

## Geração de perfis estratigráficos artificiais para o Arquipélago dos Açores



Nuno Malfeito

Estudante  
DEC-FCT/UNL  
Caparica  
nunomalfeito@hotmail.com



João Bilé Serra

Investigador Principal  
DG/CH - LNEC  
Lisboa  
biles@lnec.pt



Alexandra Carvalho

Investigadora Auxiliar  
DE/NESDE - LNEC  
Lisboa  
xana.carvalho@lnec.pt

### SUMÁRIO

A avaliação dos movimentos sísmicos à superfície, contemplando os efeitos de sítio, está dependente das características geológicas dos terrenos no local em análise.

Para o Arquipélago dos Açores a informação geotécnica disponível não permite uma avaliação geograficamente global da resposta sísmica dos terrenos característicos desta região.

Assim, após levantamento e síntese de toda a informação disponível, foram idealizados perfis estratigráficos sintéticos, representativos da variabilidade dos solos da região, permitindo posteriormente modelar a propagação da energia sísmica, materializada na forma de ondas de corte S, através de um meio estratificado representado por uma sequência de camadas, e consequentemente, avaliar a alteração do movimento sísmico devido à influência daquela.

**Palavras-chave:** Arquipélago dos Açores, Perfil estratigráfico, Efeitos de sítio.

## 1. INTRODUÇÃO

O conteúdo espectral dos movimentos sísmicos superficiais é o resultado de um processo complexo que engloba a propagação de energia sísmica através de um meio heterogéneo no que à impedância diz respeito, sendo fortemente condicionado pela geologia local e em particular pelas características dos terrenos de menor impedância, que se encontram a pequena profundidade.

Para a componente horizontal daqueles movimentos, as ondas de corte S, com polarização horizontal, constituem uma das componentes fundamentais, sendo fortemente dependentes das características de impedância do meio atravessado [1]. Como tal, uma avaliação fidedigna dos movimentos sísmicos à superfície está dependente da disponibilidade de informação geológica, em particular do conhecimento dos perfis (ou sequências) estratigráficos representativos dos locais em análise.

Para o Arquipélago dos Açores a informação geotécnica, disponível em tempo útil, sobre os perfis estratigráficos predominantes, é insuficiente e os perfis existentes não são representativos da variabilidade dos solos da região. Assim, não é possível uma avaliação generalizada dos movimentos sísmicos à superfície na região.

Nesta comunicação aborda-se a geração estatística de perfis estratigráficos artificiais com vista à criação de uma amostra, por um lado suficientemente numerosa e, por outro, representativa das tipologias identificadas no Anexo Nacional do EC8 [2] para o Arquipélago dos Açores.

A base de dados, contendo o conjunto de perfis de solo gerados, permitirá posteriormente a simulação de eventos sísmicos à superfície [3], recorrendo ao simulador LNECLoss [4] no qual se utiliza o modelo linear equivalente [5] para simular a não-linearidade mecânica dos terrenos a profundidade reduzida.

## 2. ENQUADRAMENTO REGIONAL

O arquipélago dos Açores é uma região de origem vulcânica que se encontra geograficamente localizada no oceano Atlântico Norte, mais concretamente no polígono formado pelas latitudes 36° e 43° Norte e longitudes 25° e 31° Oeste, compreendendo um total de nove ilhas que se encontram distribuídas pelos grupos Oriental, Central e Ocidental.

A região encontra-se inserida numa zona de acomodação de tensões entre três importantes estruturas tectónicas (placas Africana, Euro-Asiática e Americana) [6] estando grande parte das ilhas, excluindo-se Corvo e Flores, numa estrutura com forma aproximadamente triangular denominada por Plataforma dos Açores [7].

Neste quadro tectónico é pertinente mencionar a existência de uma faixa de expansão oceânica, na fronteira entre a plataforma dos Açores e a placa Euro-Asiática, denominada

por Rifte da Terceira sobre o qual se encontram localizadas as ilhas da Terceira, Graciosa e a parte ocidental da ilha de S. Miguel.

A Figura 1 ilustra a localização geográfica do arquipélago assim como as estruturas tectónicas existentes nas proximidades deste.

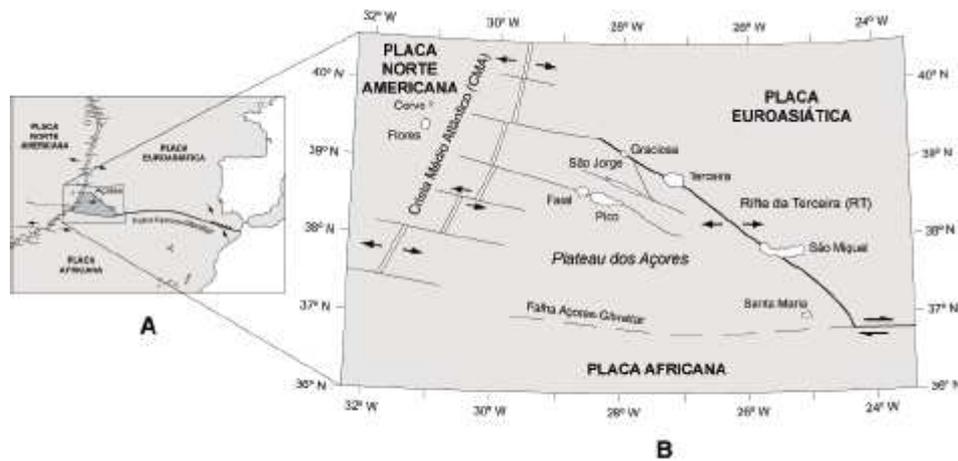


Figura 1 – Enquadramento geotectónico dos Açores (*adaptado de [7]*)

