

**Leis de Atenuação Sísmica para Portugal Continental
considerando o tipo de terreno**

José Manuel Mendonça Rodrigues

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil

Engenharia Civil

Orientadores: Professor Rui Pedro Carrilho Gomes e Doutora Alexandra Maria
Rodrigues de Carvalho

Júri

Presidente: Professor Jaime Alberto dos Santos

Orientador: Doutora Alexandra Maria Rodrigues de Carvalho

Vogais: Doutor António Santos Carvalho Cabral Araújo Correia
Professor Mário Manuel Paisana dos Santos Lopes

Outubro de 2015

Agradecimentos

Os agradecimentos são dirigidos ao Instituto Superior Técnico, pela possibilidade da elaboração deste projeto.

Ao Professor Rui Gomes, orientador científico, e à Doutora Alexandra Carvalho, co-orientadora científica, por todo o apoio, sabedoria e disponibilidade.

À minha colega de curso e de projeto, Rita Delfim, por toda a troca de informação e cooperação.

A toda a família, amigos e à Mónica por simplesmente estarem presentes.

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo a obtenção de equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo (leis de atenuação sísmica) para Portugal Continental, para os diferentes tipos de terreno considerados no Eurocódigo 8.

As ações sísmicas ao nível do terreno são geralmente estimadas usando fórmulas empíricas, denominadas leis de atenuação sísmica ou equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo, em função de variáveis como a magnitude, distância e um conjunto de características que definem a fonte em análise. As equações de previsão empíricas são, geralmente, deduzidas a partir de registos de eventos passados de zonas de grande sismicidade.

Contudo, o catálogo sísmico referente às séries registadas para Portugal Continental não traduz, de uma forma exaustiva, a sismicidade da região. Além disso, a base de dados portuguesa não contempla registos em número suficiente, quer em magnitude ou distância de interesse para a Engenharia Civil. Deste modo, a sua obtenção deverá ser baseada em modelos teóricos, de forma a obter séries simuladas associadas a um dado cenário sísmico. No caso em estudo, as séries previamente foram geradas através de um programa de modelação estocástica de falha finita, desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

O número reduzido de equações de previsão existentes adequadamente ajustadas à sismicidade de Portugal Continental e a necessidade de rever a definição da ação sísmica do Anexo Nacional do Eurocódigo 8 num futuro próximo motivaram a realização deste trabalho.

Foram compilados perfis geotécnicos da área metropolitana de Lisboa e da região algarvia, tendo sido posteriormente classificados de acordo com os tipos de terreno definidos no Eurocódigo 8. A propagação das ações sísmicas no terreno acima do substrato rochoso foi simulada pela via estocástica do método linear equivalente.

Para todos os perfis geotécnicos considerou-se a ação já existente ao nível do topo do substrato rochoso, que foi propagada até à superfície através do respetivo perfil. Tais simulações permitiram criar uma base de dados sintética, em função da magnitude e frequência do sismo, distância hipocentral, tipo de terreno e valor de aceleração à superfície.

Por fim, as equações de previsão foram obtidas através de regressões multi-lineares aos dados de acordo com a expressão: $\log_{10} SA = c_1 + c_2 M + c_3 M^2 + c_4 \log_{10} R + c_5 R \pm \sigma_\varepsilon + f(S)$, em que SA representa a aceleração espectral, M a magnitude, R a distância hipocentral, c os coeficientes de ajustamento, σ_ε está associado à incerteza e $f(S)$ tem em conta a propagação da ação sísmica no terreno acima do substrato rochoso.

Palavras-chave: método linear equivalente, leis de atenuação sísmica, equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo, efeitos de sítio

Abstract

In this work ground motion prediction equations (GMPEs) are derived for Mainland Portugal, considering the different soil typologies defined in Eurocode 8.

Ground motion amplitude is usually estimated using empirical equations, with variables such as magnitude, distance and a set of characteristics that define the tectonic environment. These equations are, usually, estimated from past events in high seismicity areas.

