

ORGANIZAM | ORGANIZAN

Secção portuguesa das Uniões Internacionais Astronómica, Geodésica e Geofísica
Centro de Geofísica de Évora
Departamento de Física da Universidade de Évora

COLABORAM | COLABORAN

Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA)
Comisión Espanhola de Geodesia y Geofísica
Instituto Geográfico Nacional

Resumos
Resumens



Asamblea Hispano-Portuguesa de
Geodesia y Geofísica

Assembleia Luso Espanhola de
Geodesia e Geofísica

Proceedings



Assembleia Luso Espanhola
de Geodesia e Geofísica
Asamblea Hispano-Portuguesa
de Geodesia y Geofísica

Caracterização da estrutura sub-superficial da ilha do Faial (Açores) *Near surface characterization of Faial island (Azores)*

Neves, S. ⁽¹⁾, Borges, J. ⁽²⁾, Casação, J. ⁽¹⁾, Caldeira, B. ⁽²⁾ e Bezzeghoud, M. ⁽²⁾

⁽¹⁾ Centro de Geofísica de Évora, Universidade de Évora, Évora, sneves@uevora.pt

⁽²⁾ Centro de Geofísica de Évora, Departamento de Física, ECT, Universidade de Évora, Évora, jborges@uevora.pt

SUMMARY

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, MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), and Horizontal-to-Vertical spectral ratio ambient-noise in Faial Island (Azores). After determining the velocity models and ratios H/V, the results were compared for the same location, with previous works of ambient-noise and with lithology of the island. These results providing important physical parameters for a near surface characterization of the soil structure and to predict seismic ground motion in this region.

1. INTRODUÇÃO

A ilha do Faial é uma das nove ilhas que se insere no arquipélago dos Açores, nomeadamente no grupo central, sendo a ilha mais a Oeste do referido grupo.

O sismo que ocorreu a 9 de Julho de 1998 (MI=5.8), com epicentro a cerca de 16 km da cidade da Horta e foi sentido com intensidade máxima VIII (MMI) (Senos *et al.*, 2008). O evento também foi sentido com grande intensidade 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 (VIII EMS98). Na cidade da Horta os danos não foram muito elevados, tendo-se observado uma intensidade máxima de VI. No entanto, é de salientar que em Lombega e Flamengos foram observadas intensidades máximas de VII, enquanto que 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 dos sismos no Arquipélago dos Açores, como é o caso do projeto COMICO, o qual utilizou vibrações ambientais para caracterizar dinamicamente as camadas superficiais na cidade da Horta (Teves Costa *et al.*, 2008). Para além do referido projeto, foi feita em 2012 uma campanha de registo de ruído sísmico ambiente no âmbito do projeto SIGMA, tendo como objectivo a caracterização dos diferentes solos.

O objectivo do presente trabalho é apresentar os modelos de velocidades de propagação das ondas sísmicas P e S, obtidos através de métodos geofísicos, tais como, ensaios de refração, MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*) e o estudo ruído ambiental, de modo a caracterizar a estrutura sub-superficial da ilha do Faial.

2. ENQUADRAMENTO

2.1. Geomorfologia

O relevo da ilha é caracterizado por quatro regiões com características geomorfológicas diferentes. Designam-se por Vulcão Central, Graben de Pedro Miguel, Plataforma da Horta (composta pela Horta, Feteira e Flamengos) e Península do Capelo (Fig. 1). A Plataforma da Horta está confinada a Norte pelo Graben de Pedro Miguel e a Oeste pelo Vulcão Central. É caracterizada por um conjunto de cones vulcânicos, que formam os principais relevos, e por zonas de baixo declive ou planas, as quais resultaram de acumulação de depósitos sedimentares, proclásticos e de derrames lávicos (Madeira, 1998).

A cidade da Horta situa-se a Este da Plataforma da Horta e ocupa uma área com cerca de 8,5 km² que se encontra urbanizada.

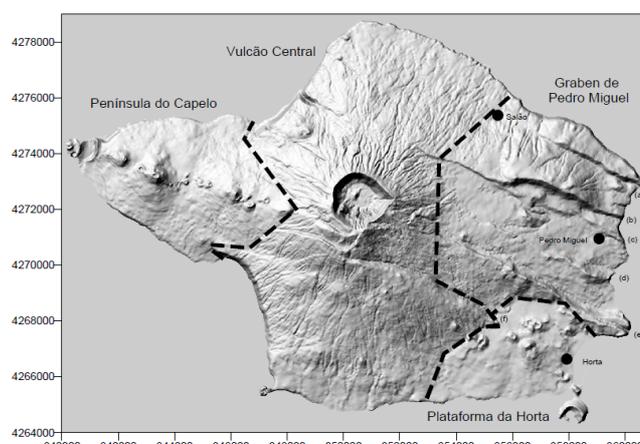


Figura 1 - Modelo tridimensional e localização das regiões geomorfológicas da ilha do Faial. (a) – escarpa de falha da Ribeirinha; (b) – escarpa de falha da Lomba Grande; (c) – escarpa de falha da Ribeira do Rato; (d) – escarpa de falha da Rocha Vermelha; (e) – escarpa de falha da Espalamaca; (f) – escarpa de falha dos Flamengos (Madeira, 1998). Coordenadas UTM

O Vulcão da Caldeira é um edifício vulcânico com cerca de 15 km de diâmetro (ao nível do mar), que domina o relevo na ilha, e em particular a região do Vulcão Central.

Após a formação da caldeira ocorreu actividade vulcânica no interior, resultando na edificação de um cone de piroclastos. Este edifício vulcânico apresenta-se superficialmente, quase na totalidade, coberto por materiais piroclásticos (pedra pomes de projeção, depósitos freáticos e freatomagmáticos, escoadas piroclásticas e lahares), cuja espessura atinge os 100 m no bordo Norte da caldeira, diminuindo para a periferia. Sobre estes materiais desenvolve-se uma rede de drenagem de padrão radial. Entre os 700-900 m e o litoral, as linhas de água encaixam-se nos depósitos piroclásticos até alcançarem as escoadas subjacentes. A rede de drenagem encontra-se condicionada tectonicamente, facto que é evidente quando ocorrem quebras do típico padrão radial por acção de falhas. A ribeira dos Flamengos tem o seu troço superior condicionado pela escarpa da falha dos Flamengos. O litoral desta região é constituído por costa rochosa, pouco recortada, apresentando arribas altas e uma estreita praia de calhau rolado.

O Graben de Pedro Miguel é geologicamente complexo, visto que os materiais efusivos e explosivos do Vulcão da Caldeira assentam sobre um conjunto de escoadas mais antigas que faziam parte do Vulcão da Ribeirinha, atualmente bastante erodido. A sua morfologia é condicionada pela ação tectónica. Esta região situa-se na parte oriental da ilha, que se estende desde Salão até a Lomba da Espalamaca. É caracterizada pelo relevo em degraus, resultante de desnivelamentos importantes da

superfície do solo ao longo de um conjunto de falhas na direcção WNW-ESE (Fig. 1). A Lomba Grande, de Espalhafatos, e uma lomba menor que corresponde ao alinhamento das vertentes do lado norte dos vales das ribeiras da Fonte Nova e do Rato, associada à falha da ribeira do Rato, apresentam escarpas voltadas para Sul. A Lomba dos Frades-Lombinha e a Lomba da Espalamaca apresentam escarpas viradas para Norte.

A região da Península do Capelo localiza-se no extremo ocidental da ilha, trata-se de uma área resultante de vulcanismo recente. Por esta razão, e por ser constituída por materiais resistentes, a rede hidrográfica é inexistente.

2.2. Morfologias vulcânicas

A forma da ilha assemelha-se a um pentágono, sendo o comprimento máximo na direcção WNW-ESE aproximadamente de 21 km. O comprimento máximo perpendicular ao alinhamento anterior, do porto do Caldeirão até ao porto do Castelo Branco, é sensivelmente de 14 km. A ilha tem uma superfície aproximadamente de 180 km², sendo que o ponto mais elevado da mesma se localiza no bordo Sul da caldeira, que corresponde ao marco geodésico do Cabeço Gordo, à cota 1043 m (Madeira, 1998).

Além do Vulcão da Caldeira, a ilha integra ainda um antigo vulcão central já parcialmente destruído, o Vulcão da Ribeirinha, localizado na região do Graben de Pedro Miguel.

A ilha apresenta vários edifícios vulcânicos de menores proporções, associados a diversos tipos de vulcanismo, nomeadamente cones de escórias, formas hidrovulcânicas e domos (Pacheco, 2001).

