



**Estudo da resposta sísmica local na região metropolitana  
de Lisboa e na região do Algarve**

**Ana Rita Serrano Delfim**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Civil**

Orientadores: Prof. Doutor Rui Pedro Carrilho Gomes  
Doutora Alexandra Maria Rodrigues de Carvalho

**Júri**

Presidente: Prof. Doutor Fernando Manuel Fernandes Simões  
Orientador: Prof. Doutor Rui Pedro Carrilho Gomes  
Vogal: Prof. Doutor Jaime Alberto dos Santos

**Outubro 2014**





## Resumo

O presente trabalho tem como principal objectivo o estudo da resposta sísmica local na área metropolitana de Lisboa e na região do Algarve, por serem as zonas com maior risco sísmico em Portugal Continental.

No âmbito de dois projectos nacionais de avaliação do risco sísmico das áreas metropolitanas de Lisboa e concelhos limítrofes e região do Algarve, financiados pela ANPC (Autoridade Nacional da Protecção Civil) foram realizados vários estudos e recolha de informação geotécnica, por equipas de diversas entidades nacionais, por forma a construir unidades sísmico-geotécnicas das áreas em estudo. Deste modo, tem-se por finalidade classificar as centenas de perfis geotécnicos disponíveis segundo a classificação proposta por Pitalakis *et al.* (2013) e analisar a adaptação da forma do espectro de resposta do Anexo Nacional do Eurocódigo 8 para as diversas classes de solo e cenários de acção sísmica com as formas dos espectros de resposta elástico dos perfis em estudo, obtidos através do programa existente no simulador de cenários sísmicos (Campos Costa, A. *et al.*, 2004) que aplica o método linear equivalente para a propagação das ondas de corte na coluna de solo.

Dos resultados obtidos, foi possível verificar que, apesar de não apresentarem diferenças significativas, a nova proposta de Pitalakis *et al.* (2013) é interessante do ponto de vista geotécnico pois é mais detalhado uma vez que introduz novos parâmetros. Relativamente ao estudo dos espectros de resposta, verificou-se que a forma varia com a variação de magnitude.

## Palavras-chave:

Resposta sísmica local

Espectro de resposta elástica

Acção sísmica

Anexo Nacional do Eurocódigo 8

## Abstract

The main purpose of the present work is to study local seismic effects on Lisbon metropolitan area and Algarve region soils, as these are two of the most susceptible seismic risk zones in Portugal mainland.

In the scope of two seismic risk national evaluation projects for the Lisbon metropolitan area and the Algarve region, under finance of the ANPC (National Civil Protection Authority), multiples studies were performed and geotechnical information was collected by several teams of national entities, to construct geotechnical seismic units for the areas under analysis. So, a classification of hundreds of samples was made applying the Eurocode 8 classification and also a new classification proposed by Pitilakis *et al*, (2013). An analysis was also made of the adaptation of the Eurocode 8 - Portuguese National Attachment (NA8) elastic response spectra form, for the different soils types and seismic scenarios, to the elastic response spectra form samples, obtained using an existing program of seismic scenarios simulator (Campos Costa, A. *et al* (2004)), which applies the equivalent linear method to the shear wave's propagation in the soil samples.

From the obtained results, it was possible to verify that, although the differences between the two classifications were not significant, the Pitilakis *et al*. (2013) new classification system is more detailed from the geotechnical point of view, due to the inclusion of new parameters. Regarding the response spectra study, it was possible to conclude the influence of the magnitude variation in the response spectra form.

## Key-words:

Local seismic response

Elastic response spectra

Seismic action

Portuguese National Annex to Eurocode 8

# Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado não teria sido possível sem os apoios de todos aqueles que de uma forma ou de outra deram a sua contribuição e aos quais estarei eternamente agradecida.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, o Prof. Doutor Rui Carrilho Gomes, e à minha co-orientadora, a Dra. Alexandra Carvalho, pela orientação, disponibilidade, apoio, opiniões e críticas e por tudo aquilo que me ensinaram ao longo destes meses.

Ao meu colega José Rodrigues pela partilha de trabalho, apoio e paciência nos tempos mais difíceis quando não parecia haver soluções.

Às minhas amigas Ana Maria Alcaface, Vanessa Valente, Inês Silva e Joana Lourenço pela companhia nas infindáveis horas nas bibliotecas, pelo apoio total, incentivo e amizade.

Ao meu namorado, Pedro Prucha, pelo apoio incondicional e palavras de motivação que sempre me deram força para concluir esta importante etapa da minha vida.

Por último, gostaria de agradecer a toda a minha família, em especial um enorme agradecimento à minha mãe, pelo seu apoio, incentivo, paciência e ajuda na superação de obstáculos pois sem ela a realização desta dissertação não seria agora uma realidade e por isso, a ela dedico este trabalho.



# Índice

1	Introdução .....	1
1.1	Enquadramento Geral .....	1
1.2	Motivação .....	1
1.2.1	Resposta sísmica local .....	1
1.2.2	Regulamentação sísmica .....	2
1.3	Objectivos .....	2
1.4	Estrutura da dissertação.....	2
2	Métodos de avaliação de efeitos de sítio sísmicos.....	4
2.1	Introdução.....	4
2.2	Fonte sísmica e propagação .....	4
2.2.1	Tipos de falhas sísmicas .....	4
2.2.2	Ondas sísmicas .....	5
2.2.3	Modelo estocástico .....	7
2.3	Efeitos de sítio .....	8
2.3.1	Comportamento do solo sob solicitações cíclicas.....	8
2.3.2	Método da resposta complexa .....	9
2.4	Método linear equivalente .....	15
2.4.1	Via determinística .....	16
2.4.2	Via probabilística .....	16
2.4.3	Cálculo do Espectro de Resposta a partir do Espectro de Potência .....	17
2.5	Curvas de rigidez e de amortecimento dependentes da distorção.....	18
2.5.1	Equações para obtenção de curvas de rigidez e amortecimento .....	20
2.5.2	Efeito do tipo de solo nas curvas de rigidez e de amortecimento.....	22
3	Perfis do terreno.....	30
3.1	Zonamento sísmico do Anexo Nacional ao Eurocódigo 8 (EC8-A.N).....	30
3.2	Esquemas de classificação do terreno.....	30
3.2.1	Classificação do terreno de acordo com o Eurocódigo 8.....	30
3.2.2	Classificação Pitalakis <i>et al.</i> , (2013) .....	32
3.3	Algarve.....	35
3.4	Área Metropolitana de Lisboa.....	37

3.5	Classificação conjunta dos perfis de terreno das 2 zonas .....	39
4	Análise de resultados .....	40
4.1	Introdução .....	40
4.2	Metodologia .....	40
4.3	Terrenos tipo do Anexo Nacional do EC8 (EC8-A.N) .....	40
4.4	Acção sísmica Tipo 1 – Sismo Afastado .....	42
4.4.1	Solo Tipo A .....	42
4.4.2	Solo Tipo B .....	44
4.4.3	Solo Tipo C .....	46
4.4.4	Solo Tipo D .....	48
4.4.5	Solo Tipo E .....	50
4.5	Acção sísmica Tipo 2 – Sismo Próximo .....	52
4.5.1	Solo Tipo A .....	52
4.5.2	Solo Tipo B .....	54
4.5.3	Solo Tipo C .....	56
4.5.4	Solo Tipo D .....	58
4.5.5	Solo Tipo E .....	60
5	Conclusões.....	62
6	Referências Bibliográficas.....	63
	Anexos.....	0
	Anexo A1 – Dados Algarve .....	A
	Anexo A2 – Dados Lisboa .....	H

# Índice de Figuras

Figura 1 – Esquema do percurso desde a fonte sísmica até ao local (adaptado de Kramer, 1996).....	1
Figura 2 – Falha Normal (fonte: <a href="http://terra-online.blogspot.pt/2010/05/estruturas-geologicas-originadas-por.html">http://terra-online.blogspot.pt/2010/05/estruturas-geologicas-originadas-por.html</a> ).....	4
Figura 3 – Falha Inversa (fonte: <a href="http://terra-online.blogspot.pt/2010/05/estruturas-geologicas-originadas-por.html">http://terra-online.blogspot.pt/2010/05/estruturas-geologicas-originadas-por.html</a> ).....	5
Figura 4 – Falha Transformante/Desligamento (fonte: <a href="http://terraonline.blogspot.pt/2010/05/estruturas-geologicas-originadas-por.html">http://terraonline.blogspot.pt/2010/05/estruturas-geologicas-originadas-por.html</a> ).....	5
Figura 5 – Modo de propagação das ondas P (fonte: <a href="http://www.apolo11.com/terremotos_wave.php">http://www.apolo11.com/terremotos_wave.php</a> )	5
Figura 6 - Modo de propagação das ondas S (fonte: <a href="http://www.apolo11.com/terremotos_wave.php">http://www.apolo11.com/terremotos_wave.php</a> )	6
Figura 7 – Modo de propagação das ondas Rayleigh (fonte: <a href="http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_wave">http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_wave</a> ).....	6
Figura 8 – Modo de propagação das ondas Love (fonte: <a href="http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Love_wave.jpg">http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Love_wave.jpg</a> ).....	7
Figura 9 – Elemento de um sólido Kelvin-Voigt sujeito a tensão de corte horizontal (adaptado de Kramer, 1996).....	9
Figura 10 - Esquema de camada de solo uniforme, com amortecimento, sobre substrato rígido (adaptado de Kramer, 1996) .....	10
Figura 11 - Esquema de camada uniforme amortecida, sobre substrato elástico (adaptado de Kramer, 1996).....	12
Figura 12 - Esquema de camada de solo estratificado, com amortecimento, sobre substrato elástico (adaptado de Kramer, 1996) .....	14
Figura 13 – Síntese do método da resposta complexa (adaptado Kramer, 1996) .....	15
Figura 14 – Curva tensão-deformação não linear dos solos e variação do módulo de distorção secante com a amplitude da tensão de corte (Darendeli, 2001).....	18
Figura 15 – Módulo de distorção e coeficiente de amortecimento (Darendeli, 2001) .....	19
Figura 16 – Curva da relação entre módulo de distorção e a distorção (Darendeli, 2001) .....	19
Figura 17 – Curva da relação entre módulo de distorção normalizado e a distorção (Darendeli, 2001) .....	19
Figura 18 – Curva da relação entre o coeficiente de amortecimento e a distorção (Darendeli, 2001).	20
Figura 19 – Curvas de rigidez e amortecimento para diferentes valores de frequência para as areias e as argilas .....	23
Figura 20 – Curvas de rigidez e amortecimento para diferentes valores do número de ciclos para as areias e as argilas .....	24
Figura 21 – Curvas de rigidez e amortecimento para diferentes valores de OCR para as areias e as argilas .....	25
Figura 22 – Curvas de rigidez e de amortecimento para $p' = 100kPa$ (a) e (c) e $p' = 1000kPa$ (b) e (d) .....	27

Figura 23 – Curvas de rigidez e amortecimento para diferentes valores de $p'$ e $IP=0\%$ para as areias .....	28
Figura 24 – Curvas de rigidez e amortecimento para diferentes valores de $p'$ e $IP=40\%$ para as argilas .....	29
Figura 25 – Zonamento sísmico para as acções do tipo 1 e 2 .....	30
Figura 26 – Esquema da classificação de Pitolakis <i>et al.</i> (2013) .....	34
Figura 27 – Distribuição dos perfis do terreno pelas classificações do EC8 pelos perfis para o Algarve .....	36
Figura 28 – Distribuição dos perfis do terreno pelas classificações de Pitolakis <i>et al.</i> (2013) pelos perfis para o Algarve .....	36
Figura 29 – Distribuição dos perfis do terreno pelas classificações do EC8 pelos perfis para Lisboa. 38	
Figura 30 – Distribuição dos perfis do terreno pelas classificações de Pitolakis <i>et al.</i> (2013) pelos perfis para Lisboa .....	38
Figura 31 – Distribuição do conjunto dos perfis do terreno pelas classificações do EC8 .....	39
Figura 32 – Distribuição do conjunto dos perfis do terreno pelas classificações de Pitolakis <i>et al.</i> (2013) .....	39
Figura 33 – Espectro da resposta elástica para acção do tipo 1 (a) e tipo 2 (b) para solos do tipo A e E .....	41
Figura 34 – Comparação dos espectros de resposta em análise com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo A e acção sísmica do tipo 1 .....	42
Figura 35 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo A e acção sísmica tipo 1 .....	43
Figura 36 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo A e acção sísmica tipo 1 .....	43
Figura 37 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo A e acção sísmica tipo 1 .....	43
Figura 38 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo A e acção sísmica tipo 1 .....	43
Figura 39 – Comparação dos espectros de resposta em análise com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo B e acção sísmica do tipo 1 .....	44
Figura 40 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo B e acção sísmica tipo 1 .....	45
Figura 41 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo B e acção sísmica tipo 1 .....	45

Figura 42 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo B e acção sísmica tipo 1.....	45
Figura 43 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo B e acção sísmica tipo 1 .....	45
Figura 44 – Comparação dos espectros de resposta em análise com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo C e acção sísmica do tipo 1 .....	46
Figura 45 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo C e acção sísmica tipo 1.....	47
Figura 46 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo C e acção sísmica tipo 1 .....	47
Figura 47 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo C e acção sísmica tipo 1.....	47
Figura 48 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo C e acção sísmica tipo 1 .....	47
Figura 49 – Comparação dos espectros de resposta em análise com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo D e acção sísmica do tipo 1 .....	48
Figura 50 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo D e acção sísmica tipo 1.....	49
Figura 51 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo D e acção sísmica tipo 1 .....	49
Figura 52 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo D e acção sísmica tipo 1.....	49
Figura 53 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo D e acção sísmica tipo 1 .....	49
Figura 54 – Comparação dos espectros de resposta em análise com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo E e acção sísmica do tipo 1.....	50
Figura 55 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo E e acção sísmica tipo 1.....	51

Figura 56 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo E e acção sísmica tipo 1 .....	51
Figura 57 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo E e acção sísmica tipo 1 .....	51
Figura 58 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo E e acção sísmica tipo 1 .....	51
Figura 59 – Comparação dos espectros de resposta em análise com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo A e acção sísmica do tipo 2.....	52
Figura 60 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo A e acção sísmica tipo 2.....	53
Figura 61 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo A e acção sísmica tipo 2 .....	53
Figura 62 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo A e acção sísmica tipo 2.....	53
Figura 63 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo A e acção sísmica tipo 2 .....	53
Figura 64 – Comparação dos espectros de resposta em análise com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo B e acção sísmica do tipo 2.....	54
Figura 65 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo B e acção sísmica tipo 2.....	55
Figura 66 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo B e acção sísmica tipo 2 .....	55
Figura 67 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo B e acção sísmica tipo 2.....	55
Figura 68 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo B e acção sísmica tipo 2 .....	55
Figura 69 – Comparação dos espectros de resposta em análise com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo C e acção sísmica do tipo 2 .....	56

Figura 70 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo C e acção sísmica tipo 2.....	57
Figura 71 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo C e acção sísmica tipo 2 .....	57
Figura 72 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo C e acção sísmica tipo 2.....	57
Figura 73 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo C e acção sísmica tipo 2 .....	57
Figura 74 – Comparação dos espectros de resposta em análise com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo D e acção sísmica do tipo 2 .....	58
Figura 75 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo D e acção sísmica tipo 2.....	59
Figura 76 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo D e acção sísmica tipo 2 .....	59
Figura 77 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo D e acção sísmica tipo 2.....	59
Figura 78 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo D e acção sísmica tipo 2 .....	59
Figura 79 – Comparação dos espectros de resposta em análise com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo E e acção sísmica do tipo 2.....	60
Figura 80 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo E e acção sísmica tipo 2.....	61
Figura 81 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo E e acção sísmica tipo 2 .....	61
Figura 82 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo E e acção sísmica tipo 2.....	61
Figura 83 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo E e acção sísmica tipo 2 .....	61

# Índice de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros em função do tipo de solo (Darendeli, 2001) .....	22
Tabela 2 – Parâmetros fixos adoptados.....	25
Tabela 3 – Parâmetros utilizados para o caso em estudo .....	26
Tabela 4 – Classificação do terreno, EC8.....	31
Tabela 5 – Resumo das condições exigidas de acordo com o EC8 para cada classificação do terreno .....	31
Tabela 6 – Classificação do terreno, Pitilakis et al., (2013) .....	33
Tabela 7 – Resumo das condições exigidas de acordo com Pitilakis <i>et al.</i> (2013) para cada classificação do terreno.....	34
Tabela 8 – Valores de densidade e índice de plasticidade estimados com base na litologia .....	35
Tabela 9 – Exemplo dos parâmetros dos perfis de terreno para o Algarve.....	35
Tabela 10 – Comparação das classificações para os perfis da Tabela 9.....	35
Tabela 11 – Exemplo dos parâmetros dos perfis do terreno para Lisboa .....	37
Tabela 12 – Comparação das classificações para os perfis da Tabela 11 .....	37
Tabela 13 – Parâmetros definidores para o espectro do tipo 1 .....	41
Tabela 14 – Parâmetros definidores para o espectro do tipo 2 .....	41

# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento Geral

O movimento das ondas sísmicas no terreno depende das características da fonte sísmica assim como da distância, desde a fonte até ao local, bem como das condições locais do terreno, como está esquematizado na Figura 1. Este último tem a designação de efeitos de sítio, que corresponde não só à resposta sísmica local no terreno devido à interferência dos geomateriais na propagação vertical das ondas sísmicas, mas também ao efeito de bacia/vale influenciado pela estrutura bi ou tri-dimensional de vales sedimentares no movimento sísmico e pela reflexão das ondas originada pela topografia da superfície (Stewart et al., 2002).

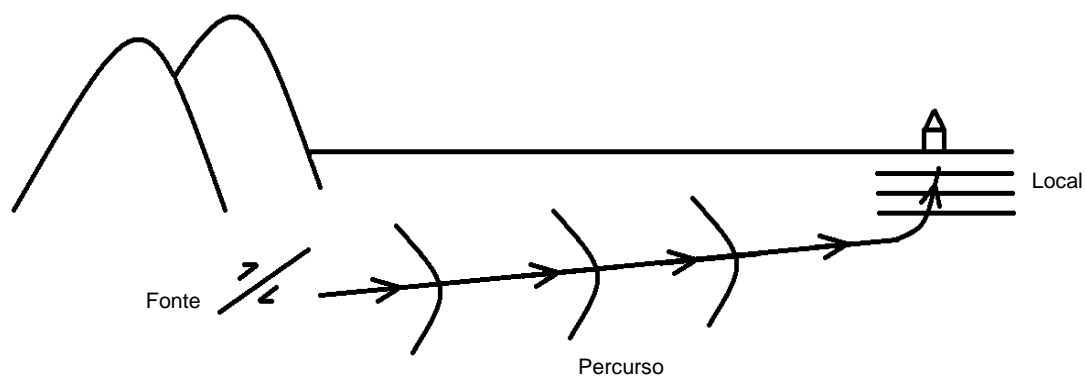


Figura 1 – Esquema do percurso desde a fonte sísmica até ao local (adaptado de Kramer, 1996)

## 1.2 Motivação

### 1.2.1 Resposta sísmica local

As condições locais influenciam profundamente todas as características do movimento do terreno, como a amplitude, o conteúdo de frequências e a duração. A extensão da sua influência depende da geometria e propriedades dos materiais constituintes das camadas superficiais do solo.

O estudo neste trabalho referente à resposta sísmica local do terreno tem por base a modelação propagação vertical de ondas de corte, de acordo com o postulado de Schnabel *et al.*, (1972). Segundo este postulado, enquanto que o movimento vertical de depósitos de solo tem origem na propagação vertical de ondas de compressão, o movimento horizontal tem como origem principal a propagação vertical de ondas de corte. Assim, a representação simplificada só é válida se a estratificação do solo for horizontal (sendo adequada para formações sedimentares recentes) e se a propagação ocorrer na vertical, em virtude de, geralmente, a rigidez dos geomateriais aumentar com a profundidade, dando origem a fenómenos de refração sucessivos tendendo a alinhar a direcção de propagação com a vertical.

A abordagem mais divulgada para avaliar a resposta sísmica local baseia-se no método linear equivalente descrito neste trabalho na secção 2.4.

## 1.2.2 Regulamentação sísmica

Os Eurocódigos são constituídos por um conjunto de normas europeias que têm como objectivo unificar critérios e normativas de cálculo e dimensionamento de estruturas. Estão divididos em 10 normas sendo objecto deste trabalho a Norma EN 1998, também designada por Eurocódigo 8 (EC8), parte 1: regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios. Estas normas podem ser acompanhadas pelos respectivos Anexos Nacionais, onde são definidos os Parâmetros de Determinação Nacional (NDP) que correspondem a parâmetros, definidos para cada país, para utilizar no projecto de edifícios e de outras obras de engenharia civil.

Relativamente ao EC8, uma das questões fundamentais incluídos nos respectivos anexos nacionais é o mapa de zonamento do território que permite diferenciar as zonas com diferentes intensidades face à acção sísmica. O desenvolvimento deste trabalho torna-se de especial interesse uma vez que se pretende estudar a forma dos espectros de resposta elástica para as diferentes zonas do distrito de Lisboa e região do Algarve e apresentar os respectivos espectros de resposta face a uma acção sísmica, representativa das características neotectónicas de Portugal Continental. Deste modo, pretende-se contribuir para uma futura revisão do Anexo Nacional do EC8 (EC8-A.N).

## 1.3 Objectivos

O presente trabalho tem como principal objectivo o estudo do comportamento não linear dos solos na Área Metropolitana de Lisboa e na região do Algarve, por serem as zonas com maior risco sísmico em Portugal Continental e para as quais estão disponíveis centenas de perfis geotécnicos.

Com recurso aos diversos dados fornecidos da região do Algarve e de Lisboa, tem-se por finalidade classificar os solos segundo a classificação proposta por Ptilakis *et al.*, (2013) e analisar a adaptação da forma dos espectros de resposta elástico à forma do espectro de resposta do Anexo Nacional do Eurocódigo 8 para as diversas classes apresentadas por este.

## 1.4 Estrutura da dissertação

O presente trabalho está organizado nos seguintes capítulos:

- No capítulo 2, descrevem-se os elementos de base, incluindo os parâmetros do movimento sísmico e apresentam-se, de um modo teórico, os métodos de análise utilizados na elaboração deste trabalho.
- No capítulo 3, são descritas as classificações para o terreno, segundo o Eurocódigo 8 e segundo Ptilakis *et al.* (2013). É também apresentada a acção sísmica para Portugal Continental, mostrando a importância da análise para as zonas referidas neste trabalho. Por fim, é apresentada uma classificação para os perfis de terreno para a zona do Algarve e região de Lisboa.
- No capítulo 4, procede-se à apresentação dos resultados dos espectros obtidos dos perfis de terreno em análise, classificadas no capítulo 3, e faz-se a comparação com os espectros de referência do Anexo Nacional do Eurocódigo 8 para cada tipo de solo e cenário sísmico, sismo afastado e próximo, e vários níveis de magnitude.

- No capítulo 5, apresentam-se, por fim, as conclusões da dissertação e desenvolvimentos futuros.

## 2 Métodos de avaliação de efeitos de sítio sísmicos

### 2.1 Introdução

Ao longo das últimas décadas, o estudo dos efeitos dos sismos em todo o Mundo mostrou a importância das camadas superficiais do terreno. Verificou-se que é de extrema importância ter em conta as condições do terreno na avaliação da acção sísmica. Abrahamson e Youngs (1992) evidenciaram duas importantes fontes de variabilidade do movimento sísmico: a variabilidade num dado local induzido por eventos distintos e a variabilidade entre locais equidistantes do epicentro induzido por um dado evento. Mais tarde, Youngs *et al.* (1995) concluiu que para eventos sísmicos com magnitude superior a 6, a variabilidade entre eventos não era significativa relativamente à variabilidade registada para o mesmo evento, uma vez que existem condições locais que provocam alterações significativas do movimento do terreno, para o mesmo evento sísmico.

O movimento sísmico pode ser descrito considerando três processos distintos:

- A geração de energia na fonte sísmica
- A propagação de ondas sísmicas desde a fonte até ao depósito de solo
- Os efeitos locais

Os processos de geração e propagação das ondas sísmicas serão brevemente analisados na secção 2.2 e os efeitos locais na secção 2.3.

### 2.2 Fonte sísmica e propagação

#### 2.2.1 Tipos de falhas sísmicas

As falhas podem ser classificadas quanto ao movimento distinguindo-se três tipos: falha normal, falha inversa ou falha transformante/desligamento.

A falha normal está associada a forças de tracção e resulta numa extensão horizontal da crosta (Figura 2).



Figura 2 – Falha Normal (fonte: <http://terra-online.blogspot.pt/2010/05/estruturas-geologicas-originadas-por.html>)

A falha inversa está associada a forças de compressão, resultando assim numa sobreposição da crosta terrestre (Figura 3).



Figura 3 – Falha Inversa (fonte: <http://terra-online.blogspot.pt/2010/05/estruturas-geologicas-originadas-por.html>)

A falha transformante/desligamento resulta de forças de corte, resultando num movimento paralelo entre os dois blocos rochosos, como está representado na Figura 4.



Figura 4 – Falha Transformante/Desligamento (fonte:

<http://terraonline.blogspot.pt/2010/05/estruturas-geologicas-originadas-por.html>)

Quanto à localização, as falhas podem ser classificadas como falhas interplacas ou intraplacas consoante seja uma falha entre placas diferentes ou na mesma placa tectónica respectivamente.

## 2.2.2 Ondas sísmicas

Existem dois tipos de ondas sísmicas que são produzidas aquando da ocorrência de um sismo: as ondas volúmicas e as ondas superficiais.

As ondas volúmicas propagam-se no interior da Terra e podem ser de dois tipos: ondas P ou ondas S.

As ondas P ou ondas primárias são compressivas ou longitudinais e propagam-se como uma onda sonora, alternadamente por compressão e dilatação dos materiais atravessados. O movimento é longitudinal à direcção de propagação e provoca variações de volume, como é possível observar na Figura 5. Estas ondas podem também atravessar qualquer tipo de material quer seja sólido ou líquido.

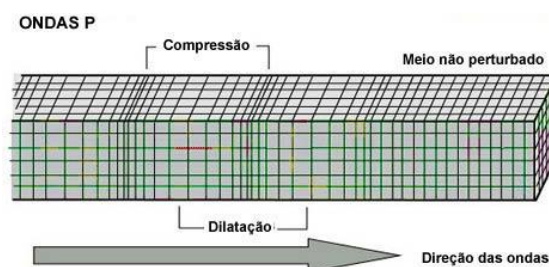
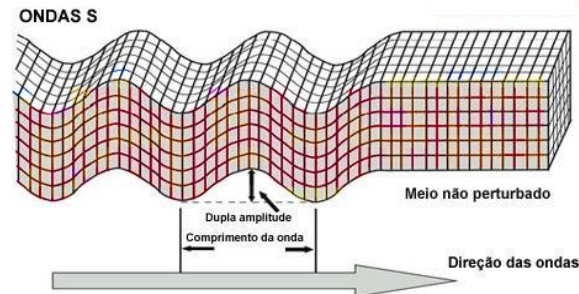


Figura 5 – Modo de propagação das ondas P (fonte:

[http://www.apolo11.com/terremotos\\_wave.php](http://www.apolo11.com/terremotos_wave.php))

As ondas S ou ondas secundárias são também designadas por ondas de corte devido ao seu modo de propagação transversal à direcção de propagação que provoca deformações de corte nos materiais atravessados (Figura 6). Como os líquidos não têm rigidez de corte, não é possível a propagação destas ondas na água.

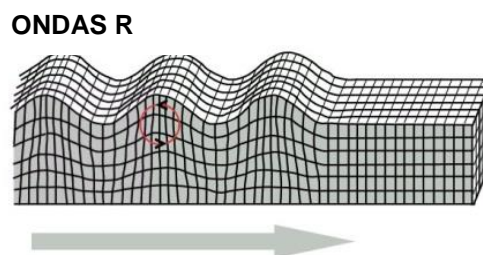


**Figura 6 - Modo de propagação das ondas S (fonte: [http://www.apolo11.com/terremotos\\_wave.php](http://www.apolo11.com/terremotos_wave.php))**

A velocidade de propagação de cada tipo de onda volumétrica depende das propriedades do material atravessado. Uma vez que os materiais geológicos são mais rígidos à compressão, as ondas P propagam-se com maior velocidade do que as ondas S sendo, por esta razão, as primeiras ondas a serem sentidas num determinado local.

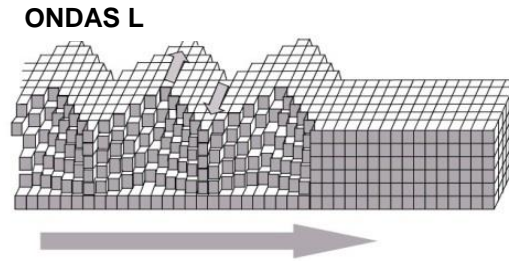
As ondas superficiais resultam da interacção das ondas volumétricas com a superfície. Propagam-se à superfície com amplitudes que decrescem com a profundidade, de uma forma aproximadamente exponencial, não penetrando o interior da Terra. Estas ondas são mais lentas, maiores em amplitude e mais longas que as ondas volumétricas. Existem dois tipos destas ondas, as ondas Rayleigh (R) e as ondas Love (L).

Nas ondas Rayleigh, Figura 7, o movimento das partículas provocado pela passagem destas ondas está confinado a um plano vertical que contém a direcção de propagação, verificando-se à superfície um movimento elíptico retrógrado, contendo uma componente vertical e uma horizontal de movimento. Devido ao facto de ter as duas componentes de movimento, este tipo de ondas pode ser registada em qualquer tipo de receptor.



**Figura 7 – Modo de propagação das ondas Rayleigh (fonte: [http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh\\_wave](http://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh_wave))**

As ondas Love, representadas na Figura 8, têm um movimento semelhante ao das ondas S, sem movimento vertical e movendo-se lateralmente num plano horizontal, em ângulos rectos com a direcção de propagação e apenas ocorrem quando há um aumento da velocidade das ondas S com a profundidade.