However, the completeness of the Portuguese seismic catalogue is questionable since the recorded events do not reproduce, in a full scale, the seismicity history. In addition, the magnitude or distance ranges of the recorded time histories do not cover the range of interest for civil engineering applications. GMPEs have to be derived from theoretical models, which are used to derive simulated response spectra for a certain seismic scenario. In this project, these simulated response spectra have already been obtained through a finite-fault stochastic model, developed at the *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*.

The reduced number of GMPEs for Mainland Portugal, adjusted to their seismicity, and the revision of the seismic definition in the Portuguese National Annex to Eurocode 8 in a near future have motivated the development of this work.

Borehole data from Metropolitan Area of Lisbon and the Algarve region were gathered and classified according to the Eurocode 8's ground types. Seismic wave propagation above the bedrock was modelled by the stochastic linear equivalent model.

All ground profiles were subjected to a seismic wave at bedrock. These simulations created a database of seismic response at surface for different magnitudes and frequencies of the earthquake, hypocentral distance and ground type.

Finally, GMPEs were obtained through multi-linear regression to the data using the expression: $\log_{10} SA = c_1 + c_2 M + c_3 M^2 + c_4 \log_{10} R + c_5 R \pm \sigma_\varepsilon + f(S)$ in which SA represents the spectral acceleration, M the magnitude, R the hypocentral distance, c the regression coefficients, σ_ε the dispersion of the data and $f(S)$ characterizes the seismic wave propagation through the ground above the bedrock.

Key-words: linear equivalent model, ground motion prediction equations, local site effects

Índice

1)	Introdução.....	1
1.1)	Enquadramento geral.....	1
1.2)	Objetivos e metodologia.....	2
1.3)	Organização da dissertação.....	3
2)	Movimento sísmico.....	5
2.1)	Fonte sísmica.....	5
2.2)	Registos sísmicos.....	6
2.3)	Formulação da equação de previsão da amplitude dos movimentos do solo.....	8
2.4)	Metodologia de falha-finita e modelo pontual estocástico.....	10
2.5)	Regulamentação sísmo-resistente existente.....	12
3)	Simulação numérica dos efeitos de sítio.....	15
3.1)	Comportamento do solo sob solicitação sísmica.....	16
3.1.1)	Curvas propostas por Ishibashi e Zhang.....	18
3.1.2)	Curvas propostas por Darendeli.....	20
3.2)	Propagação unidimensional da onda sísmica.....	22
3.2.1)	Propagação de ondas de corte com polarização horizontal.....	22
3.2.2)	Equação geral.....	24
3.3)	Lei constitutiva visco-elástica.....	25
3.4)	Método da resposta complexa.....	26
3.5)	Método linear equivalente.....	30
3.5.1)	Via determinística.....	30
3.5.2)	Via estocástica.....	31
4)	Análise e tratamento de dados.....	35
4.1)	Análise das sondagens.....	35
4.2)	Definição de parâmetros geotécnicos.....	37
4.2.1)	Curvas de degradação do módulo de distorção normalizado e do coeficiente de amortecimento em função da distorção.....	37
4.2.1.1)	Efeito da granulometria do solo.....	37
4.2.1.2)	Efeito da tensão média efetiva.....	38

4.2.1.3)	Impacto do grau de sobreconsolidação	40
4.2.1.4)	Efeito do índice de plasticidade.....	41
4.2.1.5)	Efeito da frequência da ação.....	42
4.2.1.6)	Efeito do número de ciclos de carga	42
4.2.1.7)	Curvas dependentes da distorção utilizadas nos cálculos.....	43
4.2.2)	Correlações aplicadas	44
4.3)	Distribuição dos perfis de terreno pelas classes de terreno tipo do Eurocódigo 8	46
4.4)	Análise da ação sísmica ao nível do topo do substrato rochoso	48
4.5)	Aplicação do método linear equivalente.....	48
4.6)	Aplicação de regressões multi-lineares.....	52
4.7)	Limitações da análise efetuada	56
5)	Equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo	57
5.1)	Determinação das equações de previsão	57
5.2)	Comparação com a ação regulamentar do Eurocódigo 8.....	64
6)	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	67
7)	Referências bibliográficas	69
ANEXO A	– Perfis de terreno	A.1
ANEXO B	– Exemplos de código <i>Fortran</i> do programa LNECLoss	B.1
ANEXO C	– Código <i>Fortran</i> para organização da base de dados resultante do programa LNECLoss	C.1
ANEXO D	– Figuras representantes das GMPEs com inclusão do desvio padrão	D.1
ANEXO E	– Comparação entre o espectro de resposta obtido e o regulamentar, definido pelo Eurocódigo 8	E.1

