

# ONDAS DE SUPERFÍCIE NA AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS ELÁSTICOS DE SOLOS: ESTUDO COMPARATIVO COM OUTROS MÉTODOS SÍSMICOS

## ASSESSMENT OF SOILS ELASTIC PARAMETERS BY SURFACE WAVES: CAMPARATIVE STUDY WITH OTHER SEISMIC METHODS

Rodrigues, Carlos, *Instituto Politécnico da Guarda, Portugal, crod@ipg.pt*

Bonito, Fernando, *Universidade de Aveiro, Portugal, bonito@civil.ua.pt*

Almeida, Fernando, *Universidade de Aveiro, Portugal, falm@geo.ua.pt*

Moura, Rui, *Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Portugal, rmmoura@fc.up.pt*

Cardoso, Claudino, *Universidade de Aveiro, Portugal, claudino@civil.ua.pt*

Constantino, Fernando, *Universidade de Aveiro, Portugal, a19004@alunos.geo.ua.pt*

### RESUMO

A avaliação do comportamento dos maciços terrosos quando solicitados no domínio das pequenas deformações é um tema recorrente na caracterização geofísica/geotécnica. Para tal, os ensaios de campo utilizados são, ou eminentemente sísmicos, ou se configuram como soluções híbridas entre técnicas de prospecção sísmica e mecânica, capazes de avaliar também a resistência, bem como o comportamento para níveis superiores de deformação. Neste artigo são apresentados e comparados resultados da aplicação do método MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), da refração sísmica, dos ensaios sísmicos entre furos (“crosshole” – CH) e do ensaio com o piezocone sísmico (SCPTu) em solo residual granítico da Guarda e solo sedimentar de Aveiro. Discute-se ainda a avaliação da rigidez a partir das velocidades das ondas S e a concordância com os perfis geológico-geotécnicos interpretados.

### ABSTRACT

The evaluation of soil behaviour in the small strains domain is an actual subject on the geophysical/geotechnical site characterization. Therefore, the field tests are either mainly seismic, either hybrid solutions of techniques of seismic and mechanical characterization, capable to evaluate the soil strength as well as its behaviour for larger deformation levels. In this work the results of the application of the MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) method are presented and compared together with the seismic refraction, the “crosshole” (CH) and the seismic cone penetration test with pore pressures measurements (SCPTu) in Guarda residual soil and Aveiro sedimentary soil. The evaluation of the stiffness obtained from the S wave velocities and the agreement with the interpreted geological-geotechnical profiles is also analysed.

### 1. INTRODUÇÃO

As ondas sísmicas podem ser entendidas como a propagação de vários tipos de deformação mecânica. As ondas P relacionam-se com o processo dilatacional, as ondas S com a deformação de corte e as ondas de Rayleigh com o deslocamento elíptico de partículas. As velocidades destas ondas relacionam-se com os parâmetros elásticos do terreno para pequenas deformações [1], pelo que os métodos de prospecção sísmica têm vindo recentemente a ter aplicação na caracterização *in situ*. A técnica MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), foi introduzida no final dos anos 90 pela Kansas Geological Survey [2]. O método das ondas de

superfície fornece velocidades das ondas P e S a partir da determinação das velocidades de Rayleigh [3]. A relação entre estas três velocidades é dependente do coeficiente de Poisson e da massa volumica. Assim, os modelos de velocidade obtidos podem variar em função dos parâmetros (velocidades de ondas P e S do modelo inicial) utilizados no processo de inversão. O software comercial utilizado para obter o modelo de velocidade das ondas S foi o SurfSeis<sup>®</sup> que se baseia no ajuste da curva de dispersão do modo fundamental de vibração das ondas de Rayleigh. A metodologia do estudo consistiu na confrontação dos resultados da técnica MASW/SurfSeis<sup>®</sup> e da refração sísmica com os resultados obtidos de ensaios sísmicos entre furos (CH) e de ensaios com o Piezocone sísmico (SCPTu), anteriormente realizados em solos residuais da região da Guarda e em solos sedimentares da região de Aveiro. A investigação recente neste domínio em Portugal tem evoluído no sentido da inversão multimodal [4]. A inversão centrada no modo fundamental de vibração, de maior energia, pode ser conseguida através da truncatura dos sinais sísmicos no sentido de revelar uma única curva de dispersão com uma elevada relação sinal/ruído anulando deste modo, reflexões e refrações associadas.

## **2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO**

### **2.1 Campo experimental na Guarda**

O local em investigação situa-se no Campus do Instituto Politécnico da Guarda, numa zona montanhosa de natureza granítica. O granito é do tipo monzonítico, de duas micas, com largo domínio da biotite, apresentando textura porfiróide de grão muito grosseiro, com dimensão média dos cristais da matriz de 7 mm, tendo os fenocristais por vezes comprimentos médios de 45 mm. Estes revelam por vezes orientação preferencial. Como elementos essenciais referem-se quartzo, oligoclase, microclina, albite, biotite e moscovite. Os minerais acessórios compreendem apatite, zircão e magnetite, sendo a caulinite, sericite e clorite os minerais secundários mais abundantes. O ambiente climático da zona em estudo caracteriza-se por ser húmido temperado, o que possibilita que o processo de meteorização seja intenso, transformando o maciço granítico num manto arenoso de elevada permeabilidade. O embebimento em água permite que, durante o Verão, estação em que as chuvas são escassas, a base dos perfis de alteração permaneça húmida, criando-se assim condições que permitem uma constante e evolutiva arenização do substrato rochoso.