**Figura 8 – Modo de propagação das ondas Love (fonte: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Love\\_wave.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Love_wave.jpg))**

### 2.2.3 Modelo estocástico

Os processos de geração de energia, na fonte sísmica e propagação das ondas sísmicas no meio desde a fonte até ao local, podem ser descritos com o modelo estocástico de falha-finita. Este modelo simula o processo de rotura na falha e o processo de propagação.

Relativamente à fonte sísmica, para sismos de média a elevada magnitude, é necessário uma discretização da falha-finita para ter em conta a sua geometria, heterogeneidades do processo de rotura e efeitos de directividade. Este modelo considerou:

- o modelo pontual estocástico - cada elemento da falha é considerado uma fonte pontual e o espectro de amplitude de Fourier é obtido a partir do produto das várias funções que traduzem os vários processos físicos:

$$A(f, M_0, R) = (2\pi f)^2 \cdot S(f, M_0) \cdot G(R) \cdot An(f, R) \cdot P(f) \cdot F_z(f) \quad (2.1)$$

Onde,

$S(f, M_0)$  – espectro de Fourier de deslocamento na fonte sísmica;

$G(R)$  – função de atenuação geométrica e  $An(f, R)$  – função de atenuação inelástica. Estas funções modelam a atenuação das ondas sísmicas ao longo do percurso atravessado, desde a fonte até ao local em estudo;

$P(f)$  e  $F_z(f)$  – funções de decaimento e de amplificação da energia na crosta terrestre que modelam o comportamento das camadas superiores da crosta, respectivamente.

- a técnica de modelação da fonte-finita que inclui a divisão do plano de falha em vários elementos, a distribuição heterogénea do deslizamento, a consideração da velocidade de rotura e do ponto de nucleação (ponto de início de rotura) e a soma das contribuições elementares através de um desfaseamento temporal.

A modelação de uma fonte extensa teve em consideração um plano de falha dividido em elementos rectangulares, designados de subfalhas cada uma modelada como uma fonte pontual. Esta metodologia considera que a rotura na falha se propaga radialmente desde o hipocentro até aos vários elementos da falha. A contribuição de cada subfalha é somada no receptor, com a consideração de um atraso temporal em cada elemento que resulta do tempo necessário para que a rotura atinja a subfalha.

Para caracterizar o modelo estocástico de falha-finita e descrever os processos envolvidos na obtenção do movimento sísmico do solo foram considerados vários tipos de parâmetros.

- Parâmetros relacionados com a geometria da falha - comprimento, largura, orientação e inclinação do plano de falha e o número de subfalhas
- Parâmetros relacionados com as características de rotura na fonte sísmica – momento sísmico, distribuição de deslizamento, queda de tensão, velocidade de rotura e ponto de início de rotura
- Parâmetros relacionados com as características do meio de propagação – espessura da crosta, coeficientes de atenuação geométrica e factor de qualidade do meio
- Parâmetros relacionados com as características locais – factor de decaimento espectral e factor de impedância.

No projecto ERSTA (2008), foi utilizado o programa de modelação estocástico de falha finita RSSIM (Carvalho, 2007) para realizar as simulações pretendidas. Consideraram-se, assim, os valores médios dos parâmetros do modelo obtidos em Carvalho (2007), para dois cenários sísmicos diferentes mas igualmente relevantes para a perigosidade sísmica em Portugal Continental. Estes cenários correspondem a duas zonas capazes de gerar eventos sísmicos de magnitude média a elevada ( $M \geq 6$ ): a zona do Vale Inferior do Tejo e a zona a SW do Cabo de S.Vicente.

O primeiro cenário pretende representar um segmento da falha do Vale Inferior do Tejo e ser representativo de sismos de moderada magnitude a curtas distâncias (acção sísmica do tipo 2 segundo o Anexo Nacional do EC8). O segundo representa a falha do Marquês de Pombal, e pretende ser representativo de sismos de elevada magnitude com epicentro na região Atlântica (acção sísmica do tipo 1 segundo o Anexo Nacional do EC8).

Utilizaram-se as leis de Well e Coppersmith (1994) para falhas inversas de modo a obter o comprimento e a largura do plano das respectivas falhas para cada magnitude. Assim, simularam os movimentos do solo para um conjunto de magnitudes, frequências e distâncias para os dois cenários distintos, obtendo-se uma base de dados sintética, de acção no substrato rochoso, para os dois ambientes de Portugal Continental, que pretende suprimir a falta de registos obtidos na rede acelerográfica e sísmica nacional. Estas simulações tiveram ainda em conta as heterogeneidades de rotura, captaram os efeitos de directividade e consideraram a variabilidade aleatória dos parâmetros do modelo estocástico de falha-finita.

## **2.3 Efeitos de sítio**

No projecto ERSTA (ERSTA, 2008), os efeitos de sítio foram modelados utilizando o modelo de propagação vertical das ondas de corte em meio visco-elástico estratificado.

O estudo dos efeitos de sítio tem como finalidade caracterizar a propagação das ondas sísmicas do substrato até à superfície do terreno.

### **2.3.1 Comportamento do solo sob solicitações cíclicas**

Os solos apresentam tipos de comportamentos distintos consoante o tipo de carregamento a que estão sujeitos.

Para um tipo de carregamento cíclico, que significa que o carregamento é repetitivo e com inversão do sentido do mesmo, distinguem-se padrões de comportamentos dos solos face ao nível de deformações impostos.

Para um nível de deformações muito pequeno, o comportamento é elástico linear e é associado a fenómenos de propagação de ondas e vibrações. Este tipo de comportamento observa-se na gama das muito pequenas a pequenas deformações. Neste tipo de comportamento, o amortecimento é muito reduzido e o parâmetro de referência é o módulo de distorção inicial,  $G_0$ .

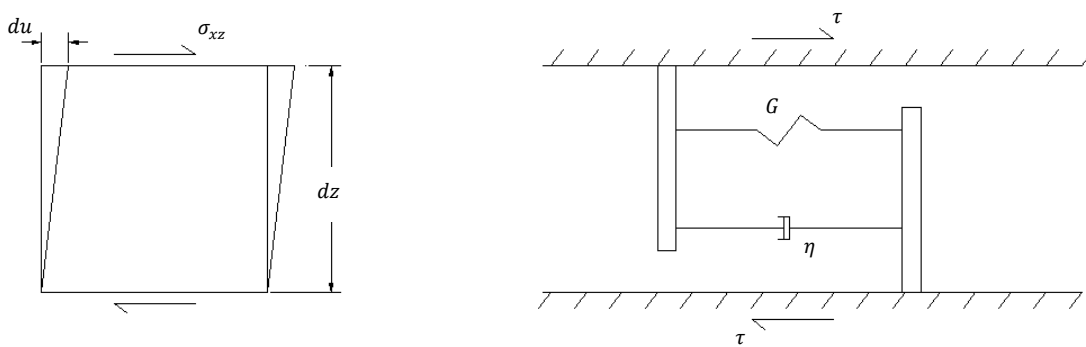
Quando o nível de deformação é pequeno, o comportamento é elástico não linear ou ligeiramente elastoplástico. Neste tipo de comportamento, é constatável que as características de rigidez e amortecimento são independentes do número de ciclos de carregamentos e que o módulo de distorção secante decresce. Neste caso, o comportamento é elastoplástico reversível, o que significa que é inteiramente recuperável após a paragem do carregamento.

Quando as deformações são de nível médio a elevado são irreversíveis, não sendo o ciclo histerético estável, que varia em função do nível de deformação e do número de ciclos de carregamento. Ocorrem grandes deformações ao nível do arranjo interno das partículas do solo, e poderão ocorrer fenómenos de dilatância (positiva ou negativa) do material.

## 2.3.2 Método da resposta complexa

### 2.3.2.1 Modelo visco-elástico

No modelo visco-elástico assume-se que o solo se trata de um material com características de um sólido Kelvin-Voigt que pode ser representado por um conjunto de elementos infinitesimais do tipo esquematizado na Figura 9 (Kramer, 1996).



**Figura 9 – Elemento de um sólido Kelvin-Voigt sujeito a tensão de corte horizontal (adaptado de Kramer, 1996)**

A relação tensão-deformação para um sólido deste tipo sujeito a tensão de corte pode ser expresso como a equação 2.2:

$$\tau = G\gamma + \eta \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (2.2)$$

A equação do movimento unidimensional para propagação de ondas verticais pode ser escrito como:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \quad (2.3)$$

Assim, substituindo a equação (2.2) na equação (2.3), e com,  $\tau = \sigma_{xz}$  e  $\gamma = \frac{\partial u}{\partial z}$ , obtém-se a equação de onda expressa da seguinte forma:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (2.4)$$

Assumindo que o movimento harmónico, a equação do deslocamento fica:

$$u(z, t) = U(z) e^{i\omega t} \quad (2.5)$$

E substituindo na equação (2.4), tem-se:

$$(G + i\omega\eta) \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\rho\omega^2 U \quad (2.6)$$

Ou

$$G^* \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\rho\omega^2 U \quad (2.7)$$

Onde, o módulo de distorção complexo é dado por:

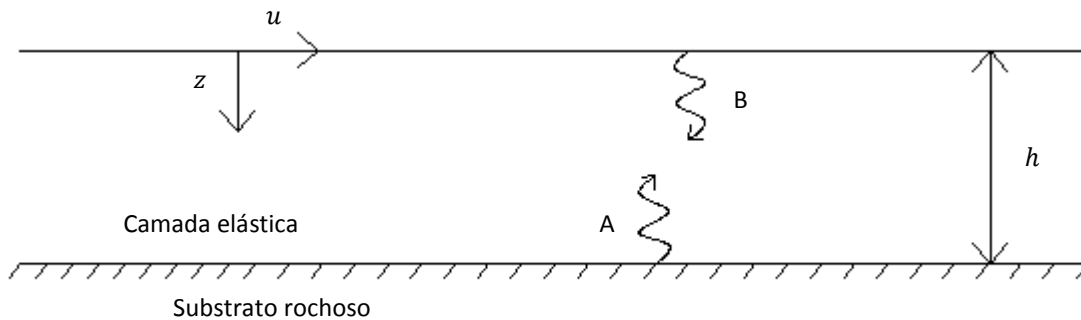
$$\begin{aligned} G^* &= G + i\omega\eta \\ &\text{ou} \\ G^* &= G(1 + 2i\xi) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Assim, a equação do movimento é expressa da seguinte forma:

$$u(z, t) = A e^{i(\omega t + k^* z)} + B e^{i(\omega t - k^* z)} \quad (2.9)$$

Onde os valores de A e B dependem das condições de fronteira e  $k^* = \omega \sqrt{\frac{\rho}{G^*}}$  é o número de onda complexo.

### 2.3.2.2 Camada solo uniforme elástica, com amortecimento, sobre substrato rígido



**Figura 10 - Esquema de camada de solo uniforme, com amortecimento, sobre substrato rígido (adaptado de Kramer, 1996)**

Tendo por base a equação da onda apresentada pela equação (2.4), a expressão do movimento pode ser expressa da seguinte forma:

$$u(z, t) = Ae^{i(\omega t + k^* z)} + Be^{i(\omega t - k^* z)} \quad (2.10)$$

Onde,

A e B – Amplitude das ondas (ascendentes e descendentes respectivamente)

$\omega$  – Frequência angular do movimento do solo

$k^*$  – n° de onda que é definido por:  $k^* = \frac{\omega}{V_s^*}$

A partir da equação de onda e das condições de fronteira:

$$\tau(z = 0, t) \rightarrow G \gamma(0, t) = 0 \rightarrow G \left[ \frac{\partial u(0, t)}{\partial z} \right] = 0 \quad (2.11)$$

$$G \left[ \frac{\partial}{\partial z} (Ae^{i(\omega t + k^* z)} + Be^{i(\omega t - k^* z)}) \right] = 0 \quad (\Rightarrow) \quad G k^* i e^{i\omega t} [A - B] = 0 \rightarrow A = B \quad (2.12)$$

Tendo em consideração a igualdade conseguida pela equação (2.10), tem-se:

$$u(z, t) = Ae^{i(\omega t + k^* z)} + Ae^{i(\omega t - k^* z)} = A[e^{i(\omega t + k^* z)} + e^{i(\omega t - k^* z)}] \quad (2.13)$$

Sabendo que,  $\frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2} = \cos(z)$

$$u(z, t) = \frac{2}{2} A [e^{i(\omega t + k^* z)} + e^{i(\omega t - k^* z)}] = 2Ae^{i\omega t} \left( \frac{e^{ik^* z} + e^{-ik^* z}}{2} \right) = 2Ae^{i\omega t} \cos(k^* z) \quad (2.14)$$

Função de transferência de aceleração:

$$F(w) = \frac{u^{max}(0, t)}{u^{max}(h, t)} = \frac{2Ae^{i\omega t} \cos(0)}{2Ae^{i\omega t} \cos(k^* h)} = \frac{1}{\cos(k^* h)} \quad (2.15)$$

A partir da equação (2.8), é possível obter a seguinte expressão para o valor da velocidade das ondas de corte complexo, da seguinte forma:

$$V_s^* = \sqrt{\frac{G^*}{\rho}} = \sqrt{\frac{G(1 + 2\xi i)}{\rho}} \cong \sqrt{\frac{G}{\rho}} (1 + \xi i) \cong V_s (1 + \xi i) \quad (2.16)$$

O número de onda complexo,  $k^*$ :

$$k^* = \frac{\omega}{V_s^*} = \frac{\omega}{V_s(1 + \xi i)} \cong \frac{\omega}{V_s} (1 - \xi i) = k(1 - \xi i) \quad (2.17)$$

Substituindo na equação (2.15), a expressão obtida anteriormente, a Função Transferência fica:

$$F(w) = \frac{1}{\cos(k(1 - \xi i)h)} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega}{V_s} (1 - \xi i)h\right)} \quad (2.18)$$

(Kramer, 1996)

### 2.3.2.3 Camada uniforme amortecida, sobre substrato elástico

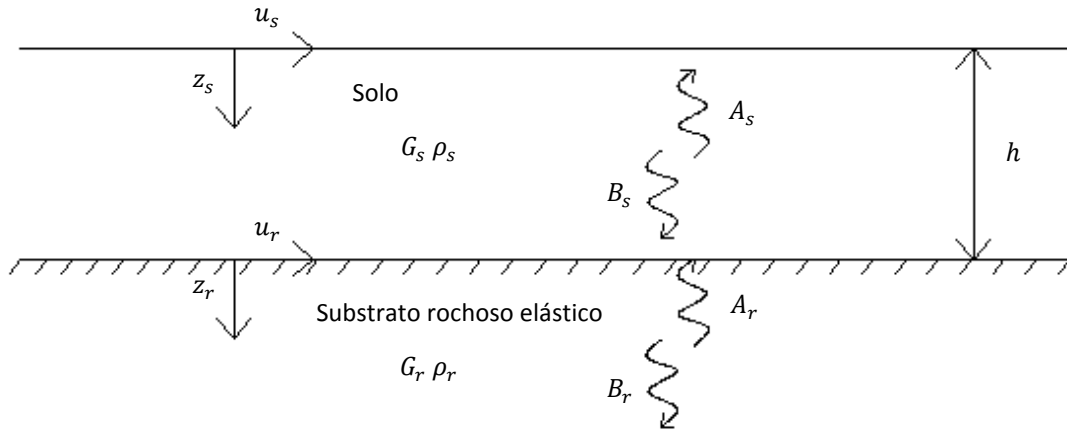


Figura 11 - Esquema de camada uniforme amortecida, sobre substrato elástico (adaptado de Kramer, 1996)

Equações do deslocamento devido à propagação das ondas verticais nas camadas:

- Solo:

$$u_s(z_s, t) = A_s e^{i(\omega t + k_s^* z_s)} + B_s e^{i(\omega t - k_s^* z_s)} \quad (2.19)$$

- Rocha:

$$u_r(z_r, t) = A_r e^{i(\omega t + k_r^* z_r)} + B_r e^{i(\omega t - k_r^* z_r)} \quad (2.20)$$

Condições de fronteira:

- Superfície livre:

$$\tau(z_s = 0, t) = 0 \rightarrow A_s = B_s \quad (2.21)$$

- Continuidade no campo deslocamentos:

$$u_s(z_s = h, t) = u_r(z_r = 0, t) \quad (2.22)$$

- Continuidade no campo de tensões:

$$\tau_s(z_s = h, t) = \tau_r(z_r = 0, t) \quad (2.23)$$

Tendo em conta a equação (2.22), é possível estabelecer a seguinte relação:

$$A_s e^{i(\omega t + k_s^* h)} + B_s e^{i(\omega t - k_s^* h)} = A_r e^{i(\omega t)} + B_r e^{i(\omega t)} \quad (2.24)$$

Desenvolvendo a equação anterior, obtém-se:

$$e^{i(\omega t)} (A_s e^{i(k_s^* h)} + B_s e^{-i(k_s^* h)}) = e^{i(\omega t)} (A_r + B_r) \quad (2.25)$$

$$A_s e^{i(k_s^* h)} + B_s e^{-i(k_s^* h)} = A_r + B_r \quad (2.26)$$

Fazendo a mesma analogia para a equação (2.23), e considerando

$\tau = G \frac{\partial u}{\partial z}$ , tem-se:

$$G_s[A_s i k_s^* e^{i(\omega t + k_s^* h)} - B_s i k_s^* e^{i(\omega t - k_s^* h)}] = G_r[A_r i k_r^* e^{i(\omega t)} - B_r i k_r^* e^{i(\omega t)}] \quad (2.27)$$

Desenvolvendo e considerando a relação obtida na equação (2.21), tem-se:

$$G_s i k_s^* [A_s e^{i(k_s^* h)} - B_s e^{i(-k_s^* h)}] = G_r i k_r^* [A_r - B_r] \quad (2.28)$$

$$G_s i k_s^* A_s (e^{i(k_s^* h)} - e^{i(-k_s^* h)}) = G_r i k_r^* (A_r - B_r) \quad (2.29)$$

$$\frac{G_s i k_s^* A_s}{G_r i k_r^*} (e^{i(k_s^* h)} - e^{i(-k_s^* h)}) = A_r - B_r \quad (2.30)$$

A primeira parcela da equação anterior, consiste no rácio de impedância complexo:

$$\alpha_z^* = \frac{G_s i k_s^*}{G_r i k_r^*} \quad (2.31)$$

Assim, a equação (2.30) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\alpha_z^* A_s (e^{i(k_s^* h)} - e^{i(-k_s^* h)}) = A_r - B_r \quad (2.32)$$

Resolvendo as equações (2.26) e (2.32) simultaneamente, obtém-se:

$$A_s e^{i(k_s^* h)} + B_s e^{-i(k_s^* h)} = A_r + B_r \quad (2.33)$$

$$\alpha_z^* A_s (e^{i(k_s^* h)} - e^{i(-k_s^* h)}) = A_r - B_r \quad (2.34)$$

$$A_r = \frac{1}{2} A_s [(1 + \alpha_z^*) e^{i(k_s^* h)} + (1 - \alpha_z^*) e^{-i(k_s^* h)}] \quad (2.35)$$

$$B_r = \frac{1}{2} A_s [(1 - \alpha_z^*) e^{i(k_s^* h)} + (1 + \alpha_z^*) e^{-i(k_s^* h)}] \quad (2.36)$$

Para superfície livre:  $A_r = B_r \rightarrow$  Amplitude do movimento à superfície do afloramento rochoso 2

Com uma camada de solo acima do afloramento rochoso:

$$2A_s = 2 \left[ \frac{2A_r}{(1 + \alpha_z^*) e^{i(k_s^* h)} + (1 - \alpha_z^*) e^{-i(k_s^* h)}} \right] \rightarrow A_s = \left[ \frac{2A_r}{(1 + \alpha_z^*) e^{i(k_s^* h)} + (1 - \alpha_z^*) e^{-i(k_s^* h)}} \right] \quad (2.37)$$

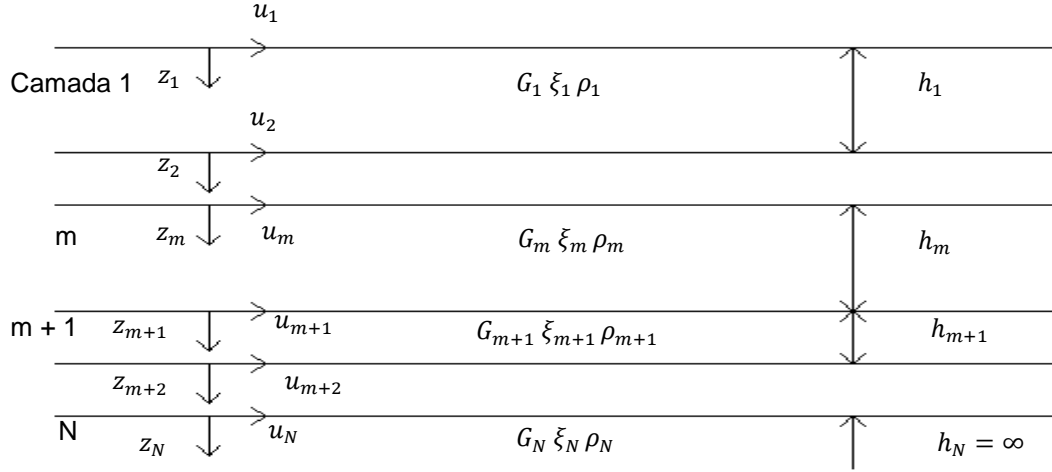
Função de transferência:

$$\begin{aligned} F(w) &= \frac{u^{max}(z_s = 0, t)}{u^{max}(z_r = 0, t)} = \frac{2A_s}{2A_r} = \frac{2A_r}{A_r [(1 + \alpha_z^*) e^{i(k_s^* h)} + (1 - \alpha_z^*) e^{-i(k_s^* h)}]} = \\ &= \frac{2}{(1 + \alpha_z^*) e^{i(k_s^* h)} + (1 - \alpha_z^*) e^{-i(k_s^* h)}} = \frac{1}{\cos(k_s^* h) + i \alpha_z^* \text{sen}(k_s^* h)} = \\ &= \frac{1}{\cos(\omega h / v_s^* s) + i \alpha_z^* \text{sen}(\omega h / v_s^* s)} \end{aligned} \quad (2.38)$$

### 2.3.2.4 Camada estratificada, com amortecimento, sobre meio elástico

Os modelos atrás referidos podem ser generalizados para a situação de depósito de solo com estratificação horizontal sobre um meio elástico.

Considerando assim, um depósito de solo com N camadas horizontais (Figura 12), onde a camada N é o meio elástico, obtém-se as expressões seguintes.



**Figura 12 - Esquema de camada de solo estratificada, com amortecimento, sobre substrato elástico (adaptado de Kramer, 1996)**

Condições de fronteira para a camada m:

- Topo da camada:

$$u_m(Z_m = 0, t) = (A_m + B_m)e^{i\omega t} \quad (2.39)$$

$$\tau_m(Z_m = 0, t) = ik_m^* G_m^* (A_m + B_m)e^{i\omega t} \quad (2.40)$$

- Fundo da camada:

$$u_m(Z_m = h_m, t) = (A_m e^{ik_m^* h_m} + B_m e^{-ik_m^* h_m})e^{i\omega t} \quad (2.41)$$

$$\tau_m(Z_m = h_m, t) = ik_m^* G_m^* (A_m e^{ik_m^* h_m} + B_m e^{-ik_m^* h_m})e^{i\omega t} \quad (2.42)$$

- Continuidade no campo deslocamentos:

$$u_m(Z_m = h_m, t) = u_{m+1}(Z_{m+1} = 0, t) \quad (2.43)$$

- Continuidade no campo de tensões:

$$\tau_m(Z_m = h_m, t) = \tau_{m+1}(Z_{m+1} = 0, t) \quad (2.44)$$

Aplicando o requerimento de compatibilidade do campo de deslocamentos e tensões, equações (2.43) e (2.44), respectivamente, entre a fronteira da camada m e m+1, tem-se:

$$A_{m+1} + B_{m+1} = A_m e^{ik_m^* h_m} + B_m e^{-ik_m^* h_m} \quad (2.45)$$

$$A_{m+1} - B_{m+1} = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} (A_m e^{ik_m^* h_m} - B_m e^{-ik_m^* h_m}) \quad (2.46)$$

Desenvolvendo as equações (2.45) e (2.46) em simultâneo, obtém-se as seguintes:

$$A_{m+1} = \frac{1}{2} A_m (1 + \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 - \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \quad (2.47)$$

$$B_{m+1} = \frac{1}{2} A_m (1 - \alpha_m^*) e^{ik_m^* h_m} + \frac{1}{2} B_m (1 + \alpha_m^*) e^{-ik_m^* h_m} \quad (2.48)$$

Onde,

$$\alpha_m^* = \frac{k_m^* G_m^*}{k_{m+1}^* G_{m+1}^*} = \frac{\rho_m (v_s^*)_m}{\rho_{m+1} (v_s^*)_{m+1}} \quad (2.49)$$

consiste no rácio de impedância complexo na fronteira entre a camada m e m+1.

À superfície, a tensão de corte tem de ser igual a zero, logo  $A_1 = B_1$ . Assim, para a camada  $m$  tem-se:

$$A_m = a_m(\omega)A_1 \quad (2.50)$$

$$B_m = b_m(\omega)B_1 \quad (2.51)$$

A função de transferência que relaciona o deslocamento da camada  $i$  para a camada  $j$ , é dado por:

$$F_{ij}(\omega) = \frac{|u_i|}{|u_j|} = \frac{a_i(\omega) + b_i(\omega)}{a_j(\omega) + b_j(\omega)} \quad (2.52)$$

### 2.3.2.5 Método da resposta complexa

Como já foi referenciado na secção 1.1, o efeito sentido à superfície dos terrenos pela acção sísmica depende de diversos factores, tais como o mecanismo da fonte sísmica, a distância a que esta se encontra e as características geológicas do solo desde a fonte até ao local e ainda as condições locais do terreno.

As análises no domínio da frequência são lineares pelo que é válida a sobreposição de efeitos. Deste modo, o movimento de entrada, representado na Figura 13 por (a) é constituído por uma série de ondas, representado na mesma figura por (b) pela soma de harmónicas. A função de transferência (c) é multiplicada por cada harmónica do movimento de entrada para calcular a harmónica de resposta (d). Por fim estas são somadas e é obtida a resposta sísmica (e).

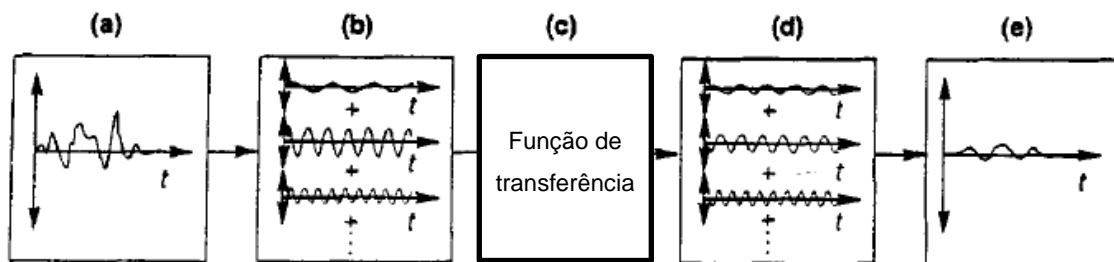


Figura 13 – Síntese do método da resposta complexa (adaptado Kramer, 1996)

## 2.4 Método linear equivalente

O método linear equivalente visa ter em conta o comportamento não linear do solo recorrendo a um processo iterativo. A análise linear é repetida até o módulo de distorção,  $G$  e o coeficiente de amortecimento,  $\xi$  utilizados ser compatível com o nível de deformação. Este método apresenta diversas vantagens uma vez que se trata de um processo simples e eficiente, que as propriedades dos solos vêm directamente de ensaios e o nível máximo de distorção é 1%. No entanto, também apresenta algumas desvantagens pois não permite a modelação da geração de pressão intersticial e é uma análise elástica linear.

Como a análise é linear, os parâmetros do módulo de distorção,  $G$ , e o amortecimento,  $\xi$ , são constantes ao longo do cálculo para cada camada de solo. Assim, para se ter em conta um comportamento não linear do solo, estes parâmetros vão ser compatibilizados através de um

processo iterativo, recorrendo às curvas  $G/G_0 - \gamma$  e  $\xi - \gamma$ , obtidas em ensaios laboratoriais de carregamento sinusoidal e tendo como referência a distorção máxima em cada ciclo de histerese.

Para a utilização deste método, primeiramente é necessário a obtenção de  $u(z, t)$  e  $\gamma(z, t)$  pelo método da resposta complexa, referenciado na secção anterior. Em seguida, para completar o processo, seguem-se os seguintes passos:

1. Estimam-se os valores de  $G$  e  $\xi$  para cada camada.
2. Os valores estimados são utilizados para calcular a resposta do solo incluindo valores de distorção de corte ao longo do tempo para cada camada pelo método da resposta complexa
3. A distorção efectiva de corte para cada camada é determinada a partir do valor máximo de distorção de corte.

Assim, para uma camada  $j$

$$\gamma_{ef j}^{(i)} = R_\gamma \gamma_{max j}^{(i)} \quad (2.53)$$

Onde, o índice subscripto representa o número da iteração e  $R_\gamma$  consiste no rácio entre o valor de distorção efectiva e de distorção máxima adoptando-se, geralmente, o valor 0,65.

4. Do valor da distorção efectiva de corte, são escolhidos novos valores de  $G$  e  $\xi$  para começar uma nova iteração, a partir das curvas de rigidez e amortecimento dependentes da distorção.
5. Os passos 2 a 4 são repetidos para os novos valores até que a diferença entre os rácios dos valores computacionais do módulo de distorção e amortecimento em duas iterações consecutivas seja abaixo de um determinado valor previamente estipulado. A convergência do processo iterativo é normalmente rápida, admite-se que esta é alcançada quando o erro é inferior a 1%, entre as duas iterações consecutivas, nos valores de  $G$  e  $\xi$  em todas as camadas.

Este método pode ser implementado pela via determinística, no domínio do tempo, através de séries temporais de modo a representar a acção sísmica, ou pela via probabilística, no domínio da frequência, através da aplicação da teoria dos processos estocásticos em que a acção sísmica é representada por funções de densidade espectral de potência.

#### 2.4.1 Via determinística

Nesta abordagem determinística, a acção sísmica é representada no domínio do tempo, sendo posteriormente transposta para o domínio da frequência recorrendo à transformada directa de Fourier, beneficiando assim da linearidade do sistema.

