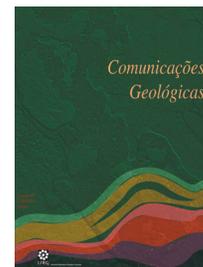


Estimativa de modelos de velocidade obtidos através de ensaios de refração sísmica e MASW, na localidade dos Flamengos (Ilha do Faial, Açores)

Velocity model estimated from seismic refraction survey and MASW, at Flamengos site (Faial island, Azores)

S. Neves^{1*}, J. F. Borges², J. Casacão¹, B. Caldeira², M. Bezzeghoud²



Artigo Curto
Short Article

© 2014 LNEG – Laboratório Nacional de Geologia e Energia IP

Resumo: O objetivo desta comunicação visa apresentar os modelos de velocidades das ondas P e S obtidos através de métodos geofísicos, tais como, método da refração sísmica e MASW (ondas superficiais). Após a determinação dos modelos de velocidades, os mesmos foram comparados com a litologia da ilha. Os parâmetros geofísicos obtidos são importantes para a caracterização da estrutura sub-superficial do solo, bem como para a simulação do movimento sísmico.

Palavras-chave: Geofísica, MASW, Refração sísmica, Açores.

Abstract: The aim of this communication is to present the velocity models of propagation of seismic waves P and S using geophysical methods, such as refraction surveys and MASW (Multichannel analysis of surface waves). After determining the velocity models, the results were compared for the same location, with the lithology of the island. These results provide important physical parameters used for a near surface characterization of the soil structure and to predict seismic ground motion in this region.

Keywords: Geophysics, MASW, Seismic refraction survey, Azores.

¹Centro de Geofísica de Évora, Universidade de Évora, Évora.

²Centro de Geofísica de Évora, Departamento de Física, ECT, Universidade de Évora, Évora.

*Autor correspondente / Corresponding author: sneves@uevora.pt

1. Introdução

O arquipélago dos Açores é composto por nove ilhas distribuídas em três grupos: o ocidental, o central e o oriental. Do grupo ocidental fazem parte as ilhas do Corvo e Flores; do grupo Central as ilhas do Pico, Faial, S. Jorge, Graciosa e Terceira, e do grupo Oriental as ilhas S. Miguel e Santa Maria.

Desde o povoamento dos Açores, no século XV, ocorreram sismos muito fortes, causando elevados danos materiais e perdas humanas. O último grande sismo registado nos Açores ocorreu a 9 de Julho de 1998 (Mw=6.1) com epicentro a cerca de 16 km da cidade da Horta e sentido com intensidade máxima VIII (MMI) (Senos *et al.*, 2008). O evento também foi sentido com violência nas ilhas do Pico e de S. Jorge e causou elevados

danos materiais. No total morreram 8 pessoas, mais de 100 feridos e um elevado número de desalojados.

A ilha do Faial foi a mais atingida, com uma percentagem elevada de construções colapsadas em várias localidades, nomeadamente, na Ribeirinha e Pedro Miguel. Na cidade da Horta os danos não foram muito elevados, tendo-se observado uma intensidade de VI. No entanto, é de salientar que na Lombega e Flamengos a intensidade foi de VII, enquanto nas zonas limítrofes as intensidades máximas observadas foram de V e VI, respetivamente.

Após o sismo foram realizados diversos trabalhos de forma a caracterizar a perigosidade sísmica da ilha, como é o caso do projeto COMICO, o qual utilizou vibrações ambiente para caracterizar dinamicamente as camadas superficiais na cidade da Horta (Teves Costa *et al.*, 2008).

O objetivo do trabalho visa apresentar modelos de velocidades de propagação das ondas sísmicas P e S, através de ensaios geofísicos de refração sísmica e MASW (*Multichannel analysis of surface waves*), de modo a caracterizar a estrutura sub-superficial dos Flamengos.