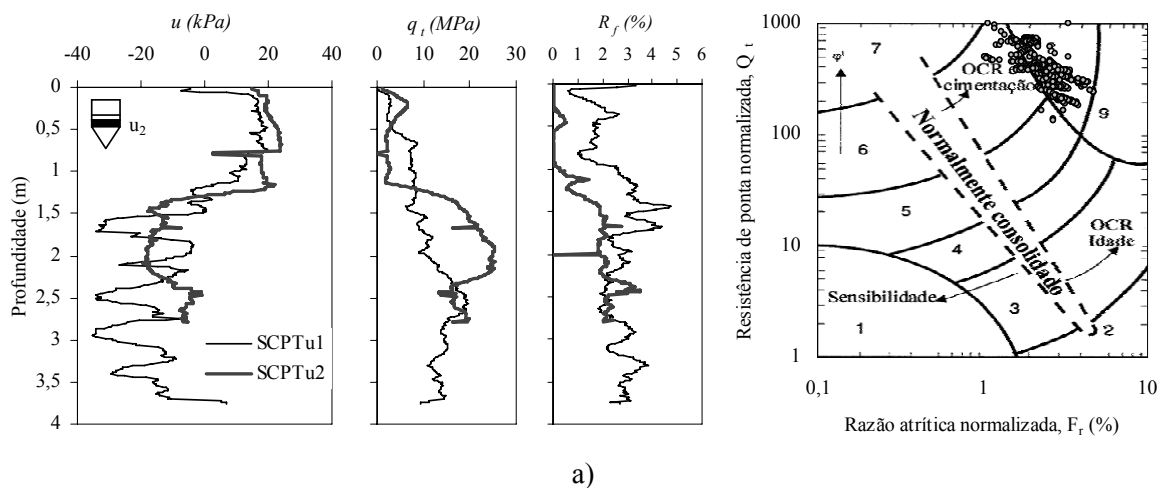
### **2.2 Campo experimental em Aveiro**

Os solos estudados situam-se na zona lagunar da cidade, na adjacência de canais da Ria de Aveiro. Em termos geológicos, são parte integrante da unidade geológica Depósitos Modernos [5] e caracterizam-se como sendo depósitos aluvionares recentes (idade Holocénica) cuja génese está associada aos processos de preenchimento por aluviões finas dos vales, por vezes muito profundos, escavados pelas fases regressivas que antecederam a transgressão pós-glaciária em curso. Estes sedimentos apresentam-se, quase invariavelmente, com uma coloração parda-escura a negra, por vezes com tonalidades acastanhadas. São sedimentos predominantemente silto-argilosos (por vezes, algo arenosos) com matéria orgânica.

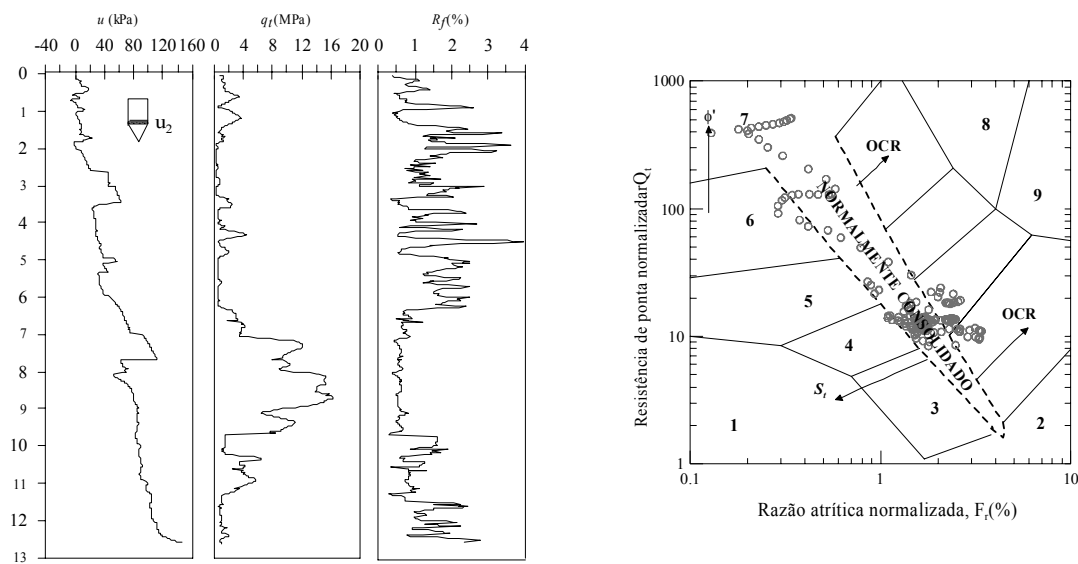
## **3. CARACTERIZAÇÃO GEOTECNICA**

### **3.1 Caracterização pelo CPTu**

Na Figura 1 estão representados os perfis de resistência à penetração do piezocone, bem como a projecção dos resultados na carta de classificação proposta por Robertson [6].



a)



b)

1-Solos finos sensíveis; 2-Solos orgânicos; 3-Argilas e argilas siltosas; 4-Argilas siltosas e siltes argilosos; 5-Areias siltosas a siltes arenosos; 6-Areias limpas a areias siltosas; 7-Areias e areias cascalhentas; 8-Areias compactas e areias argilosas compactas; 9-Argilas e siltes rijos.