No Faial existem 46 cones de escórias, dos quais 13 encontram-se na Plataforma da Horta (Fig. 2), alguns deles com mais de uma cratera devido à alteração do trajecto de ascensão do magma. Alguns dos cones têm escoadas lávicas associadas. Os cones de escórias são edifícios vulcânicos normalmente monogenéticos, formados durante erupções estrombolianas e/ou havaianas de magmas basálticos (Macdonald, 1972; Wallenstein *et al.*, 1996). A reduzida explosividade é uma característica deste tipo de erupções, pelo que a grande maioria de piroclastos são de trajectória balística e de baixa dispersão.

As formas hidrovulcânicas são designadas geralmente por *maars* (Cas & Wright, 1988). Estes aparelhos vulcânicos monogenéticos resultam de actividade hidromagmática explosiva, e apresentam crateras de grande diâmetro relativamente à altura do bordo. Actualmente, na ilha do Faial existem três edifícios hidrovulcânicos, todos do tipo de cone de tufos, resultantes de erupções surtseianas emergentes, sendo eles o Monte da Guia, a SE da ilha, constituído por tufos palagonitizados endurecidos; o cone da Costa da Nau, na Península do Capelo, bastante erodido pela acção do mar; e, a Oeste, o cone dos Capelinhos, o mais jovem destas estruturas, tendo sido formado no decurso da erupção de 1957/58 (Pacheco, 2001).

As escoadas lávicas são o resultado da actividade efusiva ou de baixa explosividade do vulcão. Neste último caso formam-se fontes de lava típicas da actividade havaiana (Cas & Wright, 1988; Head & Wilson, 1989), formando escoadas a partir da acumulação dos fluidos por elas projetados. O Faial apresenta escoadas *pahoehoe* e *aa*, originadas em magmas basálticos. As lavas *pahoehoe* caracterizam-se por uma elevada fluidez e uma baixa velocidade de progressão (Kilburn, 2000). As lavas *aa* caracterizam-se por uma maior viscosidade e velocidade de progressão. Estes factores justificam a fraturação das camadas periféricas das escoadas, mais arrefecidas, face às elevadas tensões cisalhantes desenvolvidas entre o núcleo em movimento e as camadas periféricas. Assim, o aspecto exterior destas escoadas evidencia uma superfície irregular, composta por material fragmentando e solto, designado por *clinker* (Macdonald, 1972). Para além das escoadas lávicas referidas, existem as lavas em «pasta de dentes», que resultam de escoadas

com uma fluidez idêntica às lavas *aa*, mas com menor velocidade de progressão.

A Península do Capelo é constituída maioritariamente por escoadas lávicas dos tipos *pahoehoe* e *aa*, enquanto que no resto da ilha estes tipos de escoadas surgem pontualmente no fundo de linhas de água e em arribas. No decorrer da erupção de 1972, na Península do Capelo, além das escoadas *pahoehoe* e *aa*, também foram identificadas lavas em «pasta de dentes» (Gaspar & Queiroz, 1992).

Os domos são formados por magmas de composição evoluída, muito viscosos e com pouca velocidade de progressão. No Faial existem dois domos. O domo de Altar, que se situa no interior da caldeira do Vulcão da Caldeira, encontrando-se bastante degradado, e o domo de Castelo Branco, localizado na costa sul da região do Vulcão da Caldeira.

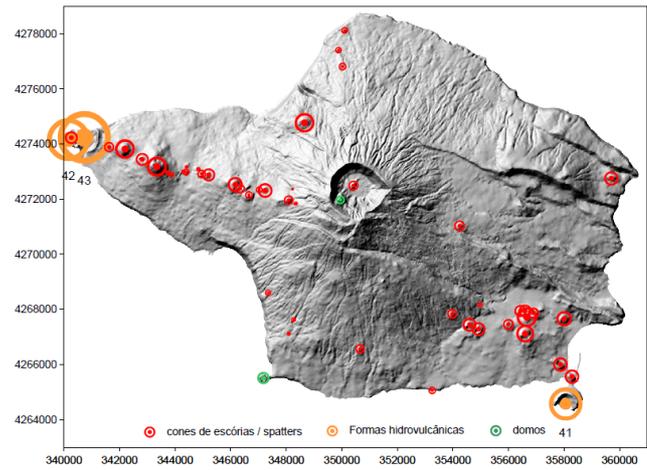


Figura 2 - Distribuição dos centros eruptivos na ilha do Faial. O diâmetro dos círculos é proporcional à dimensão do diâmetro basal médio dos edifícios vulcânicos (Pacheco, 2001). Coordenadas UTM.

2.3. Tectónica

A tectónica da ilha do Faial é extremamente complexa. Das várias estruturas tectónicas existentes, destacam-se dois sistemas de falhas, de alinhamentos gerais WNW-ESE e NNW-SSE a NW-SE (Agostinho, 1936; Berthois, 1953; Tazieff, 1959; Zbiszewski & Ferreira, 1959; Zbiszewski *et al.*, 1959; Machado, 1955, 1982; Chovelon, 1982; Serralheiro *et al.*, 1989; Madeira & Ribeiro, 1990, 1992; Madeira, 1991a, 1991b, 1998; Pacheco, 2001).

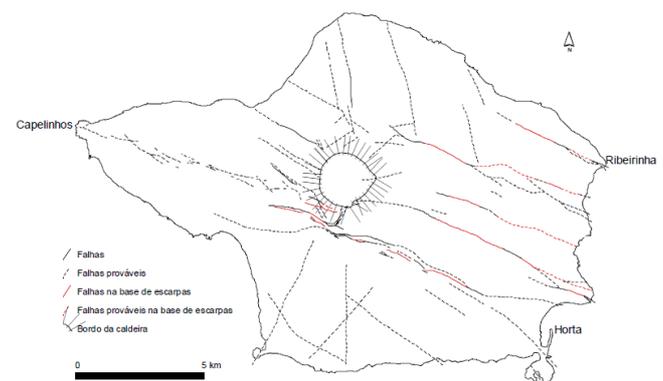


Figura 3 - Principais estruturas tectónicas da ilha do Faial (Adaptado de Pacheco, 2001).

O sistema dominante está orientado a WNW-ESE (Fig. 3), de carácter distensivo com desligamento direito, evidenciado pelo conjunto de escarpas de falha e patamares que se destacam na zona leste da ilha, onde se distinguem as falhas da Ribeirinha, da Lomba Grande, da Ribeira do Rato, da Rocha Vermelha, da Espalamaca e dos Flamengos que definem o Graben de Pedro

Miguel (Madeira & Ribeiro, 1990; Madeira, 1991a; 1991b, 1998).

Na parte ocidental da ilha, a mais importante manifestação tectónica é indicada pelo alinhamento de cones de escórias entre o Cabeço dos Trinta e o Vulcão dos Capelinhos, dispostos ao longo da falha do Capelo (Madeira, 1998). Esta falha é importante no que se refere às erupções históricas (Cabeço do Fogo em 1672 e Capelinhos em 1957/58), pois ambas se encontram sobre o mesmo alinhamento tectónico. Segundo Madeira (1998), este é um sistema distensivo com desligamento direito normal.

Relativamente às estruturas tectónicas que afectam a região da cidade da Horta, destacam-se os sistemas de falhas de direcções gerais WNW-ESE e NE-SW (Fig. 3). Contudo, é difícil identificar a sua expressão morfológica, visto que esta região está coberta por escoadas lávicas, formando uma região aplanada (Pacheco, 2001).

2.4. Sismicidade

A ilha do Faial, à semelhança das restantes ilhas dos grupos central e oriental, possui uma atividade sísmica significativa, tendo sido abalada por diversos sismos de elevada intensidade desde o seu povoamento. Alguns sismos tiveram consequências muito graves, como foi o caso do terramoto de 9 de Julho de 1998. Este sismo, que se terá desenvolvido nos sistemas de falhas de orientação NE-SW, ou nos sistemas de orientação WNW-ESSE (Gaspar *et al.*, 1998), teve uma magnitude de 6.0 (Mw) e o epicentro no mar, sensivelmente a 7.5 km da Ponta da Ribeirinha, local onde foi sentido com maior intensidade de VIII na escala de Mercalli Modificada (MM-56) (Senos *et al.*, 2008).

Para além da crise sísmica referida, o Faial também foi abalado por outra importante crise sísmica que marcou a história recente da ilha, nomeadamente a que acompanhou a erupção dos Capelinhos em 1957/58 (Machado, 1969). Entre os dias 16 e 27 de Setembro de 1957 foram sentidos mais de 200 sismos, com intensidades que não ultrapassaram o grau V (MM). No início da crise, os sismos tiveram origem na região leste da ilha, mas a 20 de Setembro a região epicentral migrou para Oeste, tornando os sismos mais frequentes. Ao mesmo tempo, o extremo Oeste da ilha era também afectado por tremores vulcânicos contínuos. Desde o início da erupção, a 27 de Setembro, a intensidade e a frequência dos sismos baixou consideravelmente até Maio de 1958. Nos dias 12 e 13 de Maio a actividade sísmica voltou a aumentar consideravelmente, estando associada à erupção do Vulcão dos Capelinhos (Machado, 1959a; Lobão, 1999). Durante este evento é referida a ocorrência de cerca de 450 sismos nos dois dias anteriormente referidos, alguns extremamente violentos, atingindo intensidades de grau X (MM).