2. Enquadramento geológico

A localidade dos Flamengos insere-se na região geomorfológica designada Plataforma da Horta. Esta região é normalmente constituída por uma sucessão de lavas basálticas, intercaladas com níveis de *clinker* de espessura variável, alternando com leitos piroclásticos com dispersão restrita. Há ainda a considerar os depósitos de piroclastos basálticos que constituem os cones de escórias presentes na Plataforma da Horta. Trata-se de depósitos que podem apresentar até 100 m de espessura, mas com uma dispersão muito localizada, evidenciada pela forma do cone. Sobre este conjunto encontram-se os materiais de cobertura constituídos por depósitos piroclásticos com origem no Vulcão da Caldeira. Estes materiais de cobertura apresentam espessuras frequentemente superiores a 2 m; no entanto, por ação da erosão, muitos locais apresentam coberturas com espessuras inferiores.

Segundo a interpretação das várias fases de edificação da ilha do Faial (Pacheco, 2001) e dos cortes geológicos e sondagens realizados em trabalhos anteriores, pode inferir-se que as litologias características da Plataforma da Horta assentam sobre o flanco do Vulcão Central e sobre os depósitos do antigo Vulcão da Ribeirinha. Ao nível da cobertura é formado por depósitos de piroclastos e, localmente, alguns leitos de escórias basálticas. As espessuras medidas desta camada variam entre os 20 cm e os 4 m. Em locais pontuais podem se encontrar espessuras da ordem dos 10 m. Além desta cobertura, devem ser considerados neste nível, os depósitos de escórias basálticas que formam os cones de escórias, pelo que, localmente a sua espessura é acrescida da altura do cone. Em seguida, a camada intermédia apresenta alternância de lavas basálticas com alguns depósitos de escórias e tufos basálticos. Esta sucessão rochosa encontra-se sã, podendo ser descrita como alternância de escoadas de lavas (com espessuras que podem variar entre 1 m e os 5 m) com camadas de *clinker* (com espessura variando entre os 40 cm e superiores a 1 m). Por último, a camada mais profunda é composta por um conjunto de escoadas lávicas com alguns depósitos de escórias e tufos basálticos antigos, muito alterados. As primeiras classificações geotécnicas dos solos dos Açores foram realizadas por Forjaz et al. (2001), que posteriormente foram relacionadas com as velocidades das ondas S, sendo estes valores apresentados por Malheiro & Nunes (2007).

3. Caracterização geofísica

3.1. Descrição geral

No mês de Outubro de 2013 foi realizada uma campanha de ensaios de refração sísmica e MASW na ilha do Faial (Açores), tendo como objetivo caracterizar a estrutura sub-superficial da mesma. Isto é, determinar os modelos de propagação das ondas sísmicas P e S. Os locais escolhidos para realizar estes ensaios foram: a cidade da Horta, Lombega e Flamengos. Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos nos Flamengos, sendo a sua localização apresentada na figura 1. O local junto à ribeira é designado por FL1 e o local junto ao campo de futebol por FL2.

O equipamento utilizado na refração sísmica e MASW foi um sismógrafo PASI (16SG24) de 24 geofones. Foram utilizados geofones verticais com frequência própria de 10 Hz e de 4,5 Hz para a refração sísmica e a MASW, respetivamente. A fonte sísmica foi um martelo de 9 kg. O comprimento do *array* para ambos os ensaios foi de 36 m, resultando um espaçamento entre geofones de 1,5 m. Na refração sísmica foram realizados 3 tiros, enquanto que no MASW foi realizado um único tiro.

3.2. Descrição geral

Os dados obtidos pela refração sísmica foram processados no programa *Winsism*, que se baseia na metodologia de Redpath (1973). Após a picagem de todas as fases das ondas sísmicas, foram determinadas as dromocrónicas cujo resultado para o sítio FL1 se encontra ilustrado na figura 2. Verificou-se que a estrutura sub-superficial é composta por

3 camadas distintas. Sendo que, a velocidade das ondas P da primeira camada é de 203 m/s e espessura de 1,25 m, a segunda camada tem 4,80 m de espessura e velocidade de 453 m/s. Por fim, a camada que corresponde ao meio semi-infinito apresenta velocidade de 758 m/s.