Lista de figuras

Figura 1.1 - Catálogo sísmico apresentado pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera, entre 2014/09/21 e 2014/10/21.....	1
Figura 2.1 - Mecanismo de deformação devido a movimentos tectónicos. Adaptado de Lowrie (2007)	5
Figura 3.1 - Movimentos à superfície registados na Ilha de Yerba Buena e de Treasure durante o sismo de Loma Prieta de 1989: série de acelerações (à esquerda) e espectro de resposta (à direita). Adaptado de Seed <i>et al.</i> (1990)	15
Figura 3.2 - Espectro de resposta de aceleração normalizada para rocha e solo brando. Adaptado de Seed <i>et al.</i> (1976)	16
Figura 3.3 - Aumento da histerese de uma curva tensão tangencial – distorção de um solo. Adaptado de Iwasaki <i>et al.</i> (1978)	17
Figura 3.4 - Histerese de uma curva tensão tangencial – distorção de um solo. Adaptado de Iwasaki <i>et al.</i> (1978)	17
Figura 3.5 - Curvas de dependência do módulo de distorção normalizado e do coeficiente de amortecimento, para $IP = 0$, em função de p' [Ishibashi e Zhang, 1993]	19
Figura 3.6 - Curvas de dependência do módulo de distorção normalizado e do coeficiente de amortecimento, para $p' = 20$ kPa, em função de IP [Ishibashi e Zhang, 1993].....	20
Figura 3.7 - Distorção provocada pela passagem de uma onda de corte (à esquerda). Deslocamentos e tensões aplicados num elemento infinitesimal (à direita). Adaptados de Lowrie (2007)	23
Figura 3.8 – Definição do depósito de solo com estratificação horizontal. Adaptado de Kramer (1996)	27
Figura 3.9 - Ilustração do método linear equivalente. Adaptado de McIntyre (2008)	29
Figura 3.10 - Função de transferência entre afloramento rochoso sem e com depósito de solo suprajacente. Adaptado de Gomes (2009)	29
Figura 3.11 - Distribuição normal de valores máximos de um acelerograma.....	32
Figura 4.1 - Localização das sondagens analisadas na região algarvia [Estevão, 2007]	35
Figura 4.2 - Influência da granulometria do solo nas curvas apresentadas por Darendeli (2001), para $p' = 1$ atm, $OCR = 1$, $f = 3$ Hz e $N = 10$, em todos os solos, e $IP = 0\%$ para as “areias puras” e $IP = 30\%$ para os restantes solos.	37
Figura 4.3 - Variação de p' nas curvas apresentadas por Darendeli (2001), para um solo do tipo “areias puras”, $IP = 0\%$, $OCR = 1$, $f = 3$ Hz e $N = 10$	39
Figura 4.4 - Variação de p' nas curvas apresentadas por Darendeli (2001), para um solo do tipo “areias com finos”, $IP = 10\%$, $OCR = 1$, $f = 3$ Hz e $N = 10$	39