Para além da Praia do Norte, que ficou completamente destruída, este evento atingiu igualmente o resto da ilha com grande devastação. Os epicentros não se restringiram à zona da Praia do Norte, tendo-se distribuído por três áreas: Praia do Norte, Espalhafatos e região sul do Vulcão Central (Machado, 1959a).

Esta crise originou rupturas superficiais com deslocamentos verticais superiores a 80 cm (Machado, 1959a), estando associada ao desenvolvimento de uma erupção freática e ao aparecimento de fumarolas no interior da caldeira, tendo ainda originado uma mudança drástica no comportamento do Vulcão dos Capelinhos.

Outro sismo devastador ocorrido no Faial, foi o de 31 de Agosto de 1926. Causou grande destruição na cidade da Horta, Flamengos, Ribeirinha e Conceição, e pontualmente nos locais de Farrobo, Lomba e Espalhafatos, com magnitude estimada de

5,3 a 5,9 (Mb). O sismo produziu intensidade máxima entre IX e X na escala de Mercalli na zona norte da cidade da Horta (Conceição), tendo provocado 9 mortes e mais de 200 feridos. O epicentro foi localizado no canal Faial – Pico (Agostinho, 1927).

2.5. Litologias e Classificação geotécnica dos solos

A Plataforma da Horta é 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 espessuras até 100 m, mas com uma dispersão muito localizada, traduzida na própria forma do cone. Sobre este conjunto encontram-se os materiais de cobertura constituídos por depósitos piroclásticos pomíticos com origem no Vulcão da Caldeira. Estes materiais de cobertura apresentam espessuras frequentemente superiores a 2 m, no entanto, por ação da erosão localizada, muitos locais apresentam coberturas de espessura significativamente inferior. Estima-se uma espessura mínima de cerca de 1 m de piroclastos pomíticos, cobrindo a generalidade da área da cidade da Horta.



Figura 4 – Sucessão de escoadas lávicas com níveis de *clinker*. Pedreira das Terças.

A partir da interpretação das várias fases de edificação da ilha do Faial (Pacheco, 2001) e dos cortes geológicos e sondagens estudadas 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 piroclastos pomíticos e, localmente, alguns leitos de escórias basálticas. As espessuras medidas desta camada variam entre os 20 cm e os 4 m. Localmente poderão encontrar-se espessuras da ordem dos 10 m. Além desta cobertura, deverão ainda 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 (Fig. 4). 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 espessuras variando entre 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.

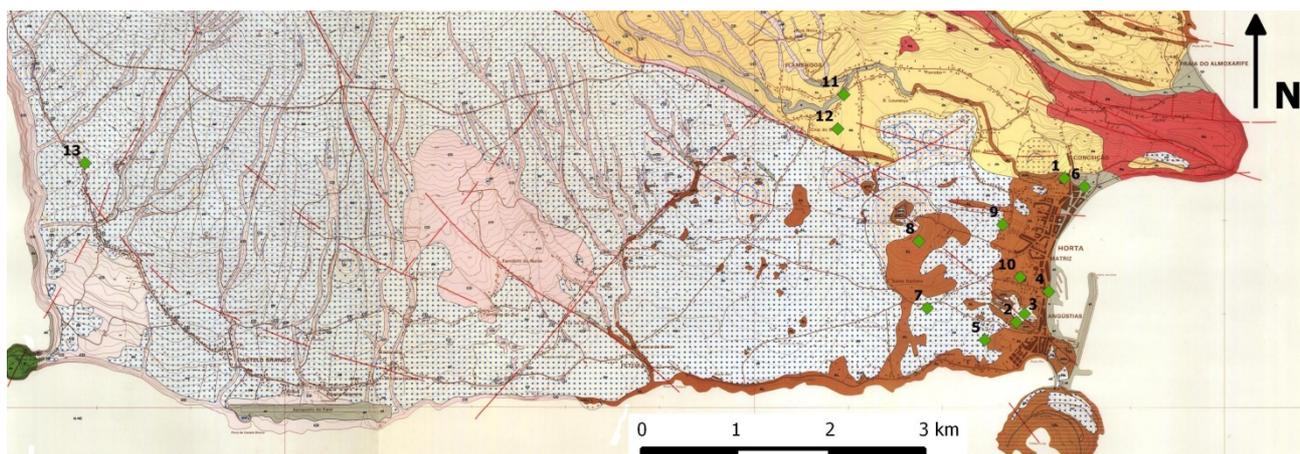


Figura 5 – Carta geológica do Faial com os pontos onde foram realizados os ensaios geofísicos (Zbyszewski *et al.*, 1959). pp - Depósitos de pedra pomes (benmoreito-traquito); AL - Escoadas lávicas e cones de piroclásticos (bagacinas); piAL - Escoadas lávicas e cones de piroclastos (bagacinas) com pequenos derrames subaéreos; de - Depósitos de enxurrada (*lahares*), com carvão; a - Aluviões”.

As primeiras classificações geotécnicas dos solos dos Açores foram realizadas por Forjaz *et al.* (2001). A Tabela 1 apresenta a referida classificação. Na primeira coluna é apresentado o grupo onde o solo se insere, podendo ser classificado de Duro (I), Intermédio (II) ou Mole (III). Na segunda coluna são apresentados os sub-grupos, que estão relacionados com as descrições dos solos, que posteriormente foram relacionadas com as velocidades das ondas S, sendo estes valores apresentados por Malheiro & Nunes (2007).

Tabela 1 – Classificação geotécnica dos solos dos Açores segundo Forjaz *et al.* (2001) e Malheiro & Nunes (2007).

Grupo	Sub-grupo	Descrição	Vs (m/s)
Duro (I)	I a	Traquito s.l. escoadas lávicas incluindo coulés e domas)	1570
	I b	Escoadas lávicas basálticas s.l.	1000 - 3300 (basalto); 399 - 1000 (<i>clinker</i>)
	I c	Ignimbritos solidificados	702
	I d	Tufos surtseianos	630
Intermédio (II)	II a	Ignimbritos não-consolidados e <i>lahares</i>	-
	II b	Depósitos de vertente, aluvionares e de praia	-
Mole (III)	III a	Pedra pomes e outros depósitos piroclásticos, traquitos s.l.	220 - 550 (normalmente inferiores a 350)
	III b	Piroclastos basálticos s.l. (escória)	-

2.6. Campanhas anteriores de ruído ambiental

Em Julho de 2006 realizou-se uma campanha de medidas de vibrações ambientais que consistiu na aquisição de 262 pontos na cidade da Horta (Teves Costa *et al.*, 2008). Em cada ponto foram registados 15 minutos de ruído ambiental. Na campanha foram utilizadas 2 estações sísmicas Marslite equipadas com sismómetros Lennartz de 3 componentes, com frequência própria de 1 Hz. No final foram obtidos 246 pontos válidos. O processamento dos dados foi realizado no programa Geopsy (Geopsy, 2005) de acordo com o método proposto por Nakamura (1989; 2000).

Após a determinação das curvas H/V, foram obtidas as frequências de pico, e depois criadas classes de frequências de pico com o objectivo de observar a classe predominante. As classes de frequência seleccionadas foram: menor de 1 Hz, de 2 a 4 Hz, de 4 a 6 Hz, de 6 a 8 Hz, de 8 a 10 Hz e superior a 10 Hz.

Verificou-se que existem picos que não foram bem definidos devido à natureza do terreno (predominantemente rochosos). Por esse motivo, foram seleccionados apenas os picos que aparentavam possuir significado, reduzindo para 136 pontos (Teves Costa *et al.*, 2008). Após nova análise, verificou-se que a frequência própria da Horta é variável, estando compreendida entre 1 e 8 Hz devido, provavelmente, à variação da espessura da camada superficial.

Teves Costa *et al.* (2008) apresentam o mapa de frequências dominantes para a cidade da Horta (Fig. 5). Pode-se observar, na parte norte da cidade da Horta, junto à ribeira da Conceição, as frequências variam entre 1 a 4 Hz, aumentando para valores superiores nas zonas para o interior e para sul. As baixas frequências, junto à ribeira, podem estar relacionadas com grandes espessuras dos depósitos sedimentares. Para sul, junto à costa, apresentam frequências superiores a 10 Hz que podem estar relacionadas com pequenas espessuras do depósito superficial. Antes do istmo para o Monte da Guia existe outra zona de baixas frequências (até 2 Hz) mas depois, para sul e sudoeste, as frequências voltam a aumentar até cerca de 8 Hz, na zona sul da cidade da Horta.