A figura 3 apresenta as dromocrónicas de FL2. O modelo determinado para este local é composto por 3 camadas de velocidades diferentes, sendo que a primeira camada tem 284 m/s de velocidade e espessura de 4,50 m, a segunda camada apresenta uma velocidade de 805 m/s e espessura de 9,00 m. A última camada corresponde ao meio semi-infinito e tem velocidade de 1850 m/s.

3.3. MASW

A velocidade das ondas S foi obtida pelo MASW através do programa *Surfseis*, que se baseia na metodologia de Park et al. (1999) e Xia et al. (1999). A figura 4 e a figura 5 apresentam as curvas de dispersão para os sítios FL1 e FL2, respetivamente. Para realizar a inversão com vista à determinação do modelo para as ondas transversais, foi necessário atribuir um modelo *a priori*. Para tal, foi adotado o modelo de camadas e velocidades das ondas P, proveniente do método da refração sísmica, sendo a velocidade das ondas S estimada com base na seguinte expressão: $V_S/V_P = \sqrt{(1-2\mu)/(2(1-\mu))}$, e *miu* igual a 0,3, sendo este valor usualmente utilizado na sismologia. Após inversão, foram determinados os modelos de velocidades finais das ondas S, sendo estes apresentados no ponto 3.4.

3.4. Discussão

Os modelos 1D resultantes da refração sísmica e MASW, que se traduzem em gráficos de velocidades das ondas P e S em função da profundidade, encontram-se ilustrados nas figuras 6 e 7 para os locais FL1 e FL2, respetivamente.

Em relação ao modelo de velocidades do local FL1 (Fig. 6), verificou-se que as velocidades das ondas P e S têm boa concordância. Isto é, ambas crescem em profundidade até à profundidade 10,85 m, no entanto, a partir dessa profundidade, não é possível comparar as ondas P com as S, visto que o método da refração sísmica não identifica camadas de baixa velocidade. As camadas de baixa velocidade presentes neste modelo poderão estar relacionadas com um importante evento vulcânico anterior ao vulcão da Caldeira - o antigo vulcão da Ribeirinha. Ao existirem dois eventos vulcânicos importantes, implicam a existência de duas sequências deposicionais a diferentes profundidades: A primeira, compreendida entre as profundidades 0,00 m e 6,05 m, estará relacionado com o último evento vulcânico (vulcão da Caldeira), enquanto que a outra, compreendida entre as profundidades 6,05 m e 20,00 m, estará relacionado o antigo vulcão da Ribeirinha. Contudo, dentro de cada sequência a velocidade das ondas aumenta com a profundidade, consequência do aumento dos níveis de compactação dos materiais, provocados pela erosão local, que resulta na topografia atual.

A interpretação litológica apresentada neste trabalho

foi baseada na classificação geotécnica dos solos dos Açores de Forjaz *et al.* (2001) e Malheiro & Nunes (2007). O local FL1 é composto por pedra pomes, depósitos piroclásticos, e escórias basálticas, com diferentes níveis de compactação em profundidade.

Relativamente ao modelo de velocidades do local FL2 (Fig. 7), observou-se que as velocidades das ondas P e S são ambas crescentes em profundidade até à profundidade 13,50 m. A partir dessa cota, as velocidades são constantes até à cota 32,50 m. As camadas

compreendidas entre as cotas 0,00 m e 13,50 m, são formadas por depósitos piroclásticos, pedra pomes, e escórias basálticas. As restantes são formadas por escoadas lávicas.

Segundo a carta geológica do Faial (Serralheiro *et al.*, 1989), os Flamengos são formados por depósitos de enxurrada (*lahares*). A inexistência de estudos sobre a velocidade de propagação das ondas sísmicas nestes materiais, impossibilita o relacionamento deste material com os resultados obtidos em campo.