Figura 4.5 - Variação de p' nas curvas por Darendeli (2001), para um solo do tipo argilas, $IP = 60\%$, $OCR = 1$, $f = 3$ Hz e $N = 10$	39
Figura 4.6 - Variação de OCR nas curvas apresentadas por Darendeli (2001), para um solo do tipo "areias com finos", $IP = 10\%$, $p' = 1$ atm, $f = 3$ Hz e $N = 10$	40
Figura 4.7 - Variação de OCR nas curvas apresentadas por Darendeli (2001), para um solo do tipo argilas, $IP = 60\%$, $p' = 1$ atm, $f = 3$ Hz e $N = 10$	40
Figura 4.8 - Variação de IP nas curvas apresentadas por Darendeli (2001), para um solo do tipo "areias com finos", $p' = 1$ atm, $OCR = 1$, $f = 3$ Hz e $N = 10$	41
Figura 4.9 - Variação de IP nas curvas apresentadas por Darendeli (2001), para um solo do tipo argilas, $p' = 1$ atm, $OCR = 1$, $f = 3$ Hz e $N = 10$	41
Figura 4.10 - Variação de f nas curvas apresentadas por Darendeli (2001), para um solo do tipo "areias com finos", $p' = 1$ atm, $OCR = 1$, $IP = 10\%$ e $N = 10$	42
Figura 4.11 - Variação de N nas curvas apresentadas por Darendeli (2001), para um solo do tipo argilas, $p' = 1$ atm, $OCR = 1$, $IP = 60\%$ e $f = 3$ Hz.....	42
Figura 4.12 - Distribuição litológica dos estratos das sondagens recolhidas, tendo em conta a espessura dos estratos	44
Figura 4.13 - Distribuição dos perfis pelos tipos de terreno do Eurocódigo 8	47
Figura 4.14 - Espectro de resposta de acelerações ao nível do topo do substrato rochoso, correspondente à ação sísmica tipo 1, para $M = 5,5$ e $R = 104,66$ km.....	48
Figura 4.15 - Esquema ilustrativo dos passos do programa LNECLoss	49
Figura 4.16 - Espectro de resposta de aceleração ao nível do topo do perfil de terreno nº5 e do substrato rochoso, correspondente à ação sísmica tipo 1, para $M = 5,5$ e $R = 104,66$ km.....	51
Figura 5.1 - Valores espectrais de aceleração para os tipos de terreno A a E do Eurocódigo 8, considerando as GMPEs para o sismo afastado e um evento de $M = 6$ e $R = 70$ km, sem inclusão do desvio padrão	58
Figura 5.2 - Valores espectrais de aceleração para os tipos de terreno A a E do Eurocódigo 8, considerando as GMPEs para o sismo próximo e um evento de $M = 6$ e $R = 70$ km, sem inclusão do desvio padrão	59
Figura 5.3 - Valores espectrais de aceleração para o tipo de terreno B do Eurocódigo 8, considerando as GMPEs para o sismo afastado (à esquerda) e próximo (à direita) e para $M = 6$ e $R = 70$ km, com inclusão do desvio padrão.....	59
Figura 5.4 - Valores espectrais de aceleração para o tipo de terreno C do Eurocódigo 8, considerando as GMPEs para o sismo afastado (à esquerda) e próximo (à direita) e para $M = 6$ e $R = 70$ km, com inclusão do desvio padrão.....	60

Figura 5.5 - Valores espectrais de aceleração para o tipo de terreno E do Eurocódigo 8, considerando as GMPEs para o sismo afastado (à esquerda) e próximo (à direita) e para $M = 6$ e $R = 70$ km, com inclusão do desvio padrão.....	60
Figura 5.6 - Razão entre aceleração espectral à superfície e a aceleração no topo do substrato rochoso para os terrenos tipo A a E do Eurocódigo 8, considerando as GMPEs obtidas para o sismo afastado e eventos de magnitude 6 e 7,5 e distância hipocentral de 70 e 200 km	61
Figura 5.7 - Razão entre aceleração espectral à superfície e a aceleração no topo do substrato rochoso para os terrenos tipo A a E do Eurocódigo 8, considerando as GMPEs obtidas para o sismo próximo e eventos de magnitude 5 e 6 e distância hipocentral de 10 e 70 km	62
Figura 5.8 - Comparação entre o espectro de resposta de aceleração obtido e o regulamentar para o sismo afastado e um evento de $M = 7,5$ e $R = 70$ km.....	64