A dinâmica do conjunto de estruturas tectónicas existentes nas proximidades da região tem um papel importante na sismicidade e nos eventos vulcânicos que ocorrem na região, principalmente no que diz respeito à qualidade e à variação dos materiais emitidos [8] nas diferentes ilhas.

É possível classificar os eventos vulcânicos como havaianos, estrombolianos, vulcanianos, surtseianos, freatoplínianos, sub-plínianos, plínianos e ultraplínianos, estando esta classificação dependente de parâmetros, tais como [9]: i) a magnitude da fase erutiva, determinada em função do volume total emitido; ii) o poder dispersivo, definido pela área coberta pelos piroclastos de queda; iii) a intensidade, dependente da altura da coluna erutiva; e iv) o potencial destrutivo da erupção, definido pela área abrangida pela isopaca de 1 m.

Os eventos vulcânicos podem ainda ser classificados como monogenéticos ou poligenéticos consoante ocorra apenas um evento isolado ou um conjunto de eventos, sendo que os períodos de ocorrência variam de dezenas de anos (monogenéticos) até milhares de anos (poligenéticos) [8].

Ainda de acordo com [8] é possível atribuir-se os produtos emitidos na erupção às fases que ocorrem num evento, estando as escoadas lávicas associadas a fases efusivas e os piroclastos a fases explosivas (Figura 2).

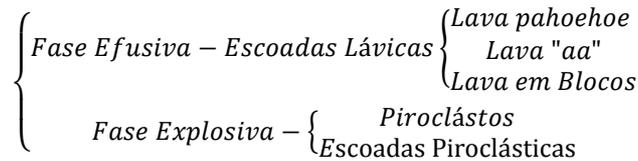


Figura 2 – Esquema de Fases eruptivas e produtos correspondentes

As sequências de eventos vulcânicos têm, assim, um papel fundamental na definição da paisagem e na estrutura dos terrenos. Os eventos vulcânicos com carácter poligenético são os mais influentes, não só pela ocorrência de diferentes tipos de episódios vulcânicos, mas também porque a sua longa duração, que pode atingir dezenas de milhares de anos [8], permite a ingerência de processos erosivos ocasionadores de alternância de estratos vulcânicos originais com estratos sedimentares.

### 3. MODELOS DE PERFIS ESTRATIGRÁFICOS PARA O ARQUIPÉLAGO DOS AÇORES

Para as ilhas dos Açores a insuficiência ou, pelo menos, a inacessibilidade de perfis estratigráficos baseados em sondagens geológicas não permitiu a avaliação dos efeitos sísmicos de sítio de forma representativa da referida heterogeneidade geológica

De modo a preencher as lacunas existentes relativas aos terrenos da região, elaboraram-se perfis de solo sintéticos, pretendendo-se que estes sejam representativos dos solos da região, tendo em consideração o carácter vulcânico da região e a forte dependência das sequências estratigráficas e das propriedades dos materiais com o tipo e a ocorrência temporal de eventos vulcânicos.

Para a criação de uma base de dados de propriedades dos solos para o Arquipélago foram utilizados estudos desta região [10,11] complementando-se a informação com outros trabalhos elaborados para regiões de génese similar [12,13].

Como resultado elaboraram-se seis modelos de perfis estratigráficos, cujas propriedades dos materiais se encontram perfeitamente definidas, permitindo a aplicação de metodologias estocásticas para a geração de variados perfis estratigráficos para a região dos Açores.

#### 3.1 Propriedade dos materiais ocorrentes

A informação de base recolhida destina-se à geração de modelos geotécnicos de perfis estratigráficos adequados à aplicação do modelo de propagação vertical de ondas de corte com polarização horizontal. Conforme [4], este modelo é um modelo pseudo-não linear com ajuste iterativo das propriedades mecânicas dos solos de deformabilidade – o módulo de distorção secante elástico – e de dissipação energética por histerese mecânica – a fração de amortecimento crítico – de modo a compatibilizar os valores adotados em cada zona ao valor médio temporal da distorção nela ocorrida. Cada zona individual pode ser um estrato

ou uma sub-divisão de um estrato, sendo a respetiva espessura função do comprimento de onda associado à frequência mais elevada presente no movimento excitador.

Para além das características de deformabilidade e de amortecimento é necessário conhecer a massa volúmica e a classificação do tipo de curvas de degradação do módulo secante de distorção e da fração de amortecimento crítico em função do nível médio de distorção. Esta classificação pode ser efectuada com base no índice de plasticidade do solo, atribuindo-se o valor nulo no caso de solos sem fração fina, por exemplo solos de dimensão predominantemente areia ou cascalho.