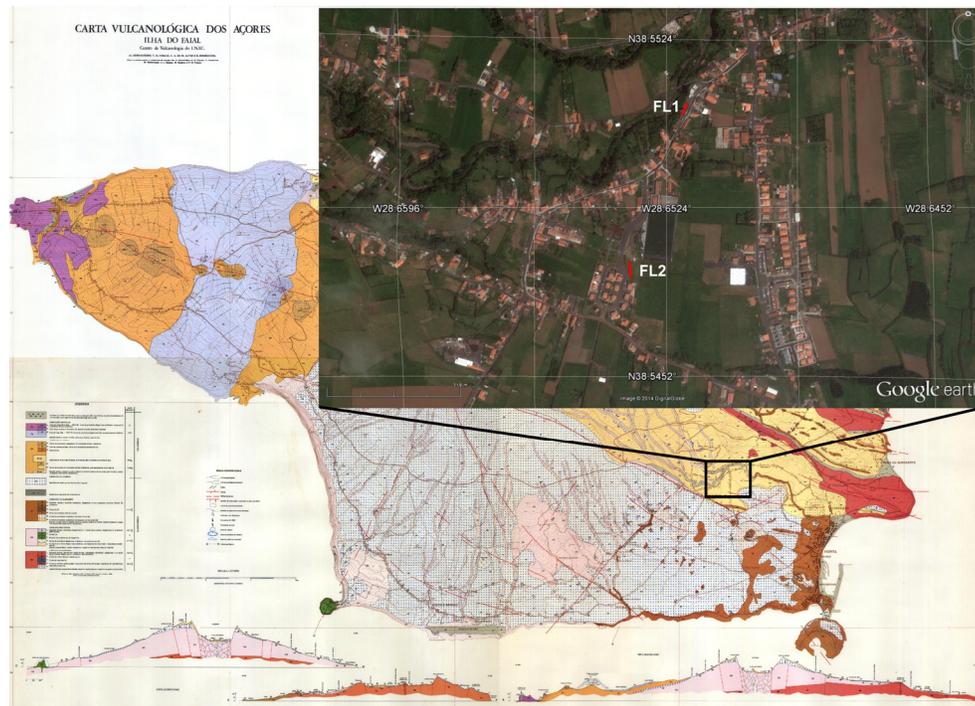


Fig. 1. Localização dos ensaios, adaptado de Serralheiro *et al.* (1989) e Google Earth.

Fig. 1. Seismic survey's location, adopted from Serralheiro *et al.* (1989) e Google Earth.

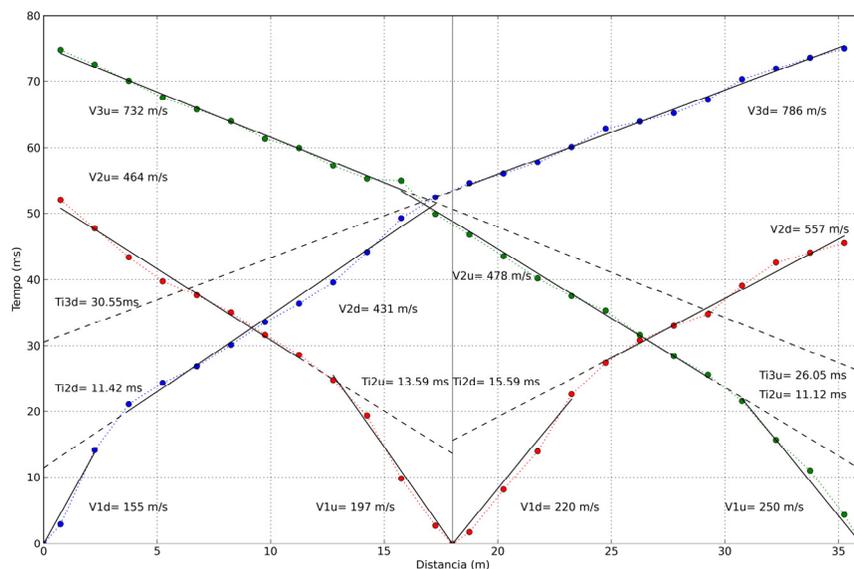


Fig. 2. Dromocrónicas de FL1.