Lista de quadros

Quadro 2.1 - Tipos de terreno corrente propostos pelo Eurocódigo 8.....	13
Quadro 3.1 - Fatores que afetam $G/G_{máx}$ e ξ em argilas normalmente consolidadas e ligeiramente sobreconsolidadas. Adaptado de Vucetic e Dobry (1991)	18
Quadro 3.2 - Valores dos coeficientes das curvas propostas por Darendeli (2001).....	22
Quadro 4.1 - Informações geológicas e geotécnicas do perfil nº27 da região algarvia.....	35
Quadro 4.2 - Informações geológicas e geotécnicas do perfil tipo “U” da região algarvia	36
Quadro 4.3 - Informações geológicas e geotécnicas do perfil tipo “D” do distrito de Lisboa.....	36
Quadro 4.4 - Fatores que influenciam o cálculo da resposta sísmica local. Adaptado de Idriss (2004)	38
Quadro 4.5 - Valores típicos de coeficiente de impulso em repouso do solo [Rocscience e Chapman <i>et al.</i> , 2010].....	38
Quadro 4.6 - Curvas consideradas e valores de parâmetros de solo.....	43
Quadro 4.7 - Valores adotados para a modelação das curvas do Quadro 4.6.....	43
Quadro 4.8 - Classificação Unificada de solos.....	45
Quadro 4.9 - Classificação AASHTO de solos.....	45
Quadro 4.10 - Valores típicos de índice de plasticidade para solos siltsos e argilosos [Kulhawy e Mayne, 1990].....	45
Quadro 4.11 - Valores típicos de massa volúmica para solos [Subramanian ,2010]	45
Quadro 4.12 - Valores de parâmetros geotécnicos adotados consoante a litologia do solo.....	46
Quadro 4.13 - Forma de organização dos dados	51
Quadro 4.14 - Resumo da introdução de dados para o início da regressão multi-linear	52
Quadro 4.15 - Regressão linear efetuada para o primeiro valor de frequência.....	52
Quadro 4.16 - Coeficientes das GMPEs para sismo próximo e afastado, no topo do substrato rochoso	53
Quadro 4.17 - Coeficientes das GMPEs para sismo próximo e afastado, no topo de um terreno do tipo A	53
Quadro 4.18 - Coeficientes das GMPEs, para sismo próximo e afastado, no topo de um terreno do tipo B.....	54
Quadro 4.19 - Coeficientes das GMPEs para sismo próximo e afastado, no topo de um terreno do tipo C	54

Quadro 4.20 - Coeficientes das GMPEs para sismo próximo e afastado, no topo de um terreno do tipo D	55
Quadro 4.21 - Coeficientes das GMPEs para sismo próximo e afastado, no topo de um terreno do tipo E	55
Quadro 5.1 - Resumo dos períodos associados ao máximo valor de aceleração espectral	63
Quadro 5.2 - Valores de magnitude de referência para a classe de importância II.....	64
Quadro 5.3 - Comparação entre o espectro de resposta de aceleração obtido e o regulamentar.....	65

Simbologia

Alfabeto grego:

α_{m-1}^* : coeficiente de impedância complexo na interface de contacto entre as camadas $m - 1$ e m ;

β : parâmetro que permite a correção do valor máximo de distorção aplicados por sismos e os simulados em laboratório;

γ_{xz} : distorção;

ε : variável aleatória que reflete a natureza imprevisível do movimento do solo e as características do modelo utilizado;

ε_{xz} : semi-distorções;

λ : comprimento de onda da respectiva camada;

μ : constante de viscosidade do amortecedor;

ξ : coeficiente de amortecimento;

ρ : massa volúmica;

σ_ε : desvio padrão da equação de previsão da amplitude dos movimentos do solo;

σ_{xz} ou τ : tensão tangencial;

ω : frequência angular;

$\bar{\omega}$: frequência angular da ação provocada;

ω_n : frequência angular própria.

Alfabeto latino:

A : amplitude da onda sísmica ascendente;

a_z : área transversal;

B : amplitude da onda sísmica descendente;

$b_{j,\varphi}$: coeficientes da equação de previsão da amplitude dos movimentos do solo, tendo apenas em conta o terreno acima do substrato rochoso, para $j = \{1; 2; 3; 4; 5\}$ e $\varphi = \{A; B; C; D; E\}$;

C_t : fator que depende do material e contraventamento adotado na estrutura;

c_u : resistência não drenada;

c_j : coeficientes da equação de previsão da amplitude dos movimentos do solo, até ao topo do substrato rochoso, para $j = \{1; 2; 3; 4; 5\}$;

d : duração do processo de resposta estacionário;

d_r : densidade relativa;