Figura 1 – Perfis e resistência e projecção dos solos estudados na carta classificação [6]; a) solos da Guarda; b) solos de Aveiro.

Nos solos da Guarda, os resultados obtidos mostram que a grande maioria dos pontos se concentra no campo 8, correspondente a materiais fortemente sobreconsolidados ou cimentados, cujas características granulométricas correspondem a areias muito densas silto-argilosas, situação que é perfeitamente concordante com o observado *in situ*. Nos solos de Aveiro, ressalta a heterogeneidade granulométrica mas, globalmente, os resultados reflectem um depósito sedimentar normalmente consolidado com alguma sobreconsolidação nas camadas mais superficiais que, no caso, está essencialmente ligado à influência da variação das marés.

### 3.2 Ensaio Sísmico entre furos – “crosshole” (CH) na Guarda

Foram realizados ensaios “crosshole” numa área próxima da zona em estudo, com espaçamento planar entre furos de 5 m e espaçamento vertical entre medições de 0,5 m. Os resultados dos

ensaios sísmicos entre os furos CH<sub>1</sub> e CH<sub>2</sub> apresentam-se na Figura 2, onde se relacionam com a profundidade, a velocidade de propagação das ondas P ( $V_p$ ), das ondas S ( $V_s$ ), o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), e os módulos iniciais de elasticidade ( $E_0$ ) e de distorção ( $G_0$ ).

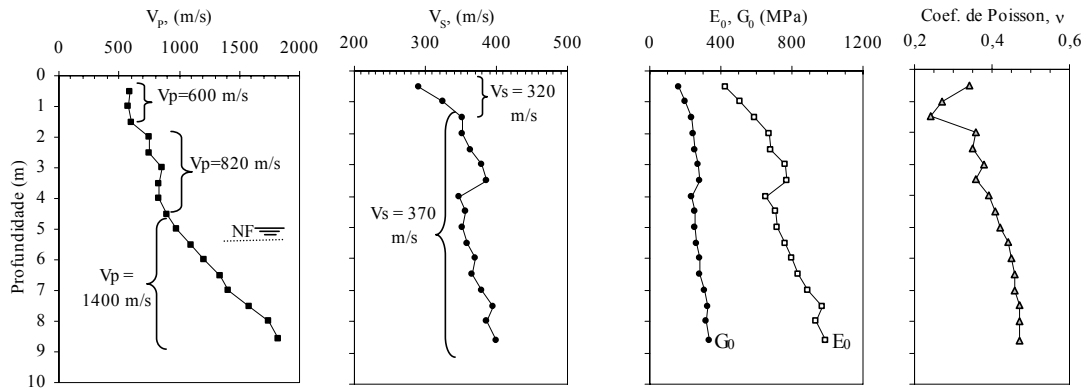


Figura 2 – Variação da velocidade de propagação das ondas sísmicas e rigidez, num ensaio CH

Da análise dos resultados obtidos observa-se que as menores velocidades de propagação tanto das ondas P como das ondas S ocorre na secção superficial. A propagação das ondas S apresenta um ligeiro aumento de velocidade a partir dos 1,5 m de profundidade e um andamento muito pouco crescente das velocidades em profundidade até ao último ponto de ensaio. Verifica-se também que a partir dos 5 m de profundidade é evidente o crescimento nos valores das ondas P, com uma velocidade média de 1400 m/s, devendo em certa medida, este aumento corresponder à saturação do solo saprolítico, dado que o nível freático se localizava a 5,5 m de profundidade.

### 3.3 Ensaios com o piezocone sísmico (SCPTu) em Aveiro

Foi feito um estudo comparativo entre as velocidades das ondas de corte obtidas pela aplicação isolada dos métodos interpretativos de *cruzamento* (*cross-over*) e de *correlação cruzada* (*cross-correlation*), tendo sido desenvolvida, para o caso deste último método, uma aplicação informática em Qbasic<sup>®</sup>. Na Figura 3 representam-se os perfis obtidos por *cruzamento* [7]. Nesta figura é notória a concordância dos valores de velocidade e respectiva rigidez com a litologia do local.

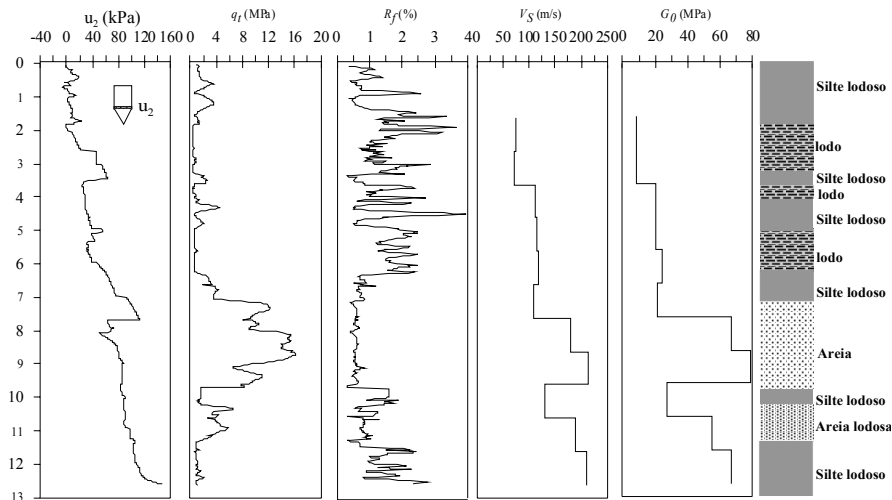


Figura 3 – Perfis SCPTu em Aveiro

#### 4. CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA EM GEOTECNIA

O equilíbrio dinâmico das tensões que actuam num elemento de volume faz-se através das forças de inércia associadas aos deslocamentos e à massa volúmica. Utilizando a lei de Hooke para substituir as tensões pelas deformações obtêm-se três equações diferenciais para cada eixo espacial que dependem dos deslocamentos, do tempo e dos parâmetros elásticos; no caso de uma onda plana, a aplicação do rotacional a essas três equações conduz à equação de onda, onde se identifica a velocidade das ondas S [8].