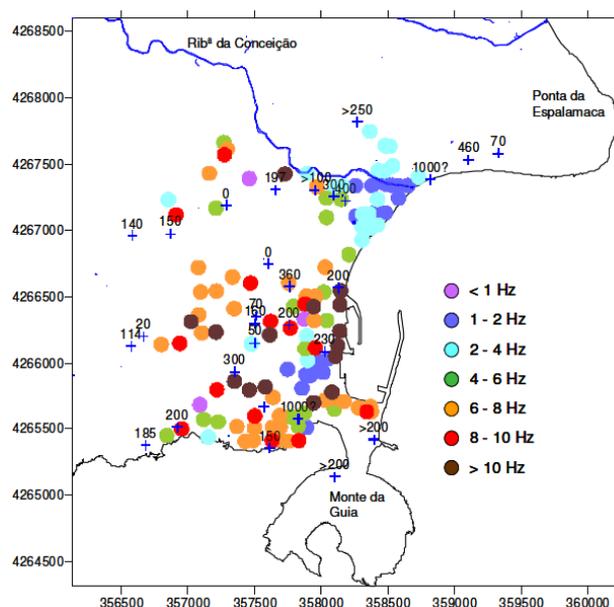


Figura 5 – Frequências de pico das curvas H/V. As cruces assinalam os pontos onde foi medida a espessura da camada superficial (cm) (Teves Costa *et al.*, 2008)

Posteriormente foram realizados mais ensaios de ruído ambiental no Faial, concretamente em Lombega, Salão, Flamengos, Pedro Miguel, Horta e Alagoa. Nesta campanha foram realizados array's circulares, nomeadamente na Alagoa. Após o processamento e inversão das curvas H/V através do programa Geopsy, foram determinados os modelos de velocidades das ondas S em profundidade e determinadas as frequências de pico, e a espessura máxima da camada superficial (Tabela 2).

Tabela 2 – Parâmetros geofísicos obtidos através das curvas H/V.

Local	Frequência de pico (Hz)	Espessura máxima da camada superficial (m)	Velocidade das ondas S na camada superficial (m/s)
Horta	7	15	400
Alagoa	8 - 10	4	200
Salão	7 - 9	5	160
Lombega	5 - 9	5 - 10	200
Flamengos	4	5	80
Pedro Miguel	5 -20	4	240

3. CAMPANHA DE ENSAIOS GEOFÍSICOS

3.1. Descrição geral dos ensaios

Em Outubro de 2013, realizou-se uma campanha de ensaios de refração sísmica, MASW, e ruído ambiental na ilha do Faial. O objectivo principal desta campanha foi caracterizar a estrutura sub-superficial do Faial, em concreto, a cidade da Horta, Flamengos e Lombega. Os motivos da escolha são: Na cidade da Horta, como contributo para enriquecimento do conhecimento sobre a litologia da cidade e avaliar com maior rigor os perigos sísmicos a que o aglomerado populacional está sujeito. Nos Flamengos e Lombega, por ter-se constatado que estas localidades ter ocorrido efeito de sítio durante o sismo de 1998 (Senos *et al.*, 2008).

Através do método da refração sísmica é possível estimar a estrutura sub-superficial do solo e determinar as velocidades de propagação das ondas P em profundidade. Para além do método referido, o método MASW permite estimar a estrutura sub-superficial e determinar as velocidades de propagação das ondas S em profundidade, parâmetro absolutamente indispensável para a avaliação do perigosidade sísmica.

Os locais ensaiados foram estabelecidos de acordo com os registos sismológicos prévios, os constrangimentos geográficos e habitacionais da cidade da Horta, as frequências de pico obtidas em trabalhos anteriores, a geologia, e condições adequadas para a realização dos ensaios.

No total foram realizados 13 conjuntos de ensaios, cada conjunto é composto pelos ensaios de refração, MASW, e ruído ambiental. Na cidade da Horta realizaram-se 10 conjuntos de ensaios, nos Flamengos 2 e na Lombega 1.

A Figura 5, além de apresentar a carta geológica do Faial também indica os locais onde foram realizados os ensaios.

O equipamento utilizado tanto na refração sísmica como no MASW foi um sismógrafo PASI (16SG24) de 24 geofones. Na refração sísmica utilizaram-se geofones verticais com frequência própria de 10 Hz, e para o MASW de 4,5 Hz. A fonte sísmica foi um martelo de aproximadamente 9 Kg. O comprimento total do array foi de 36 m, assim, o espaçamento entre dois geofones consecutivos foi de 1,50 m. Na refração sísmica foram realizados cinco tiros. Para o MASW foi realizado um único tiro. No ruído ambiente foram utilizadas duas estações Guralp CMG-6TD broadband (BB) de 3 componentes, com frequência própria de 30 s. As estações (BB) foram colocadas no início do array dos ensaios anteriores. Foram efectuados registos

de ruído sísmico durante períodos de 30 m, tendo-se ignorado os primeiros 15 minutos, intervalo de tempo para estabilizar os sensores (Furtado, 2010).

Neste trabalho descreve-se o processamento dos dados da Alagoa. Os resultados dos restantes locais são apresentados em forma de tabela.

3.2. Refração sísmica

A refração sísmica é um método rápido, eficiente e não evasivo. A maior limitação deste método é que não consegue identificar camadas de baixa velocidade estando intercalado em duas camadas com velocidades superiores. Ou seja, a velocidade de propagação das ondas P tem que ser sempre crescente em profundidade (Redpath, 1973).

O método de refração sísmica, baseia-se na geração de ondas sísmicas P que se propagam no terreno e se refractam nas interfaces dos meios com velocidades de propagação crescentes em profundidade, e com características elásticas suficientemente distintas.

Ao introduzir um impulso no solo, são obtidos os tempos de percurso das ondas sísmicas através dos geofones, que se encontram dispostos ao longo do terreno em array (em linha e com espaçamento constante). Ao ajustar os tempos de percurso a segmentos de recta, utilizando por exemplo o método dos mínimos quadrados, são determinados os declives da recta, sendo que o inverso do declive é a velocidade de propagação da onda sísmica. Cada segmento de recta com declive diferente, representa diferentes camadas com diferente velocidade de propagação das ondas P (Fig. 6).

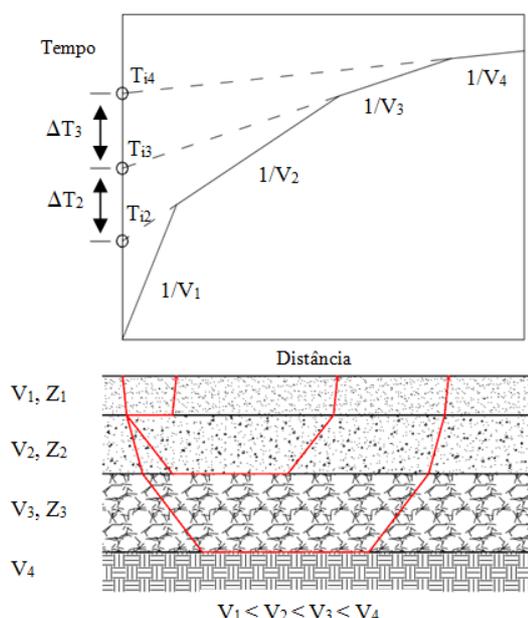


Figura 6 – Esquema de um modelo multicamada em correspondência com os tempos de percurso das ondas sísmicas em função da distância. (Adaptado de Redpath, 1973)

Ao prologar-se as rectas até a posição onde foi realizado o tiro, no caso apresentado é a origem do gráfico, são determinados os tempos de interceptação (T_i). Ao subtrair o tempo de interceptação T_{i3} com o T_{i2} é obtida a diferença temporal (ΔT_2). Determinadas as diferenças temporais para todos os casos, e as respectivas velocidades, são calculadas as espessuras das camadas segundo as equações de Redpath (1973). A utilização de vários impulsos ao longo do array permite criar um modelo de velocidades 1.5D (Fig. 7).

Todos os dados foram processados com o programa Winsism, que utilizada a metodologia descrita anteriormente.

A Figura 7 apresenta o modelo de velocidades das ondas P da Alagoa. Verifica-se que a estrutura sub-superficial é composta por 3 camadas distintas em velocidade. A primeira camada tem

aproximadamente 3 m de espessura e com velocidade de propagação de 250 m/s. A segunda camada apresenta uma espessura variável ao longo do modelo, tendo uma espessura mínima de 3 m e máxima de 8 m. A velocidade desta camada é de 1500 m/s. Por fim, a última camada representa o meio semi-infinito, tendo uma velocidade de 3000 m/s.