O método linear equivalente para a resposta do solo unidimensional para solo estratificado foi codificado para o uso de um programa designado por SHAKE (Schnabel *et al.*, 1972).

#### 2.4.2 Via probabilística

A via probabilística baseia-se na teoria dos processos estocásticos para permitir a representação do movimento sísmico.

Um processo estocástico é um conjunto de “realizações” do processo, cuja descrição é efectuada por uma distribuição estatística.

Segundo Gomes (2009), na análise através de processos estocásticos, admite-se como hipótese que as vibrações sísmicas podem ser representadas por um processo estocástico,

estacionário e gaussiano. Deste modo, a função de densidade espectral de potência da aceleração da resposta,  $S_r(\omega)$ , é determinada a partir da função de densidade espectral de potência da aceleração da acção,  $S_a(\omega)$ , e da função de transferência complexa do sistema entre a variável que define a acção e a variável escolhida para medir a resposta,  $F(\omega)$ :

$$S_r(\omega) = |F(\omega)|^2 S_a(\omega) \quad (2.54)$$

A função de densidade de probabilidade para os valores extremos da resposta é dada pela equação (2.55) e permite calcular o valor médio do valor máximo da grandeza em estudo, admitindo que esta grandeza pertence ao conjunto que integra o processo estocástico associado à função de densidade espectral de potência.

$$E(p) = \sqrt{2\lambda_0 \left[ \ln \left( \frac{T}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \right) - \ln(-\ln p) \right]} \quad (2.55)$$

Onde,

$p$  – ordem do percentil

$T$  – duração da amostra

$m_0$  e  $m_2$  – momentos espectrais de ordem 0 e 2 definidos pela equação (2.56)

$$m_i = \int_0^{+\infty} \omega^i S_r(\omega) d\omega \quad (2.56)$$

### 2.4.3 Cálculo do Espectro de Resposta a partir do Espectro de Potência

Calcular o espectro de potência da resposta de um determinado oscilador de um grau de liberdade a partir do espectro de potência da acção é possível através da equação (2.54), multiplicando a densidade espectral do movimento sísmico pela função de transferência de um oscilador de 1 grau de liberdade. Deste modo, para calcular a resposta máxima basta aplicar directamente a expressão (2.55) que permite obter o valor máximo da grandeza representada através do um espectro de potência.

A sequência de cálculo envolve:

1. Determinação do espectro de potência da resposta através da função de transferência,  $F(\omega)$ , que faz a relação entre as acelerações na base e as acelerações absolutas da resposta.

$$S_{ri}(\omega) = |F(\omega)|^2 S_a(\omega) \quad (2.57)$$

Onde,

$S_{ri}(\omega)$  – espectro de potência da resposta para o oscilador  $i$ , de frequência própria  $\omega_{in}$

$S_a(\omega)$  – espectro de potência da acção

$F(\omega)$  – função de transferência do oscilador de 1 grau de liberdade

$$F(\omega) = \frac{\omega_{in}^2 + i 2 \xi \omega \omega_{in}}{\omega_{in}^2 - \omega^2 + i 2 \xi \omega \omega_{in}} \quad (2.58)$$

$\xi$  – coeficiente de amortecimento

$\omega_{in}$  – frequência própria do oscilador

## 2. Cálculo do espectro de resposta

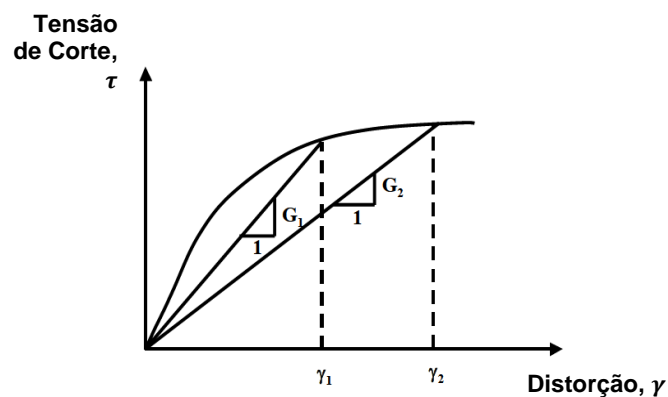
Define-se o conjunto dos valores máximos da resposta de osciladores com amortecimento  $\xi$  e frequência própria  $\omega_n$  quando sujeitos a uma excitação na base por espectro de resposta  $E_R(\omega_n, \xi)$ . Expressa-se este valor como apresentado na equação seguinte:

$$E_R(\omega_n, \xi) = \sqrt{2\lambda_0 \left[ \ln \left( \frac{T}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \right) - \ln(-\ln 2) \right]} \quad (2.59)$$

## 2.5 Curvas de rigidez e de amortecimento dependentes da distorção

O módulo de distorção,  $G$  e o coeficiente de amortecimento  $\xi$ , são conhecidas propriedades dinâmicas.

O módulo de distorção,  $G$ , representa a rigidez do solo e relaciona a tensão de corte,  $\tau$ , e a distorção,  $\gamma$ . Devido ao facto da curva tensão-deformação dos solos ser de natureza não linear, o módulo de distorção varia com a distorção, como se encontra apresentado na Figura 14.



**Figura 14 – Curva tensão-deformação não linear dos solos e variação do módulo de distorção secante com a amplitude da tensão de corte (Darendeli, 2001)**

O módulo de distorção adoptado corresponde à rigidez média durante o ciclo histórico, como mostra a Figura 15. Na mesma figura, é apresentado o coeficiente de amortecimento,  $\xi$ , que consiste na medida da proporção da energia dissipada e da energia de deformação máxima mantida durante cada ciclo.

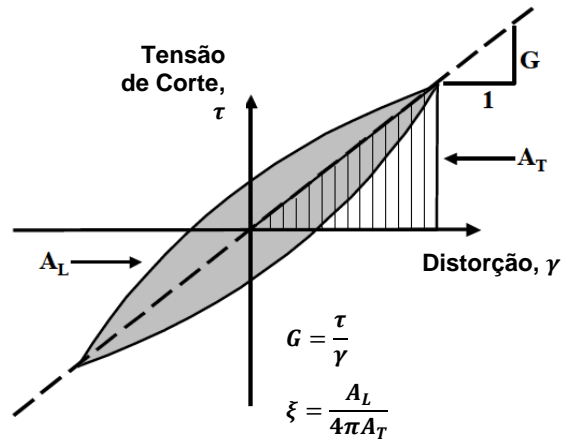


Figura 15 – Módulo de distorção e coeficiente de amortecimento (Darendeli, 2001)

O valor de  $G$  diminuiu com o aumento da distorção, sendo  $G_{max}$  o valor máximo do módulo de distorção, tal como apresentado na Figura 16. No entanto, a relação entre o módulo de distorção e a amplitude de distorção é tipicamente caracterizada pela curva de redução do módulo de distorção normalizado,  $G/G_{max} - \gamma$ , cujo valor diminui com o aumento da distorção (Figura 17).

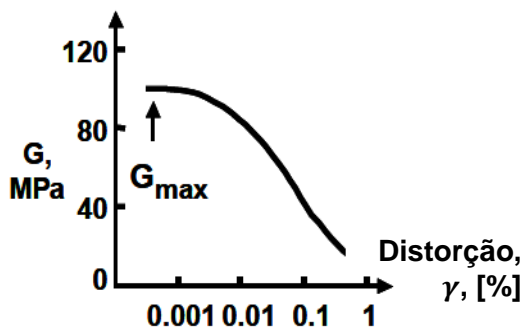


Figura 16 – Curva da relação entre módulo de distorção e a distorção (Darendeli, 2001)

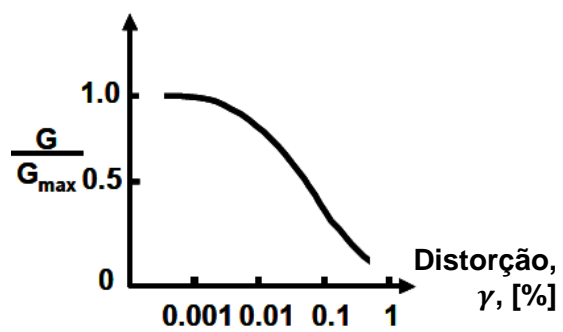


Figura 17 – Curva da relação entre módulo de distorção normalizado e a distorção (Darendeli, 2001)

O coeficiente de amortecimento cresce com o aumento da amplitude de distorção. O coeficiente de amortecimento para pequenas distorções é referido como coeficiente de amortecimento para pequenas distorções,  $\xi_{min}$  e apresentado na Figura 18.

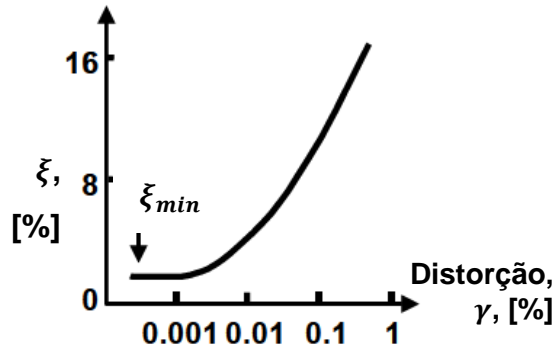


Figura 18 – Curva da relação entre o coeficiente de amortecimento e a distorção (Darendeli, 2001)

### 2.5.1 Equações para obtenção de curvas de rigidez e amortecimento

Para obter as curvas de rigidez e de amortecimento, utilizou-se as equações e os parâmetros propostos por Darendeli (2001). De seguida procede-se à apresentação das equações e à apresentação dos parâmetros para diferentes tipos de solo.

A curva de redução do módulo de distorção normalizado é descrita por:

$$G/G_{max} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a} \quad (2.60)$$

Onde,

$G/G_{max}$  – módulo de distorção normalizado

$\gamma$  – distorção

$\gamma_r$  – distorção de referência

$a$  – coeficiente de curvatura

Os parâmetros  $\gamma_r$  e  $a$  deste modelo podem ser relacionados com o tipo de solo e com as condições de carregamento ( $p'$  e OCR) da seguinte forma:

$$\gamma_r = (\phi_1 + \phi_2 * IP * OCR^{\phi_3}) * p'^{\phi_4} \quad (2.61)$$

$$a = \phi_5 \quad (2.62)$$

Onde,

$p'$  – tensão efectiva média de confinamento [atm]

IP – índice de plasticidade [%]

OCR – grau de sobreconsolidação

$\phi_1$  a  $\phi_5$  – parâmetros que relacionam a curva de redução do módulo de distorção normalizado com o tipo de solo e as condições de carregamento

Estas equações controlam a curva de redução do módulo de distorção normalizado com o aumento da tensão efectiva de confinamento,  $p'$ , plasticidade do solo, e sobreconsolidação.

A equação para a curva do amortecimento do material está relacionada com o formato da curva de redução do módulo de distorção assumindo que a lei de Masing é válida (Masing, 1926)

combinada com dois parâmetros modificados. Deste modo, a equação para o amortecimento fica tal como é apresentada na expressão (2.63).

$$\xi = F \times \xi_{Masing} + \xi_{Min} \quad (2.63)$$

Onde,

$$\xi_{Masing} = c_1 \xi_{Masing,a=1} + c_2 \xi_{Masing,a=1}^2 + c_3 \xi_{Masing,a=1}^3 \quad (2.64)$$

$$\xi_{Masing,a=1} = \frac{1}{\pi} \left[ 4 \frac{\gamma - \gamma_r \ln \left( \frac{\gamma + \gamma_r}{\gamma_r} \right)}{\frac{\gamma^2}{\gamma + \gamma_r}} - 2 \right] \quad (2.65)$$

$$c_1 = -1,143a^2 + 1,8618a + 0,2523 \quad (2.66)$$

$$c_2 = 0,0805a^2 - 0,0710a - 0,0095 \quad (2.67)$$

$$c_3 = -0,0005a^2 + 0,0002a + 0,0003 \quad (2.68)$$

$$F = b \times \left( \frac{G}{G_{max}} \right)^{0,1} \quad (2.69)$$

$b$  – factor de escala

$\xi_{Masing}$  – estimativa do coeficiente de amortecimento com base na lei de Masing

$\xi_{Min}$  – rácio de amortecimento

Os parâmetros  $b$  e  $\xi_{Min}$  podem ser relacionados com o tipo de solo e as condições de carregamento da seguinte forma:

$$\xi_{Min} = (\phi_6 + \phi_7 \times IP \times OCR^{\phi_8}) \times p'^{\phi_9} \times [1 + \phi_{10} \times \ln(frq)] \quad (2.70)$$

$$b = \phi_{11} + \phi_{12} \times \ln(N) \quad (2.71)$$

$frq$  – frequência do carregamento

$N$  – número de ciclos de carregamento

$\phi_6$  a  $\phi_{12}$  – parâmetros que relacionam a curva de redução do módulo de distorção normalizado com o tipo de solo e as condições de carregamento

Como a curva do amortecimento está directamente relacionada com a curva do módulo de distorção normalizado, qualquer mudança na curva do módulo de distorção normalizado devido ao aumento da plasticidade do solo, sobreconsolidação e tensão efectiva de confinamento, é também considerada na curva do amortecimento (Darendeli, 2001).

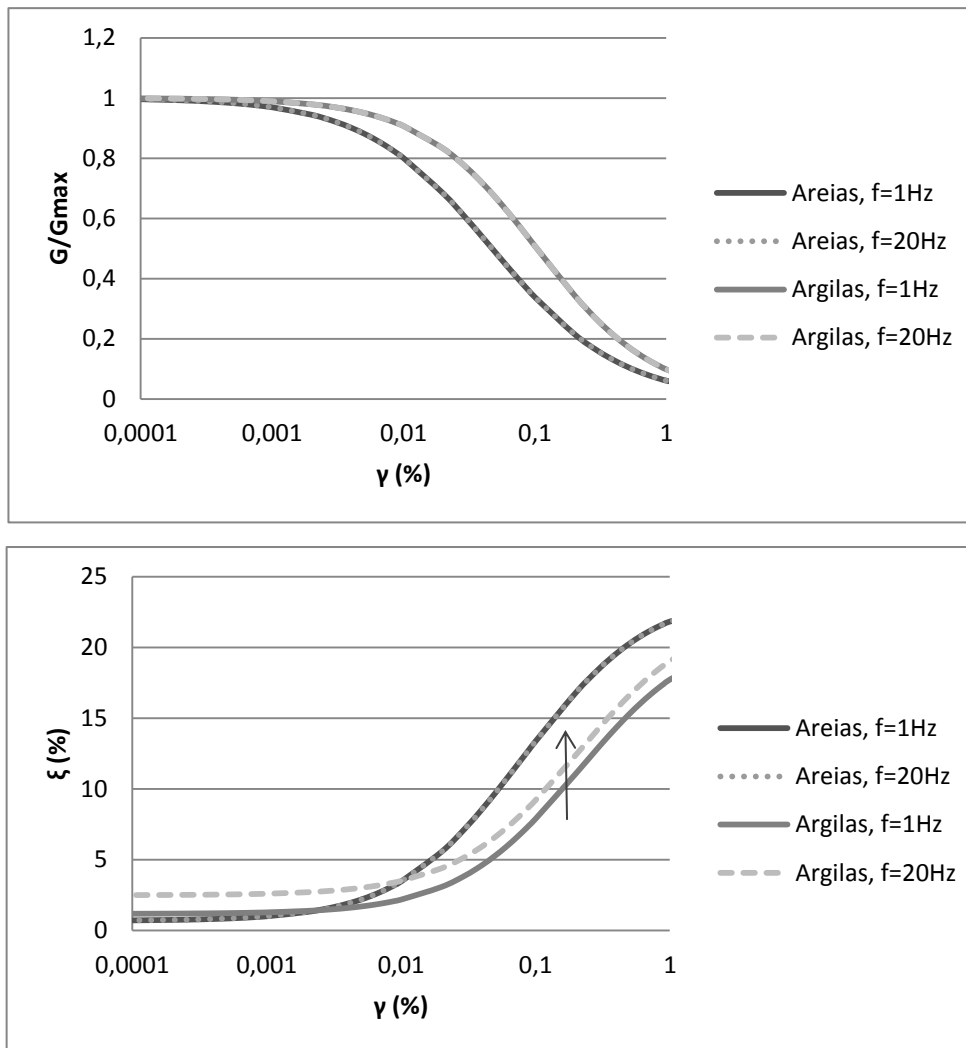
Segundo Darendeli (2001), de modo a observar a influência do tipo de solo no comportamento não linear dos solos, as curvas de redução do módulo de distorção normalizado e de amortecimento para um dado tipo de solo sobre uma determinada condição de carregamento utilizam alguns parâmetros para diferentes tipos de solos, como é apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1 – Parâmetros em função do tipo de solo (Darendeli, 2001)**

Parâmetros	Areias "puras"		Areias com elevado teor de finos		Siltes		Argilas	
	Média	Variância	Média	Variância	Média	Variância	Média	Variância
φ1	4,74E-02	9,62E-06	3,34E-02	2,06E-06	4,16E-02	5,18E-06	2,58E-02	5,68E-06
φ2	-2,34E-03	1,63E-07	-5,79E-05	8,09E-09	6,89E-04	7,74E-09	1,95E-03	1,84E-08
φ3	2,50E-01	1,00E-02	2,49E-01	9,94E-03	3,21E-01	7,56E-03	9,92E-02	1,64E-03
φ4	2,34E-01	1,08E-03	4,82E-01	7,46E-04	2,80E-01	8,63E-04	2,26E-01	3,48E-04
φ5	8,95E-01	4,30E-04	8,45E-01	1,49E-04	1,00E+00	4,10E-04	9,75E-01	1,60E-04
φ6	6,88E-01	7,82E-03	8,89E-01	5,86E-03	7,12E-01	3,55E-03	9,58E-01	2,93E-03
φ7	1,22E-02	2,43E-05	2,02E-02	1,91E-05	3,03E-03	2,65E-06	5,65E-03	2,79E-06
φ8	-1,00E-01	2,50E-03	-1,00E-01	2,50E-03	-1,00E-01	2,50E-03	-1,00E-01	2,50E-03
φ9	-1,27E-01	4,00E-03	-3,72E-01	1,83E-03	-1,89E-01	1,95E-03	-1,96E-01	5,21E-04
φ10	2,88E-01	3,14E-03	2,33E-01	1,35E-03	2,34E-01	2,60E-03	3,68E-01	1,19E-03
φ11	7,67E-01	1,59E-03	7,76E-01	7,71E-04	5,92E-01	8,09E-04	4,66E-01	2,69E-04
φ12	-2,83E-02	2,79E-05	-2,94E-02	1,70E-05	-7,67E-04	1,61E-05	2,23E-02	7,13E-06

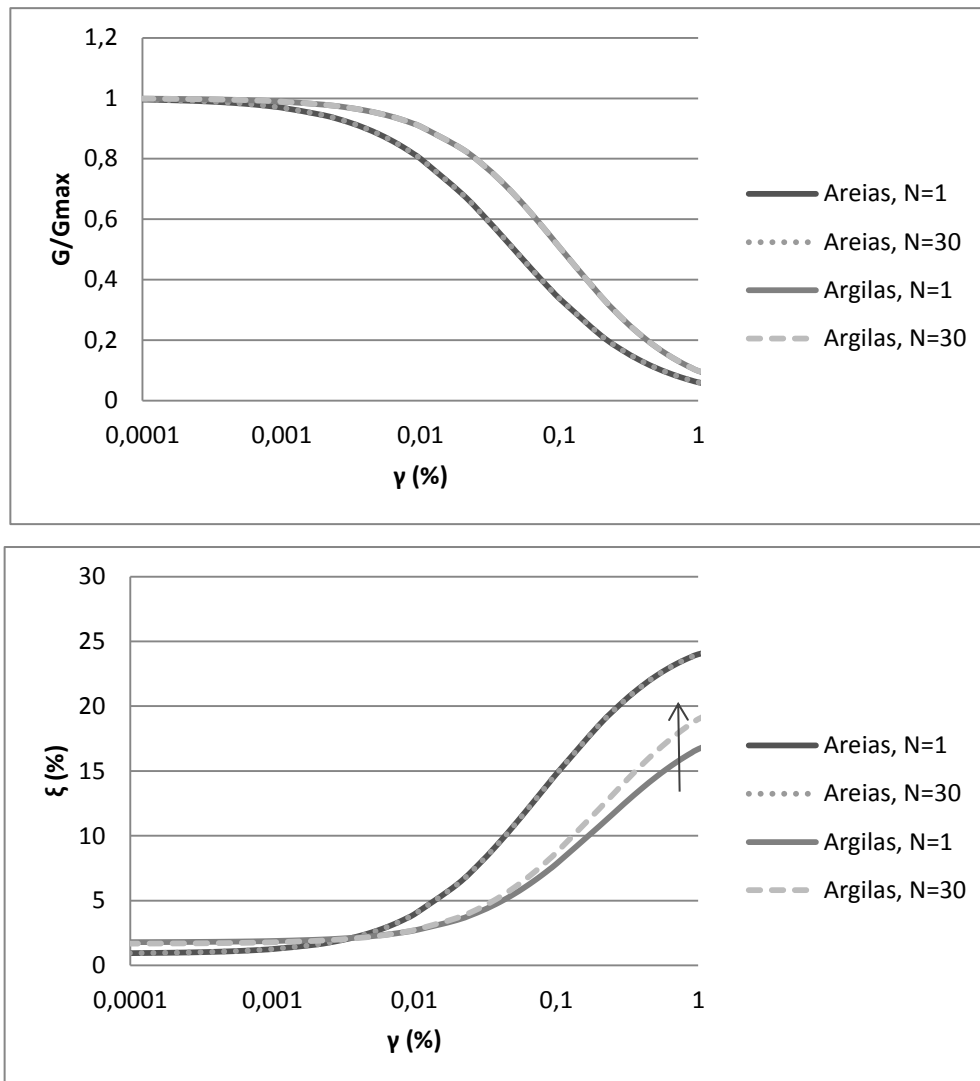
## 2.5.2 Efeito do tipo de solo nas curvas de rigidez e de amortecimento

Nesta secção pretende-se avaliar a influência de alguns parâmetros dos solos, como índice de plasticidade e tensão efectiva média de confinamento, nas curvas de redução do módulo de distorção normalizado de amortecimento. Para tal, procedeu-se a uma análise de sensibilidade. Primeiramente fez-se a análise da influência da frequência, Figura 19, e conclui-se que a variação da frequência não influencia os valores de rigidez, variando apenas de tipo de solo para tipo de solo, apresentando as argilas os valores mais elevados. Relativamente ao amortecimento, a frequência imposta influencia os valores obtidos, fazendo o aumento desta aumentar o amortecimento. No entanto, tal só acontece para o caso das argilas.



**Figura 19 – Curvas de rigidez e amortecimento para diferentes valores de frequência para as areias e as argilas**

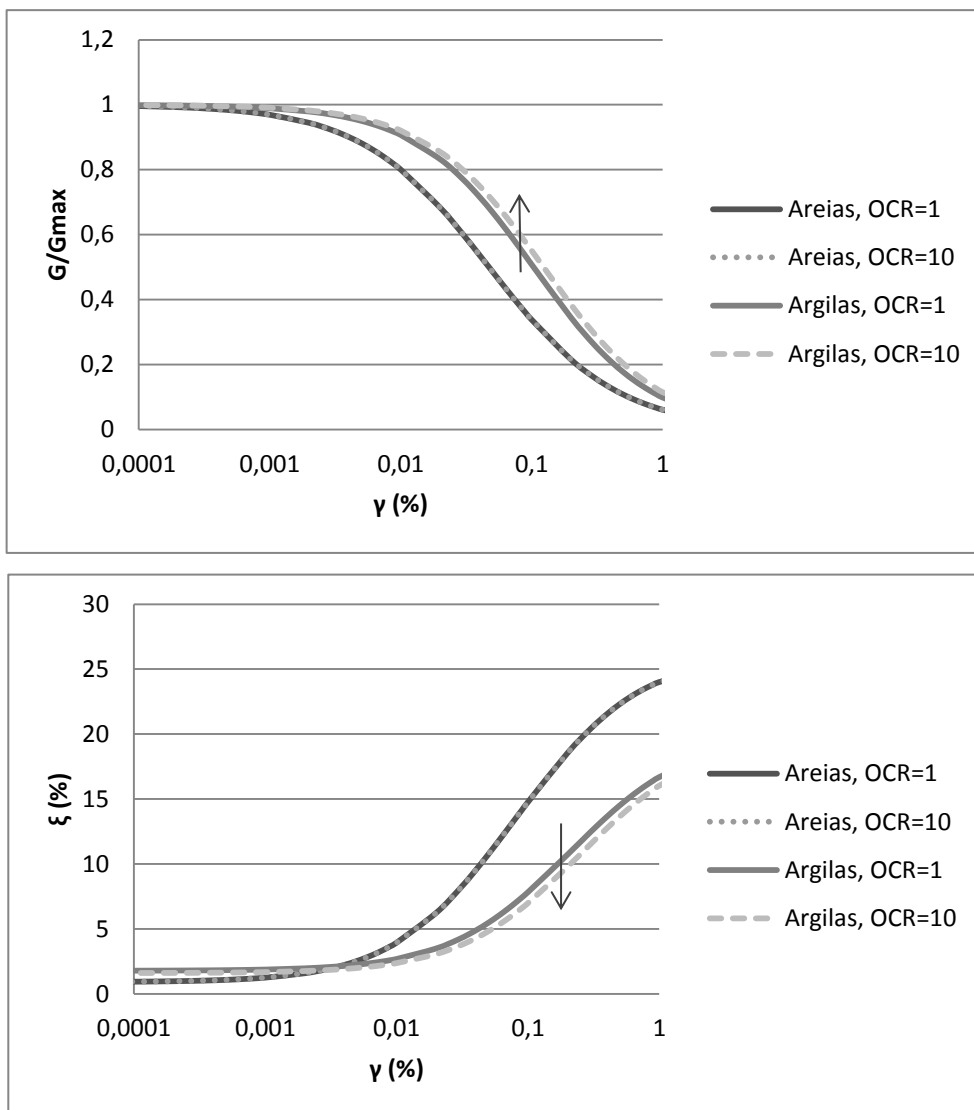
Seguidamente fez-se a variação do número de ciclos e verificou-se, com base na Figura 20, que não influencia as curvas de rigidez e apenas influencia os valores de amortecimento para as argilas. Neste caso, para valores de distorção superiores a 0,01%, observa-se um aumento de amortecimento com o aumento do número de ciclos.



**Figura 20 – Curvas de rigidez e amortecimento para diferentes valores do número de ciclos para as areias e as argilas**

Por último, analisou-se a influência da variação do valor de OCR, Figura 21, e conclui-se que a alteração deste valor apenas influencia as argilas. Deste modo, as curvas, quer de rigidez quer de amortecimento, são inalteráveis para as areias.

Em relação à rigidez, verifica-se que quanto maior for o valor de OCR, para o mesmo valor de distorção, maior é a rigidez das argilas. Em termos de amortecimento, verifica-se que quanto maior for o valor de OCR, menor é o amortecimento das argilas, para o mesmo valor de distorção.



**Figura 21 – Curvas de rigidez e amortecimento para diferentes valores de OCR para as areias e as argilas**

Após a análise da influência dos parâmetros de frequência, número de ciclos e grau de sobreconsolidação nas curvas de degradação de rigidez e amortecimento, procedeu-se à análise da influência do valor da tensão média de confinamento e do índice de plasticidade. Deste modo, adoptaram-se valores fixos para os outros parâmetros, tal como mostra a tabela Tabela 2.

**Tabela 2 – Parâmetros fixos adoptados**

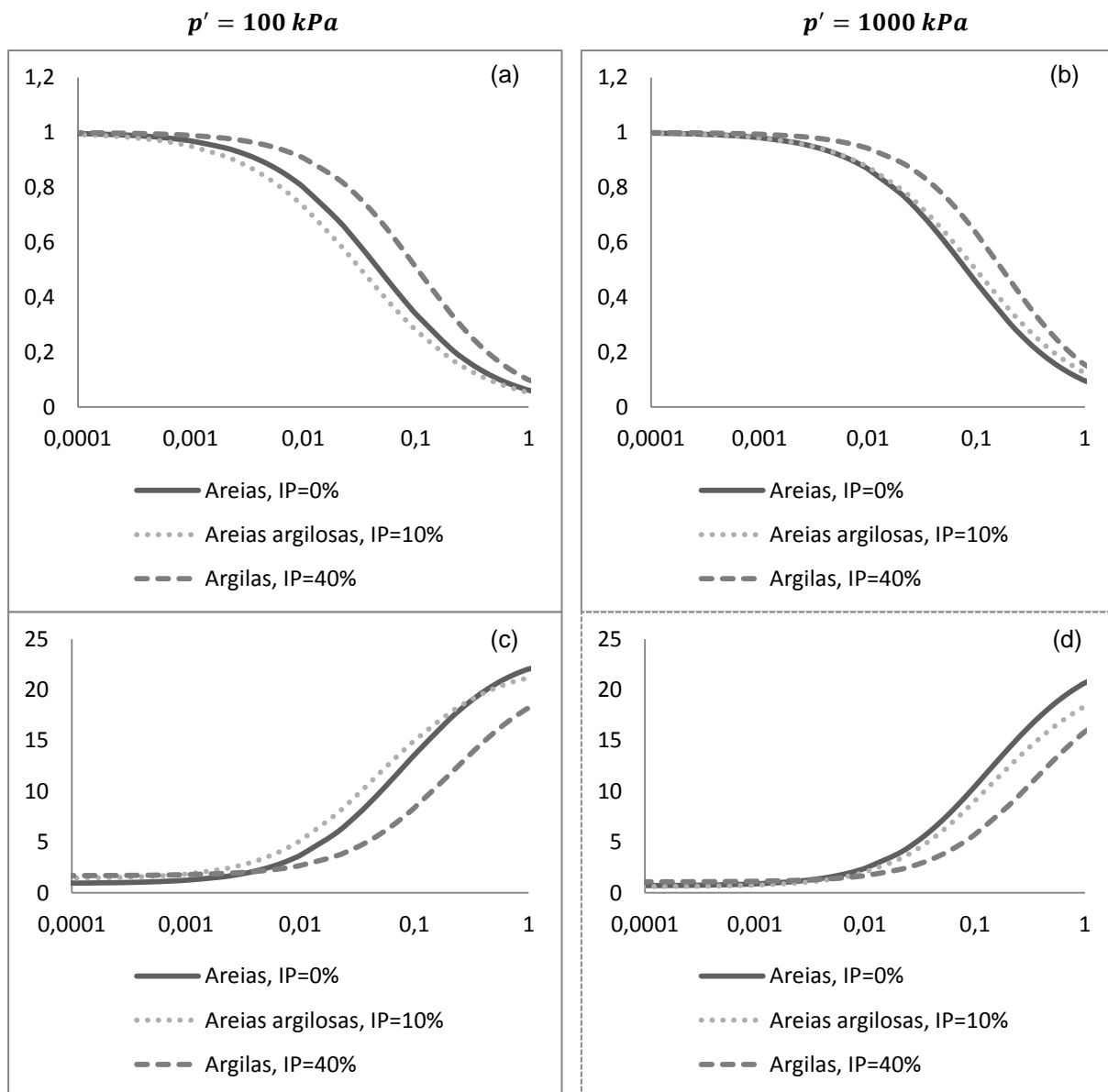
Frequência ( <i>frq</i> [Hz])	3
Número de ciclos ( <i>N</i> )	10
Grau de sobreconsolidação ( <i>OCR</i> )	1

Foram adoptados estes valores tendo em consideração que os sismos têm energia nesta gama de frequências, que o número corrente de ciclos para obter as curvas de degradação de rigidez é normalmente igual a 10 e para o grau de sobreconsolidação considerou-se a unidade como referência. Os parâmetros utilizados apresentam-se na Tabela 3.