##### 4.1 Propagação dos erros na determinação do módulo de distorção dinâmico

No caso de uma onda sísmica associada a pequenas deformações pode explicitar-se o módulo de distorção máximo ( $G_0$ ) em função da velocidade das ondas S ( $V_s$ ) e da massa volúmica ( $\rho$ ):

$$G_0 = \rho V_s^2 \quad (1)$$

Na determinação indirecta deste parâmetro existem erros propagados ( $\Delta G_0/G_0$ ) que dependem daqueles cometidos na estima dos valores da massa volúmica e da velocidade das ondas S. Admitindo uma variação isolada dos parâmetros, os erros na determinação da massa volúmica (2) e na determinação da velocidade (3) são os seguintes:

$$\frac{\Delta G_0}{G_0} = \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta G_0}{G_0} = 2 \frac{\Delta V_s}{V_s} \quad (3)$$

Verifica-se assim que o processo de estima de  $G_0$  se torna (duplamente) mais sensível quando depende do erro ligado à determinação das velocidades do que do erro na avaliação da massa volúmica. A indeterminação do  $G_0$  existe porque os parâmetros dos quais deriva ou são obtidos sobre amostras pontuais (que podem não ser representativas do conjunto), ou são obtidos *in-situ*, podendo reflectir a heterogeneidade lateral do meio. A conjugação de vários métodos na determinação das ondas S pode contribuir para revelar erros na caracterização geotécnica.

##### 4.2 MASW versus outros métodos sísmicos na determinação da velocidade das ondas S

A questão da obtenção de um modelo de velocidades de ondas S a partir do método MASW foi abordada por vários ângulos, na tentativa de verificar a resposta do método a diferentes condições. Para tal, foram realizados perfis de refração tomográfica de ondas P em Aveiro, ao que se juntou a informação do SCPT (Figura 4), e perfis de refração de ondas P e S na Guarda (Figura 5). Para a execução de refração sísmica de ondas P e S, foram adquiridos registos sísmicos ao longo de um mesmo perfil. Assim, para a aquisição de dados foram utilizados dois sismógrafos RAS 24<sup>®</sup> ligados entre si, do que resultou um perfil com 48 canais para cada tipo de onda. Foi aplicado um esquema de aquisição com um espaçamento entre geofones (4,5Hz para os verticais e 28Hz para os horizontais) de 1m, tendo sido utilizados 5 “Shot-Points”. A metodologia utilizada na modelação conjunta das ondas P e S com controlo através do coeficiente de Poisson feita nos solos residuais na Guarda, foi idêntica à utilizada num campo experimental de solos residuais graníticos do Porto no âmbito da conferência ISC’2 [9].

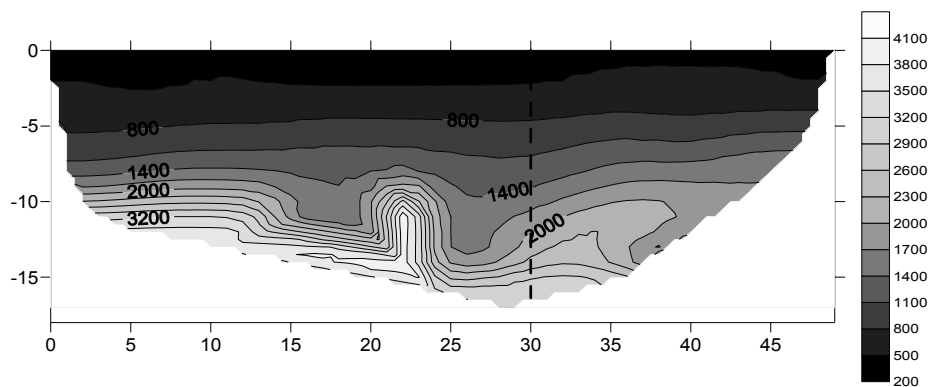


Figura 4 – Modelo de velocidades de ondas P (m/s) em Aveiro obtido por refração tomográfica com Seisopt@2D