O resultado das informações recolhidas está sintetizado no Quadro 1, onde se apresentam os intervalos de valores da massa volúmica e da velocidade de propagação elástica de ondas S e a estimativa do índice de plasticidade de diferentes unidades geotécnicas identificadas no Arquipélago.

Quadro 1 – Intervalo de valores da massa volúmica,  $\rho$ , e da velocidade de propagação das ondas S,  $v_s$ , e índice de plasticidade para diferentes materiais geológicos identificados no Arquipélago dos Açores

	$\rho_{\min}$ (t/m <sup>3</sup> )	$\rho_{\max}$ (t/m <sup>3</sup> )	$v_{s\min}$ (m/s)	$v_{s\max}$ (m/s)	Índice de Plasticidade (%)
Pedra-Pomes	0,601	0,738	220	412,5	10
Ignimbrito (Não Soldados)	0,7	1,7	250	700	10
Tufos Surtseianos	1,121	1,733	130	800	40
Escória Basáltica	1,287	1,355	220	412,5	20
Basaltos de queda (Depósito)	1,53	1,733	80	200	0
Ignimbritos (Soldados)	1,532	1,852	500	702	0
Solos Pomíticos	1,6	1,8	220	412,5	10
Traquito(Depósito Piroclástico)	1,619	1,983	220	412,5	10
Traquitos (Escoadas de Lava)	2,04	2,24	600	1570	0
Clinker	2	2,3	300	1000	20
Basalto (Escoadas de Lava)	2,24	2,548	1000	3300	0
Basalto (Maciço)	2,548	2,956	1000	3300	0
Basalto Esponjoso (Escoadas de Lava)	0,6	0,9	220	412,5	0

### 3.2 Hipóteses simplificativas consideradas

A adoção de modelos estratigráficos e das propriedades de materiais que tenham por base registos reais não é, no entanto, condição suficiente para que seja garantido que as sequências estratigráficas geradas não representam singularidades o que indicaria não só uma incoerência das variações das colunas estratigráficas mas também que a consideração destas variações peculiares poderia desencadear a propagação de erros numéricos, nos cálculos subsequentes invalidando os resultados obtidos.

Com vista à minimização da ocorrência de singularidades nos modelos de perfis de solo a gerar, torna-se necessário considerar hipóteses simplificativas, relativamente aos materiais e aos estratos que constituem as diferentes sequências, as quais se enumera de seguida:

#### 3.2.1 Propriedades dos materiais:

- Os limites do intervalo para as propriedades dos materiais são inalteráveis, em todas as classes de perfis estratigráficos, e o valor de uma propriedade de um dado material é constante para cada perfil gerado;
- Se para um mesmo estrato existir mais de uma possibilidade para o material constituinte, elabora-se um novo tipo de perfil, alterando-se apenas o material no estrato em questão;
- As características do material que constitui um estrato são consideradas constantes apenas se a espessura do estrato for menor ou igual a 3m, admitindo-se para espessuras superiores, um crescimento linear em profundidade desde o topo até à base entre 95% e 105% do valor médio, ou seja de acordo com as expressões (1) e (2);

$$\rho_{Topo,Estrato} = (1 - 0,05) \cdot \rho_{Méd} \quad (1)$$

$$\rho_{Base,Estrato} = (1 + 0,05) \cdot \rho_{Méd} \quad (2)$$

- A velocidade de propagação das ondas de corte num material encontra-se dependente da massa volúmica, de acordo com a expressão 3a:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (3a)$$

Resulta, assim, que num estrato em que se verifiquem variações de densidade do material, a velocidade de propagação das ondas de corte é dependente da razão entre as densidades observadas a meio da espessura e um outro local do estrato, segundo a expressão (3b);

$$V_{s,Local} = \frac{V_{s,Méd} \times \rho_{Local}}{\rho_{Méd}} \quad (3b)$$

em que  $V_{s,Local}$  representa a velocidade de propagação das ondas no local onde se verifica a propriedade (Topo ou base do estrato),  $\rho_{Local}$  representa a massa volúmica,  $V_{s,Méd}$  é a velocidade de propagação das ondas S na profundidade média do estrato e  $\rho_{Méd}$  representa a massa volúmica na profundidade média do estrato;

- As propriedades mecânicas dos materiais correspondem a análises em tensões totais, decorrente de a resposta sísmica dos solos ser predominantemente não drenada, dada a diferença de velocidade entre os fenómenos de aumento de pressão intersticial (mecânico, local e associado à dilatância) e de dissipação da mesma (hidráulico, global). Não são considerados fenómenos de liquefação.

### 3.2.2 Propriedade dos estratos:

- Estrato composto por um único material de forma a permitir a constituição de um meio, aproximadamente homogéneo, para a propagação de ondas;
- Valores limites, para as espessuras dos estratos são próprios de cada um dos tipos de perfis considerados;
- A menos que seja feita uma exceção, efetua-se a supressão dos estratos que apresentem uma espessura inferior a 0,5m;
- Eliminação do estrato superficial de solo vegetal.