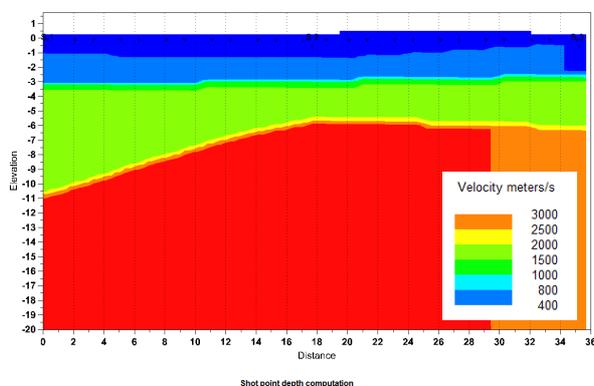


Figura 7 – Modelo de velocidades das ondas P da Alagoa.

Segundo este modelo, verifica-se que existe variação lateral da velocidade, o que era expectável devido à complexidade da litologia do Faial.

A Tabela 3 apresenta resumidamente todos os resultados da refração sísmica. A primeira coluna apresenta os locais onde foram realizados os ensaios e a respectiva numeração, sendo esta representada na Figura 5. Nas restantes colunas são apresentados as posições das camadas. Sendo que a camada 1, é a camada superficial do solo e a camada 3 corresponde à camada mais profunda, enquanto que a camada 2 encontra-se no meio das duas camadas referidas. Cada coluna que corresponde a 1 camada é sub-dividida em 2 colunas, em que a primeira coluna corresponde à velocidade de propagação das ondas P e a segunda coluna à espessura da respectiva camada.

Tabela 3 – Velocidades de propagação das ondas P para cada camada e respetiva espessura, para cada local.

Local	Camada 1		Camada 2		Camada 3
	Vp (m/s)	Esp. (m)	Vp (m/s)	Esp. (m)	Vp (m/s)
1 Alagoa	250	3,0	1500	3,0	3000
2 Observatório	-	-	-	-	-
3 Hotel Faial	200	1,0	500	-	-
4 Marina	250	3,0	1500	1,0	2800
5 Jardim da Igreja Santa Maria Isale	220	1,5	400	1,0	500
6 Ribeira da Conceição	-	-	-	-	-
7 Campo 1	200	3,0	400	-	-
8 Base Militar	200	5,0	600	-	-
9 Campo 2	200	2,5	450	-	-
10 Horta	180	3,5	500	8,5	1400
11 Flamengos 1	230	1,5	450	3,0	760
12 Flamengos 2	320	5,0	450	7,5	840
13 Lombega	150	2,0	590	7,0	800

A Alagoa, a Marina e os Flamengos 2 apresentam velocidades elevadas de propagação das ondas P para a camada 1 ($V_p \geq 250$ m/s). Estes locais apresentam 3 camadas, com espessuras diferentes entre si. Os locais com velocidades mais baixas são, a Horta e a Lombega. Ambas apresentam velocidades inferiores a 200 m/s. Estes locais são compostos por 3 camadas

de espessura variável. Os restantes locais apresentam velocidades das ondas P para a camada 1 compreendidas entre os 200 e 250 m/s. As espessuras são variáveis para cada local. Os locais que não apresentam velocidades das ondas P devem-se a problemas com os ficheiros de aquisição ou conterem muito ruído.

3.3. MASW

O objectivo principal do método é determinar a distribuição em profundidade da velocidade de propagação das ondas S. Para além de estimar a velocidade das ondas S, este método permite estimar a estrutura sub-superficial, nomeadamente o número de camadas e as respectivas espessuras (Xia et al., 1999). É um método rápido, não evasivo, e de baixo custo. Permite identificar camadas de baixa velocidades alternadas com camadas de velocidade mais elevada. É possível escolher o tipo fonte sísmica, activa ou passiva. No MASW a razão sinal/ruído é maximizada. A desvantagem deste método consiste na não unicidade das soluções, ou seja, na possibilidade de se obter diversos modelos de camadas relativamente próximos da solução que satisfazem os dados observados. Para este método ser aplicado com sucesso, é necessário aplicar restrições, nomeadamente, o estabelecimento de um modelo *a priori* para iniciar o processo de inversão, de modo a minimizar a dispersão do resultado finais.

O método MASW 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 encontra-se na base da construção uma curva que relaciona a velocidade de fase com a frequência, designada por curva de dispersão (Fig. 8).

As ondas superficiais adquiridas são normalmente as ondas de Rayleigh, (ondas presentes unicamente na componente vertical do registo sísmico) que correspondem a cerca de dois terços da energia produzida por uma fonte pontual (Richart et al., 1970). São conhecidas diversas metodologias, em que se faz variar, por exemplo, o número, tipo de geofones utilizados, geometria do array e o processo para obter a curva de dispersão e/ou o algoritmo de inversão (Nazarian & Stokoe, 1984; Stokoe et al., 1988; Park et al., 1998-b; 1999; Xia et al., 1999; 2000). Após o processamento são determinados os modelos de velocidades das ondas S 1D., tendo-se optado no presente trabalho por um dispositivo linear semelhante em tudo ao da refração sísmica

Para processar os dados do MASW recorreu-se ao programa Surfseis. Foi necessário importar os dados e introduzir os parâmetros geométricos do ensaio. De seguida, foi realizado o processamento dos dados e determinado o gráfico de dispersão de energia, que relaciona a frequência com a velocidade de fase. Neste gráfico realizou-se a picagem dos pontos com maior energia, de modo a criar um conjunto de pontos que depois o programa utiliza para ajustar a uma curva de dispersão. A figura 11 apresenta a curva de dispersão obtida no sítio da Alagoa.

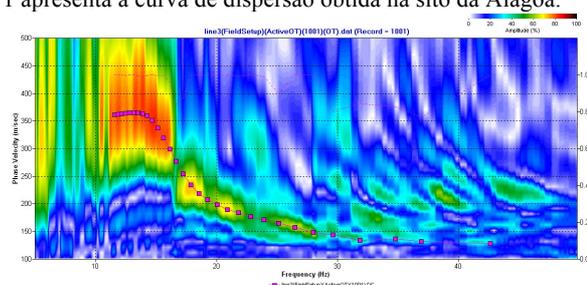


Figura 8 – Curva de dispersão da Alagoa.

Para realizar a inversão é necessário utilizar 1 modelo de camadas *a priori*. Para tal, foram utilizados as espessuras das camadas obtidos previamente pela refração sísmica. A velocidade das ondas S do modelo *a priori* foi obtida a partir da

equação 1, em que relaciona a velocidade das ondas S com a velocidade das ondas P através do coeficiente de Poisson, que no presente caso foi considerado 0,4. Para os locais que não foram obtidos os modelos de refração, utilizou-se a formulação proposta por Xia *et al.* (1999).

$$V_{s, inicial} / V_{p, refração} = \sqrt{(1 - 2\mu) / (2(1 - \mu))} \quad (1)$$

Após a inversão, é obtido um gráfico que relaciona a velocidade de propagação das ondas S com a profundidade. A Figura 9 apresenta o modelo de velocidades de propagação das ondas S obtida no sítio da Alagoa. Verifica-se que a estrutura sub-superficial da Alagoa é composta por 3 camadas distintas, sendo que a primeira apresenta uma velocidade de 150 m/s, a segunda camada de 250 m/s, e a última de 475 m/s. Visto que o MASW utilizou o modelo de camadas da refração sísmica, assim, os dois métodos apresentam a mesma estrutura de camadas.

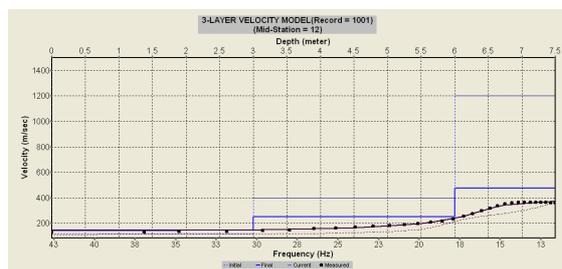


Figura 9 – Modelo de velocidades de propagação das ondas S da Alagoa.

Para os restantes locais, foi realizado o mesmo procedimento que no caso da Alagoa.

A Tabela 4 apresenta os modelos de velocidades das ondas S, em que a primeira coluna indica o local onde foi realizado o ensaio e respectivo número, que permite a identificação do local na Figura 5. Entre as colunas 2 e 5 são apresentadas os números das camadas, em que a camada 1 corresponde à camada superficial e a camada 4 à camada mais profunda. Cada coluna é subdividida em 2 colunas em que a primeira corresponde à velocidade de propagação das ondas S e a segunda à respectiva espessura.

Tabela 4 – Velocidades de propagação das ondas sísmicas S para cada camada e respectiva espessura, para cada local.