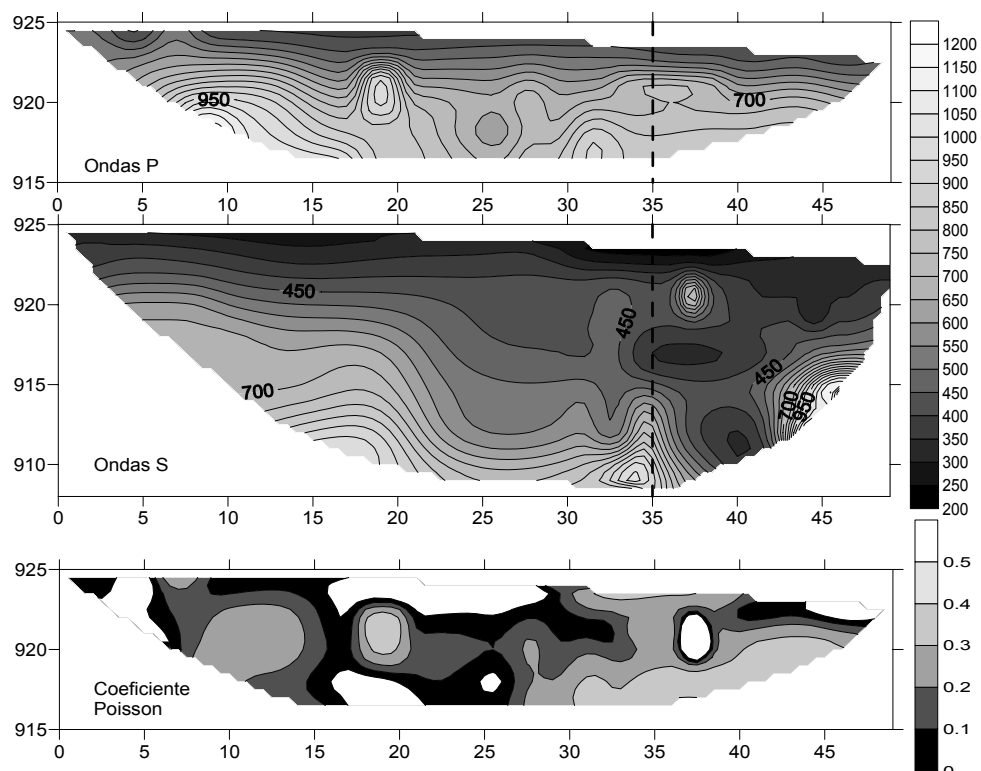


Figura 5 – Modelos de ondas P e S (m/s) na Guarda obtidos por refração tomográfica com Seisopt@2D e respectivos coeficientes de Poisson calculados.

Na abordagem ao MASW, foram utilizados os registos sísmicos de ondas P obtidos da refração tomográfica, sendo utilizado o programa SurfSeis<sup>®</sup> para o tratamento dos dados. Separou-se a onda de Rayleigh truncando os sinais com o objectivo de evidenciar o seu modo de vibração fundamental. Sobre estes sinais truncados (faixas nas Figuras 6a e 6c), o programa inicialmente calcula uma superfície em função da frequência/velocidade de fase sobre a qual define posteriormente a curva de dispersão do modo fundamental de vibração (pontos nas Figuras 6b e 6d) com uma relação sinal-ruído quantificável e aceitável. Esta curva de dispersão experimental corresponde aos dados que sustentam o processo de inversão geofísica que consiste em obter um modelo de velocidades distribuído em camadas horizontais. O processo de inversão parte de um modelo inicial da velocidade das ondas S e do coeficiente de Poisson. Neste trabalho a interligação dos métodos sísmicos foi feita através da introdução no processo de inversão referente ao MASW de modelos iniciais que constituíam resultados de outros métodos de modo a mostrar o grau de indeterminação na estima do parâmetro velocidade das ondas S.