**Tabela 3 – Parâmetros utilizados para o caso em estudo**

Parâmetros	Areias	Areias argilosas	Argilas
φ1	4,74E-02	3,34E-02	2,58E-02
φ2	-2,34E-03	-5,79E-05	1,95E-03
φ3	2,50E-01	2,49E-01	9,92E-02
φ4	2,34E-01	4,82E-01	2,26E-01
φ5	8,95E-01	8,45E-01	9,75E-01
φ6	6,88E-01	8,89E-01	9,58E-01
φ7	1,22E-02	2,02E-02	5,65E-03
φ8	-1,00E-01	-1,00E-01	-1,00E-01
φ9	-1,27E-01	-3,72E-01	-1,96E-01
φ10	2,88E-01	2,33E-01	3,68E-01
φ11	7,67E-01	7,76E-01	4,66E-01
φ12	-2,83E-02	-2,94E-02	2,23E-02

Considerou-se em primeira instância um valor de  $p' = 100kPa$  para os três tipos de solo. Cada tipo de solo apresenta o seu valor de IP correspondente, ou seja, para as areias limpas IP=0%, para areias argilosas IP=10% e argilas IP=40 %, tal como foi considerando anteriormente na secção 0 para obter as classificações dos perfis.



**Figura 22 – Curvas de rigidez e de amortecimento para  $p' = 100kPa$  (a) e (c) e  $p' = 1000kPa$  (b) e (d)**

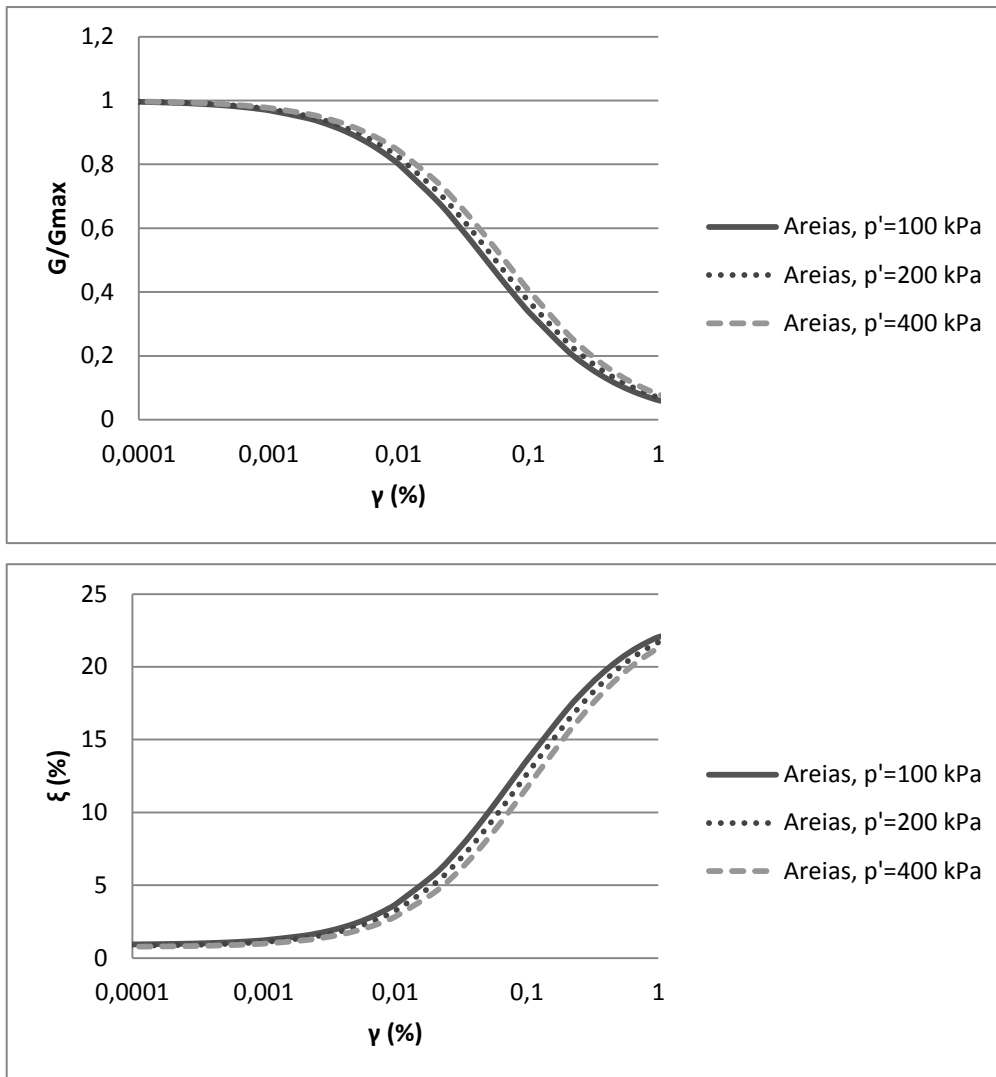
Analisando a Figura 22, conclui-se que para o mesmo valor de distorção, as argilas são o tipo de solo que apresenta maior valor do módulo de distorção normalizado. Pela curva de rigidez é ainda possível observar que as argilas têm um comportamento linear para valores mais elevados de distorção, uma vez que na curva de rigidez apresentam maior patamar inicial.

Relativamente ao amortecimento, denota-se que as argilas apresentam os menores valores de amortecimento.

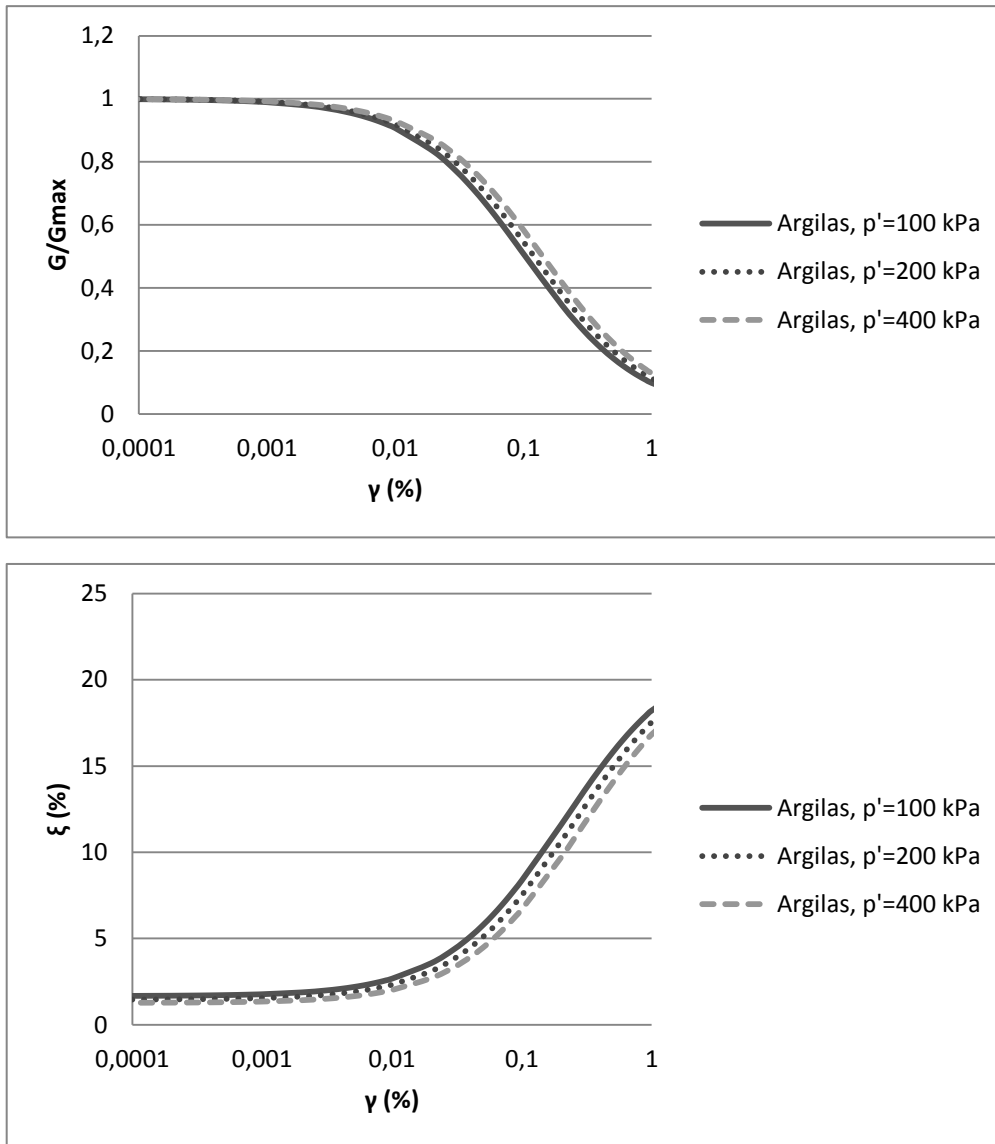
Destes três casos apresentados anteriormente, é possível concluir que o valor de IP dos solos influencia a evolução das curvas de rigidez e amortecimento. No entanto, a distribuição pelos solos não coincide ao que teoricamente se previa, uma vez que quanto maior a plasticidade dos mesmos, maior seria a sua curva de rigidez. Deste modo, a curva das areias argilosas deveria encontrar-se entre as curvas das areias e das argilas, uma vez que tem maior valor de IP que as areias e menor que as argilas, o que não acontece na Figura 22 (a) e (c). A correspondência dos

parâmetros da Tabela 3 ao solo em estudo pode estar na origem de tal acontecimento. Por conseguinte, na análise dos outros parâmetros apenas se teve em consideração as areias e as argilas. No entanto, constatou-se que, para  $p' = 1000\text{kPa}$ , Figura 22 (b) e (d), as curvas já se encontram conforme o que teoricamente foi estabelecido.

De seguida, estuda-se a influência de  $p'$  para o mesmo tipo de solo.



**Figura 23 – Curvas de rigidez e amortecimento para diferentes valores de  $p'$  e  $IP=0\%$  para as areias**



**Figura 24 – Curvas de rigidez e amortecimento para diferentes valores de  $p'$  e  $IP=40\%$  para as argilas**

Pela Figura 23 e pela Figura 24 verifica-se, para o mesmo valor de distorção, o aumento da rigidez e o decréscimo de amortecimento com o aumento da tensão de confinamento.

### 3 Perfis do terreno

#### 3.1 Zonamento sísmico do Anexo Nacional ao Eurocódigo 8 (EC8-A.N)

Para Portugal Continental, estão definidos dois tipos de ação sísmica segundo o Anexo Nacional do Eurocódigo 8: Tipo 1, que corresponde a sismo afastado, e Tipo 2, que corresponde a um sismo próximo. Na Figura 25, apresenta-se o zonamento sísmico de Portugal Continental. Constata-se que as zonas de Lisboa e do Algarve são as que têm maiores valores de aceleração de referência, sendo por esta razão as zonas de interesse deste trabalho.

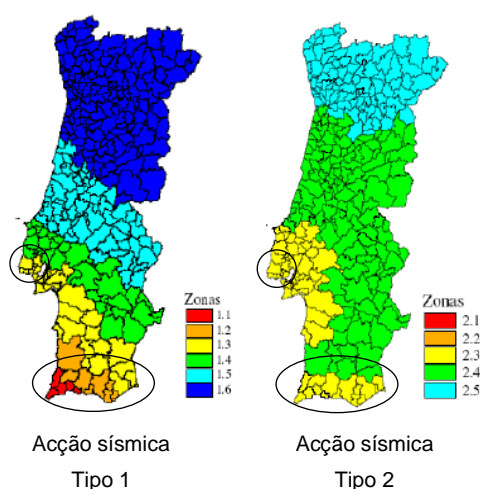


Figura 25 – Zonamento sísmico para as acções do tipo 1 e 2

A acção sísmica do tipo 1 representa um sismo de magnitude elevada com epicentro no oceano Atlântico. A acção sísmica do tipo 2, ou sismo próximo, corresponde a um sismo de magnitude moderada cujo epicentro se encontra no território Continental (ou no Arquipélago dos Açores).

#### 3.2 Esquemas de classificação do terreno

Como já foi anteriormente referido na secção 1.3, este trabalho visa analisar perfis de terreno da região do Algarve e da área metropolitana de Lisboa. Esta análise pretende obter uma classificação para os tipos de solo não só de acordo com o estipulado no Eurocódigo 8 como também segundo a classificação mais recente apresentada por Pitilakis *et al.* (2013).

Em seguida, serão apresentadas de forma sucinta as duas classificações utilizadas e a forma como os parâmetros foram fornecidos para cada zona analisada.

##### 3.2.1 Classificação do terreno de acordo com o Eurocódigo 8

Para a classificação dos terrenos, o Eurocódigo 8 apresenta as seguintes classes na Tabela 4.

**Tabela 4 – Classificação do terreno, EC8**

Tipo de terreno	Descrição do perfil estratigráfico	Parâmetros		
		$V_{s,30}$ (m/s)	$N_{SPT}$ (palcadas/30cm)	$c_u$ (kPa)
A	Rocha ou outra formação geológica de tipo rochoso, que inclua, no máximo, 5 m de material mais fraco à superfície	> 800	-	-
B	Depósitos de areia muito compacta, de seixo (cascalho) ou de argila muito rija, com uma espessura de, pelo menos, várias dezenas de metros, caracterizadas por um aumento gradual das propriedades mecânicas com a profundidade	360 – 800	> 50	> 250
C	Depósitos profundos de areia compacta ou medianamente compacta, de seixo (cascalho) ou de argila rija com uma espessura entre várias dezenas e muitas centenas de metros	180 – 360	15 – 50	70 - 250
D	Depósitos de solos não coesivos de compactidade baixa a média (com ou sem alguns estratos de solos coesivos moles), ou de solos predominantemente coesivos de consistência mole a dura	< 180	< 15	< 70
E	Perfil de solo com um estrato aluvionar superficial com valores de $V_s$ do tipo C ou D e uma espessura entre cerca de 5 m e 20 m, situado sobre um estrato mais rígido com $V_s > 800$ m/s			
S1	Depósitos constituídos ou contendo um estrato com pelo menos 10 m de espessura de argilas ou siltes moles com um elevado índice de plasticidade (IP>40) e um elevado teor de água	< 100 (indicativo)	-	10 - 20
S2	Depósitos de solos com potencial de liquefacção, de argilas sensíveis ou qualquer outro perfil de terreno não incluído nos tipos A-E ou S1			

Onde o valor da velocidade média das ondas de corte é obtido pela equação (3.1) e é considerado como parâmetro primário, sendo o terreno classificado de acordo com este valor se disponível. Caso contrário, utilizar-se-á o valor de  $N_{SPT}$  ou  $c_u$  (resistência não drenada).

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}} \quad (3.1)$$

em que  $h_i$  e  $V_i$  representam a espessura (em metros) e a velocidade das ondas de corte de cada camada (em metros/segundo), num total de  $N$  camadas existentes nos 30 m superiores.

A tabela seguinte (Tabela 5) apresenta de forma sucinta as condições que deverão ser respeitadas para a possível classificação do terreno.

**Tabela 5 – Resumo das condições exigidas de acordo com o EC8 para cada classificação do terreno**

Classificação	A	B	C	D	E	S1
$V_{s,30}$ [m/s]	≥ 800	360 - 800	180 - 360	< 180	-	< 100
IP [%]	-	-	-	-	-	≥ 40
Espessura camada aluvionar superficial [m]	-	-	-	-	5 - 20	≥ 10

Não foi incluída a classe S2 nesta tabela uma vez que esta é utilizada para solos que não correspondem a nenhum dos outros tipos, não tendo por si só condições restritivas. Tendo em conta

todas estas condições, realizou-se a classificação para os perfis de terreno de cada zona apresentada nas secções 3.3 e 3.4.

### 3.2.2 Classificação Ptilakis *et al.*, (2013)

Ptilakis *et al.*, (2013) apresenta um sistema de classificação que introduz como parâmetros primários: o período fundamental local (factor fundamental para a amplificação local) e a profundidade do substrato ou da camada com contraste de impedância significativo. Como parâmetros secundários tem-se não só os parâmetros geotécnicos clássicos:  $N_{spt}$ ,  $c_u$  e IP (índice de plasticidade), como também o tipo de solo e sua estratigrafia.

A classificação de Ptilakis *et al.*, (2013) é assim mais complexa e detalhada que a classificação do EC8.

Nesta classificação, os factores que afectam o movimento do solo devido à acção sísmica e a resposta sísmica local:

- Contraste de impedância entre a superfície e os depósitos rígidos de solo subjacentes ou substrato rochoso
- Tipo de solo
- Estratigrafia e espessura das camadas
- Material não linear e amortecido e a sua variação de potencial com a intensidade do movimento do terreno

Como foi anteriormente referido, um dos parâmetros primários é o período fundamental local do depósito de solo. Este parâmetro pode ser medido directamente ou estimado pela equação seguinte, admitindo que se trata de um meio elástico limitado inferiormente por substrato rígido.

$$T_0 = \frac{4H}{V_{s,av}} \quad (3.2)$$

Onde  $V_{s,av}$  é o valor da velocidade das ondas de corte média no depósito de solo. Este valor é obtido através da equação (2.75).

$$V_{s,av} = \frac{H}{\sum_{i=1, N_b} \frac{h_i}{V_i}} \quad (3.3)$$

O valor de  $H$  corresponde à espessura do depósito de solo, isto é, a profundidade até ao substrato rochoso, e  $h_i$  e  $V_i$  correspondem à espessura e valor da velocidade das ondas de corte de cada camada, num total de  $N_b$  camadas desde a superfície até ao estrato rochoso, respectivamente (Ptilakis, 2013).

A classificação de Ptilakis *et al.*, (2013) está apresentada na Tabela 6.

**Tabela 6 – Classificação do terreno, Pitilakis et al., (2013)**

Tipo de terreno	Descrição do perfil estratigráfico	Parâmetros					
		$T_0$ [s]	$V_{s,av}$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$N_{SPT}$ (pancadas /30cm)	$c_u$ [kPa]	$H$ [m]
A1	Rocha ou outra formação geológica de tipo rochoso	≤ 0.2	-	≥ 1500	-	-	0
A2	Formações rochosas ligeiramente alteradas/segmentadas (espessura da camada alterada < 5m) Formações geológicas semelhantes a formações rochosas pelas suas propriedades mecânicas e a sua composição		Camada superficial alterada ≥ 200	Formação rochosa ≥ 800	-	-	0 - 5
B1	Formações rochosas muito alteradas, cuja camada tem uma espessura considerável entre 5 e 30 m Formações de rocha branda de grande espessura ou formações que se assemelham a estas pelas suas propriedades mecânicas Formações de solo de areia/areia-cascalho denso e/ou argila rija a muito rija de natureza homogênea e pequena espessura (até 30 m)	≤ 0.5	400 - 800	-	> 50	> 200	0 – 30
B2	Formações de solo de areia/areia-cascalho muito denso e/ou argila rija a muito rija de natureza homogênea e média espessura (30 a 60 m) cujas propriedades mecânicas aumentam com a profundidade	≤ 0.8	400 - 800	-	> 50	> 200	30 - 60
C1	Formações de solo de areia/areia-cascalho denso a muito denso e/ou argila rija a muito rija de grande espessura (> 60 m) cujas propriedades mecânicas e resistência são constantes e/ou aumentam com a profundidade	≤ 1.5	400 - 800	-	> 50	> 200	> 60
C2	Formações de solo de areia/areia-cascalho de média compactidade e/ou argila de média rigidez (IP> 15, percentagem de finos>30%) e espessura média (20 a 60 m)	≤ 1.5	200 - 450	-	> 20	> 70	20 - 60
C3	Formações de solo da classe C2 de grande espessura (> 60 m) de natureza homogênea ou estratificada que são intercaladas por outra formação de solo de espessura de mais de 5 m e de menor resistência e menor velocidade $V_{s,av}$	≤ 1.8	200 – 400*				> 60
D1	Depósitos recentes de solo de grande espessura (até 60 m) constituídos por argilas moles com elevado índice de plasticidade (IP > 40), elevado teor em água e parâmetros de resistência com valores baixos	≤ 2	< 300	-	< 25	< 70	20 - 60
D2	Depósitos recentes de solo de grande espessura (até 60 m) constituídos por formações arenosas a siltosas/arenosas bastante soltas com uma percentagem de finos elevada (com baixa susceptibilidade à liquefacção)						
D3	Formações de solo de grande espessura global (> 60 m) interrompida por camada da classe D1 ou D2 de pequena espessura (5 a 15 m) até uma profundidade de ~40 m com solos (arenosos e/ou argilosos, classe C) de elevada resistência com $V_c \geq 300$ m/s	≤ 3	150 - 600	-	-	-	> 60
E	Formações de solo superficial de pequena espessura (5 a 20 m), baixa resistência e rigidez, provavelmente classificado como classe C ou D de acordo com as propriedades geotécnicas que se sobrepõe às formações de classe A ( $V_c \geq 800$ m/s)	≤ 0.7	Camada superficial ≤ 400	-	-	-	5 - 20
X	Solos finos soltos siltosos abaixo do nível freático susceptíveis à liquefacção						

\*Valor alterado para ser possível a distinção entre um solo tipo C1 de um C3.

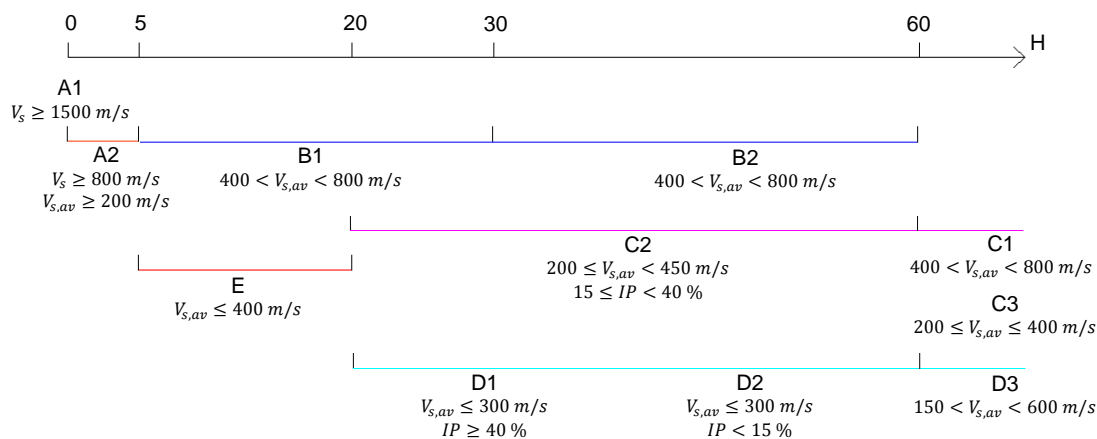
A Tabela 7 apresenta de forma sucinta as condições que deverão ser respeitadas para a possível classificação do terreno.

**Tabela 7 – Resumo das condições exigidas de acordo com Pitilakis *et al.* (2013) para cada classificação do terreno**

Classificação	A1	A2	B1	B2	C1	C2	C3	D1	D2	D3	E
$V_s$ [m/s]	$\geq 1500$	$\geq 800$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$V_{s,av}$ [m/s]	-	$\geq 200$	400 - 800			200 - 450	200 - 400	$\leq 300$		150 - 600	$\leq 400$
IP [%]	-	-	-	-	-	15 - 40	-	$\geq 40$	$< 15$	15 - 40	-
H [m]	0	0 - 5	5 - 30	30 - 60	$\geq 60$	20 - 60	$\geq 60$	20 - 60		$\geq 60$	5 - 20

Não foi incluída uma classificação tipo X neste quadro uma vez que não se teve em conta o fenómeno de liquefacção. Tendo em conta todas estas condições, realizou-se a classificação para os perfis de terreno de cada zona apresentada nos capítulos 3.3 e 3.4.

A Figura 26 representa de uma forma esquemática a classificação Pitilakis *et al.* (2013), que consiste na atribuição dos diversos tipos de solo consoante o valor de H. Assim, torna-se de fácil percepção a escolha de cada tipo de terreno para um determinado perfil. No entanto, para os perfis em causa neste trabalho, esta escolha foi feita de uma forma mais automatizada, recorrendo a folha de cálculo como se poderá observar na secção seguinte.



**Figura 26 – Esquema da classificação de Pitilakis *et al.* (2013)**

### 3.3 Algarve

Para a região do Algarve a principal fonte resultou do trabalho desenvolvido por uma equipa da Universidade do Algarve (ERSTA, 2008). Foram, assim, e para este estudo, fornecidos 280 perfis, dos quais apenas 134 foram classificados devido à falta de informação que os restantes 146 perfis apresentavam (Anexo A1). A informação dada inclui a localização geográfica dos perfis, litologia, profundidade e velocidade de propagação das ondas S. No entanto, dada a ausência de dados que permitissem efectuar as classificações pretendidas, foi necessário admitir valores tanto para a densidade,  $\rho$ , como para o índice de plasticidade, IP, indicados na Tabela 8.

**Tabela 8 – Valores de densidade e índice de plasticidade estimados com base na litologia**

Litologia	$\rho$ [ton/m <sup>3</sup> ]	IP [%]
Aluvião	1,6	40
Argila	1,7	40
Areia Argilosa	1,9	10
Areia	1,8	0
Rocha	2,2	0

Em seguida apresentam-se 4 dos 134 perfis estudados.

**Tabela 9 – Exemplo dos parâmetros dos perfis de terreno para o Algarve**

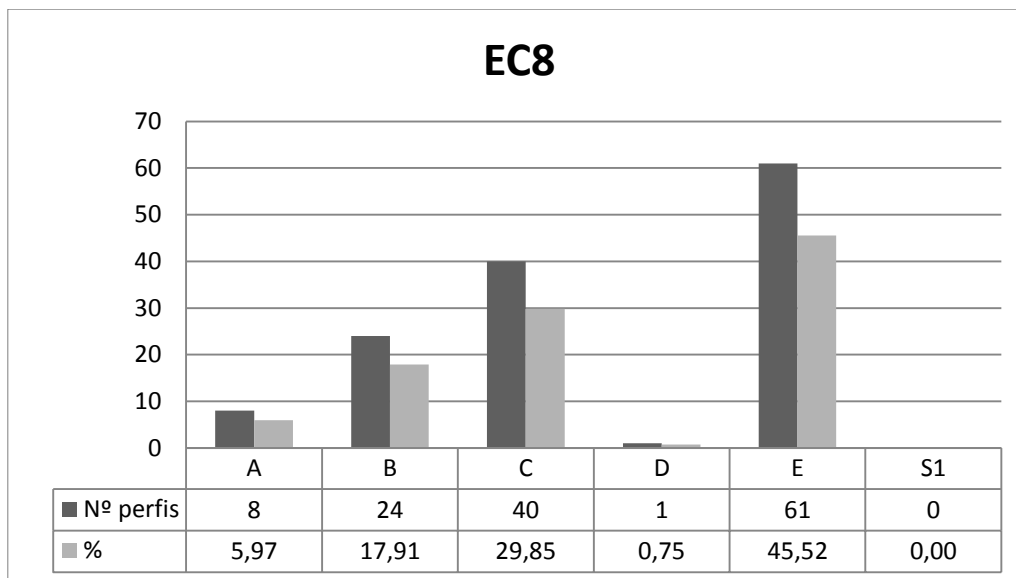
Perfil	y [m]	$V_{s,med}$ [m/s]	Litologia	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	IP [%]
4	0,0	136	Aluvião	1,60	40
	13,1	800	Rocha	2,20	0
7	0,0	155	Aluvião	1,60	40
	26,5	800	Rocha	2,20	0
17	0,0	223	Argila	1,70	40
	27,5	402	Aluvião	1,60	40
	50,5	800	Rocha	2,20	0
25	0,0	165	Argila	1,70	40
	4,0	1670	Rocha	2,20	0

Tendo por base os dados apresentados na Tabela 9, procedeu-se à classificação dos perfis do terreno segundo o EC8 e pela classificação de Pitolakis *et al.* (2013) apresentada na Tabela 10.