Local	Camada 1		Camada 2		Camada 3		Camada 4	
	Vs (m/s)	Esp. (m)						
1 Alagoa	150	3,0	250	3,0	475	-	-	-
2 Observatório	160	3,5	260	1,5	380	7,5	465	-
3 Hotel Faial	55	1,0	325	-	-	-	-	-
4 Marina	180	3,0	515	1,0	740	-	-	-
5 Jardim da Igreja Santa Maria Isale	95	1,5	255	1,0	375	-	-	-
6 Ribeira da Conceição *	185	5,0	200	-	-	-	-	-
7 Campo 1	130	3,0	270	-	-	-	-	-
8 Base Militar	185	5,0	600	-	-	-	-	-
9 Campo 2	90	2,5	330	-	-	-	-	-
10 Horta	140	3,5	265	8,5	530	-	-	-
11 Flamengos 1	115	1,5	220	3,0	270	-	-	-
12 Flamengos 2	165	5,0	260	7,5	420	-	-	-

13 Lombega* - - - - -

Os locais com menor velocidade de propagação das ondas S (< 100 m/s) para a camada superficial (camada 1) são, o Hotel Faial, a Jardim da Igreja Santa Maria Isale e o Campo 2. O número de camadas para estes locais variam entre si. Contudo, para a camada superficial verifica-se que as espessuras estão compreendidas entre 1 e os 2,5 m. As velocidades nas camadas 2 variam entre os 255 m/s e os 330 m/s, sendo que para o Hotel Faial e para o Campo 2 esta camada corresponde ao meio semi-infinito. O Jardim da Igreja Santa Maria Isale apresenta uma velocidade de 375 m/s para a última camada.

Os locais com velocidades superficiais superiores a 250 m/s são o Observatório, a Marina, a Ribeira da Conceição, a Base Militar e Flamengos 2. As velocidades superficiais das ondas S estão compreendidas entre os 160 e os 185 m/s. Este grupo apresenta elevadas espessuras para a camada superficial (> 3 m), e espessuras que variam entre si. As velocidades na segunda camada variam entre os 200 e os 600 m/s, sendo que alguns casos esta camada corresponde ao meio semi-infinito. As espessuras destas camadas são variáveis. A camada 3 corresponde ao meio semi-infinito para a Marina e os Flamengos, tendo uma velocidade de 740 e 420 m/s, respectivamente, enquanto no Observatório, esta camada apresenta uma espessura de 7,5 m e uma velocidade de 380 m/s e é seguida do meio semi-infinito cuja velocidade é de 465 m/s.

A Alagoa, o Campo 1, a Horta e os Flamengos 1 apresentam velocidades superficiais das ondas S entre os 115 e os 150 m/s. Nestes locais, o número de camadas varia de local para local, apresentado entre 2 a 3 camadas, e espessuras que variam entre 1,5 e os 3,5 m. Para a segunda camada as velocidades variam entre os 220 e os 270 m/s e as espessuras variam entre os 3,0 e os 8,5 m, sendo que, para o Campo 1, esta camada corresponde ao meio semi-infinito. Para os restantes casos, a terceira camada corresponde ao meio semi-infinito, apresentando velocidades que variam entre os 270 e os 475 m/s.

Para a Lombega não é apresentado o modelo de velocidade de propagação das ondas S devido aos dados conterem muito ruído.

3.4. Ruído ambiental

O processamento dos dados foi realizado no programa Geopsy, que utiliza a metodologia proposta por Nakamura (1989, 2000), que consiste na determinação da razão espectral H/V. Isto é, a razão entre o espectro da componente horizontal (resultante da composição das duas componentes horizontais) e o espectro da componente vertical.

O primeiro passo do processamento consiste na visualização das 3 componentes do registo. Na eventualidade de o registo apresentar ruído é possível nesta fase filtrar os dados. Em seguida, foram seleccionadas janelas com duração de 30 segundos em todo o registo. A selecção das janelas é realizada de forma automática através da utilização de um algoritmo que analisa a amplitude do registo e selecciona as janelas com menor amplitude. Por fim, é calculada a razão H/V para cada janela, de acordo com um conjunto de parâmetros de cálculo definidos *a priori*, tais como, a frequência de amostragem, o tipo de filtragem e pré-tratamento do sinal, e a razão STA/LTA. O resultado é apresentado em gráfico, onde são apresentadas as curvas H/V para cada janela, a média de todas as curvas e o respectivo desvio padrão.

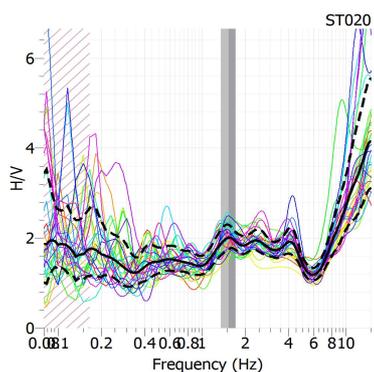


Figura 10 – Curva H/V da Alagoa.

A Figura 10 apresenta a curva H/V da Alagoa. No eixo das abcissas é apresentado o intervalo de frequências e no eixo das ordenadas a gama de valores para a razão H/V. A linha contínua a preto indica a média das curvas H/V, e a linha descontínua preta indica o desvio padrão. A coluna vertical cinzenta indica a frequência de pico do registo.

Para a Alagoa, o registo apresenta-se relativamente uniforme, o que indica que a camada superficial é pouco espessa de piroclastos pomíticos, ou que as escoadas lávicas se encontram próximas da superfície. Note que, quando o registo apresenta picos de frequência, significa que estão associados a camadas de depósitos sedimentares. Enquanto que, no caso da curva H/V apresentar uniformidade e ausência de picos, isto, indica que a camada superficial de depósitos sedimentares é pouco espessa, ou inexistente, ou que o substrato é rochoso e aflora à superfície.

Para os restantes locais utilizou-se o mesmo procedimento que o caso da Alagoa.

De modo a resumir os resultados de todos os ensaios de ruído ambiental, foram obtidas as frequências de pico de cada local, sendo que estas foram agrupadas em diversas classes. Utilizou-se as mesmas classes de frequências de pico de Teves Costa *et al.* (2008). Nomeadamente, menor de 1 Hz, de 2 a 4 Hz, de 4 a 6 Hz, de 6 a 8 Hz, de 8 a 10 Hz e superior a 10 Hz.

Tabela 5 – Frequências de pico e espessura da camada superficial para cada local.

Local	Frequência de Pico (Hz)	Amplitude de pico (H/V)	Espessura superficial (m)
1 Alagoa	1 - 2	1 - 2	3,0
2 Observatório	1 - 2	4 - 5	3,5
3 Hotel Faial	1 - 2	4 - 5	1,0
6 Ribeira da Conceição	1 - 2	6 - 7	5,0
11 Flamengos 1	2 - 4	4 - 5	1,5
8 Base Militar	4 - 6	10 - 11	5,0
9 Campo 2	4 - 6	3 - 4	2,5
10 Horta	4 - 6	3 - 4	3,5
5 Jardim da Igreja Santa Maria Isale	6 - 8	3 - 4	1,5
12 Flamengos 2	6 - 8	2 - 3	5,0
13 Lombega	6 - 8	5 - 6	2,0
4 Marina	8 - 10	2 - 3	3,0
7 Campo 1	> 10	4 - 5	3,0

A Tabela 5 apresenta na primeira coluna o local onde foi realizado o ensaio e a respectiva numeração que permite a sua identificação na Figura 5. Na segunda coluna a frequência de

pico do respectivo local, na terceira coluna amplitude de pico, e por fim, na quarta coluna, a espessura da camada superficial, que corresponde à camada 1 obtida pela refração sísmica.

Verifica-se que os locais apresentam variações de frequências e amplitudes de pico, reflectido a grande variabilidade litológica estratigráfica da ilha do Faial.

4. Discussão dos resultados

Neste capítulo são apresentadas comparações entre os vários parâmetros calculados, e entre os resultados obtidos com a litologia do Faial e com o sismo de 1998.

A Tabela 6 apresenta o resumo de todos os parâmetros obtidos através dos métodos geofísicos realizados. Nomeadamente, o número de camadas e as respectivas espessuras, as velocidades das ondas P e S, as frequências e amplitudes de pico. Os dados foram organizados de acordo com as classes de frequências de pico.