### 3.3 Modelos representativos dos perfis estratigráficos

Para o presente trabalho são considerados os modelos propostos em [10] como modelos de base, justificando-se a decisão com a natureza dos modelos que representam a síntese de 1108 perfis de solo reais, obtidos em diversas campanhas levadas a cabo na região, e ainda por estes terem constituído a base para a elaboração dos perfis de solo presentes no Anexo Nacional do Eurocódigo 8 [2], relativos à região em questão.

Aos modelos de base utilizados foram ainda aplicadas as hipóteses simplificativas, apresentadas anteriormente, resultando deste exercício um total de seis modelos de perfis de solo (Figura 3), em que o sexto tipo é resultante da alteração do material, que constitui o primeiro estrato do perfil Tipo 1 (Traquito), por um novo material (Ignimbrito).

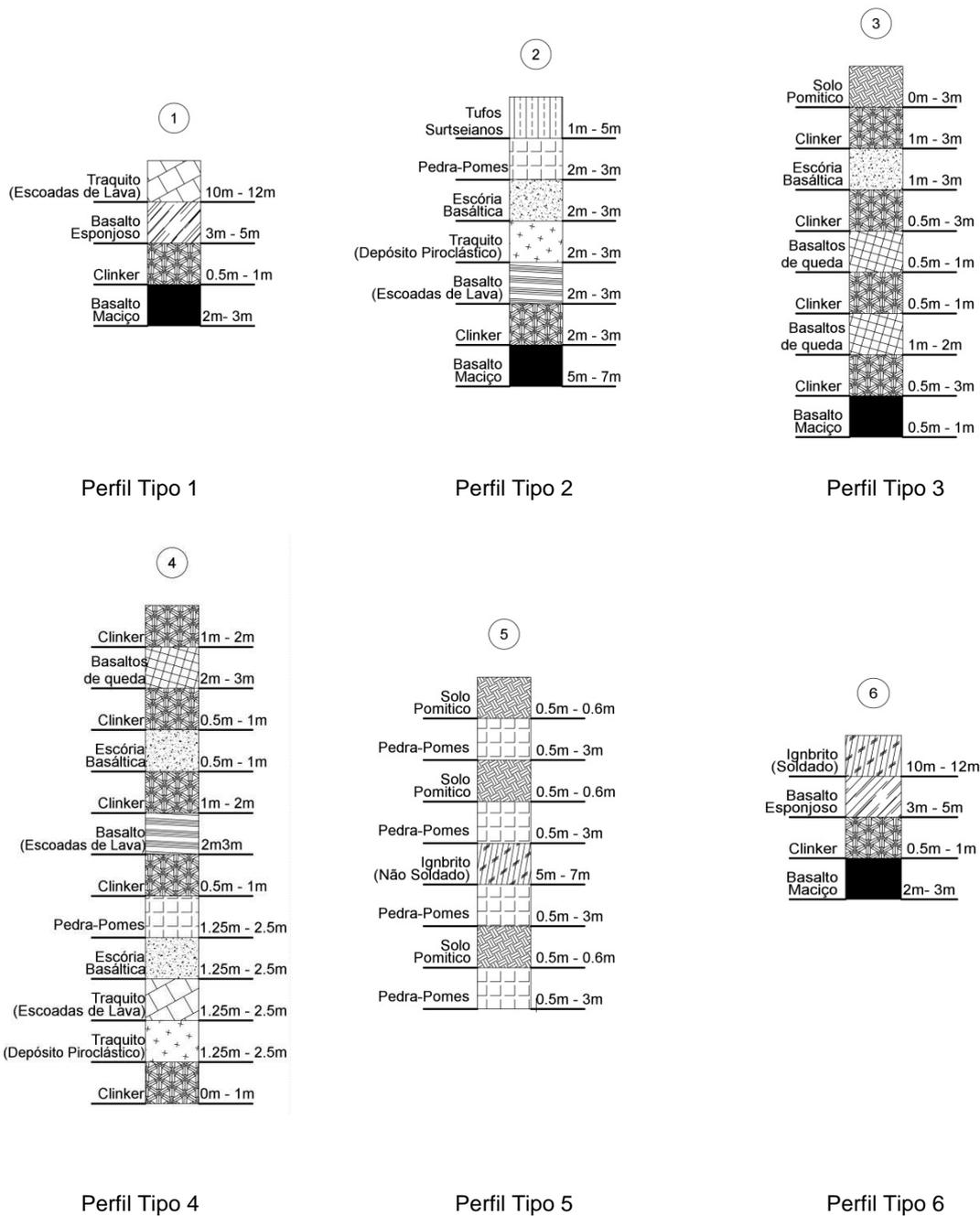


Figura 3 – Modelos de perfis estratigráficos para o Arquipélago dos Açores

Conforme é possível observar a cada elemento do perfil estratigráfico encontra-se associado um intervalo de variação da espessura, variável geométrica indispensável para a definição espectral da propagação pretendida de ondas S. Esta dispersão quantificada permite a geração aleatória de valores de espessura para cada um dos modelos.

O resumo do número de estratos dos perfis, de cada um dos tipos, assim como do intervalo de variação possível para as espessuras dos mesmos encontram-se resumidos nos Quadros 2 e 3.