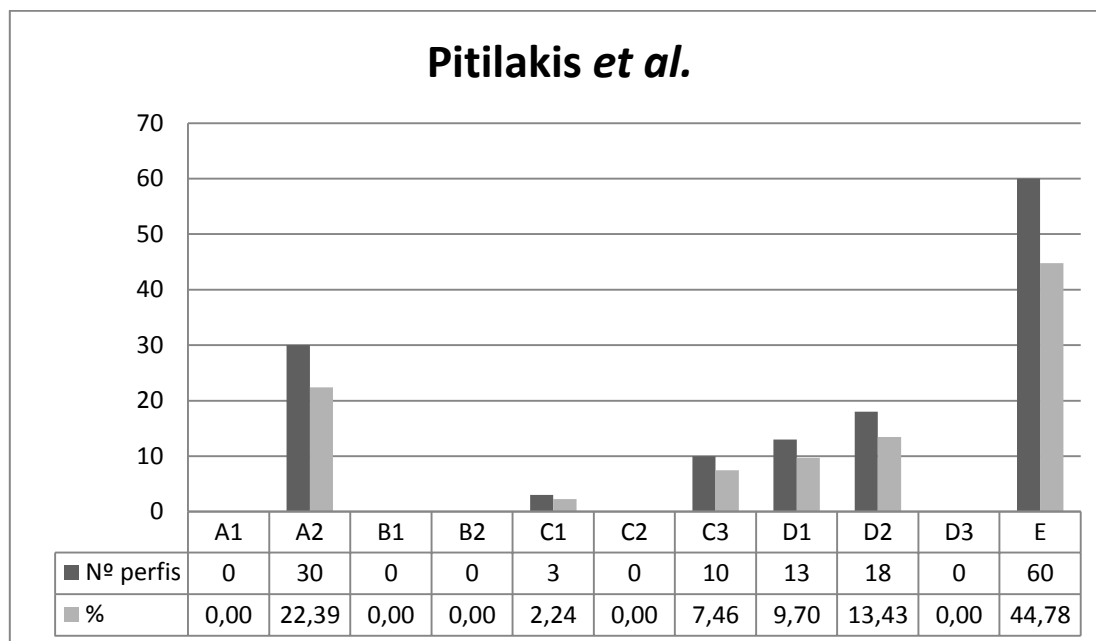
**Tabela 10 – Comparação das classificações para os perfis da Tabela 9**

Perfil	4	7	17	25
EC8	E	D	C	B
Pitolakis <i>et al.</i> (2013)	E	D1	D1	A2

A Figura 27 e a Figura 28 representam distribuição de todos os perfis do terreno do Algarve pelas diversas classes do EC8 e Pitolakis *et al*, respectivamente.



**Figura 27 – Distribuição dos perfis do terreno pelas classificações do EC8 pelos perfis para o Algarve**



**Figura 28 – Distribuição dos perfis do terreno pelas classificações de Pitolakis *et al*. (2013) pelos perfis para o Algarve**

Pelas figuras anteriores, é possível observar algumas diferenças entre as classificações nomeadamente para os perfis do tipo B do EC8 que, para a classificação de Pitolakis *et al*., são muitas vezes considerados do tipo E ou do tipo A2, como acontece para o perfil 25 da Tabela 10. O mesmo

acontece, por exemplo para os perfis do tipo C (EC8) que são divididos em tipo E e tipo D1 (Pitilakis *et al.*).

### 3.4 Área Metropolitana de Lisboa

Para a área metropolitana de Lisboa, foram fornecidos 38 perfis identificados de B a AN (Anexo A2) (Cansado Carvalho, Campos Costa, Sousa, & Martins, 2002). Cada um destes perfis tinha a informação referente a profundidade do topo da camada,  $y$ , densidade,  $\rho$ , velocidade média das ondas de corte,  $V_{s,med}$ , número de camadas, índice de plasticidade, IP.

A tabela seguinte ilustra, como exemplo, 4 dos 38 de perfis.

**Tabela 11 – Exemplo dos parâmetros dos perfis do terreno para Lisboa**

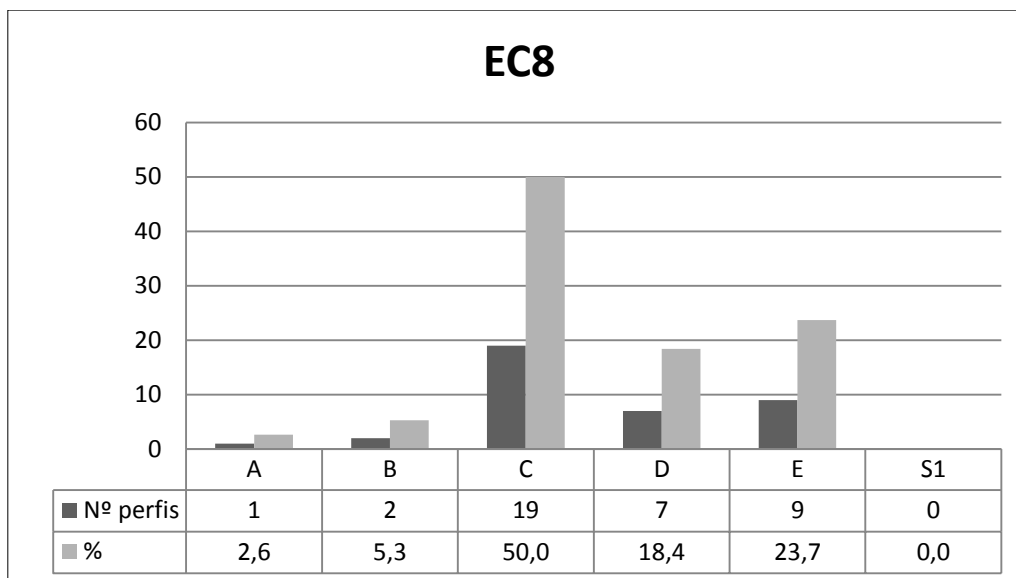
Perfil	$y$ [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$V_{s,med}$ [m/s]	$n_{camadas}$	IP [%]
B	0,0	1,80	327,0	4	0
	3,5	2,20	1000,0	0	0
C	0,0	2,00	197,0	4	40
	3,5	1,87	167,4	6	30
	8,9	2,00	600,0	0	0
E	0,0	1,80	265,0	5	40
	4,5	1,60	137,0	7	50
	11,5	1,80	223,0	3	40
	15,0	1,80	172,0	2	0
	20,0	1,80	253,0	6	40
	26,0	2,00	600,0	0	0
J	0,0	1,80	240,6	20	30
	20,0	1,80	170,0	18	50
	38,0	1,80	147,0	7	30
	45,0	2,20	1000,0	0	0

Tendo em conta os parâmetros fornecidos na Tabela 11, foi possível classificar os perfis segundo o EC8 e segundo a classificação de Pitilakis *et al.*,(2013), apresentada na Tabela 12.

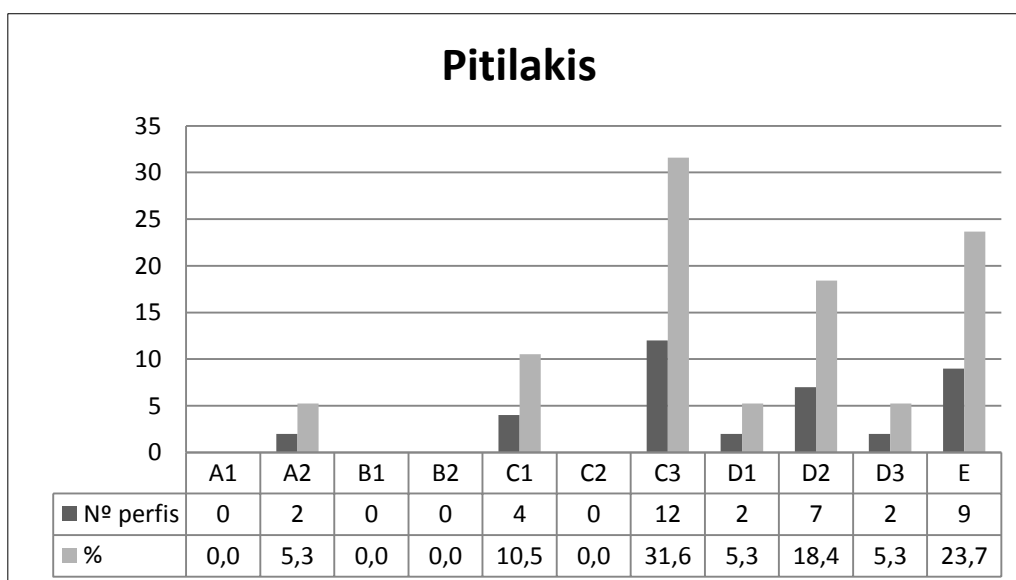
**Tabela 12 – Comparação das classificações para os perfis da Tabela 11**

Perfil	B	C	E	J
EC8	A	C	C	C
Pitilakis <i>et al.</i> ,(2013)	A2	C1	C3	D2

As figuras seguintes apresentam a distribuição das classificações dos tipos de terreno para todos os 38 perfis fornecidos.



**Figura 29 – Distribuição dos perfis do terreno pelas classificações do EC8 pelos perfis para Lisboa**



**Figura 30 – Distribuição dos perfis do terreno pelas classificações de Pitilakis et al. (2013) pelos perfis para Lisboa**

Observando a Figura 29 pode-se constatar que a maior parte dos perfis são designados como tipo C com uma percentagem de 50%. Em seguida, encontram-se os perfis do tipo E e D. Tendo isto em conta, se se observar de seguida a Figura 30, constata-se que a grande percentagem de perfis (31,6%) é classificada como tipo C3 seguindo-se os perfis do tipo E com uma percentagem de 23,7%.

A maior diferença entre as duas classificações é o facto de para a segunda, Pitilakis et al.(2013) não existirem perfis com a designação de tipo B (neste caso divididas em B1 e B2), uma vez que foram distribuídas pelas classificações do tipo E ou A2.

### 3.5 Classificação conjunta dos perfis de terreno das 2 zonas

Após a análise de cada zona individualmente, fez-se a junção de todos os perfis.

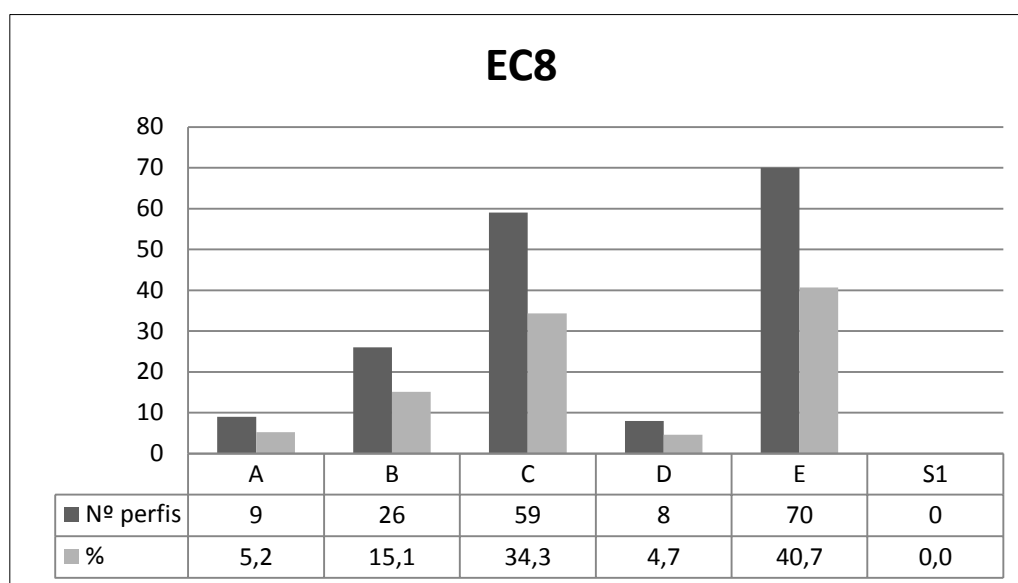


Figura 31 – Distribuição do conjunto dos perfis do terreno pelas classificações do EC8

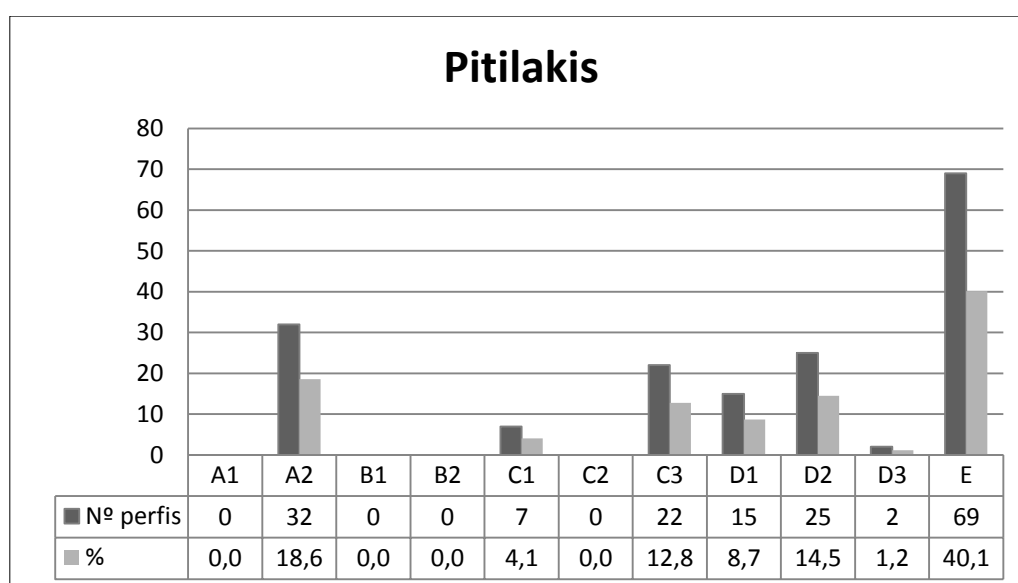


Figura 32 – Distribuição do conjunto dos perfis do terreno pelas classificações de Pitilakis et al. (2013)

## 4 Análise de resultados

### 4.1 Introdução

A representação da acção sísmica através de espectros de resposta elástica é a forma mais utilizada pelos regulamentos actuais. Assim, neste capítulo apresentam-se os espectros de resposta elástica para o conjunto dos perfis do terreno das zonas do Algarve e de Lisboa analisados no capítulo 3.

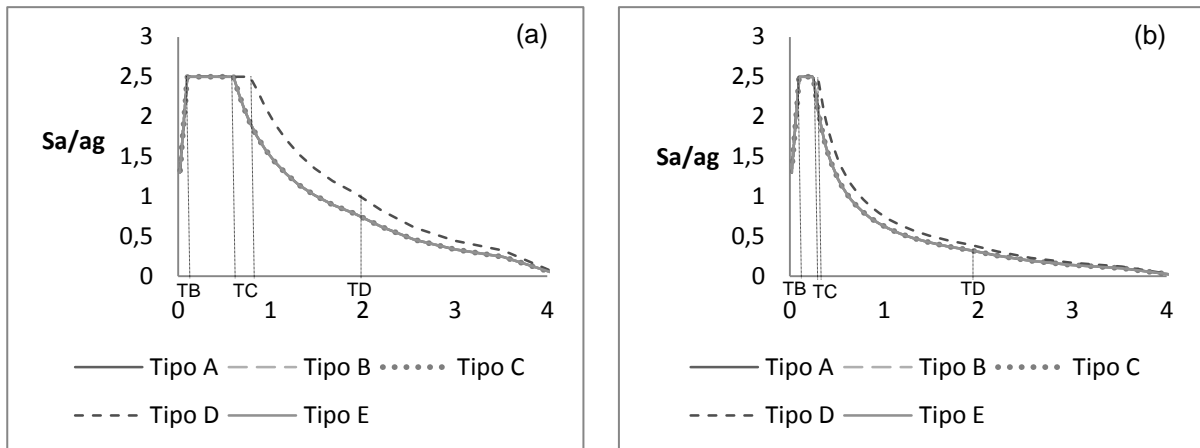
### 4.2 Metodologia

Como acção sísmica indutora foram considerados os espectros ao nível do substrato rochoso, obtidos por Carvalho *et al.* (2007). Nesse estudo, foram realizadas simulações, através de da metodologia estocástica de falha-finita, já referida na secção 2.2, para dois cenários (próximo e afastado) representativos das duas acções tipo 2 e tipo 1, respectivamente, preconizados no EC8-A.N. Para o cenário afastado as simulações foram feitas para magnitudes entre 5,1 e 8,7, em intervalos de 0,2, e para 20 distâncias ao plano de falha entre 50 km e 700 km, sendo a base de dados final consistindo de um total de 45600 espectros. Para o cenário próximo, apenas se considerou distâncias inferiores a 200 km e foram simuladas magnitudes entre 4,1 e 7,5, em intervalos de 0,2, a que corresponderam um total de 45360 espectros. Os espectros de resposta elásticos à superfície foram determinados através do programa existente no simulador de cenários sísmicos (Campos Costa, A. *et al.* (2004)), que aplica o método linear equivalente (secção 2.4) para a propagação das ondas de corte na coluna de solo. Calculam-se os espectros de potência e de resposta de aceleração à superfície tendo em consideração os espectros de potência no substrato rochoso e o comportamento não linear das colunas de solo, traduzido pelas curvas de rigidez e de amortecimento do solo dependentes da distorção definidas por Darendeli (2001). Assim, obteve-se valores de acelerações espectrais à superfície em função do período de um grau de liberdade.

Uma vez obtidos os espectros à superfície, para cada tipo de terreno definido no EC8-A.N, (secções 4.4 e 4.5) estes foram normalizados (divididos pelo valor máximo de aceleração) de modo a obter espectros unitários e comparados com os espectros unitários do EC8-A.N (divididos por  $S/ag$ , sendo  $ag$  a aceleração regulamentar e  $S$  o coeficiente de solo). Assim, analisou-se os espectros em termos de “forma” e não de “intensidade” e considerou-se apenas a distribuição de energia ao longo de cada período.

### 4.3 Terrenos tipo do Anexo Nacional do EC8 (EC8-A.N)

O Anexo Nacional do EC8 apresenta a forma dos espectros de resposta elástica para cada um dos tipos de solo fazendo a diferenciação face ao tipo de acção sísmica. Deste modo, para cada tipo de cenário sísmico deve adoptar-se o tipo de espectro correspondente como mostra a Figura 33. Nesta figura estão representados os espectros de resposta elástica sem considerar, quer o valor de coeficiente do terreno quer o valor da aceleração de referência à superfície de um terreno do tipo A. Na Tabela 13 e Tabela 14 são apresentados os parâmetros para obtenção dos espectros para os dois tipos de acção sísmica.



**Figura 33 – Espectro da resposta elástica para acção do tipo 1 (a) e tipo 2 (b) para solos do tipo A a E**

**Tabela 13 – Parâmetros definidores para o espectro do tipo 1**

Tipo	$T_B$ [s]	$T_C$ [s]	$T_D$ [s]
A	0,1	0,6	2
B	0,1	0,6	2
C	0,1	0,6	2
D	0,1	0,8	2
E	0,1	0,6	2

**Tabela 14 – Parâmetros definidores para o espectro do tipo 2**

Tipo	$T_B$ [s]	$T_C$ [s]	$T_D$ [s]
A	0,1	0,25	2
B	0,1	0,25	2
C	0,1	0,25	2
D	0,1	0,3	2
E	0,1	0,25	2

Desta figura, observa-se que a variação na forma dos espectros é apresentada apenas em função do tipo de solo e tipo de acção sísmica. É também possível constatar que apenas para o tipo D a forma do espectro é diferente apresentando uma forma mais alargada.

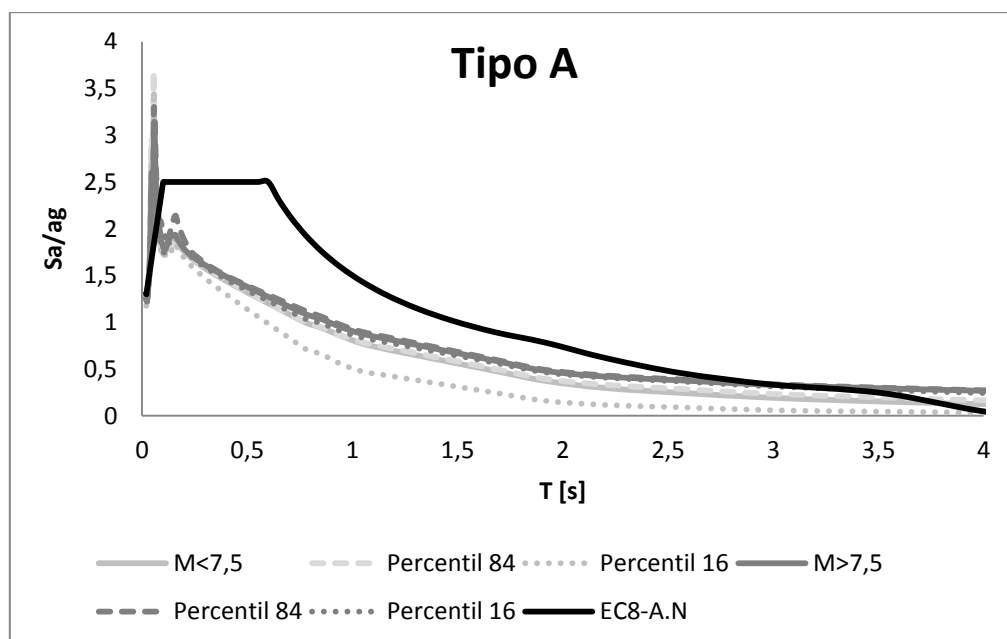
O objectivo seguinte será comparar estes espectros com os espectros determinados através dos dados obtidos do Algarve e Lisboa.

## 4.4 Acção sísmica Tipo 1 – Sismo Afastado

Para a acção sísmica do tipo 1 fez-se a análise para magnitudes entre 5,5 e 8,7, considerando dois grupos, com magnitudes inferiores a 7,5 e superiores a 7,5, para melhor manuseamento dos dados.

Para cada magnitude, a que corresponde um plano de falha de determinada dimensão, foram geradas acções sísmicas para cerca de 500 distâncias diferentes. Uma vez que os sismos de maior magnitude abrangem maiores distâncias, analisou-se as menores magnitudes para um intervalo de distâncias de 100 a 350 km, e para as maiores distâncias um intervalo de 100 a 500 km.

### 4.4.1 Solo Tipo A

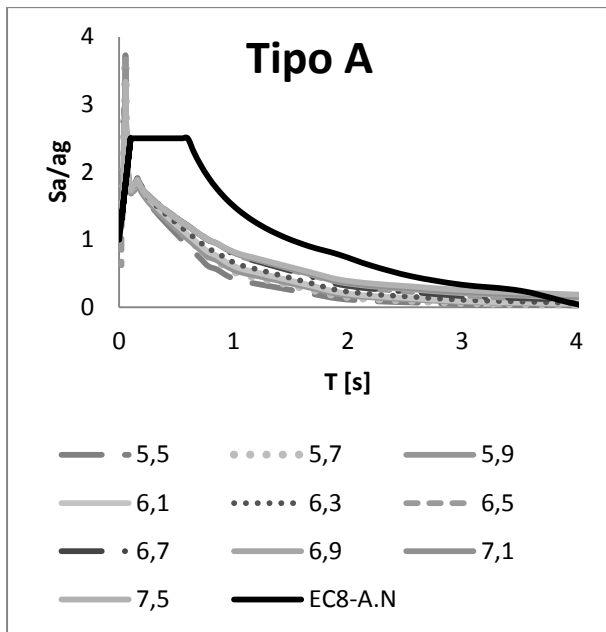


**Figura 34 – Comparação dos espectros de resposta em análise com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo A e acção sísmica do tipo 1**

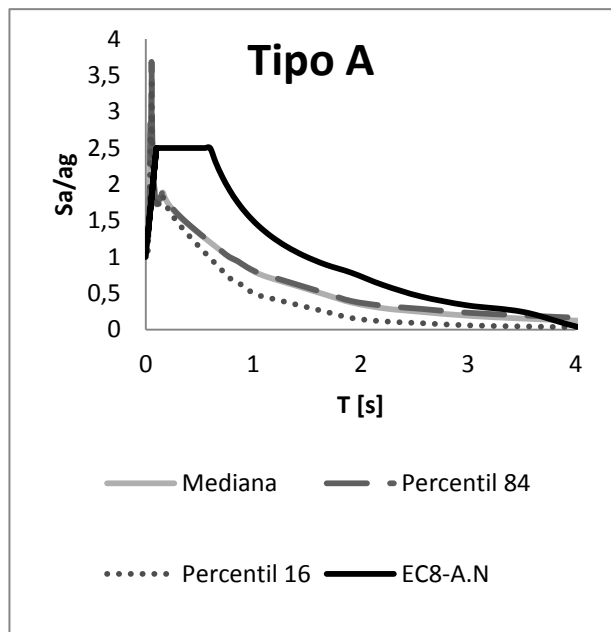
Como foi referido na secção 3.2.1, o solo do tipo A corresponde a terreno rochoso.

Nas figuras seguintes, faz-se a discriminação das magnitudes, representando a primeira, Figura 35, as formas dos espectros para magnitudes 5,5 até 7,5 e a Figura 37 para magnitudes de 7,7 até 8,7. Pela observação da primeira constata-se, não só que existem dois picos de acelerações espectrais normalizadas (o primeiro bastante elevado, da ordem dos 3,5 e outro mais pequeno para valores de período de aproximadamente 0,2s) mas também na sobreposição das formas dos espectros para os mesmos valores de períodos. A partir do segundo pico, observa-se uma divergência entre as magnitudes, sendo os valores das acelerações maiores quanto maior for a magnitude.

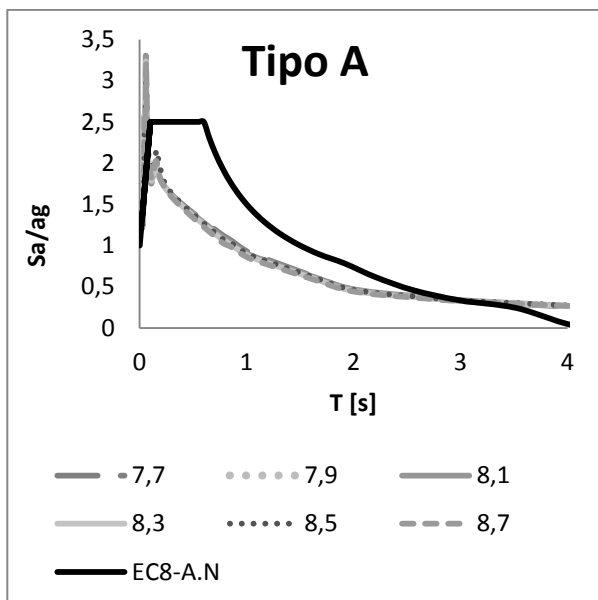
Observando as Figura 37 e Figura 38 é de salientar a semelhança em relação à figura anterior uma vez que o espectro apresenta dois picos para baixos períodos apesar da diferença de valores de aceleração espectral normalizada. Para este caso, a forma dos vários espectros não apresenta grandes diferenças para as diferentes magnitudes.



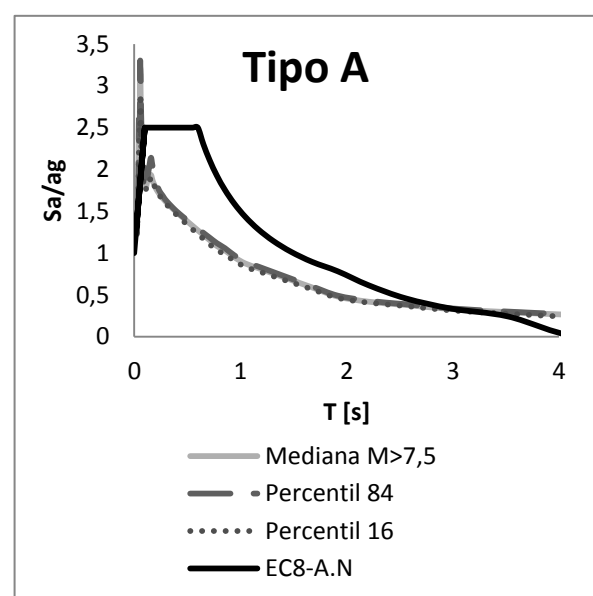
**Figura 35 – Comparação dos espectros de resposta determinados com ações sísmicas com magnitudes inferiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo A e ação sísmica tipo 1**



**Figura 36 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com ações sísmicas com magnitudes inferiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo A e ação sísmica tipo 1**



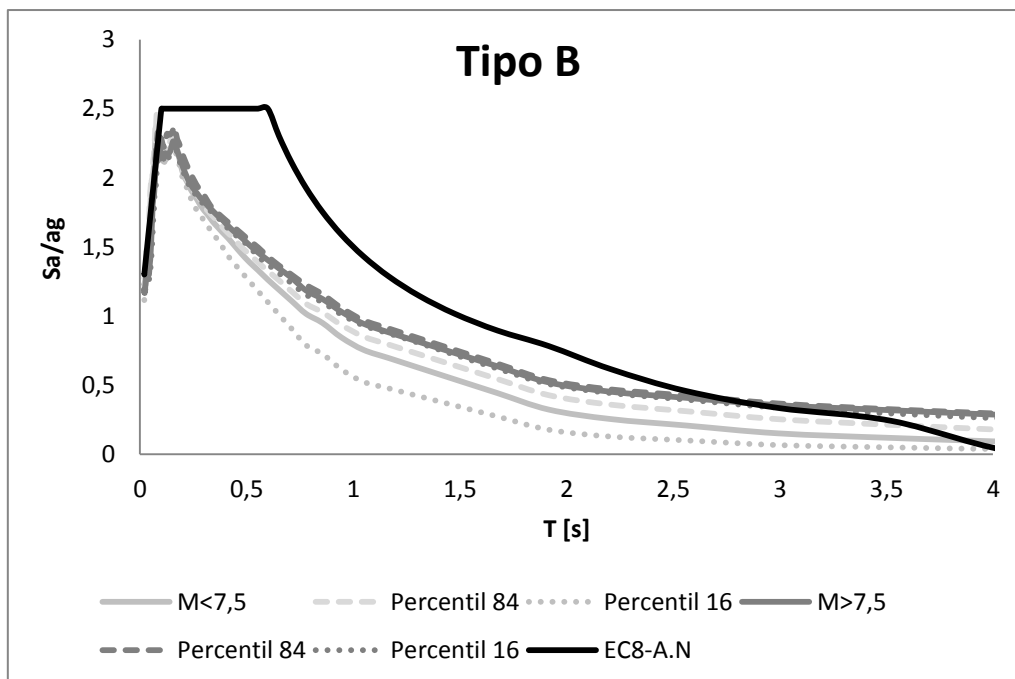
**Figura 37 – Comparação dos espectros de resposta determinados com ações sísmicas com magnitudes superiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo A e ação sísmica tipo 1**



**Figura 38 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com ações sísmicas com magnitudes superiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo A e ação sísmica tipo 1**

#### 4.4.2 Solo Tipo B

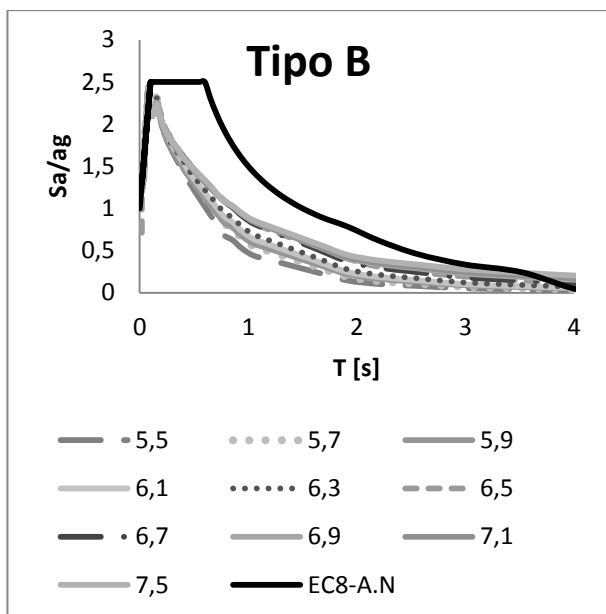
Sendo o terreno do tipo B menos rígrado que o tipo A, esperam-se valores de acelerações espectrais mais baixos como mostra a Figura 39. Desta figura, é possível constatar que os espectros de resposta determinados encontram-se maioritariamente abaixo do espectro de resposta do EC8-A.N, excepto para magnitudes superiores a 7,5 a partir dos 3s.