Os locais com frequências entre 1 e 2 Hz são, a Alagoa, o Observatório, o Hotel Faial e a Ribeira da Conceição. As amplitudes de pico para estes locais variam entre 1 a 7. As velocidades das ondas S para as camadas 1 variam entre os 55 e 185 m/s, nas camadas 2 variam entre os 200 e 325 m/s e nas camadas 3 variam entre os 380 e 475 m/s, e no caso do observatório, existe uma quarta camada, que corresponde ao meio semi-infinito com velocidade de 465 m/s. A espessura de cada camada para estes locais é variada. Contudo, é de salientar que dois dos quatro locais apresentam uma espessura próxima dos 3 m, nomeadamente, a Alagoa e o observatório. Para a gama de frequências de pico entre 2 e 4 Hz existe os Flamengos 1, apresentando uma amplitude de pico entre 4 a 5. A primeira camada tem 1,5 m de espessura com uma velocidade das ondas S de 115 m/s, a segunda camada tem uma espessura de 3,0 m e velocidade igual a 220 m/s, enquanto a última camada apresenta uma velocidade de 270 m/s. Entre 4 a 6 Hz existem a Base Militar, Campo 2 e Horta que apresentam amplitudes de pico a variar entre 3 e 4, excepto a Base Militar que apresenta amplitudes de pico a variar entre 10 e 11. No entanto, os resultados da Base Militar são discutíveis devido à elevada amplitude de pico em relação com os outros ensaios. As velocidades das ondas S para as camadas 1 variam entre os 90 e 185 m/s, sendo que a espessura das camadas aumenta com a velocidade das ondas sísmicas, variando entre os 2,5 e os 5,0 m. As velocidades nas camadas 2 estão compreendidas entre os 265 e 600 m/s, sendo que 2 destes casos correspondem ao meio semi-infinito. A Horta apresenta, para a camada 2, uma espessura igual 8,5 m, e para a camada 3 uma velocidade de 530 m/s. Entre os 6 e 8 Hz existem os locais, Jardim da Igreja Santa Maria Isale, Flamengos 2 e Lombega que apresentam amplitudes de pico entre 2 a 6. Todos estes locais apresentam 3 camadas, sendo que as velocidades das ondas S para as camadas 1 variam entre os 95 e 165 m/s, e as espessuras variam entre 1,5 e os 5,0 m. Para as camadas 2, as velocidades variam entre os 255 e 260 m/s e as espessuras entre 1,0 e 7,5 m. Por fim, os meios semi-infinitos (camadas 3) apresentam velocidades entre os 375 e 420 m/s. A Lombega não apresenta velocidades das ondas S pelos motivos descritos no ponto 3.3. Entre os 8 e 10 Hz temos a Marina, que é composta por 3 camadas e apresenta uma amplitude de pico a variar entre os 2 e 3. A camada 1 tem uma velocidade de 180 m/s e 3 m de espessura, a velocidade na segunda camada é de 515 m/s e tem uma espessura de 1,0 m, e na última camada apresenta uma velocidade de 740 m/s. Para a classe de frequências superior a 10 Hz, temos o Campo 1 que é composto por 2 camadas e a amplitude de pico do solo varia entre 4 e 5. A camada superficial (camada 1) apresenta uma velocidade de 130 m/s e 3,0 m de espessura. O meio semi-infinito (camada 2) tem uma velocidade de 270 m/s. Verifica-se que não é possível estabelecer uma clara relação entre as frequências de pico e as espessuras das camadas superficiais (camada 1).

As camadas superficiais (camadas 1) de todos os locais apresentam velocidades de propagação das ondas S inferiores a 185 m/s. De acordo com a litologia apresentada no capítulo 2.5, em geral, admite-se que sejam depósitos de piroclastos pomíticos com diferentes densidades. As velocidades das camadas 2 variam entre 200 e 600 m/s. Estas camadas correspondem a depósitos piroclastos pomíticos no caso das velocidades mais baixas, e no caso das velocidades mais elevadas podem indicar que são depósitos de *clinker*. A terceira camada corresponde a escoadas lávicas alteradas unicamente, ou alternadas com depósitos de *clinker* em profundidade. As relações apresentadas anteriormente estão de acordo com a classificação de solos apresentada por Forjaz *et al.* (2001) e Malheiro & Nunes (2007).

Comparando as espessuras obtidas por medição direta efectuada em cortes, cuja localização consta na Figura 5 com os resultados obtidos pela refração sísmica verificou-se o seguinte. Para a Alagoa, a espessura obtida pela refração foi de 3 m, e através da Figura 5 é apresentada uma espessura a variar entre 2 e 4 m. Para o Observatório foi obtida uma espessura de 3,5 m, não é possível comparar visto que a Figura 5 não apresenta espessuras próximas deste local. Na Ribeira da Conceição a espessura obtida foi de 5 m, enquanto que a espessura observada encontra-se entre os 4 m e os 10 m. O Hotel Faial obteve uma espessura de 1 m enquanto que a espessura observada encontra-

se próxima dos 2,3 m. No Campo 2 foi obtida uma espessura de 2,5 m, e a observada varia entre os 0,7 e os 3,6 m. Para a Horta obteve-se uma espessura de 3,5 m e a observada varia entre os 2,3 e os 3,6 m. O Jardim da Igreja Santa Maria Isale apresenta uma espessura de 1,5 m, e a espessura observada é próxima dos 10 m. Neste local, verificou-se que os solos foram alterados, visto que a Igreja que dá o nome a este ponto foi construída recentemente. Admite-se que a primeira camada de solo poderá ser aterro. Na Marina foi obtida uma espessura de 3 m e a espessura observada é próxima de 2,3 m. O campo 1 obteve uma espessura de 3 m e a espessura observada para este local varia entre os 1,14 e os 2,0 m. Note que, para este local, os pontos de onde foram retiradas as espessuras observadas encontram-se distantes do local onde foi realizado o ensaio, o que pode introduzir erros de estimativa.

De um modo geral, as espessuras superficiais obtidas pela refração sísmica enquadram-se bem nas espessuras medidas diretamente em cortes geológicos.

Para o sismo de 1998, a intensidade máxima foi registada em Ponta da Ribeirinha, tendo diminuído regularmente. Neste sismo são notórios os efeitos de sítio registados em Flamengos e Lombega. Verificou-se que nestes locais as frequências de pico são diferentes, mas ao nível das amplitudes de pico são semelhantes.

Tabela 6 – Resumo dos parâmetros físicos obtidos por refração sísmica, MASW e ruído ambiental.

Local	Frequência de Pico (Hz)	Amplitude de pico (H/V)	Camada 1			Camada 2			Camada 3		
			Vp (m/s)	Vs (m/s)	Esp. (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Esp. (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Esp. (m)
1 Alagoa	1 - 2	1 - 2	250	150	3,0	1500	250	3,0	3000	475	-
2 Observatório	1 - 2	4 - 5	-	160	3,5	-	260	1,5	-	380	7,5
6 Ribeira da Conceição	1 - 2	6 - 7	-	185	5,0	-	200	-	-	-	-
3 Hotel Faial	1 - 2	4 - 5	200	55	1,0	500	325	-	-	-	-
11 Flamengos 1	2 - 4	4 - 5	230	115	1,5	450	220	3,0	760	270	-
8 Base Militar	4 - 6	10 - 11	200	185	5,0	600	600	-	-	-	-
9 Campo 2	4 - 6	3 - 4	200	90	2,5	450	330	-	-	-	-
10 Horta	4 - 6	3 - 4	180	140	3,5	500	265	8,5	1400	530	-
5 Jardim da Igreja Santa Maria Isale	6 - 8	3 - 4	220	95	1,5	400	255	1,0	500	375	-
12 Flamengos 2	6 - 8	2 - 3	320	165	5,0	450	260	7,5	840	420	-
13 Lombega	6 - 8	5 - 6	150	-	-	590	-	-	800	-	-
4 Marina	8 - 10	2 - 3	250	180	3,0	1500	515	1,0	2800	740	-
7 Campo 1	> 10	4 - 5	200	130	3,0	400	270	-	-	-	-

5. Conclusões

O objectivo deste trabalho foi caracterizar a estrutura sub-superficial da ilha do Faial, recorrendo a métodos geofísicos, nomeadamente, a ensaios de refração sísmica, MASW e ruído ambiental. Foram estimados modelos geofísicos para as 13 localidades apresentadas na Tabela 6, sendo que na mesma tabela são mencionados todos os parâmetros físicos obtidos pelos métodos realizados. Também é apresentada a comparação da estrutura sub-superficial obtida com a litologia do Faial apresentada por Pacheco (2001), e a classificação de solos por Forjaz *et al.* (2001) e Malheiro & Nunes (2007).

Verificou-se que a velocidade das ondas S é variada, estando compreendida entre os 55 e os 185 m/s para as camadas superficiais (camadas 1). Nas camadas 2, entre os 200 e os 600 m/s, e na última camada entre os 270 e os 740 m/s. As espessuras das camadas foram determinadas pela refração sísmica, obtendo-se espessuras a variar entre 1 e os 5 m para as camadas superficiais. Para as camadas 2 entre 1 e 7,5 m, sendo

que nalguns casos corresponde ao meio semi-infinito. As camadas 3 representam o meio semi-infinito. Verificou-se que, quando a espessura da camada superficial aumenta, a velocidade das ondas S também aumenta. O mesmo não acontece para as outras camadas.

As espessuras obtidas foram comparadas com espessuras interpoladas provenientes de medições diretas efectuada em cortes geológicos, tendo-se verificado boas correlações entre elas.