$E(p)$: equação que permite calcular a distribuição dos máximos da função densidade espectral de potência da ação;

f : frequência;

\bar{f} : frequência da ação;

$f(S)$: termo que traduz os efeitos não lineares dos solos da equação de previsão da amplitude dos movimentos do solo;

G : módulo de distorção;

G_{eq} : módulo de distorção equivalente;

$G_{m\acute{a}x}$: módulo de distorção máximo;

G^* : módulo de distorção complexo;

$H(\bar{\omega})$, $H'(\bar{\omega})$ e $H''(\bar{\omega})$: funções de transferência;

H : altura do edifício, em m, desde a fundação ou do nível superior de uma cave rígida;

h : espessura do estrato;

$i = \sqrt{-1}$, unidade imaginária;

IP : índice de plasticidade;

k : número de onda;

k^* : número de onda complexo;

k_0 : coeficiente de impulso em repouso do solo;

M : magnitude do sismo;

M_{DtLx} e P_{DtLx} : coordenadas cartográficas;

m_j : momento espectral de ordem j ;

n : numeração atribuída às camadas;

N : número de ciclos de carga;

$N_{m\acute{a}x}$: número máximo de estratos em cada perfil;

N_{SPT} : número de pancadas do ensaio *Standard Penetration Test*;

N_{60} : valor corrigido do parâmetro N_{SPT} ;

P : conjunto de variáveis que caracteriza a fonte e/ou o local em análise;

p : percentil;

p' : tensão média efetiva de confinamento;

Q : constante da equação de previsão da amplitude dos movimentos do solo não dependente de M e R ;

R : distância entre a fonte e o local em análise, mais propriamente, distância hipocentral;

S : intensidade do movimento do solo que se pretende prever;

$S_a(\omega)$: função densidade espectral de potência da ação;

$S_r(\omega)$: função densidade espectral de potência da resposta;

T : período;

T_n : período próprio;

t : tempo;

u_x : deslocamento segundo o eixo x ;

u_y : deslocamento segundo o eixo y ;

u_z : deslocamento segundo o eixo z ;

v : velocidade de propagação da onda em análise;

v_p : velocidade de propagação das ondas de compressão;

v_s : velocidade de propagação das ondas de corte;

$v_{s,30}$: velocidade média das ondas de corte até 30 m de profundidade;

W : parâmetro proporcional à energia de pico durante um ciclo histerético;

ΔW : parâmetro proporcional à energia de deformação dissipada durante um ciclo histerético;

x, y e z : eixos tridimensionais.

Siglas e abreviaturas:

AS1: Ação sísmica tipo 1, para o sismo afastado;

AS2: Ação sísmica tipo 2, para o sismo próximo;

EC8: Eurocódigo 8;

GMPEs: *Ground Motion Prediction Equations* ou Equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo;

OCR: grau de sobreconsolidação;

SA: aceleração espectral em cm/s^2 ;

SD: deslocamento espectral;

SPT: *Standard Penetration Test*.

1) Introdução

1.1) Enquadramento geral

Os sismos são movimentos vibratórios bruscos da crosta da superfície terrestre, originados pela libertação e propagação de ondas provocadas por uma súbita e imprevisível libertação de energia em zonas instáveis do interior da Terra.

Portugal Continental tem o seu passado marcado pela ocorrência de eventos sísmicos, enquadrando-se numa zona de moderada atividade sísmica. As zonas litorais centro e sul são as que registam valores mais elevados de intensidade sísmica e que, associado à grande concentração de população no litoral, apresentam um risco sísmico mais elevado.

Os cenários sísmicos demonstram que uma zona anteriormente atingida por sismos poderá voltar a sê-lo no futuro [Oliveira *et al.*, 2012], visto que o sismo tem origem em zonas de falha da litosfera.

Portugal tem sido ciclicamente atingido por sismos, porém, a maioria dos registos sísmicos apresenta fraca magnitude, pelo que o catálogo sísmico é limitado. A Figura 1.1 mostra um exemplo do registo sísmico de Portugal Continental entre os dias 2014/09/21 e 2014/10/21, em que ocorreram 152 sismos, de magnitude média de 1,7 e máximo registado de 3,8.