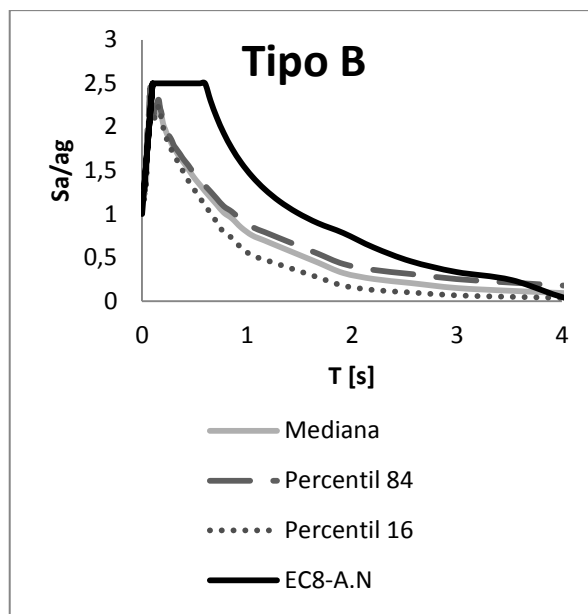
**Figura 39 – Comparação dos espectros de resposta em análise com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo B e acção sísmica do tipo 1**

Nas figuras seguintes observa-se novamente que uma maior magnitude corresponde a um maior valor de aceleração espectral.

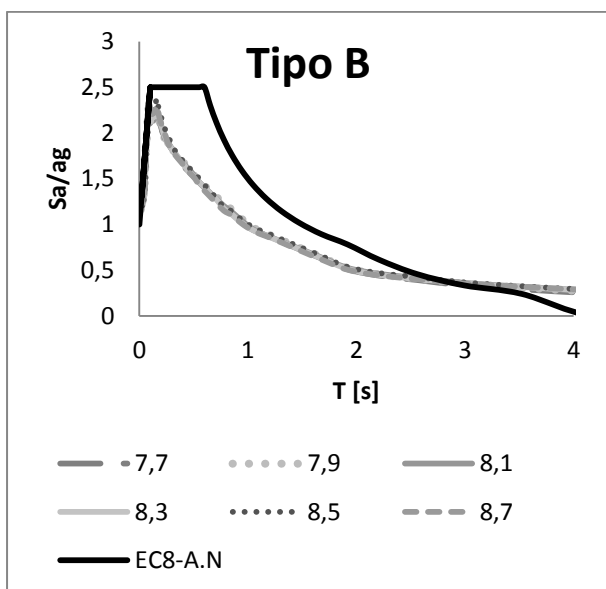
Tanto para magnitudes inferiores a 7,5 (Figura 40), como para magnitudes superiores a esse valor (Figura 42), verifica-se que a forma do espectro do EC8-A.N está bastante acima dos espectros obtidos e que, à semelhança do que acontecia para os espectros de resposta do tipo A, para magnitudes inferiores a 7,5 observa-se bem as diferentes magnitudes. Para magnitudes superiores a 7,5, os espectros são bastante coincidentes entre si.



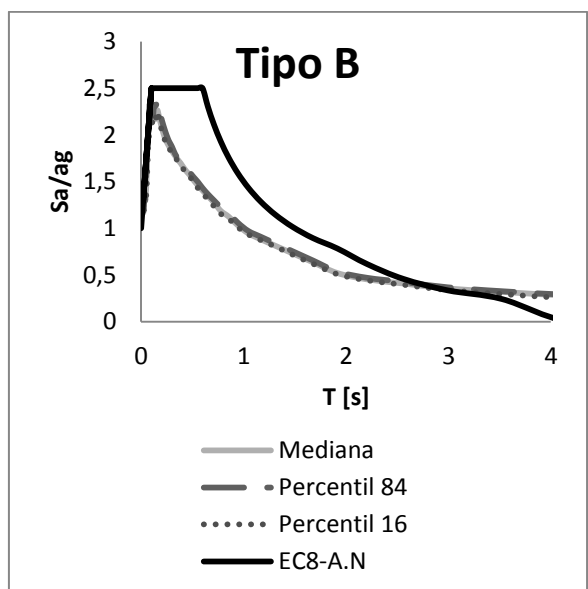
**Figura 40 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo B e acção sísmica tipo 1**



**Figura 41 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo B e acção sísmica tipo 1**

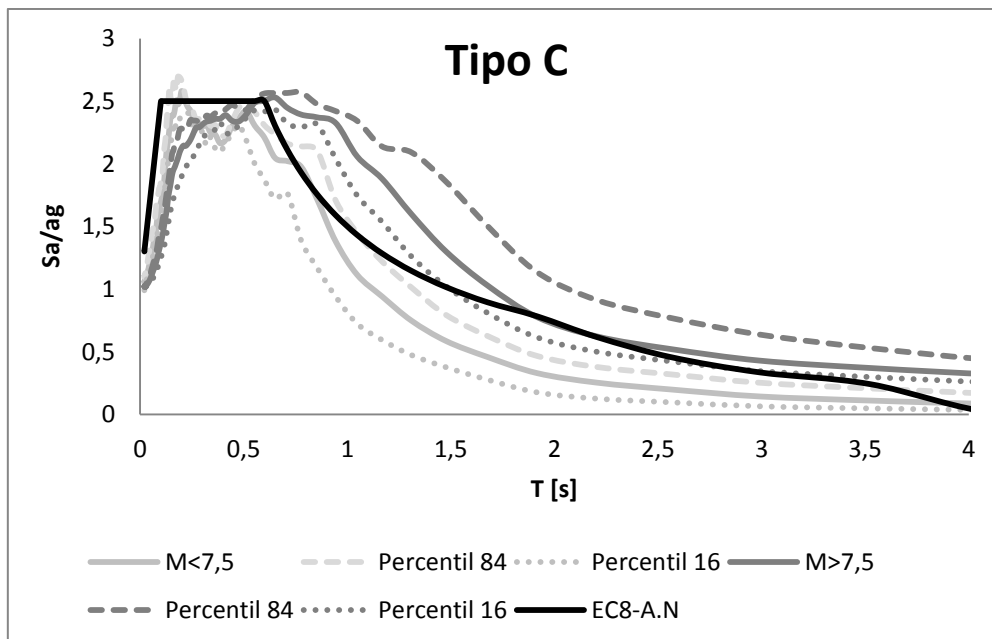


**Figura 42 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo B e acção sísmica tipo 1**



**Figura 43 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo B e acção sísmica tipo 1**

#### 4.4.3 Solo Tipo C



**Figura 44 – Comparação dos espectros de resposta em análise com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo C e ação sísmica do tipo 1**

Pela observação da Figura 44, é possível constatar a irregularidade do solo do tipo C para baixos períodos, não ultrapassando valores de aceleração espectral normalizada da ordem dos 2,5.

Relativamente à forma dos espectros de resposta determinados, contacta-se que, para valores de período baixos, aproxima-se à forma do espectro do EC8-A.N, ultrapassando-o em alguns pontos.

Na Figura 45 e na Figura 46 observa-se que os espectros para magnitudes inferiores a 7,5 encontram-se maioritariamente abaixo do espectro do EC8-A.N, excepto para valores baixos de período. Para magnitudes superiores a 7,5 (Figura 47 e Figura 48), é um pouco diferente uma vez que o espectro de resposta determinado ultrapassa o espectro de resposta do EC8-A.N a partir de 0,5s.

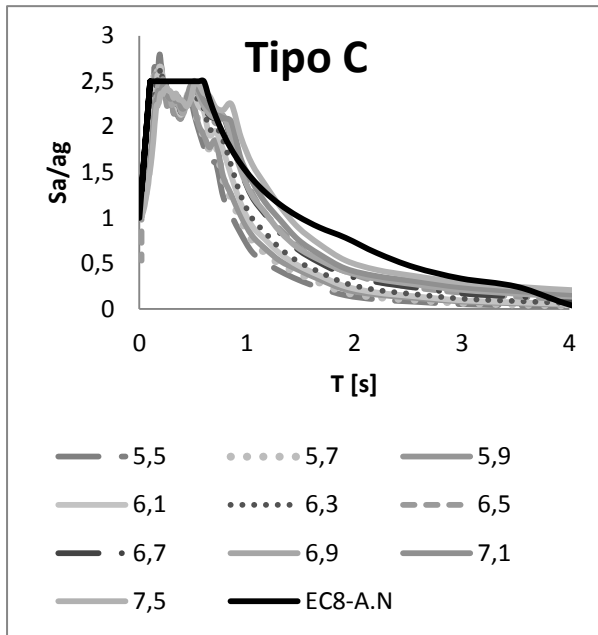


Figura 45 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo C e acção sísmica tipo 1

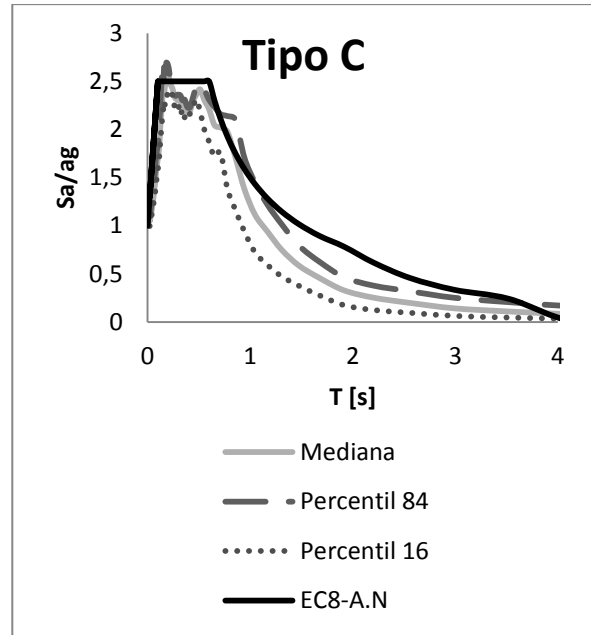


Figura 46 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo C e acção sísmica tipo 1

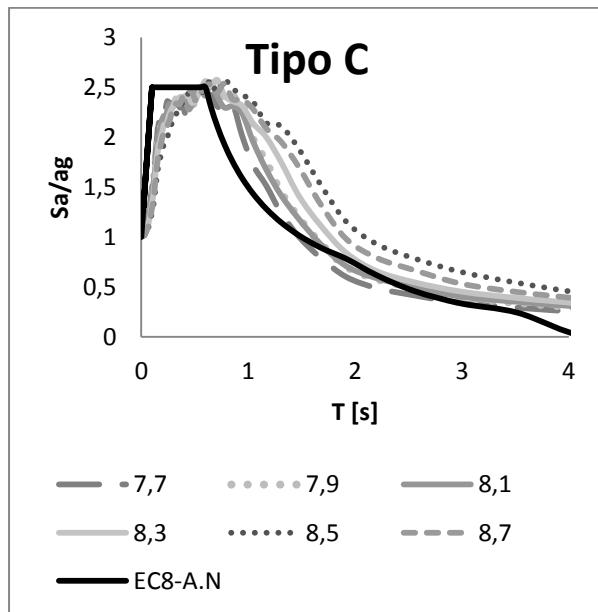


Figura 47 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo C e acção sísmica tipo 1

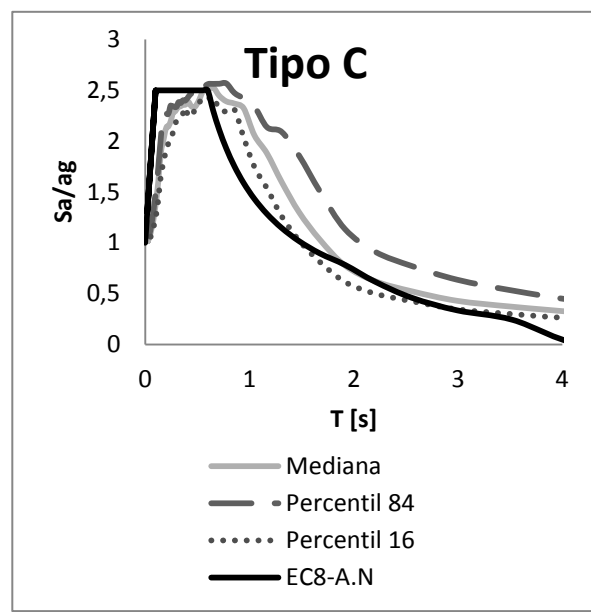
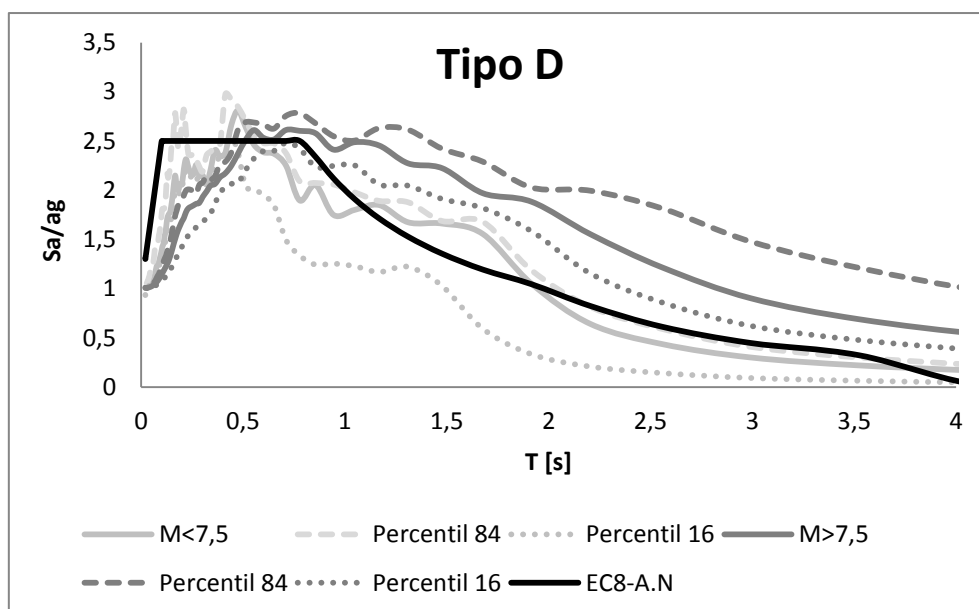


Figura 48 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo C e acção sísmica tipo 1

#### 4.4.4 Solo Tipo D

Os solos do tipo D são solos cuja compactidade é baixa a média, logo os valores de aceleração espectral normalizada não ultrapassam os 2,7, conforme mostra a Figura 49.

Relativamente à forma dos espectros obtidos, denota-se as irregularidades dos mesmos em comparação com os espectros obtidos para outro tipo de solo.



**Figura 49 – Comparação dos espectros de resposta em análise com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo D e ação sísmica do tipo 1**

A Figura 50 mostra a irregularidade de cada uma das magnitudes até aos 2s e a existência de dois picos antes dos 0,5s. É também de referir que quanto maior a magnitude, maior é o valor correspondente da aceleração espectral normalizada. Da Figura 51 é possível constatar, pela mediana e pelo percentil 84, que os espectros de resposta de magnitude inferior a 7,5 se aproximam bastante do espectro de resposta do EC8-A.N.

Para as magnitudes superiores a 7,5 (Figura 52), os espectros de resposta determinados ultrapassam o espectro de resposta do EC8-A.N, em semelhança ao que acontecia para solos do tipo C. Pela Figura 53, contacta-se que a mediana se encontra acima do espectro do EC8-A.N e que, pela posição do percentil 16, a probabilidade de se encontrar um espectro mais próximo do espectro do EC8-A.N é baixa.

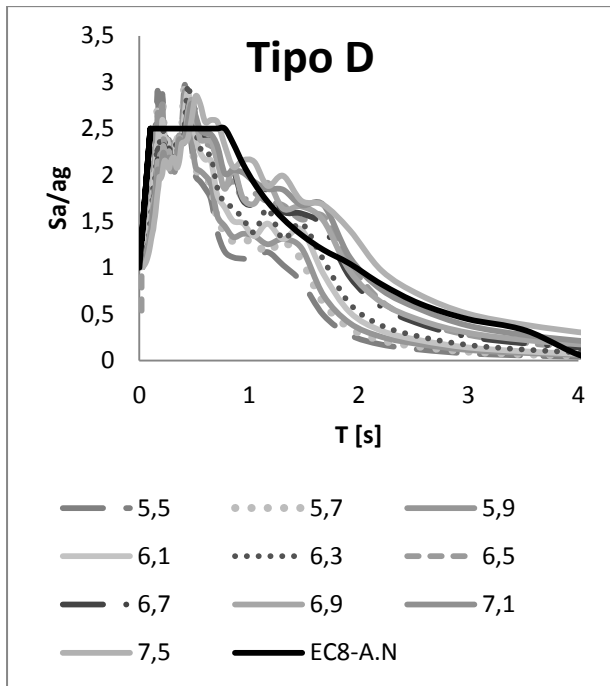


Figura 50 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo D e acção sísmica tipo 1

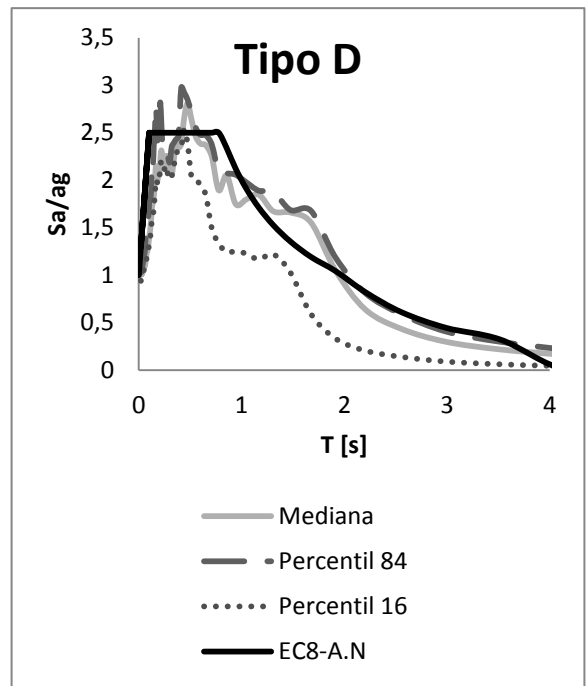


Figura 51 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo D e acção sísmica tipo 1

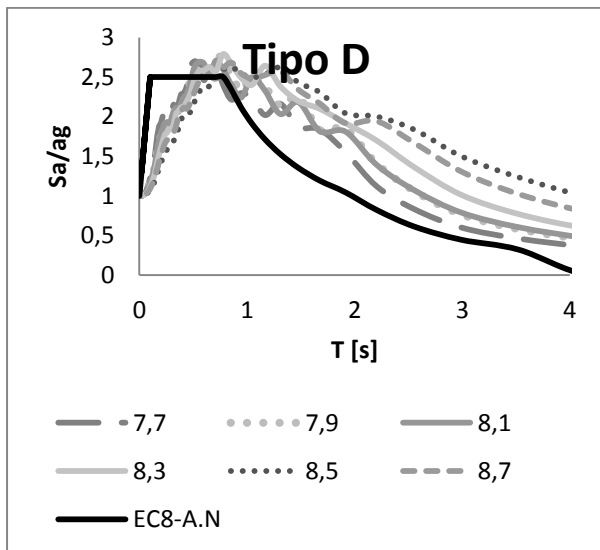


Figura 52 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo D e acção sísmica tipo 1

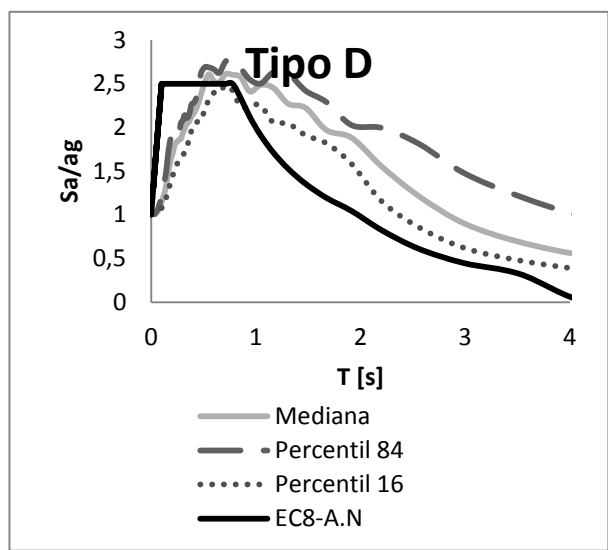
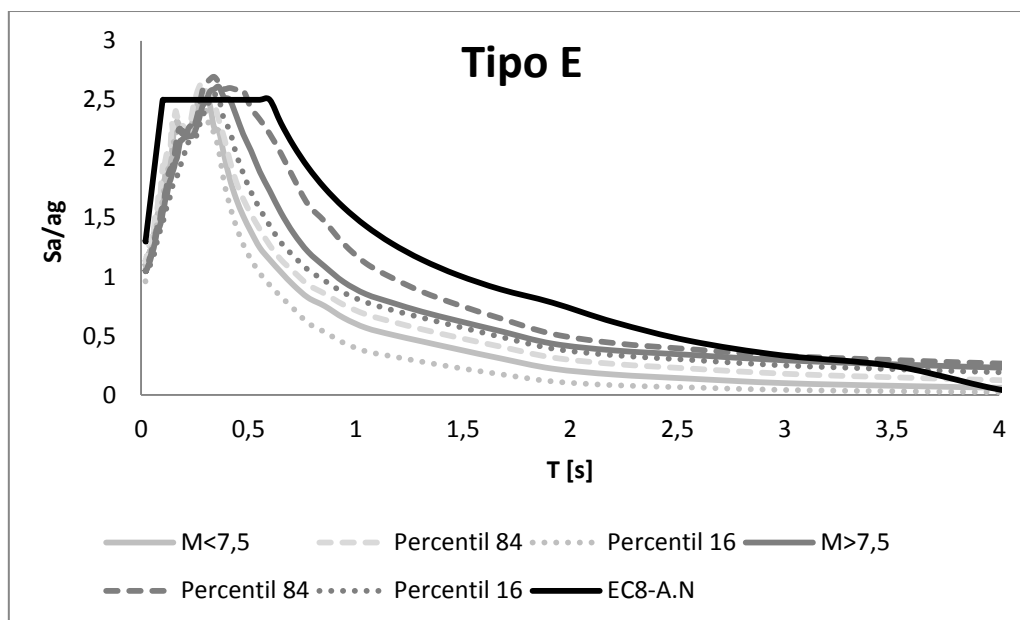


Figura 53 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo D e acção sísmica tipo 1

#### 4.4.5 Solo Tipo E

A Figura 54 mostra que para o tipo de solo E, os espectros de resposta determinados, quer para magnitudes inferiores quer superiores a 7,5, encontram-se maioritariamente abaixo do espectro de resposta do EC8-A.N, excepto para valores períodos de 0,5s e a partir dos 3,5s.



**Figura 54 – Comparação dos espectros de resposta em análise com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo E e ação sísmica do tipo 1**

Observando os espectros de resposta de magnitudes inferiores a 7,5, na Figura 55, é possível verificar que apresentam dois picos de aceleração espectral normalizada para baixos períodos. Verifica-se também que quanto maior a magnitude maior é o valor de aceleração espectral normalizada associado.

Para magnitudes superiores a 7,5 (Figura 57), os espectros de resposta determinados apresentam apenas um pico e de um modo geral aproximam-se mais ao espectro de resposta do EC8-A.N.

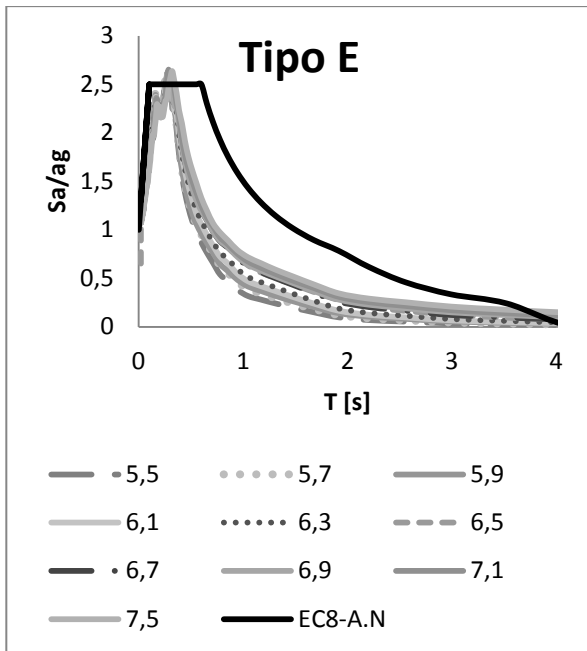


Figura 55 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo E e acção sísmica tipo 1

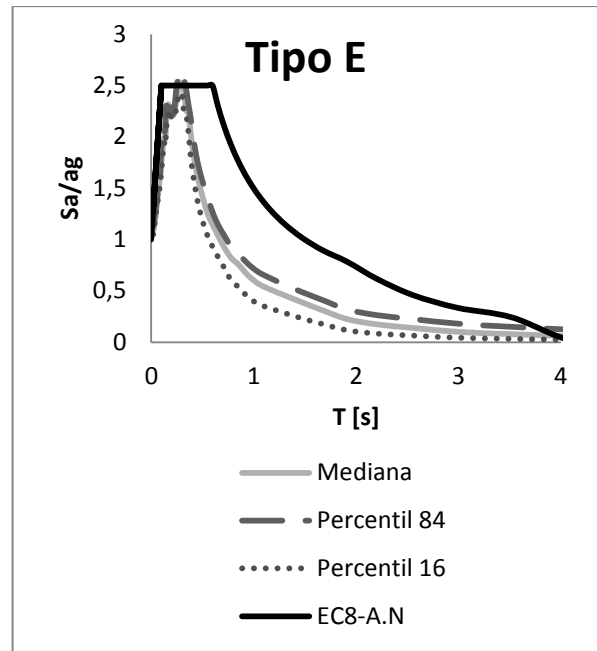


Figura 56 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo E e acção sísmica tipo 1

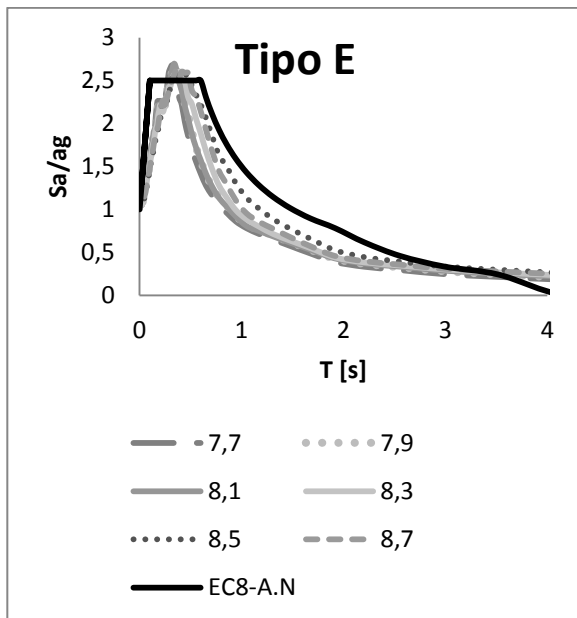


Figura 57 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo E e acção sísmica tipo 1

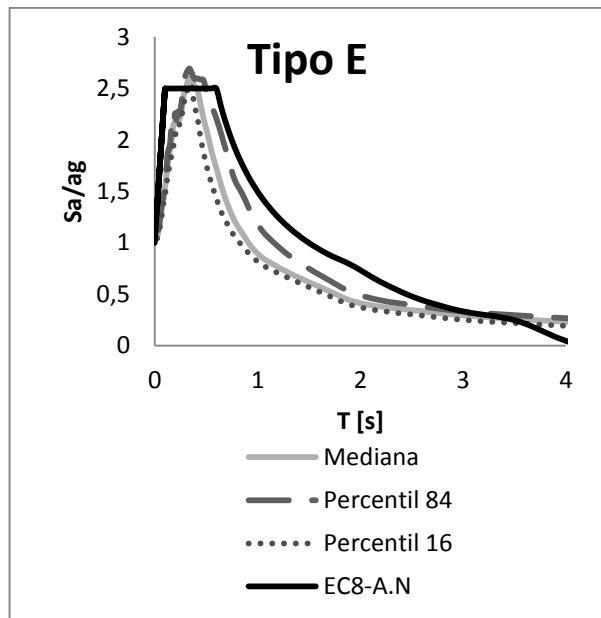
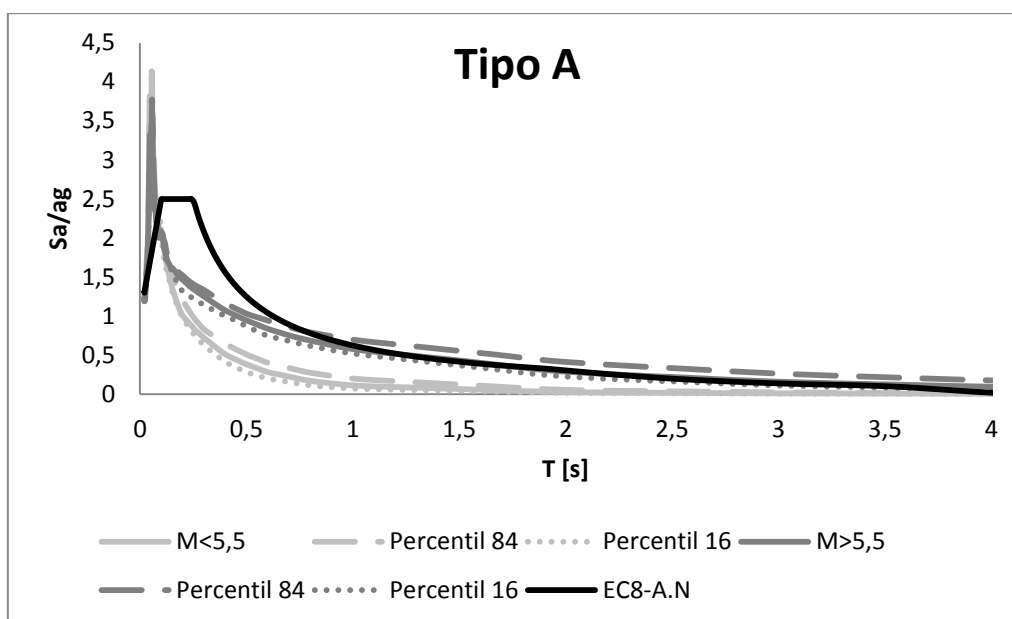


Figura 58 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 7,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo E e acção sísmica tipo 1

## 4.5 Acção sísmica Tipo 2 – Sismo Próximo

A análise para este tipo de acção sísmica engloba magnitudes de 4,1 a 7,5, fazendo uma separação em dois grupos entre magnitudes inferiores ou superiores a 5,5 de modo a ser possível observar as diferenças. Para cada magnitude foram geradas cerca de 50 acções com diferentes distâncias. Para as menores magnitudes o intervalo de distâncias é até 50 km e para as maiores distâncias, o intervalo é até 100 km.