Baseado na litologia proposta por Pacheco (2001) e a classificação de solos apresentada por Forjaz *et al.* (2001) e Malheiro & Nunes (2007) admite-se que as camadas superficiais são compostas por depósitos de piroclastos, enquanto que na camada 2, as velocidades mais baixas correspondem a depósitos de piroclastos pomíticos, e as velocidades mais elevadas correspondem a depósitos de *clinker*. A última camada corresponde a escoadas lávicas, podendo estar alteradas ou não, ou alternadas por depósitos de *clinker*.

Em relação ao ruído ambiental, chegou-se à conclusão de que a Horta, Flamengos e Lombega apresentam uma grande diversidade de frequências e de amplitudes de pico, o que é justificado pela complexidade litológica da ilha.

Verificou-se também que não é possível relacionar directamente as frequências de pico com as velocidades das ondas S para as camadas superficiais, havendo necessidade de proceder futuramente a modelação.

O sismo de 1998 apresenta uma dispersão constante da intensidade a partir do epicentro. Contudo, foi bastante evidente o registo do fenómeno de efeito de sítio na Lombega e nos Flamengos. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que, para a Lombega e os Flamengos, as frequências de pico são diferentes mas as amplitudes de pico são semelhantes.

Este trabalho visa contribuir para o enriquecimento do conhecimento sobre a litologia da ilha do Faial, de modo a ser utilizado em trabalhos futuros no domínio da Perigosidade sísmica.

6. 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 aquando da realização da campanha.

7. REFERÊNCIAS

- Agostinho, J. (1936): "Tectónica, sismicidade e vulcanismo das ilhas dos Açores". *Açoreana*, vol.I(1), p. 85-98.
- Agostinho, J. (1927): "O terramoto de 31 de Agosto nas ilhas dos Açores". *Labor*, 8, 229-235.
- Berthois, L. (1953): "Contribution à l'étude lithologique de l'archipel des Açores". *Com. Serv. Geol. Portugal*, TXXXIV, p. 41-7.
- Cas, R. & Wright, J. (1988): "Volcanic successions. Modern and ancient". *Allen & Unwin*, London, 2ª Edição, 485 p.
- Chovelon, P. (1982): "Évolution volcanotectonique des îles de Fayal et de Pico, Archipel des Açores-Atlantique Nord". Thèse de Docteur 3ème Cycle, l'Université de Paris-Sud, 193 p.
- Coutinho, R. (2000): "Elementos para a monitorização sismovulcânica da ilha do Faial (Açores): Caracterização hidrogeológica e avaliação de anomalias de Rn associadas a fenómenos de desgaseificação". Tese de doutoramento, Universidade dos Açores, 342 p.
- Forjaz, V.H., J.C. Nunes, J.H.C. Guedes e C.S. Oliveira (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.
- Furtado, J. A. (2010): "Confirmação do modelo da estrutura 3D do Vale Interior do Tejo a partir de dados de ruído sísmico ambiente, tese de mestrado, Universidade de Évora, 136 p.
- Gaspar, J.L. & Queiroz, G. (1992): "Morfologia e estrutura interna de escoadas lávicas basálticas". *Doc. VC/INIC 01/02*.
- Gaspar, J.L., Ferreira, T., Malheiro, A.M., Coutinho, R., Trota, A., Queiroz, G. (1998): "Avaliação de perigos geológicos na ilha do Faial após o terramoto de 1998: o caso da freguesia da Ribeirinha". *Proc. do 1º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG*, p. 89-95.
- Head, J. W. & Wilson, L. (1989): "Basaltic pyroclastic eruptions: influence of gas-release patterns and volume fluxes on fountain structure, and the formation of cinder cones, spatter cones, rootless flows, lava ponds and lava flows". *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 37, p. 261-271.
- Kilburn, C.R.J. (2000): "Lava flows and flow fields. In: Encyclopedia of volcanoes (Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymmer, H., Stix, J., Eds.)". *Academic Press*, San Diego, 1ª Edição, 1417 p.
- Lobão, C. (1999): "O ano do vulcão: 1957-1958". *Tipografia Telégrafo*, 2ª Ed., Horta, 132 p.
- Macdonald, G. (1972): "Volcanoes". *Prentice-Hall Inc.*, Englewood Cliffs, N.J., 510 p.
- Machado, F. (1982): "Interpretation of ground deformation in the Azores", *Arquipélago*, 3, p. 95-112.
- Machado, F. (1959a): "Actividade vulcânica da ilha do Faial (Mai/Ago. 1958)". *Atlântida*, Vol. III, p. 40-55.
- Machado, F. (1955): "Alguns aspectos da sismicidade dos Açores". *Bol. Ord. Eng.*, 4, 107, 6 p.
- Madeira, J. & Ribeiro, A. (1992): "O regime tectónico dos Açores. In: 10 anos após o sismo dos Açores de 1 de Janeiro de 1980 (Oliveira, C., Lucas, A., Guedes, J., Eds.)", LNEC, Vol.1, p. 163-174.
- Madeira, J. & Ribeiro, A. (1990): "Geodynamic models for the Azores triple junction: a contribution from tectonics". *Tectonophysics*, 184, p. 405-415.
- Madeira, J. (1998): "Estudos de neotectónica nas ilhas do Faial, Pico e S. Jorge: uma contribuição para o conhecimento geodinâmico da junção tripla dos Açores". Tese de doutoramento, Universidade de Lisboa, 428 p.
- Madeira, J. (1991a): "Neotectónica dos Açores: I - O sistema Pico-Faial (Abstract)". *IIIº Congresso Nacional de Geologia*, Coimbra, 51.
- Madeira, J. (1991b): "Neotectónica dos Açores: II - S. Jorge e o sismo de 1/1/80 (Abstract)". *IIIº Congresso Nacional de Geologia*, Coimbra, 52.
- 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 e J.C. Nunes (Ed.)". *Proc. of the International Workshop on Volcanic Rocks*, Workshop W2 - 11th Congress ISRM, Ponta Delgada, Azores. Taylor & Francis Group/Balkema, London, UK, pp. 59-64.
- Nakamura, Y. (2000): "Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications", *12th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Nakamura, Y. (1989): "A method for dynamic characteristics estimations of surface using microtremors on the ground surface", *Quarterly Report, RTRI, Japan*, v.30, p. 25-30.
- 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.
- 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 de doutoramento, Universidade dos Açores, 330 p.
- Park, C.B., R.D. Miller, J. Xia (1999): "Multichannel analysis of surfaces waves". *Geophysics* 64(3), pp. 800-808.
- Park, C.B., Xia, J., Miller, R.D. (1998-b): "Imaging dispersion curves of surfaces waves on multichannel record". *68th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys.* Expanded Abstracts, 1377-1380.
- Redpath, B. B. (1973): "Seismic Refraction Exploration for Engineering site investigations". *Explosive Excavation Research Laboratory Livermore*, California.
- Richart, F.E., Hall, J.R. & Woods, R.D. (1970): "Vibration of soils and foundations". *Prentice-Hall*.
- Senos, M.L., M. Silva, P. Teves Costa, M. Escuer (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.
- Stokoe, K. H. II, Nazarian, S., Rix, G. J., Sanchez-Saliner, 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.
- Tazieff, H. K. (1959): "L'éruption 1957-1958 et la tectonique de Faial (Azores)". *Mem. Serv. Geol. Portugal*, 4, p.71-88.
- Teves Costa, P., J. Pacheco, M. Escuer, R. Coutinho, V. Zanon, A. Pimentel e U. T. Kueppers (2008): "Utilização de vibrações ambientais na caracterização dinâmica das camadas superficiais na cidade da Horta". "Sismo 1998 - Açores. Uma década depois", Oliveira, C.S., Costa, A., Nunes, J.C. (Eds.), *Ed. do Governo dos Açores e da Sociedade de Promoção e Reabilitação da Habitação e Infra-Estruturas*, S.A., p. 137 - 149.
- Walleinstein, N., Gaspar, J. L., Guest, J.E, Duncan, A.M. (1996): "Eruptive styles observed during the 1995 volcanic eruption at Fogo island, Cape Verde (Abstract). Simpósio internacional "A erupção vulcânica de 1995 na ilha do Fogo, Cabo Verde", *Fundação Caloust Gulbenkian*, Lisboa, Setembro.
- Xia, J., C.B. Park, R.D. Miller (1999): "Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves". *Geophysics* 64(3), pp. 691-700.

- Zbyszewski, G. & Ferreira, O.V. (1959): “Le volcanisme de l’île Fayal et l’éruption du volcan Capelinhos: rapport de la deuxième mission géologique”. *Mem. Serv. Geol. Portugal*, nº 4, p. 339-345.
- Zbyszewski, G., Moitinho de Almeida, F., Ferreira, O. V., Assunção, C.T. (1959): “Carta geológica de Portugal à escala 1:25000”, folha do Faial. *Publ. Serv. Geol. Portugal*. Notícia explicativa, 25 p.