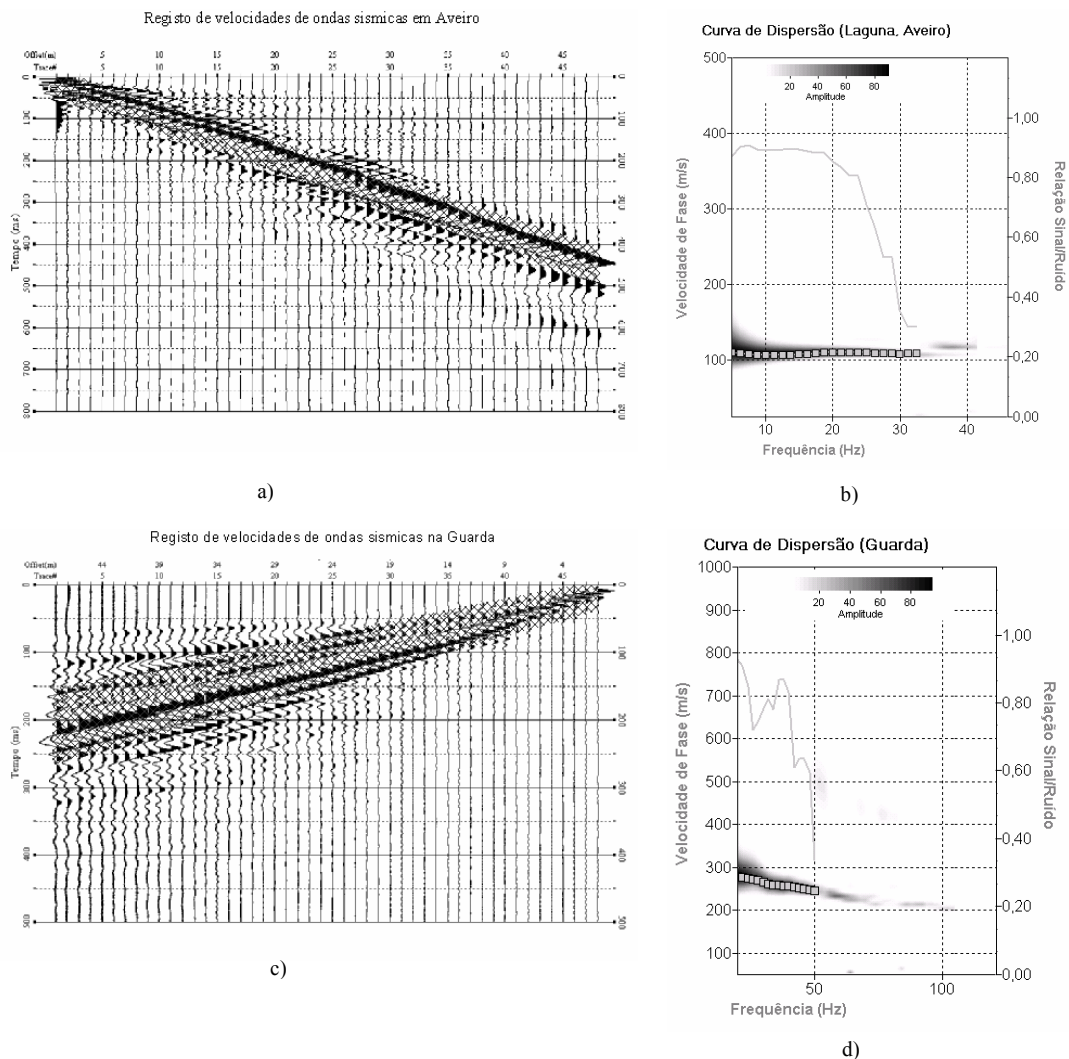


Figura 6 – Registos sísmicos e curvas de dispersão experimentais obtidas com o programa SurfSeis<sup>®</sup> a partir do cone de Rayleigh, isolado pelas faixas sobrepostas aos registos sísmicos.

No Quadro 1 apresenta-se em paralelo o estudo efectuado nos dois locais de teste sublinhando as diferenças na metodologia que consistem na definição do modelo de partida para iniciar o processo de inversão das ondas de superfície.

Quadro 1 – Metodologias de estudo utilizadas nos dois campos experimentais

Aveiro	Guarda
Realização de refração de ondas P e respectiva inversão tomográfica com SeisOpt@2D	
Realização do <u>ensaio SCPT</u> para obter $V_s$	Realização de <u>refracção de ondas S</u> e respectiva inversão tomográfica com SeisOpt@2D
Aquisição do cone de Rayleigh a partir dos registos sísmicos de refração de ondas P	
Inversão com SurfSeis a partir dos modelos iniciais ( $V_s$ e $V_p$ ) arbitrados pelo programa	
Inversão com SurfSeis a partir do modelo $V_s$ arbitrado pelo programa, inferindo $V_p$ do modelo de refração tomográfica obtido com SeisOpt@2D	
Inversão com SurfSeis a partir do modelo $V_p$ arbitrado pelo programa, inferindo $V_s$ do <u>SCPT</u>	Inversão com SurfSeis a partir do modelo $V_p$ arbitrado pelo programa, inferindo $V_s$ do modelo de <u>refracção tomográfica</u>
Inversão com SurfSeis a partir do modelo $V_p$ da refração tomográfica e $V_s$ do <u>ensaio SCPT</u>	Inversão com SurfSeis a partir do modelo $V_p$ e $V_s$ dos modelos de <u>refracção tomográfica</u>

O programa SurfSeis trabalha com dados pontuais como acontece com os ensaios SCPT, isto é, o cone de Rayleigh dá origem a um modelo de camadas com as respectivas velocidades de ondas P e S apenas em profundidade num único ponto. Desta forma, para as diferentes abordagens mencionadas anteriormente, foi necessário converter os dados da refração tomográfica de modo a que se pudessem cruzar, pelo que se efectuaram cortes em profundidade nos modelos obtidos (a traço interrompido na Figura 4 e 5). A escolha do corte (a traço interrompido na Figura 4) retirado do modelo de velocidades de ondas P em Aveiro foi feita com base na zona mais significativa relativa à cobertura de raios, ao passo que na Guarda (a traço interrompido na Figura 5) calcularam-se os coeficientes de Poisson para encontrar a zona onde se efectuou o corte. No caso da Guarda, como não existiam dados de SCPT, recorreu-se também a este procedimento para a determinação das velocidades de ondas S para a inversão.

No caso de Aveiro, as velocidades das ondas S foram obtidas através de ensaio SCPT, o qual, para além disso, permite igualmente obter modelos diferentes caracterizáveis em termos de variabilidade que se expõe em seguida. Durante a realização do ensaio, foram dados tiros à direita e à esquerda do que resultaram três modelos: modelo de velocidades de intervalo obtidas pelo cruzamento de ambos os sinais (direito e esquerdo), modelo de velocidades obtido pela correlação cruzada à direita e modelo de velocidades obtido pela correlação cruzada à esquerda. A forma encontrada para minimizar o erro, correspondeu à média aritmética entre estes três modelos, uma vez que embora fossem semelhantes apresentavam uma certa disparidade. O modelo resultante da média aritmética foi o utilizado nas abordagens em que se inferiu um modelo inicial de ondas S para a inversão (Figura 7a).

No caso da Guarda, o modelo de partida utilizado (Figura 8a), nas abordagens em que se definiram as velocidades de ondas S, foi o obtido da refração tomográfica e a variabilidade foi estudada em função da escolha do modelo inicial em dois pontos da secção tomográfica.