### 4.5.1 Solo Tipo A



**Figura 59 – Comparação dos espectros de resposta em análise com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo A e acção sísmica do tipo 2**

A Figura 59 mostra que para valores baixos de período, cerca de 0,2s, corresponde um pico de acelerações espectrais para ambos os intervalos de magnitudes. É também possível observar que o espectro para magnitudes superiores a 5,5 é o que mais se aproxima do espectro de resposta do EC8-A.N, coincidindo com este a partir dos 2s.

Para magnitudes inferiores a 5,5 (Figura 60 e Figura 61), o espectro de resposta determinado atinge um pico de acelerações espectrais até ao valor 4 para períodos muito baixos. A partir deste pico, a forma do espectro é sempre inferior ao espectro do EC8-A.N e os valores de acelerações espectrais aumentam com o aumento da magnitude.

Para magnitudes superiores a 5,5 (Figura 62 e Figura 63), o pico de acelerações espectrais é mais baixo que no caso anterior, não chegando a 4. A partir deste ponto, observa-se um desfasamento entre magnitudes, havendo sobreposição da forma dos espectros com o espectro do EC8-A.N para as magnitudes 6,3 e 6,5.

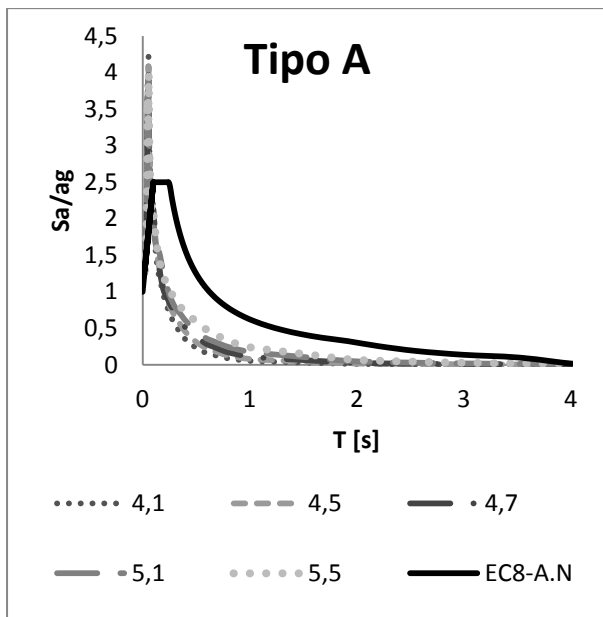


Figura 60 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo A e acção sísmica tipo 2

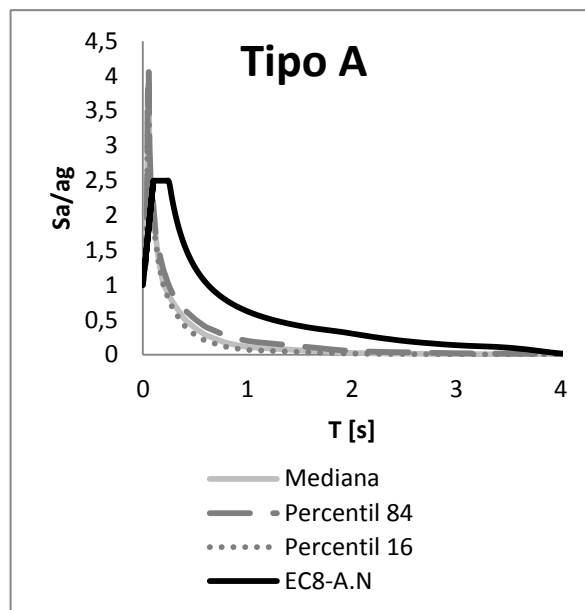


Figura 61 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo A e acção sísmica tipo 2

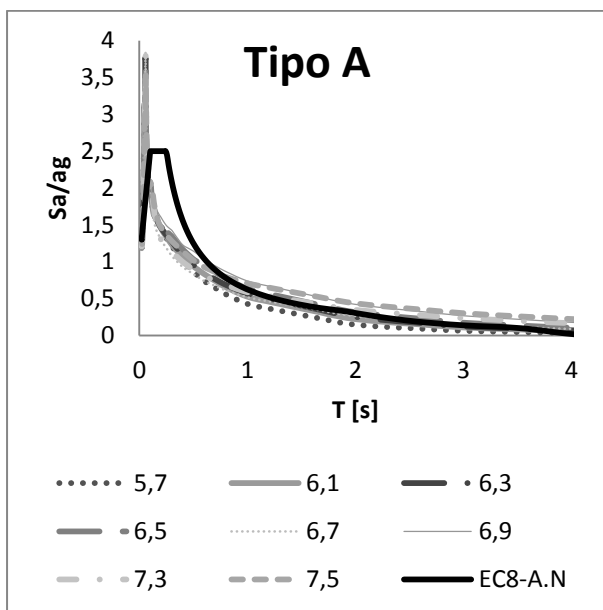


Figura 62 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo A e acção sísmica tipo 2

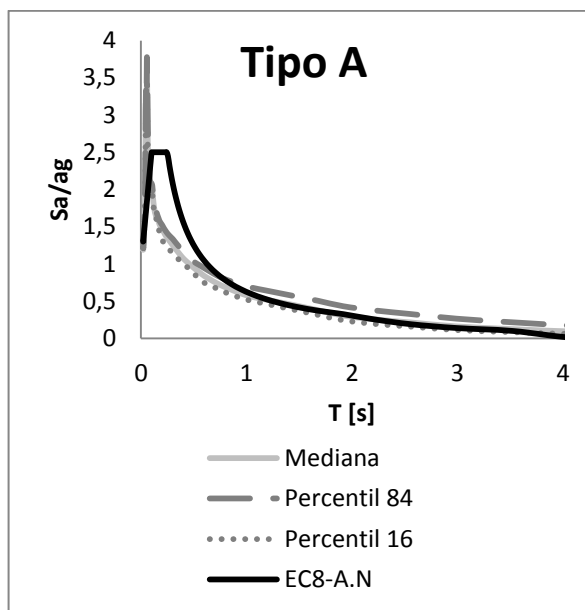
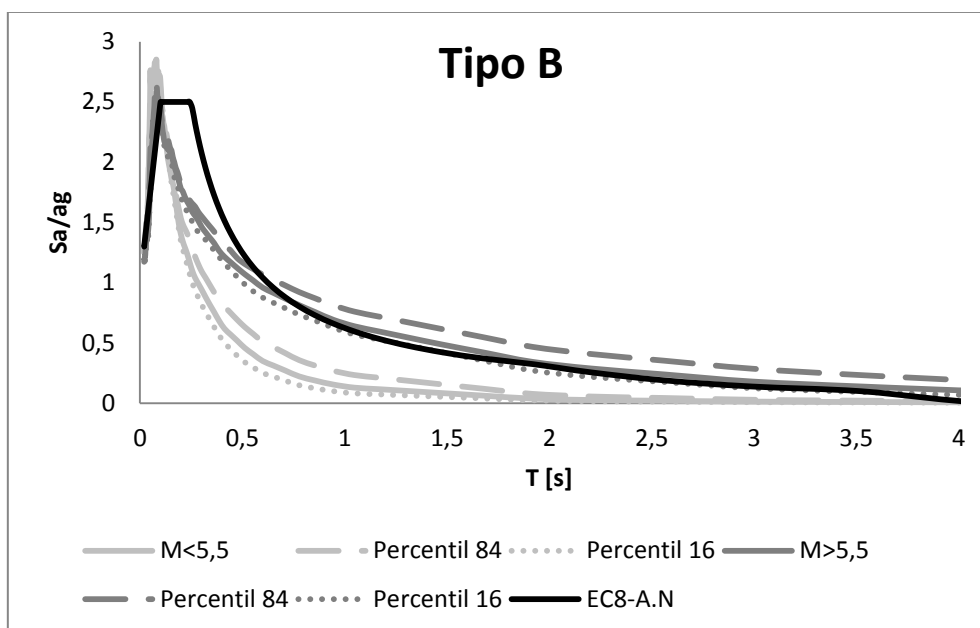


Figura 63 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo A e acção sísmica tipo 2

## 4.5.2 Solo Tipo B

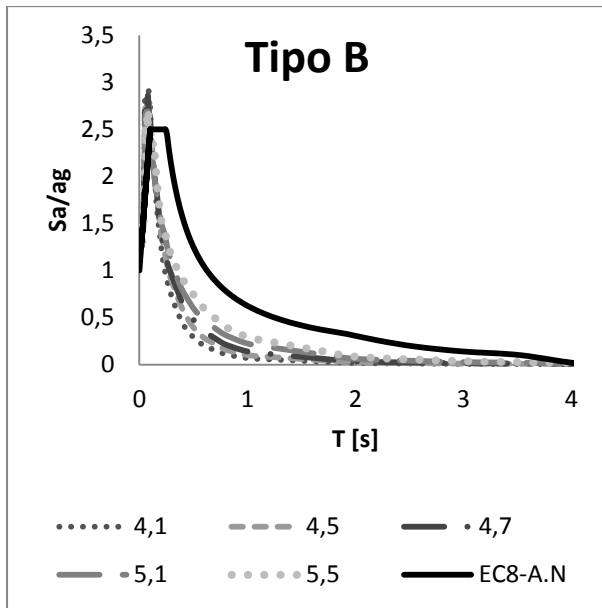


**Figura 64 – Comparação dos espectros de resposta em análise com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo B e acção sísmica do tipo 2**

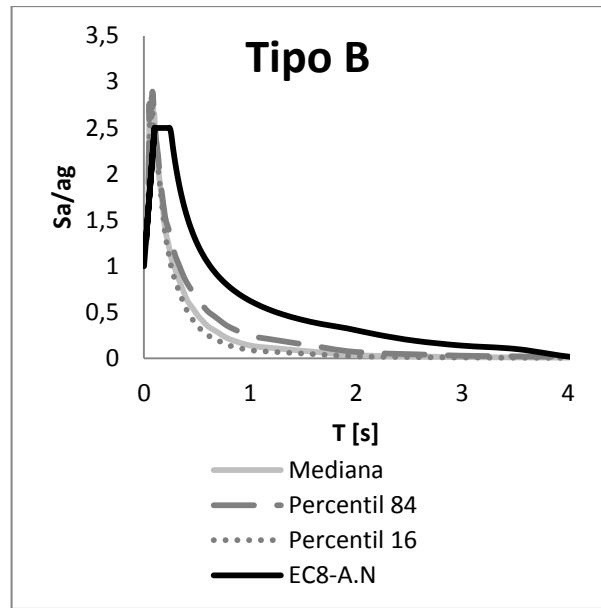
Pela Figura 64, constata-se que, à semelhança do que acontecia para solos do tipo A, existe a sobreposição dos espectros de resposta de magnitude superior a 5,5 e o espectro de resposta do EC8-A.N. Para este tipo de solo não se observam picos de elevadas acelerações, não chegando a 3 unidades de aceleração espectral normalizada.

De um modo geral, a forma dos espectros de resposta, quer para magnitudes inferiores a 5,5 (Figura 65 e Figura 66) quer para magnitudes superiores a 5,5 (Figura 67 e Figura 68), é semelhante à forma dos espectros para os solos do tipo A para valores de aceleração espectral mais baixo. Para magnitudes inferiores a 5,5, os espectros apenas ultrapassam o espectro do EC8-A.N quando é atingido o pico de acelerações e observa-se o desfasamento entre as várias magnitudes a partir deste ponto, havendo um aumento de acelerações com o aumento de magnitudes.

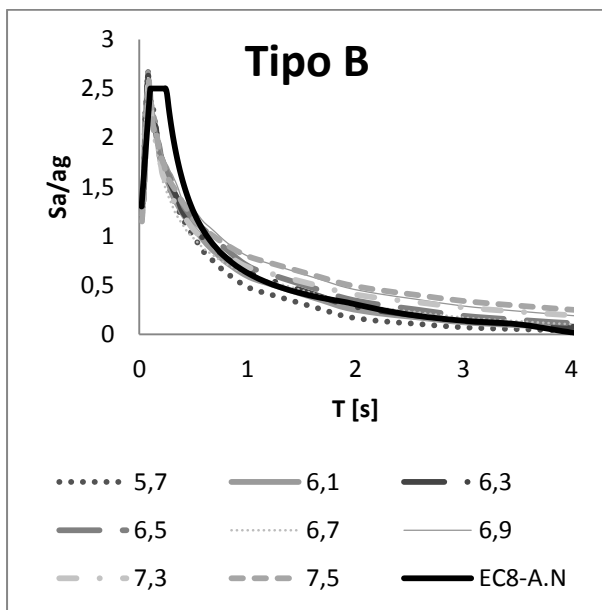
Para as magnitudes superiores a 5,5, os espectros de magnitude 6,3 e 6,5 sobrepõem-se ao espectro de resposta do EC8-A.N para períodos superiores a 1s.



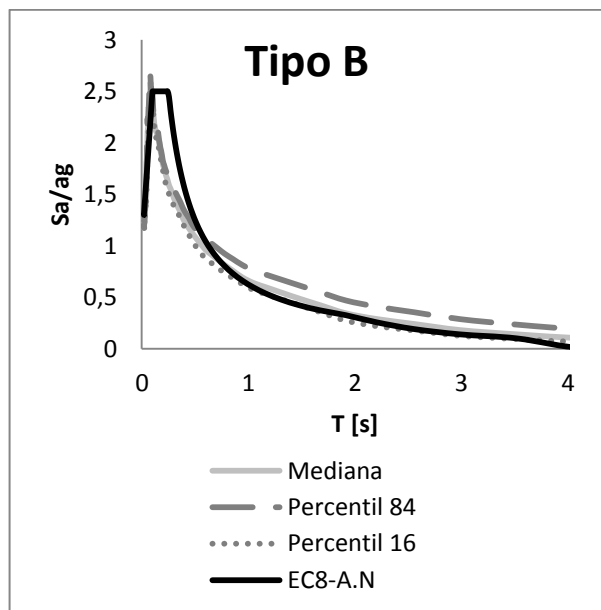
**Figura 65 – Comparação dos espectros de resposta determinados com ações sísmicas com magnitudes inferiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo B e ação sísmica tipo 2**



**Figura 66 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com ações sísmicas com magnitudes inferiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo B e ação sísmica tipo 2**

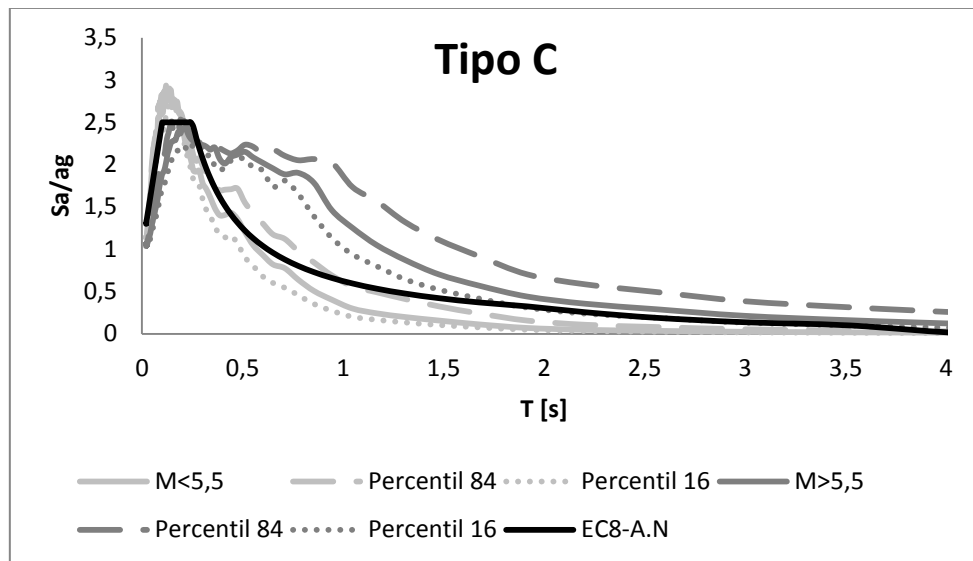


**Figura 67 – Comparação dos espectros de resposta determinados com ações sísmicas com magnitudes superiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo B e ação sísmica tipo 2**



**Figura 68 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com ações sísmicas com magnitudes superiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo B e ação sísmica tipo 2**

### 4.5.3 Solo Tipo C



**Figura 69 – Comparação dos espectros de resposta em análise com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo C e ação sísmica do tipo 2**

Relativamente ao solo do tipo C, pela Figura 69 é possível observar a irregularidade nas formas dos espectros de resposta determinados.

A Figura 70 e a Figura 71 mostram os espectros de resposta para magnitudes inferiores a 5,5 e onde se observa que existe um pico de acelerações espectrais para baixos valores de período. A partir deste ponto, a forma dos espectros de resposta determinados encontra-se maioritariamente abaixo do espectro do EC8-A.N.

Pela Figura 72 e Figura 73, observa-se a irregularidade da forma dos espectros. Para as menores magnitudes (5,7 e 6,1), os espectros de resposta sobrepõem-se ao espectro do EC8-A.N para valores de período a partir de 1,5s. Os espectros de magnitudes mais elevadas encontram-se acima do espectro do EC8-A.N.

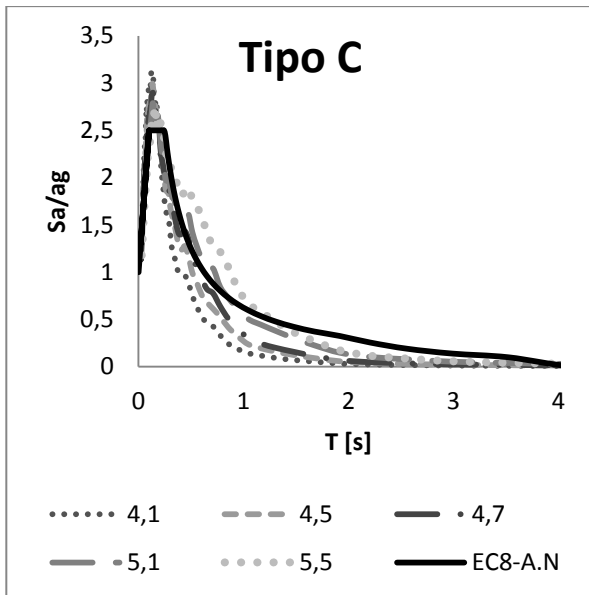


Figura 70 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo C e acção sísmica tipo 2

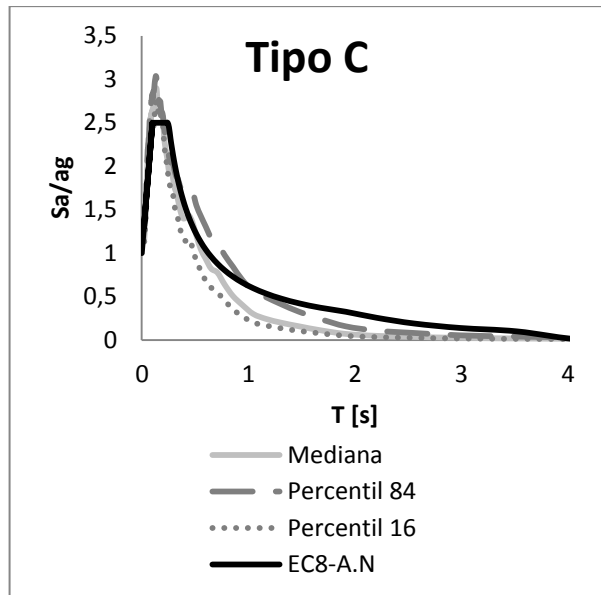


Figura 71 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo C e acção sísmica tipo 2

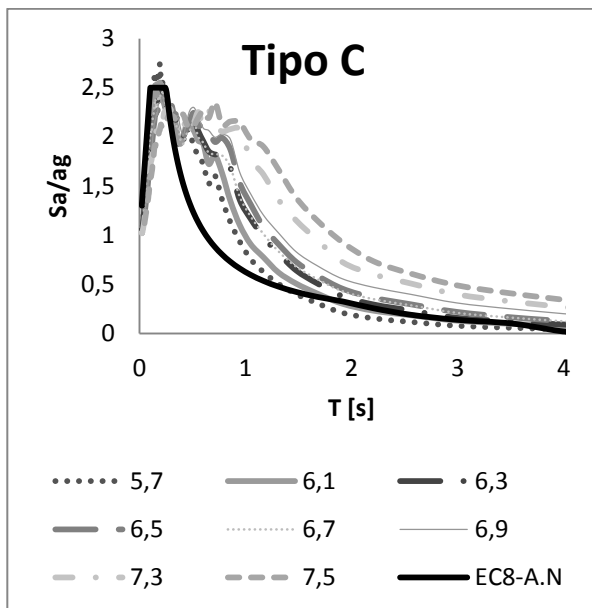


Figura 72 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo C e acção sísmica tipo 2

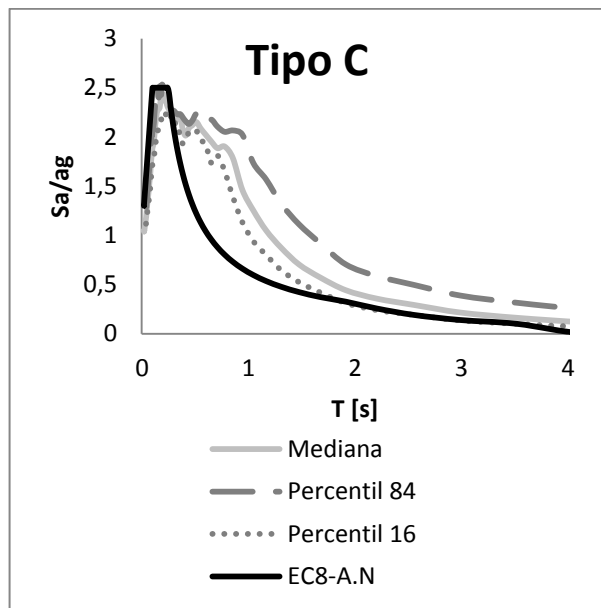
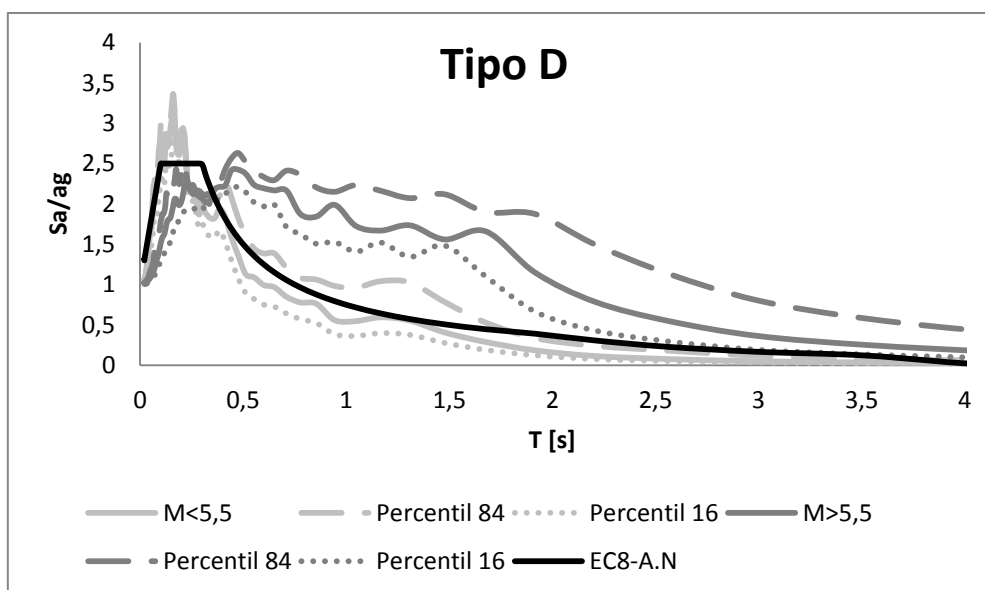


Figura 73 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo C e acção sísmica tipo 2

#### 4.5.4 Solo Tipo D

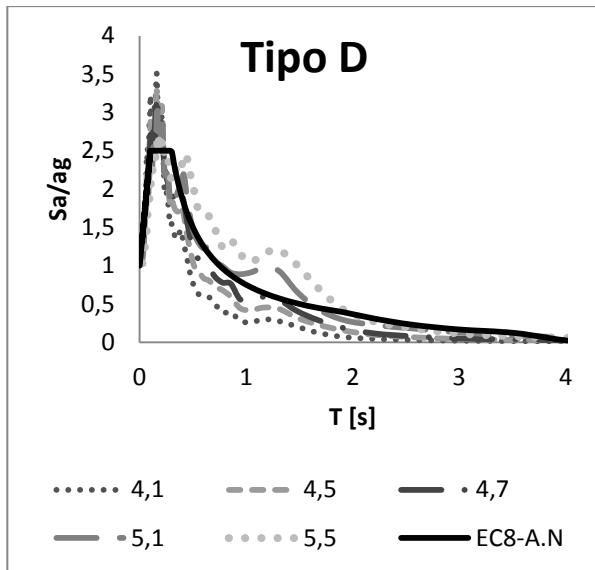


**Figura 74 – Comparação dos espectros de resposta em análise com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo D e acção sísmica do tipo 2**

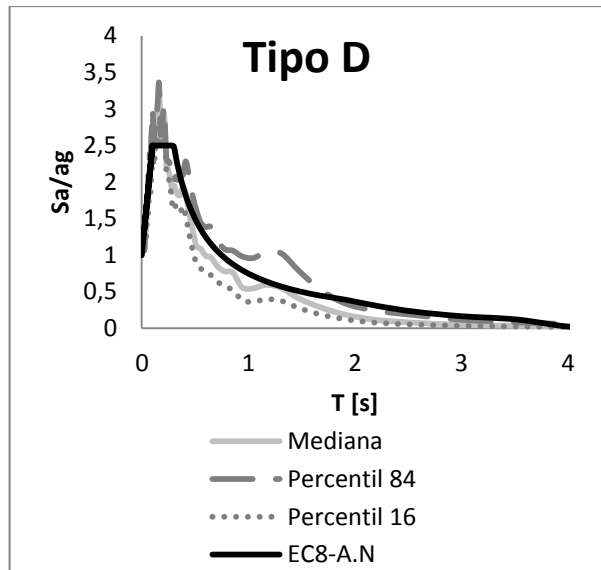
Para os solos do tipo D, o único tipo para o qual a forma do espectro do EC8-A.N difere dos outros, observa-se, pela Figura 74, a aproximação dos espectros de resposta para magnitudes inferiores a 5,5 relativamente a este. Os espectros de resposta para magnitudes superiores a 5,5 apresentam uma forma irregular e encontram-se maioritariamente acima do espectro de resposta do EC8-A.N.

Para o conjunto de magnitudes mais baixa (Figura 75 e Figura 76), existe um pico de acelerações espectrais cujo valor ultrapassa os valores dos espectros de resposta do EC8-A.N. A partir deste valor, os espectros de resposta determinados sobrepõem-se ao espectro do EC8-A.N.