Fig. 2. Dromochronics from FL1.

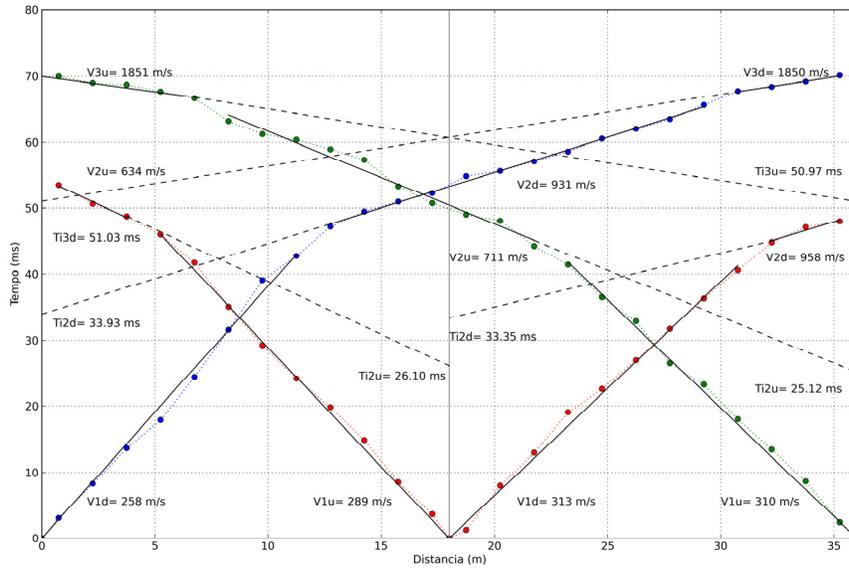


Fig. 3. Dromocrónicas de FL2.

Fig. 3. Dromochronics from FL2.

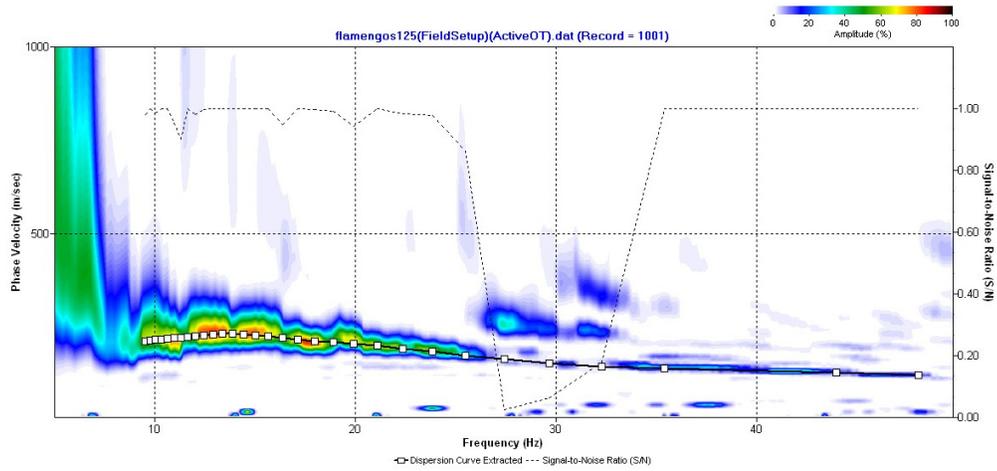


Fig. 4. Curva de dispersão de FL1.

Fig. 4. Dispersion curve from FL1.