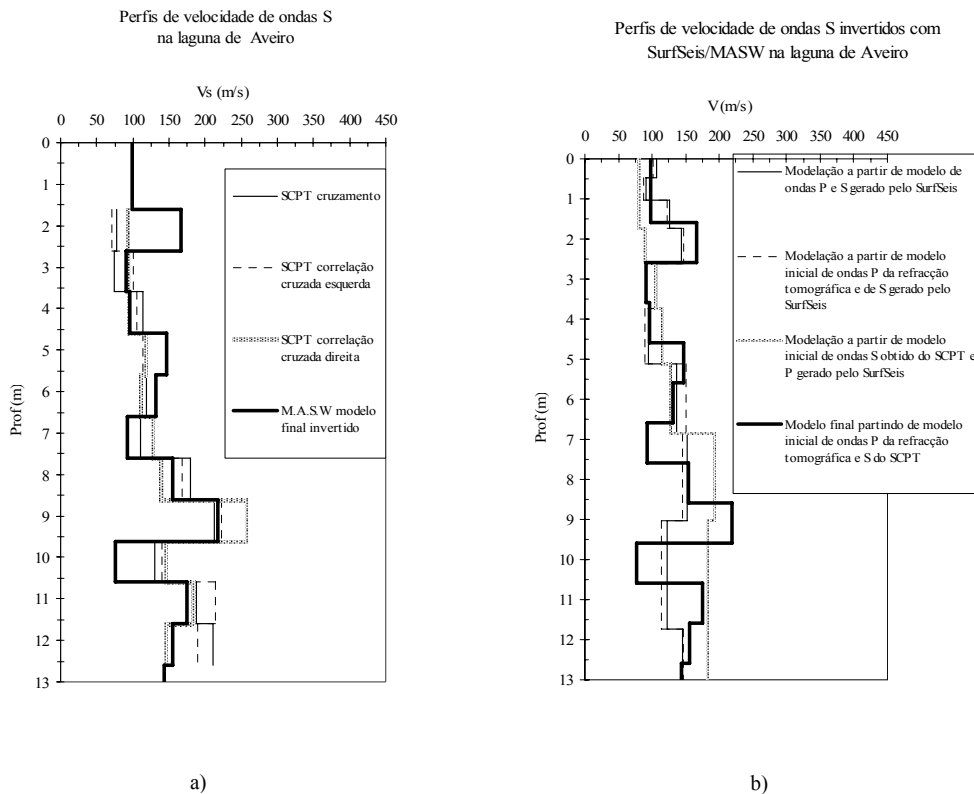


Figura 7 – Resultados das várias abordagens ao método MASW em Aveiro



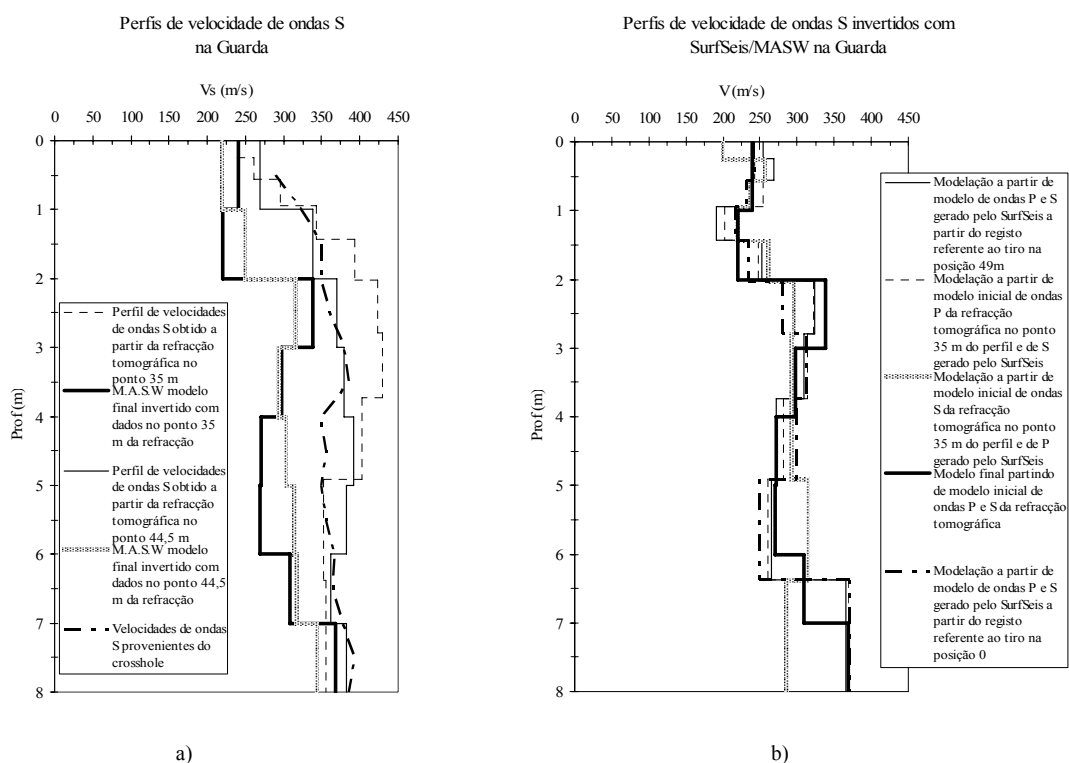


Figura 8 – Resultados das várias abordagens ao método MASW na Guarda

Nas Figuras 7b e 8b apresentam-se os resultados referentes à metodologia exposta no quadro 1 de modo a avaliar a indeterminação do processo de inversão, quando vários modelos iniciais plausíveis, obtidos por outros procedimentos geofísicos, são impostos à partida do processo recorrente de inversão das ondas de Rayleigh. A discussão dos resultados geofísicos passa pela análise das Figuras 7 e 8. Em Aveiro, mesmo sem recorrer a uma análise estatística, é notório que os modelos iniciais não se afastam em média dos modelos invertidos, enquanto na Guarda já não se constata esse facto. Neste segundo caso os resultados do MASW são sempre inferiores aos modelos iniciais quer eles sejam obtidos a partir de registos diferentes, relativos a pontos de tiro nos extremos do perfil (Figura 8b), ou nos pontos 35m e 44,5m da secção da refração tomográfica e ainda por “crosshole” (Figura 8a). Interpreta-se esta discrepância como resultante do facto de em Aveiro a estratificação sedimentar se aproximar de um modelo de distribuição horizontal das propriedades físicas; enquanto no caso de estudo na Guarda as heterogeneidades laterais e verticais deverão condicionar a aplicabilidade do método.

Apesar de nesta etapa da investigação em curso ainda não se ter efectuado qualquer estatística dos resultados obtidos para as várias abordagens ao MASW, será possível, após adoptar uma medida da variabilidade das velocidades em função da profundidade, estimar o erro associado ao cálculo de  $G_0$  a partir da equação 3. Analisando a Figura 7, é possível inferir graficamente que em Aveiro, desde que se admita que é idêntica a variabilidade encontrada nas Figuras 7a e 7b, os erros em  $G_0$  vão ser semelhantes quer se obtenham por SCPT quer por MASW. Comparando as Figuras 7b e 8b e admitindo uma medida idêntica da variabilidade dos resultados provenientes do MASW nos dois locais de estudo, pode concluir-se que o método tem um erro intrínseco independente da escolha do modelo de partida que aumenta em profundidade. Este tipo de erro não poderá ser o responsável pela discrepância entre os modelos iniciais e finais obtidos na Guarda (Figuras 8a e 8b); neste caso, dada a semelhança entre os perfis verticais obtidos da refração tomográfica e do “crosshole” (Figura 8a), supõe-se que algo de errado se passa na aplicação ou no processamento efectuado.