005) "Use of surface waves for geotechnical characterization of soft alluvial deposits - the Póvoa de Santa Iria case study", Near Surface Geophysics 3:1, EAGE (European Association of Geoscientists & Engineers), pp. 47-56.
- [17] Lopes, I. M. F. (2005) "Caracterização de solos no domínio das pequenas deformações. Aplicação do Método das Ondas Superficiais", Tese de Doutoramento em Geotecnia, apresentada à Universidade de Lisboa, 369 p.
- [18] Nazarian, S. & Stokoe, II K.H. (1984) In situ shear wave velocity from spectral analysis of surface waves. Proc. 8th Conf. on Earthquake Engineering, S. Francisco, vol. 3. Prentice Hall, pp. 31-38.
- [19] O'Neill, A. (2003) "Full-waveform Reflectivity for Modelling, Inversion and Appraisal of Seismic Surface Wave Dispersion in Shallow Site Investigations", PhD Thesis, School of Earth and Geographical Sciences, University of Western Australia, 420 p.
- [20] prEN 1998-1 (2003) "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance -Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings" European Committee for standardization.
- [21] Park, C.B.; Miller, R.D. & Xia, J. (1999) Multichannel analysis of surface waves. Geophysics 64(3), pp. 800-808.
- [22] Richart, F.E.; Hall, J.R. & Woods, R.D. (1970) Vibration of soils and foundations, Prentice-Hall.
- [23] SGP (1981) Carta Geológica de Portugal. Folha 34B Loures, escala 1:50.000, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- [24] Stokoe, K. H. II; Nazarian, S.; Rix, G. J.; Sanchez-Salineró, I.; Sheu, J-C. & Mok, Y-J. (1988) "In situ seismic testing of hard-to-sample soils by surface wave method", Earthquake Eng. & Soil Dynamics II, Recent Advances in ground-motion evaluation, ASCE, Park City, pp.264-278.
- [25] Strobbia, C. (2003) "Surface Wave Method. Acquisition, processing and inversion" PhD Thesis, Politecnico di Torino, 317p.
- [26] Svensson, M. (2001) "Application of the SASW-technique in geotechnical in-situ testing", Doctoral Thesis, Lund University, 162 p.
- [27] Tselentis, G-A. & Delis, G. (1998) "Rapid assessment of S-wave profiles from the inversion of multichannel surface wave dispersion data", Annali di Geofisica, Vol. 41, Nº 1, pp. 1-15.
- [28] Teixeira Duarte S.A. (2002) TD Via – Sociedade Imobiliária, S.A. Loteamento das Marinhas do Mulato. Vila Franca de Xira. Reconhecimento Geotécnico. Relatório R:4931.
- [29] Viana da Fonseca, A.; Carvalho, J.; Ferreira, C.; Costa, E.; Tuna, C. & Santos, J. A. (2004) "Geotechnical characterization of a residual soil profile: the ISC'2 experimental site, FEUP" Proceedings ISC'2 on Geotechnical and Geophysical characterization, Viana da Fonseca & Mayne (eds), Porto, Milpress, pp. 1361-1369.