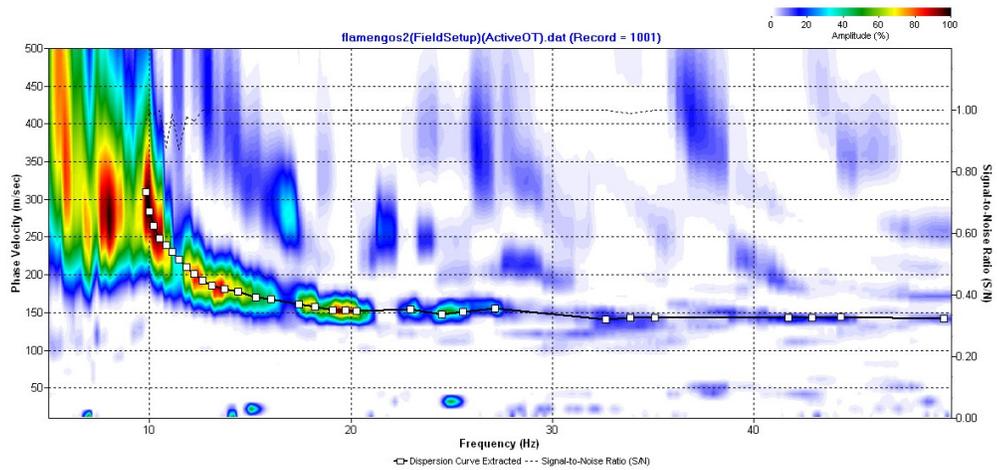


Fig. 5. Curva de dispersão de FL2.

Fig. 5. Dispersion curve from FL2.

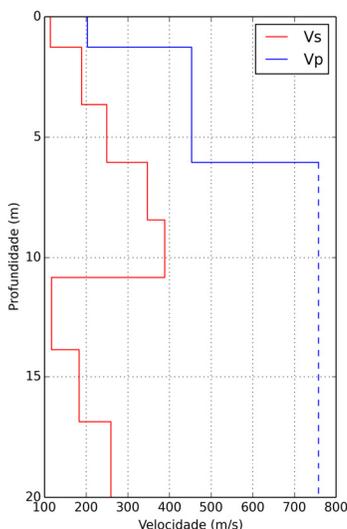


Fig. 6. Modelo de velocidades das ondas P e S do sítio FL1.

Fig. 6. Velocity model from P and S waves from FL1 site.

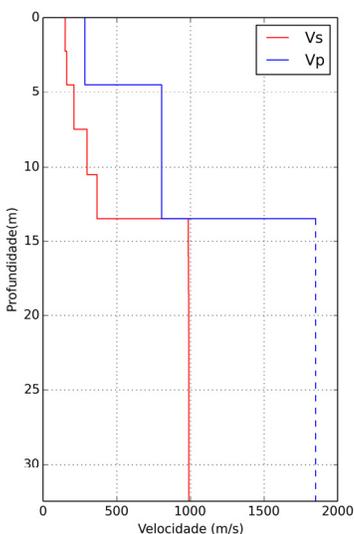


Fig. 7. Modelo de velocidades das ondas P e S do sítio FL2.

Fig. 7. Velocity model from P and S waves from FL2 site.

6. Conclusão

Pretende-se com este trabalho apresentar os modelos de velocidades de propagação das ondas sísmicas P e S, através dos ensaios geofísicos de refração sísmica e MASW, de forma a caracterizar a estrutura sub-superficial dos Flamengos.

Verificou-se que a velocidades das ondas P e S para o local FL1 são crescentes em profundidade até à cota 10,85 m. A partir desta profundidade, as ondas S apresentam velocidades inferiores (camadas de baixa velocidade), deste modo, não é possível comparar os modelos de velocidades entre as ondas P e S devido ao método da refração sísmica não identificar camadas de baixa

velocidade. As camadas de baixa velocidade resultam do facto de existirem dois eventos vulcânicos distintos. O ultimo evento vulcânico (vulcão da caldeira) formou as camadas mais à superfície até à cota 10,85 m, enquanto que o anterior evento vulcânico (antigo vulcão da Ribeirinha) é responsável pela formação das camadas de baixa velocidade. A litologia deste local é constituída por pedra pomes, depósitos piroclásticos e escórias basálticas com diferentes níveis de compactação em profundidade.