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A rigidez dinâmica é função de  $\rho$  e de  $V_s$  e, usando a técnica MASW, depende indirectamente da velocidade das ondas de Rayleigh e do coeficiente de Poisson. O erro em  $G_0$  é duplo relativamente ao erro na estima de  $V_s$ . Nesse sentido, quanto mais informação for associada ao processo de inversão na técnica MASW, maior confiança terão os resultados obtidos. No entanto, pode dizer-se que em zonas onde o coeficiente de Poisson é sensivelmente constante e se aproxima de 0,5 (como acontece nos solos saturados em Aveiro), o processo é eficaz. Nos solos residuais da Guarda, apesar das distribuições em profundidade das velocidades obtidas por MASW e pelas outras técnicas terem a mesma forma, os valores de  $V_s$  obtidos por MASW são significativamente inferiores. Na Guarda, são notórias as variações laterais dos parâmetros geofísicos o que constitui um alerta no sentido de que é baixa a confiança da aplicação da técnica MASW em ambientes onde a heterogeneidade lateral dos parâmetros não seja avaliada por outras técnicas. Nos dois locais a técnica MASW permitiu aferir indirectamente a variabilidade nos modelos  $V_s$  invertidos, comparando-os com outros obtidos por via directa

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] Almeida F.; Moura R.; Teves-Costa P.; Oliveira C.S. (1999) – *Caracterização dinâmica das Areias de Faro através de ensaios sísmicos*. Actas do 4.º Encontro Nacional Sobre Sismologia e Engenharia Sísmica (SÍSMICA 99), pp 233-243, Faro.
- [2] Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J. (1999) - *Multi-channel analysis of surface waves (MASW)*. Geophysics, v. 64, no. 3, pp. 800-808.
- [3] Foti S. (2000) – *Multistation methods for geotechnical characterization using surface waves*. Tese de Doutoramento. Politecnico di Torino, 250p
- [4] Lopes I.; Santos J.; Almeida I.; Brito T. (2004) – *O método das ondas sísmicas superficiais na caracterização geotécnica – Caso de estudo*. Actas do 9.º Congresso Nacional de Geotecnia, Vol 1, pp 277-286, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- [5] Teixeira, C.; Zbyszewski, G. (1976) – *Carta Geológica de Portugal, 1/50 000. Notícia explicativa da Folha 16-A, Aveiro*. Serviços Geológicos de Portugal.
- [6] Robertson, P.K (1990) – *Soil classification using the cone penetration test*. Canadian Geotechnical Journal 27 (1), pp 151-158
- [7] Bonito F.; Almeida F.; Gomes C.; Cardoso C. Rocha F. (2002) – *O piezocone sísmico e a sua aplicação no reconhecimento e caracterização de solos da região de Aveiro*. Actas do 8.º Congresso Nacional de Geotecnia, Vol 1, pp 165-172, LNEC, Lisboa.
- [8] Telford, W.M.; Geldart, L.P.; Sheriff, R.E. (1990) – *Applied Geophysics Second edition*. 770p. Cambridge University Press.
- [9] Carvalho, J.; 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 of ISC'2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Vol 1, pp 433-441. Viana da Fonseca & Mayne (eds), FEUP, Porto.