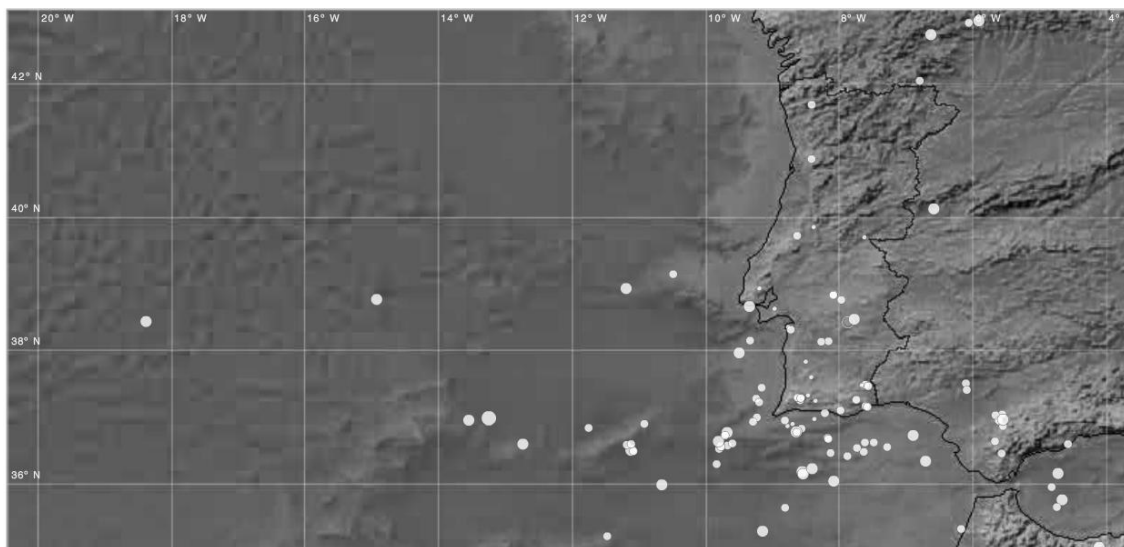


Figura 1.1 - Catálogo sísmico apresentado pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera, entre 2014/09/21 e 2014/10/21

O risco sísmico é definido pelo nível de destruição e pelo potencial de perda associado, devido à ocorrência de um dado sismo. É caracterizado por três fatores principais e interligados [Lourenço, 2012]:

- (i) a perigosidade é representada pela probabilidade de ocorrência de uma ação sísmica, numa dada região, que excede uma certa intensidade ou magnitude;

(ii) a vulnerabilidade reflete a suscetibilidade do elemento em risco sofrer danos em consequência da ação de um sismo;

(iii) a exposição avalia o valor dos elementos em risco, associado à perda e sua possível substituição.

A Engenharia Sísmica dedica-se ao estudo dos efeitos de sismos nas estruturas e ao desenvolvimento de métodos e técnicas para prever e quantificar o comportamento das estruturas, de modo a mitigar os efeitos dos sismos sobre estas. Ao dimensionar os edifícios com resistência sísmica adequada, diminui-se a possibilidade de ocorrência de perdas humanas e de danos materiais importantes.

É, assim, de grande importância a caracterização da ação sísmica, envolvendo a estimativa da amplitude, conteúdo em frequência e a variabilidade espacial dos movimentos intensos do solo.

A adequada caracterização dos movimentos sísmicos intensos tem como objetivos a atualização da regulamentação sismo-resistente aplicável a estruturas novas e também a análise rigorosa da perigosidade sísmica no território continental, para aplicação a estudos de mitigação do risco sísmico, planeamento e gestão de emergências.

1.2) Objetivos e metodologia

O presente trabalho tem como objetivo a dedução de leis de atenuação sísmica para Portugal Continental, considerando o tipo de terreno. Estas leis, mais correntemente denominadas equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo, permitem estimar o movimento do solo no topo de um dado terreno, tendo em conta parâmetros da fonte sismogénica e as propriedades do perfil de terreno por onde se propaga o sismo.