**Quadro 2 – Intervalos de Valores Para Cada Estrato nos Vários Perfis**

Espessura (m)	Perfil Tipo 1		Perfil Tipo 2		Perfil Tipo 3		Perfil Tipo 4		Perfil Tipo 5		Perfil Tipo 6	
	Mín	Máx										
Estrato 1	10	12	1	5	0	3	1	2	0,5	0,6	10	12
Estrato 2	3	5	2	3	1	3	2	3	0,5	3	3	5
Estrato 3	0,5	1	2	3	1	3	0,5	1	0,5	0,6	0,5	1
Estrato 4	2	3	2	3	0,5	3	0,5	1	0,5	3	2	3
Estrato 5	-	-	2	3	0,5	1	1	2	5	7	-	-
Estrato 6	-	-	2	3	0,5	1	2	3	0,5	3	-	-
Estrato 7	-	-	5	7	1	2	0,5	1	0,5	0,6	-	-
Estrato 8	-	-	-	-	0,5	3	1,25	2,5	0,5	3	-	-
Estrato 9	-	-	-	-	0,5	1	1,25	2,5	-	-	-	-
Estrato 10	-	-	-	-	-	-	1,25	2,5	-	-	-	-
Estrato 11	-	-	-	-	-	-	1,25	2,5	-	-	-	-
Estrato 12	-	-	-	-	-	-	0	1	-	-	-	-

**Quadro 3 – Intervalos de Variação da Dimensão dos Perfis de Solo**

	Número de Estratos	Espessura Mínima do perfil de solo (m)	Espessura Máxima do perfil de solo (m)
Perfil Tipo 1	4	15,5	21
Perfil Tipo 2	7	16	27
Perfil Tipo 3	10	6	23
Perfil Tipo 4	12	12,5	24
Perfil Tipo 5	8	8,5	20,8
Perfil Tipo 6	4	15,5	21

A variação das propriedades em profundidade, para cada um dos modelos, apresenta-se nas Figuras 4 a 6, para a massa volúmica (Figura 4), velocidade média de propagação de ondas de corte (Figura 5) e índice de plasticidade (Figura 6).