Em relação ao local FL2, verificou-se que as velocidades das ondas sísmicas são crescentes em profundidade. As camadas compreendidas entre as cotas 0,00 m e 13,50 m, são formadas por depósitos piroclásticos, pedra-pomes e escórias basálticas, enquanto que as restantes são constituídas por escoadas lávicas.

Os baixos valores da velocidade das ondas S e elevada espessura das camadas que constituem os depósitos acumulados no ao longo de diversos episódios vulcânicos ocorridos na ilha do Faial poderão estar na origem de efeitos de amplificação na amplitude das ondas sísmicas (efeito de sítio) que se verificam em diversos pontos da ilha do Faial, e em particular na zona dos Flamengos à qual se reporta o presente trabalho.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) do Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior (MCTES, Portugal) no âmbito dos projectos SIGMA (PTDC/CTE-GIX/121957/2010) e LTV-SourceMod4PSHA (PTDC/CTE-GIX/101852/2008). Agradece-se ao IPMA pela cedência das instalações da Horta durante a realização da campanha.

Referências

- Forjaz, V.H., Nunes, J.C., Guedes, J.H.C., Oliveira, C.S., 2001. Classificação Geotécnica dos Solos Vulcânicos dos Açores: uma Proposta. In: Associação Portuguesa de Meteorologia e Geofísica (Ed.). *Actas do II Simpósio de Meteorologia e Geofísica – Comunicações de Geofísica*, Évora, 76-81.
- Malheiro, A.M., Nunes, J.C., 2007. Volcanostratigraphic profiles for the Azores region: a contribution for the EC8 Regulations and the characterization of volcanic rocks geomechanical behaviour. In: A.M. Malheiro, J.C. Nunes, (Eds). *Proc. of the International Workshop on Volcanic Rocks, Workshop W2 – 11th Congress ISRM*. Ponta Delgada, Azores, Taylor & Francis Group/Balkema, London, UK, 59-64.
- Pacheco, J. M., 2001. *Processos associados ao desenvolvimento de erupções vulcânicas hidromagmáticas explosivas na ilha do Faial e a sua interpretação numa perspectiva de avaliação do hazard e minimização do risco*. Tese doutoramento, Universidade dos Açores, 330 p.
- Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., 1999. Multichannel analysis of surfaces waves. *Geophysics*, **64**(3), 800-808.
- Redpath, B.B., 1973. *Seismic Refraction Exploration for Engineering site investigations*. Explosive Excavation Research Laboratory Livermore, California, 51 p.
- Senos, M.L., Silva M., Teves Costa, P., Escuer, M., 2008. Sismicidade histórica observada nas ilhas de S. Miguel, Terceira e Faial – Açores. *5º Ass. Luso – Espanhola de Geodesia e Geofísica*, Sevilha.

- Serralheiro, A., Matos Alves, C.A., Forjaz, V.H., Rodrigues, B., 1989. *Carta Vulcanológica dos Açores – ilha do Faial à escala 1:15000*. Edição do Serviço Regional de Protecção Civil, Universidade dos Açores e Centro de Vulcanologia do INIC, 4 folhas.
- Teves Costa, P., Pacheco, J., Escuer, M., Coutinho, R., Zanon, V., Pimentel, A., Kueppers, U.T., 2008. Utilização de vibrações ambientais na caracterização dinâmica das camadas superficiais na cidade da Horta. Sismo 1998 - Açores. Uma década depois. *In*: C.S. Oliveira, A. Costa, J.C. Nunes, (Eds). *Edição do Governo dos Açores e da Sociedade de Promoção e Reabilitação da Habitação e Infra-Estruturas, S.A.*, 137 - 149.
- Xia, J., Park, C.B., Miller, R.D., 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, **64**(3), 691-700.