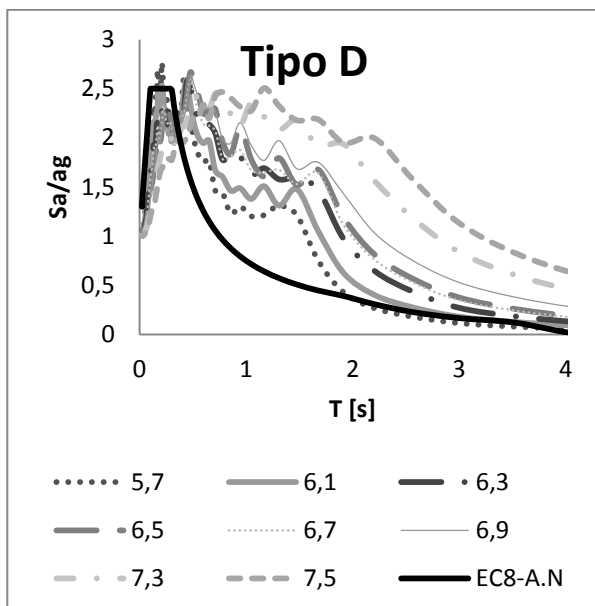
Relativamente ao conjunto de magnitudes superiores a 5,5 (Figura 77 e Figura 78), os valores médios de aceleração espectral não ultrapassam os valores do espectro do EC8-A.N para baixos períodos. No entanto, a partir de 0,5s, os espectros de resposta determinados com as magnitudes mais elevadas encontram-se sempre acima do espectro de resposta do EC8-A.N. Os espectros de respostas de magnitude mais baixas deste conjunto, 5,7 e 6,1, sobrepõem-se ao espectro do EC8-A.N a partir de 2s.



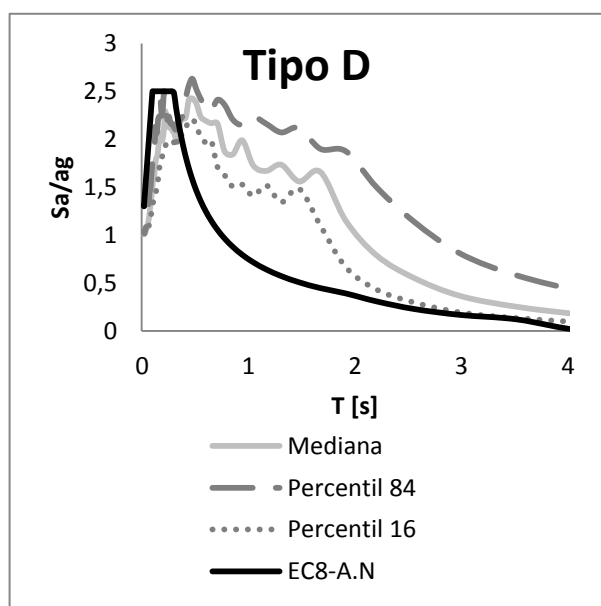
**Figura 75 – Comparação dos espectros de resposta determinados com ações sísmicas com magnitudes inferiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo D e ação sísmica tipo 2**



**Figura 76 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com ações sísmicas com magnitudes inferiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo D e ação sísmica tipo 2**

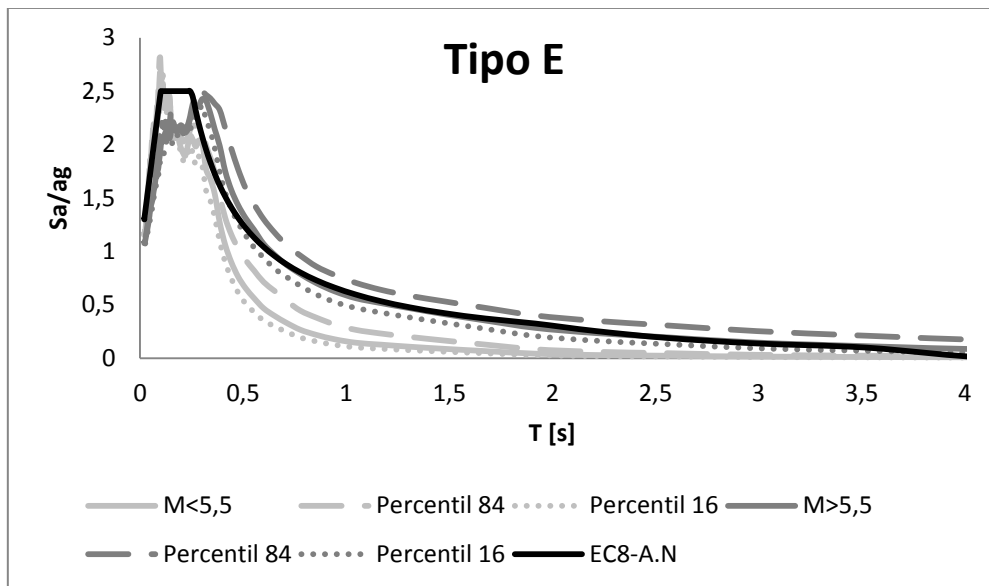


**Figura 77 – Comparação dos espectros de resposta determinados com ações sísmicas com magnitudes superiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo D e ação sísmica tipo 2**



**Figura 78 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com ações sísmicas com magnitudes superiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo D e ação sísmica tipo 2**

#### 4.5.5 Solo Tipo E



**Figura 79 – Comparação dos espectros de resposta em análise com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo E e ação sísmica do tipo 2**

A Figura 79 mostra que para os solos do tipo E existem dois picos de acelerações para os primeiros 0,5s. A partir do segundo pico, os espectros de resposta para magnitudes inferiores a 5,5 encontram-se sempre abaixo do espectro de resposta do EC8-A.N. Para magnitudes mais elevadas, a mediana dos espectros para estas magnitudes coincide com o espectro de resposta do EC8-A.N.

Para o conjunto de magnitudes mais baixas (Figura 80 e Figura 81), os espectros de resposta atingem um pico de acelerações espectrais mais elevado e outro mais baixo. De um modo geral, os espectros de resposta determinados encontram-se abaixo do espectro de resposta do EC8-A.N.

Para magnitudes superiores a 5,5 (Figura 82 e Figura 83), a forma dos espectros de resposta determinados sobrepõe-se à forma do espectro de resposta do EC8-A.N.

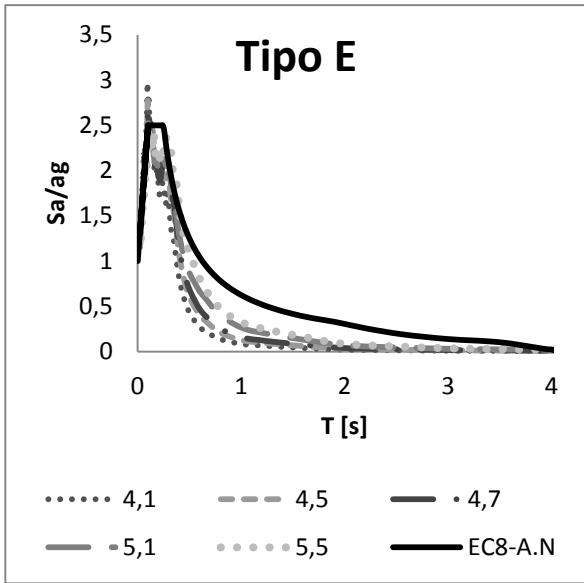


Figura 80 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo E e acção sísmica tipo 2

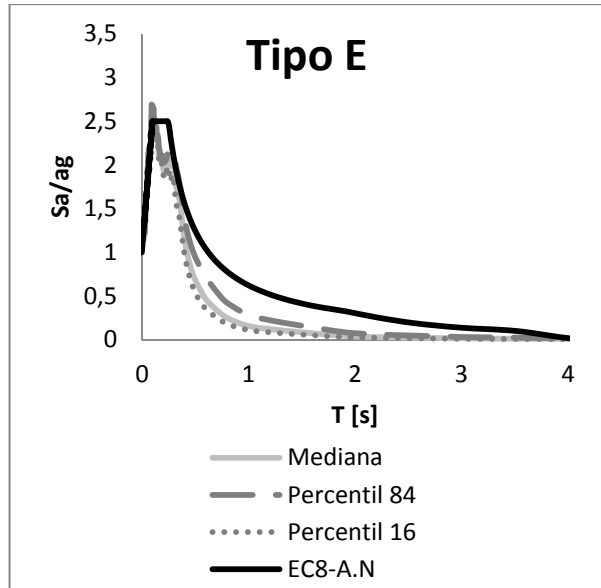


Figura 81 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes inferiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo E e acção sísmica tipo 2

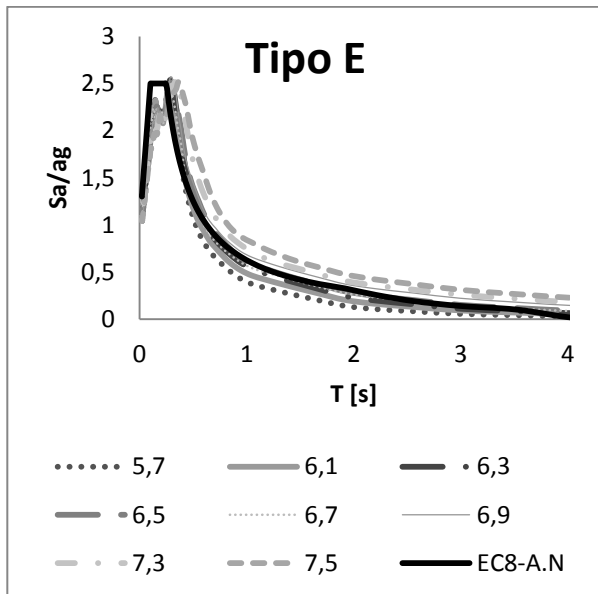


Figura 82 – Comparação dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo E e acção sísmica tipo 2

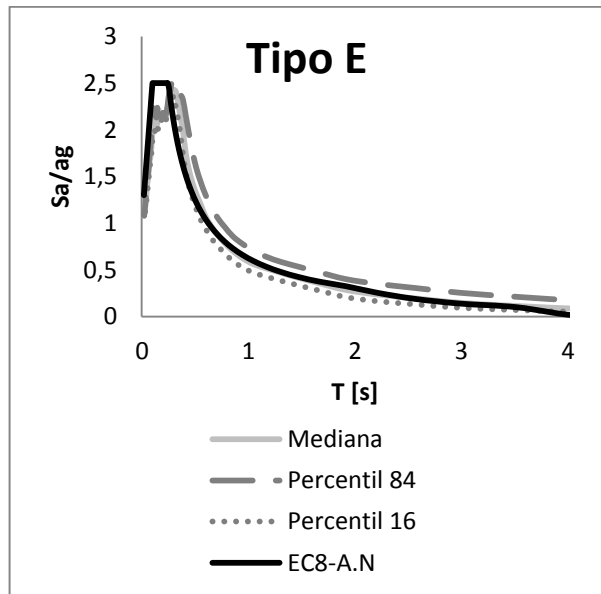


Figura 83 – Comparação da mediana, percentil 84 e percentil 16 dos espectros de resposta determinados com acções sísmicas com magnitudes superiores a 5,5 com o espectro de resposta do EC8-A.N para solo do tipo E e acção sísmica tipo 2

## 5 Conclusões

Com o presente trabalho pretendeu-se caracterizar a resposta sísmica local em duas zonas de importante interesse sísmico de Portugal Continental: Algarve e região de Lisboa.

Para tal, procedeu-se à classificação de perfis de terreno através de duas classificações distintas, a apresentada pelo EC8 e uma outra proposta por *Pitilakis et al.* (2013) recorrendo a dados obtidos anteriormente no âmbito de dois projectos nacionais. Segundo os resultados obtidos, as diferenças entre as duas classificações são pouco significativas. No entanto, o novo sistema de classificação proposto por *Pitilakis et al.* (2013) é mais detalhado, no sentido geotécnico uma vez que introduz novos parâmetros primários não considerados no sistema classificativo do EC8.

Na segunda parte deste trabalho apresentam-se os espectros de resposta elástica calculados para cada perfil de estudo obtidos pela introdução de uma acção base. A acção na base é compatível com os 2 cenários sísmicos definidos no Anexo Nacional do Eurocódigo 8. Pelos resultados obtidos por esta análise conclui-se que o efeito da magnitude dos sismos faz variar a forma dos espectros, sendo por isso importante a sua consideração nos espectros de referência do EC8-A.N.

De um modo geral, pode-se afirmar que a maioria dos espectros de resposta obtidos respeitam os parâmetros dos espectros de resposta do EC8-A.N. No entanto, o tipo C e o tipo D de ambos os cenários sísmicos ultrapassam ou sobrepõem-se ao espectro de resposta do EC8-A.N. Como este é um espectro de resposta de referência, demonstra que alguns parâmetros, como o valor de TC, deveriam ser reavaliados no sentido de alargar a forma do espectro para períodos longos.

## 6 Referências Bibliográficas

- Campos Costa, A. S. (2004). *Simulador de cenários sísmicos integrado num sistema de informação geográfica*. EN 1998-1. (2010). Eurocódigo 8 - Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios.
- Cansado Carvalho, E. C., Campos Costa, A., Sousa, M. L., & Martins, A. (2002). *Caracterização, Vulnerabilidade e Estabelecimento de Danos para o Planeamento de Emergência sobre o Risco Sísmico na Área Metropolitana de Lisboa e nos Municípios de Benavente, Salvaterra de Magos, Cartaxo, Alenquer, Sobral de Monte Agraço, Arruda dos Vin.* LNEC: Relatório 280/02 G3ES Proc. 037/1/13810.
- Carvalho, A. (2007). *Modelação estocástica da acção sísmica em Portugal Continental*. Lisboa: Tese para obtenção de grau de doutoramento no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.
- Darendeli, M. (2001). *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves*. Dissertation of the degree of Doctor of philosophy in the University of Texas at Austin.
- EN 1998-1. (2010). Eurocódigo 8 - Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios.
- ERSTA. (2008). *Estudo do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve, Relatório 295/2008*. Lisboa: LNEC.
- Estêvão, J. M., Silva, E., & Silva, J. (2007). *Avaliação da resposta sísmica de edifícios sitos em solos brandos estratificados*. 7º Congresso de sismologia e engenharia sísmica.
- Gomes, R. (2009). *Modelação numérica da resposta sísmica do terreno e de túneis circulares*. Lisboa: Tese para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.
- Guerreiro, L. (2011). *Acção sísmica*. Engenharia sísmica de pontes, Instituto Superior Técnico.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, Inc.
- Pitilakis, K. R. (2013). *New code site classification, amplification factors and normalized response spectra based on a worldwide ground-motion database*. Springer .
- Teixeira Duarte, R., & Vale e Azevedo, Á. (1992). *Métodos de análise, curso sobre estruturas de betão armado sujeitas às acções dos sismos*.

## **Anexos**

## Anexo A1 – Dados Algarve

Perfil	y [m]	$V_{s,med}$ [m/s]	Litologia	$\rho$ [ton/m <sup>3</sup> ]	IP [%]
4	0	136	aluvião	1,6	40
	13,1	800	rocha	2,2	0
5	0	209	argila	1,7	40
	12	800	rocha	2,2	0
7	0	155	aluvião	1,6	40
	26,5	800	rocha	2,2	0
14	0	166	argila	1,7	40
	6,2	1670	rocha	2,2	0
17	0	223	argila	1,7	40
	27,5	402	aluvião	1,6	40
	50,5	800	rocha	2,2	0
20	0	189	argila	1,7	40
	9	800	rocha	2,2	0
22	0	223	areia argilosa	1,9	10
	11,7	1670	rocha	2,2	0
25	0	165	argila	1,7	40
	4	1670	rocha	2,2	0
27	0	218	argila	1,7	40
	15	256	argila	1,7	40
	34	1670	rocha	2,2	0
31	0	227	argila	1,7	40
	19	1670	rocha	2,2	0
32	0	180	argila	1,7	40
	5	1670	rocha	2,2	0
33	0	158	argila	1,7	40
	1,9	1670	rocha	2,2	0
36	0	162	argila	1,7	40
	2,5	800	rocha	2,2	0
37	0	155	argila	1,7	40
	2	1670	rocha	2,2	0
38	0	322	argila	1,7	40
	72	1670	rocha	2,2	0
39	0	209	argila	1,7	40
	12	1670	rocha	2,2	0
40	0	265	argila	1,7	40
	30	1670	rocha	2,2	0
41	0	166	argila	1,7	40
	2	1670	rocha	2,2	0
42	0	233	argila	1,7	40
	15	1670	rocha	2,2	0

44	0	155	argila	1,7	40
	2	1670	rocha	2,2	0
45	0	285	argila	1,7	40
	44,15	1670	rocha	2,2	0
46	0	233	argila	1,7	40
	15	1670	rocha	2,2	0
53	0	115	aluvião	1,6	40
	7	242	areia	1,8	0
	20,7	1670	rocha	2,2	0
54	0	242	argila	1,7	40
	26,77	1670	rocha	2,2	0
55	0	179	argila	1,7	40
	9,6	1670	rocha	2,2	0
56	0	121	aluvião	1,6	40
	9,4	1670	rocha	2,2	0
57	0	140	aluvião	1,6	40
	10,7	1670	rocha	2,2	0
58	0	127	aluvião	1,6	40
	12,2	223	argila	1,7	40
	26,3	1670	rocha	2,2	0
59	0	185	areia	1,8	0
	10	800	rocha	2,2	0
61	0	213	argila	1,7	40
	9	1670	rocha	2,2	0
63	0	109	aluvião	1,6	40
	5	1670	rocha	2,2	0
64	0	233	areia	1,8	0
	18,1	1670	rocha	2,2	0
65	0	249	areia	1,8	0
	16,2	1670	rocha	2,2	0
66	0	192	argila	1,7	40
	6	1670	rocha	2,2	0
67	0	166	aluvião	1,6	40
	18,66	1670	rocha	2,2	0
68	0	185	areia	1,8	0
	16,5	800	rocha	2,2	0
69	0	258	areia	1,8	0
	24,2	800	rocha	2,2	0
70	0	211	argila	1,7	40
	10,2	1670	rocha	2,2	0
71	0	187	argila	1,7	40
	5	1670	rocha	2,2	0
72	0	242	argila	1,7	40
	18,4	2100	rocha	2,2	0

78	0	222	argila	1,7	40
	10	1670	rocha	2,2	0
80	0	229	argila	1,7	40
	13,5	800	rocha	2,2	0
81	0	226	argila	1,7	40
	14,8	800	rocha	2,2	0
83	0	223	argila	1,7	40
	14	1670	rocha	2,2	0
89	0	377	areia	1,8	0
	120	1670	rocha	2,2	0
91	0	267	argila	1,7	40
	31,35	1670	rocha	2,2	0
92	0	275	areia	1,8	0
	14,65	1670	rocha	2,2	0
93	0	187	argila	1,7	40
	5	1670	rocha	2,2	0
94	0	340	argila	1,7	40
	108	1670	rocha	2,2	0
95	0	273	areia argilosa	1,9	10
	35	1670	rocha	2,2	0
96	0	263	areia	1,8	0
	18,6	1670	rocha	2,2	0
99	0	254	areia argilosa	1,9	10
	24	1670	rocha	2,2	0
100	0	270	areia argilosa	1,9	10
	38,5	800	rocha	2,2	0
101	0	256	argila	1,7	40
	25	800	rocha	2,2	0
102	0	283	areia argilosa	1,9	10
	42	800	rocha	2,2	0
104	0	213	areia argilosa	1,9	10
	9	800	rocha	2,2	0
106	0	256	areia argilosa	1,9	10
	25	800	rocha	2,2	0
107	0	237	areia argilosa	1,9	10
	16,25	800	rocha	2,2	0
109	0	236	areia	1,8	0
	15	800	rocha	2,2	0
110	0	274	argila	1,7	40
	36	800	rocha	2,2	0
111	0	197	areia argilosa	1,9	10
	8,5	800	rocha	2,2	0
114	0	277	areia argilosa	1,9	10
	37,75	800	rocha	2,2	0

117	0	248	areia argilosa	1,9	10
	25	800	rocha	2,2	0
120	0	316	areia argilosa	1,9	10
	75	1670	rocha	2,2	0
122	0	283	areia argilosa	1,9	10
	42	1670	rocha	2,2	0
123	0	144	areia argilosa	1,9	10
	1	1670	rocha	2,2	0
124	0	289	areia argilosa	1,9	10
	47	1670	rocha	2,2	0
126	0	362	areia argilosa	1,9	10
	149,2	1670	rocha	2,2	0
127	0	174	argila	1,7	40
	2,55	800	rocha	2,2	0
129	0	304	areia argilosa	1,9	10
	61,5	800	rocha	2,2	0
131	0	262	areia argilosa	1,9	10
	27,95	800	rocha	2,2	0
132	0	155	argila	1,7	40
	2	800	rocha	2,2	0
133	0	274	areia argilosa	1,9	10
	36	800	rocha	2,2	0
137	0	180	argila	1,7	40
	5	1670	rocha	2,2	0
139	0	195	argila	1,7	40
	8	1670	rocha	2,2	0
140	0	250	areia argilosa	1,9	10
	26	1670	rocha	2,2	0
143	0	271	areia argilosa	1,9	10
	48	1670	rocha	2,2	0
144	0	326	areia argilosa	1,9	10
	68	1670	rocha	2,2	0
148	0	197	argila	1,7	40
	7	1670	rocha	2,2	0
149	0	195	argila	1,7	40
	8	1670	rocha	2,2	0
151	0	162	argila	1,7	40
	2,5	1670	rocha	2,2	0
153	0	176	argila	1,7	40
	3,4	1670	rocha	2,2	0
154	0	246	argila	1,7	40
	20	1670	rocha	2,2	0
155	0	180	argila	1,7	40
	5	1670	rocha	2,2	0

156	0	254	argila	1,7	40
	23,75	1670	rocha	2,2	0
157	0	198	areia	1,8	0
	5,34	1670	rocha	2,2	0
158	0	192	argila	1,7	40
	6	291	areia argilosa	1,9	10
	54,6	1670	rocha	2,2	0
159	0	161	argila	1,7	40
	2	800	rocha	2,2	0
160	0	237	argila	1,7	40
	19,57	800	rocha	2,2	0
161	0	217	argila	1,7	40
	12	800	rocha	2,2	0
162	0	278	areia argilosa	1,9	10
	38,67	800	rocha	2,2	0
163	0	305	areia argilosa	1,9	10
	62	800	rocha	2,2	0
164	0	299	areia argilosa	1,9	10
	56	800	rocha	2,2	0
165	0	335	areia argilosa	1,9	10
	78	800	rocha	2,2	0
166	0	308	areia argilosa	1,9	10
	65,5	800	rocha	2,2	0
167	0	86	aluvião	1,6	40
	3	325	areia	1,8	0
	83	800	rocha	2,2	0
168	0	319	areia	1,8	0
	60	800	rocha	2,2	0
169	0	281	areia argilosa	1,9	10
	47,55	800	rocha	2,2	0
170	0	321	areia argilosa	1,9	10
	71	800	rocha	2,2	0
171	0	180	argila	1,7	40
	4	800	rocha	2,2	0
172	0	187	argila	1,7	40
	5	800	rocha	2,2	0
176	0	185	argila	1,7	40
	6	1670	rocha	2,2	0
177	0	236	areia argilosa	1,9	10
	19	1670	rocha	2,2	0
180	0	94	aluvião	1,6	40
	10,5	2100	rocha	2,2	0
181	0	106	argila	1,7	40
	1	800	rocha	2,2	0

182	0	181	argila	1,7	40
	2	800	rocha	2,2	0
183	0	148	areia	1,8	0
	4,5	103	areia	1,8	0
	7	800	rocha	2,2	0
184	0	143	aluvião	1,6	40
	12	181	areia	1,8	0
	15	800	rocha	2,2	0
185	0	151	argila	1,7	40
	1,5	800	rocha	2,2	0
186	0	115	aluvião	1,6	40
	8,5	2100	rocha	2,2	0
187	0	192	areia argilosa	1,9	10
	6	185	areia argilosa	1,9	10
	12	800	rocha	2,2	0
188	0	170	argila	1,7	40
	3,5	800	rocha	2,2	0
189	0	105	aluvião	1,6	40
	4	800	rocha	2,2	0
190	0	170	argila	1,7	40
	3	800	rocha	2,2	0
191	0	173	argila	1,7	40
	4	800	rocha	2,2	0
194	0	206	argila	1,7	40
	9	2100	rocha	2,2	0
196	0	207	areia argilosa	1,9	10
	6,5	800	rocha	2,2	0
197	0	177	argila	1,7	40
	3,5	800	rocha	2,2	0
198	0	182	argila	1,7	40
	1,5	800	rocha	2,2	0
199	0	93	aluvião	1,6	40
	10	800	rocha	2,2	0
200	0	156	argila	1,7	40
	1,5	800	rocha	2,2	0
201	0	176	areia	1,8	0
	3,5	800	rocha	2,2	0
202	0	91	aluvião	1,6	40
	8,5	800	rocha	2,2	0
203	0	140	argila	1,7	40
	4,5	800	rocha	2,2	0
205	0	192	aluvião	1,6	40
	1	2100	rocha	2,2	0
209	0	210	argila	1,7	40
	5	800	rocha	2,2	0

214	0	182	areia argilosa	1,9	10
	2,8	800	rocha	2,2	0
215	0	189	areia	1,8	0
	5,5	800	rocha	2,2	0
218	0	176	argila	1,7	40
	6	800	rocha	2,2	0
222	0	93	aluvião	1,6	40
	10	176	areia	1,8	0
	13,5	800	rocha	2,2	0
224	0	162	areia argilosa	1,9	10
	2,5	800	rocha	2,2	0
227	0	166	argila	1,7	40
	2	800	rocha	2,2	0
232	0	120	aluvião	1,6	40
	11	800	rocha	2,2	0
237	0	173	argila	1,7	40
	4	800	rocha	2,2	0

## Anexo A2 – Dados Lisboa

Perfil	y [m]	$\rho$ [ton/m <sup>3</sup> ]	$V_{s,med}$ [m/s]	$n_{camadas}$	IP [%]
B	0	1,8	327	4	0
	3,5	2,2	1000	0	0
C	0	2,0	197,0	4	40
	3,5	1,9	167,4	6	21
D	8,9	2,0	600,0	0	0
	0	1,8	111,0	4	40
	4,5	1,8	231,0	5	40
	10	1,8	249,0	6	0
	16	2,2	1000,0	0	0
E	0	1,8	265	5	40
	4,5	1,6	137	7	50
	11,5	1,8	223	3	40
	15	1,8	172	2	0
	20	1,8	253,0	6	20
	26	2	600	0	0
F	0	1,8	232	13	30
	13	2	360	15	0
	28,5	2,2	1000	0	0
G	0	1,8	236,5	18	4
	18,4	2,4	1000	0	0
H	0	1,8	212,3	5	30
	4,5	1,9	314,7	9	40
	13,5	2	287	5	30
	19,1	2,2	1000	0	0
I	0	1,8	292	8	0
	8,4	1,6	158	4	50
	12,6	2,2	1000	0	0
J	0	1,8	240,6	20	30
	20	1,8	170	18	50
	38	1,8	147	7	30
	45	2,2	1000	0	0
K	0	1,6	197	7	30
	7	1,6	175	7	0
	14	1,6	142	6	50
	20	2	204	20	30
	40	2,2	254	14	0
	54	2	600	0	0
L	0	1,8	222	3	0
	3,5	1,8	356	2	30
	6,5	1,8	184	5	0
	11,4	1,6	117	1	30
	13,8	2,4	1500	0	0

M	0	1,8	242	6	0
	6,4	2,0	336,0	10	0
	16,4	2	1000	0	0
N	0	1,6	155	7	50
	6,8	1,8	290,4	3	40
	14,2	1,8	282,8	9	47
	23,7	2	600	0	0
O	0	1,8	196	4	0
	3,8	1,8	150	3	40
	6,9	1,8	269,4	11	31
	17,6	1,8	267	12	0
	29,6	1,8	229,9	19	34
	49,1	2	600	0	0
P	0	1,8	266	7	0
	7,5	1,8	232	26	40
	34,5	2,0	263,1	6	32
	41,5	2	600	0	0
Q	0	1,8	248	7	40
	7,5	1,8	210	11	0
	18,5	2,2	1000	0	0
S	0	2	136	3	0
	3	1,6	135	3	40
	7,5	2,2	250	13	30
	20,5	2	600	0	0
T	0	1,7	188,1	16	30
	16	1,8	224	7	0
	23	1,6	141	9	50
	32	1,8	185,1	25	30
	57	2	600	0	0
U	0	1,8	188	13	30
	13,1	1,9	268,7	10	32
	23,3	2	600	0	0
V	0	1,8	310	2	0
	2	1,6	148	21	30
	23	1,8	159,7	15	39
	37,8	1,9	183,4	5	0
	42,8	2,2	1000	0	0
W	0	1,8	216,3	15	41
	15,1	1,8	201,6	18	32
	33,4	2,4	1500	0	0
X	0	1,8	187,6	8	40
	8,8	1,9	265,4	7	30
	15,9	2	600	0	0

Y	0	1,8	179	4	0
	4	1,6	102	2	50
	6	1,8	225	6	30
	12	1,8	307,9	7	30
	19	2	600	0	0
Z	0	1,6	102	6	50
	5,5	1,8	155	2	0
	7,5	1,8	135,3	21	31
	15,2	2,2	1000	0	0
AA	0	1,6	159,0	27	50
	27	2,2	1000	0	0
AB	0	1,8	221	3	0
	2,7	1,8	296	2	40
	4,2	2,2	1000	0	0
AC	0	1,8	188	15	0
	15	1,8	159	6	50
	22,7	2,2	1000	0	0
AD	0	1,8	158,0	7	0
	7	2	600	0	0
AE	0	1,6	173	4	30
	4,5	1,6	122	44	50
	15,7	1,8	188	26	30
	42	1,8	188,3	19	34
	61,5	2	600	0	0
AF	0	1,8	254	7	0
	6,8	1,8	202,8	6	34
	13,2	1,6	160,1	7	38
	20	1,6	154	6	40
	29	2	600	0	0
AG	0	1,7	177,6	19	30
	19	2	600	0	0
AH	0	1,8	288	6	30
	6,4	2,2	1000	0	0
AI	0	1,8	292	3	0
	3,1	1,7	170,1	18	40
	21,1	1,6	144	3	50
	24,1	2,2	1000	0	0
AJ	0	1,7	138	2	0
	2	1,8	172	4	40
	6	1,8	173	2	0
	8	2	600	0	0
AK	0	2	224	6	30
	5,5	2,1	203,0	12	30
	20	2	600	0	0

AL	0	1,6	120	25	30
	30	1,8	243	15	20
	50	2,4	1000	0	0
AM	0	1,6	120	30	30
	35	1,8	278	10	0
	50	2,4	1000	0	0
AN	0	1,6	80	20	30
	28	1,8	295	5	20
	35	1,8	304	25	0
	68	2,4	1000	0	0