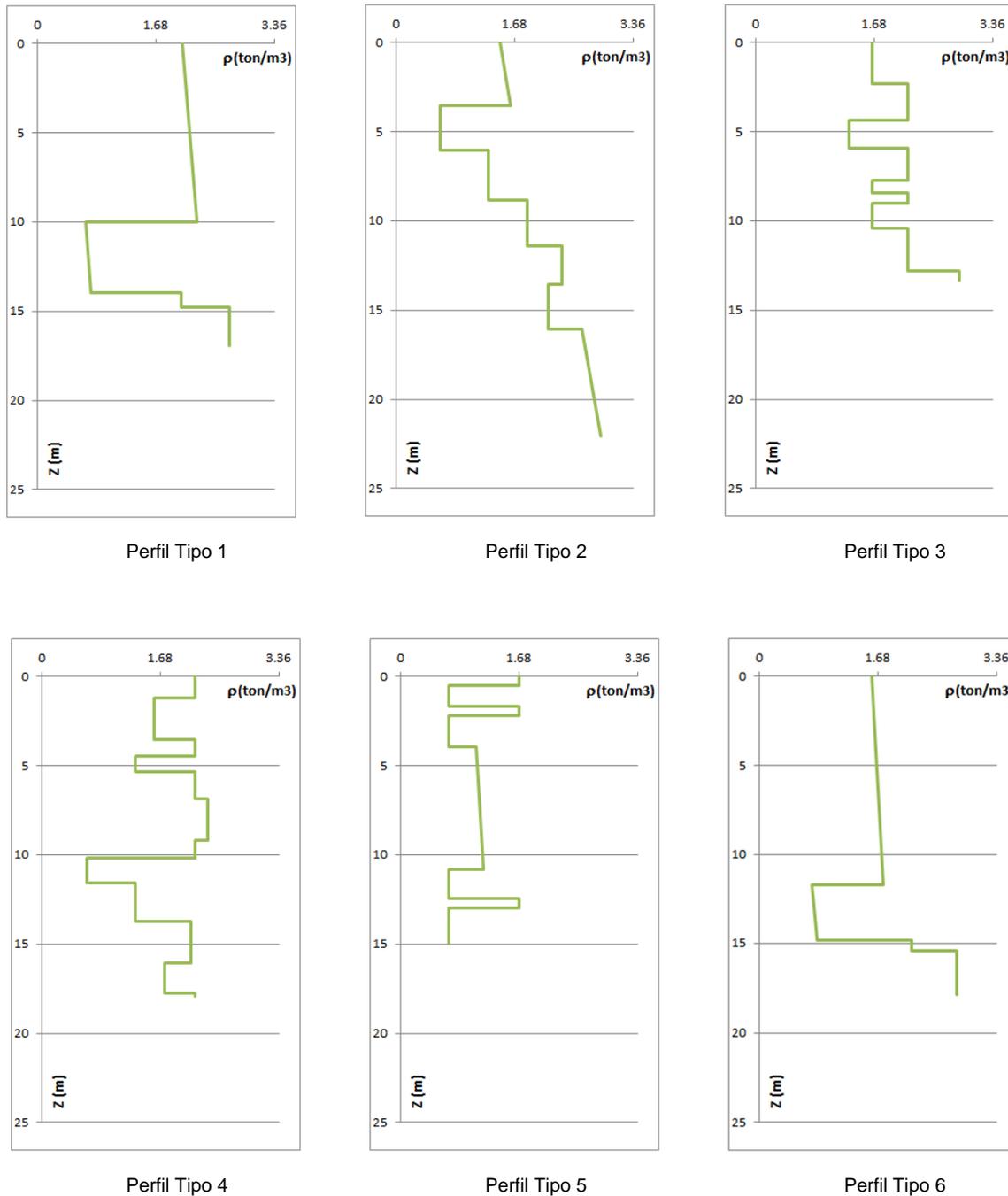


Figura 4 – Perfis de massa volúmica

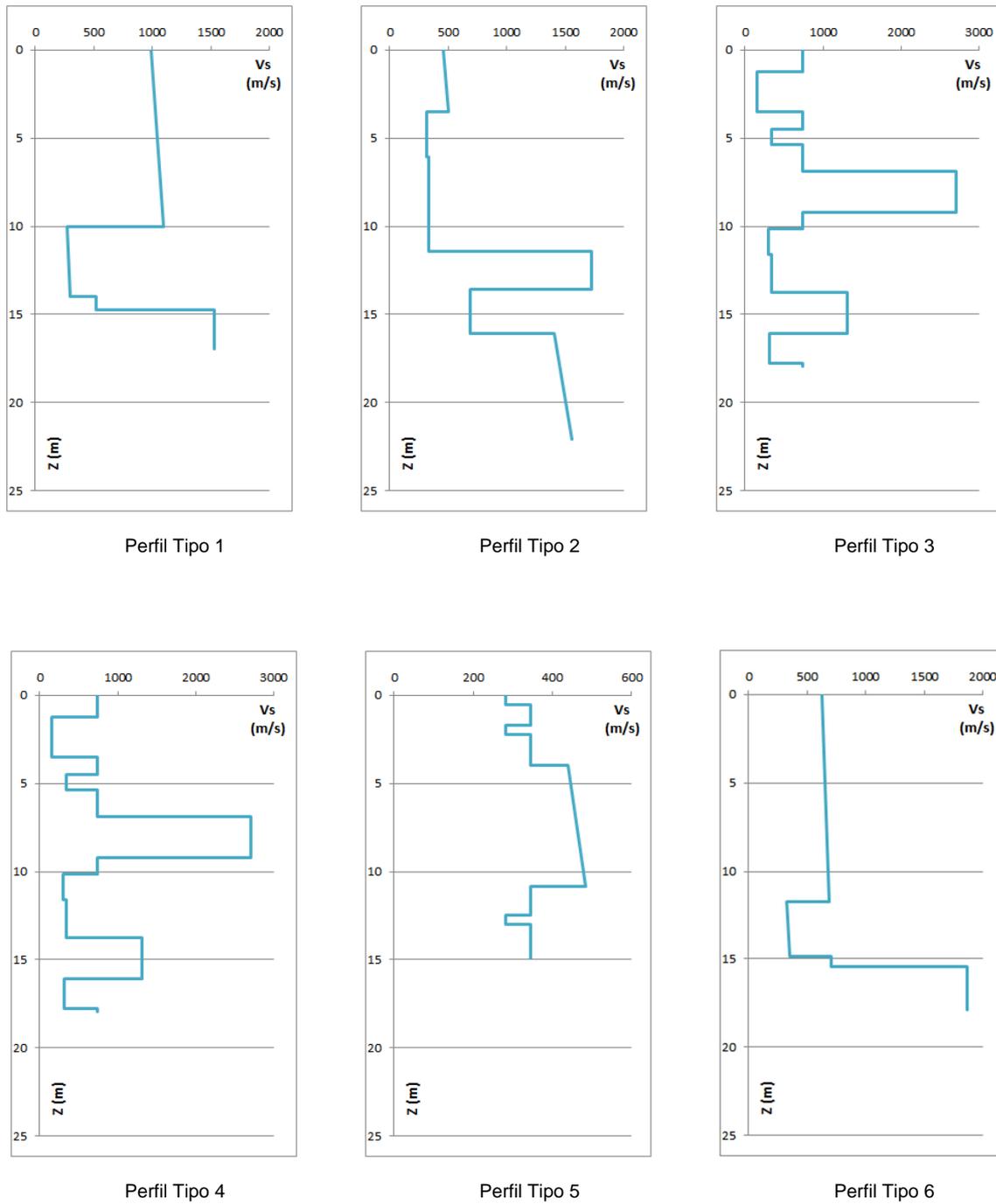


Figura 5 – Perfis de velocidade das ondas de corte

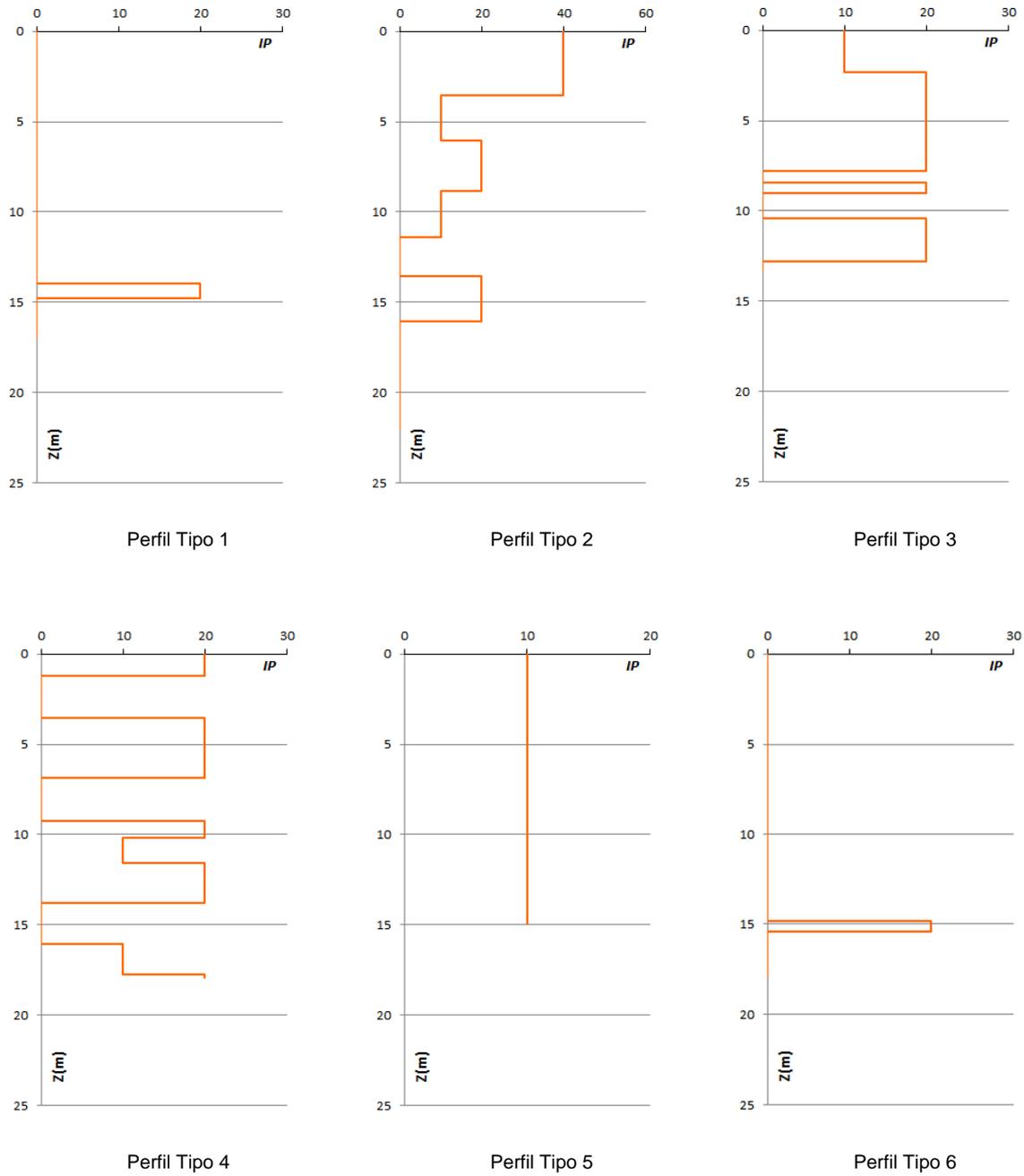


Figura 6 – Perfis do índice de plasticidade

## 4. GERAÇÃO DOS PERFIS SINTÉTICOS

### 4.1 Metodologia para a geração de perfis sintéticos

Cada modelo de perfil sintético de solo é definido pela sequência estratigráfica litológica, e para cada estrato, pelos valores da espessura, da massa volúmica, da velocidade de propagação elástica – isto é, para muito pequenas deformações – e do índice de plasticidade prescrito. Este último define, por sua vez, as equações da curva de degradação do módulo secante de distorção e da curva de variação da fração de amortecimento crítico, ambas em dependência do nível médio da distorção.

Para cada estrato o valor de cada grandeza, à excepção do índice de plasticidade, é definido a partir da soma do limite inferior do intervalo com uma percentagem aleatória, da amplitude, sendo esta obtida pela geração de um número aleatório, no intervalo [0, 1], com distribuição estatística uniforme.

A geração dos perfis é realizada, identificando-se as espessuras dos estratos e materiais constituintes, sendo de seguida gerados valores de espessuras e das propriedades dos materiais, tendo em consideração os intervalos de variação apresentados anteriormente (Quadros 2 e 3) e utilizando-se para o efeito a expressão (4).

$$Prop_i = Prop_{Mínimo} + \alpha_{Aleatório} \times [Prop_{Máximo} - Prop_{Mínimo}] \quad (4)$$

em que:  $Prop_i$  representa o valor atribuído à grandeza em estudo,  $Prop_{Mínimo}$  e  $Prop_{Máximo}$  correspondem, respetivamente, aos limites mínimo e máximo do intervalo, e  $\alpha_{Aleatório}$  o número aleatório uniforme padrão.

### 4.2 Aplicação da Metodologia para Geração perfis estratigráficos sintéticos

Com vista a solucionar o problema já referido, da falta de registos referentes a perfis estratigráficos que impossibilita uma avaliação dos efeitos à superfície, são geradas de acordo com a metodologia apresentada 200 unidades de perfis de solo sintéticos para cada um dos tipos de solo apresentados na Figura 3.

A geração dos perfis é efectuada recorrendo-se à metodologia já apresentada, sendo gerados um total de 1200 perfis correspondentes aos seis tipos de perfis.

## 5. CONCLUSÕES

As lacunas existentes, em base de dados, acerca da estrutura dos solos e respetivos materiais constituintes para o Arquipélago dos Açores e as suas combinações, constituem

um dos principais problemas à correta avaliação dos efeitos à superfície do terreno, decorrentes de eventos sísmicos.

A informação relativa a propriedades de materiais, obtida no âmbito do presente trabalho, foi sintetizada sob forma de intervalos de variação, relativamente a cada um dos materiais identificados, permitindo o incremento, através de métodos estatísticos, do número de registos de propriedades disponíveis para cada um dos materiais.

A informação recolhida resultou na elaboração de seis modelos de perfis de solo, com os quais se pretende representar a variabilidade dos solos existentes para a região. A adoção de métodos estatísticos, conjuntamente com a informação sintetizada acerca da estrutura dos solos (na forma de modelos) e de materiais constituintes conduziu à geração de um conjunto de 1200 registos de perfis de solo.

Este conjunto de perfis estratigráficos sintéticos será utilizado posteriormente para a avaliação dos efeitos de sítio, ou seja, para a avaliação das alterações do movimento sísmico, desde a base até ao topo do perfil de solo assente em firme rochoso.

Os efeitos de transmissão de energia poderão ser avaliados, para o conjunto de perfis gerado, com a consideração de uma ação sísmica em firme rochoso aplicando-se o modelo de propagação vertical de ondas de corte através de uma estratigrafia [2] subjacente ao firme rochoso, e obtendo-se a função de transferência entre a base e o topo.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve o apoio de fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto "Caraterização da ação sísmica no Arquipélago dos Açores – SiGMA" (PTDC/CTE-GIX/121957/2010).

## REFERÊNCIAS

- [1] Fumal, T.E.; Tinsley, J.C. – "Mapping shear-wave velocities of near-surface geologic materials", U.S. Geological Survey Professional Paper 1360, 1985, p 127 – 150.
- [2] EN 1998-1 – "Eurocódigo 8 - Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios", 2010, Instituto Português da Qualidade, Portugal.
- [3] Malfeito, N.; Carvalho, A.; Bilé Serra, J.P. – "Equações de Previsão dos Movimentos Sísmicos à Superfície para o Arquipélago dos Açores", JPEE2014, 2014.
- [4] Campos Costa, A., Sousa, M.L., Carvalho, A., Bilé Serra, J., Martins, A. e Carvalho, E.C. – "Simulador de cenários sísmicos integrado num sistema de informação geográfica". 6

- Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Guimarães, 2004, pp. 455-464.
- [5] Bilé Serra, J.P.; Saraiva Caldeira, L.M.M – “Resposta sísmica de camadas de solo por meio de uma abordagem estocástica” em Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, *Geotecnia* nº 81, 1997, p 51 - 63.
- [6] Ferreira, A.B. – “Geodinâmica e perigosidade natural das ilhas dos Açores”, *Finisterra* 79, 2005, p 103-120.
- [7] Forjaz, V.H. – “Azores study tour. Field trip guide: Seminar on prediction Earthquakes”, 1988, European Commission for Europe, Universidade Nova de Lisboa, 26p.
- [8] Nunes, J.C., 2002. “Novos conceitos em vulcanologia: erupções, produtos e paisagens vulcânicas”, *Geonovas* 16, 2002, p 5-22.
- [9] CAS, R.A.F. e WRIGHT, J.V.; - “Volcanic successions. Modern and ancient”, 1987, Allen & Unwin, Ltd (Ed.), Londres, 528 p.
- [10] Malheiro, A.M.; Nunes, J.C. – “Volcano stratigraphic profiles for the Azores region: a contribution for the EC8 Regulations and the characterization of volcanic rocks geo mechanical behavior”, 2007.
- [11] Teves-Costa, P.; Veludo, I. – “Soil characterization for seismic damage scenarios purposes: application to Angra do Heroísmo (Azores)”, *Bull Earthquake Engineering*, 2013, p 401-421.
- [12] Shoji, S.; Nanzyo, M.; Dahlgren, R.A. – “Volcanic Ash Soils- Genesis, Properties and Utilization”, 1994, Elsevier, 287 p.
- [13] Arnalds, O.; Buurman, F.B.P.; Oskarsson, H.; Stoops, G - “Soils Of Volcanic Regions Of Europe”, 2007, Springer , 670 p.