Os solos são materiais naturais cujas propriedades variam grandemente, pelo que o comportamento destes materiais difere de um caso para outro. Um dos desafios que um engenheiro geotécnico enfrenta é a necessidade de dimensionar uma estrutura tendo em conta os materiais existentes no local de implantação do mesmo. Como resultado, ao longo de décadas, a Engenharia Civil tem vindo a classificar os diferentes tipos de solo e, no caso da análise sísmica, a associar o comportamento dos solos a determinadas classes.

A avaliação da resposta sísmica do terreno foi, neste trabalho, realizada com uma abordagem estatística baseada na teoria dos processos estocásticos, assumindo um modelo unidimensional correspondente à propagação vertical de ondas de corte, em meio visco elástico, e considerando o método linear equivalente para considerar a não linearidade do comportamento do solo.

Foram aplicadas regressões multi-lineares à resposta sísmica agrupada por ambiente sísmico e tipo de solo, de forma a obter equações de previsão dos movimentos sísmicos em Portugal Continental.

A importância da elaboração do presente trabalho está relacionada com o número reduzido de equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo para Portugal, associada à fraca

representatividade dos registos sísmicos a nível nacional. Por essa mesma razão, as equações de previsão recorrentemente utilizadas até à data, em estudos de perigosidade sísmica, foram baseadas em registos sísmicos a nível europeu, sem ter em conta a especificidade das fontes sismogénicas que afetam o território nacional continental.

Este trabalho poderá ainda contribuir para fundamentar a revisão da ação sísmica do Anexo Nacional do Eurocódigo 8.

Os dados recolhidos para a elaboração do presente trabalho foram obtidos no âmbito de dois projetos nacionais promovidos pela Autoridade da Proteção Civil [Cansado Carvalho *et al.*, 2002; Sousa *et al.*, 2008], consistindo em:

- (i) 280 perfis de terreno da região do Algarve, com informações em profundidade recolhidas através de prospeção geológica e geotécnica, tais como a litologia, estratificação, valores de ensaio SPT e velocidade de propagação da onda sísmica (de compressão e de corte);
- (ii) 49 perfis “tipo” de terreno da região do Algarve, com informações em profundidade da estratificação, densidade relativa, índice de plasticidade e velocidade de corte de propagação da onda sísmica;
- (iii) 38 perfis “tipo” de terreno da área metropolitana de Lisboa, com informações em profundidade da estratificação, densidade relativa, índice de plasticidade e velocidade de corte de propagação da onda sísmica;
- iv) séries simuladas, ao nível do topo do substrato rochoso, para os dois tipos de ação sísmica definida no Eurocódigo 8, obtidas através da aplicação da metodologia de falha-finita.

1.3) Organização da dissertação

Para atingir o objetivo pretendido, definiram-se as etapas que foram divididas pelos seguintes capítulos:

- no Capítulo 2 pretende-se explicitar todo o enquadramento teórico relacionado com o presente trabalho, abordando ações sísmicas e os riscos associados, efeitos de sítio, equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo e a sua aplicabilidade ao Eurocódigo 8;
- no Capítulo 3 realiza-se uma pré-análise da metodologia a aplicar, nomeadamente a obtenção de curvas que representam a variação do módulo de distorção normalizado e do coeficiente de amortecimento dos solos em função da distorção aplicada, bem como as vantagens e limitações da aplicação do método linear equivalente;
- no Capítulo 4 apresenta-se o tratamento efetuado aos dados: a divisão dos perfis de terreno consoante a classificação definida no Eurocódigo 8, a definição de curvas estudadas no capítulo anterior, a modelação do método linear equivalente e a aplicação de regressões multi-lineares;

- no Capítulo 5 são detalhados e analisados os resultados obtidos;
- no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões inferidas da análise efetuada e são sugeridos desenvolvimentos futuros.

2) Movimento sísmico

2.1) Fonte sísmica

Os sismos de origem natural são fenómenos caracterizados pela sua imprevisibilidade, recorrência e poder de destruição. Podem ter origem em fenómenos tectónicos, vulcânicos ou em colapsos, como desabamentos de terras ou desmoronamentos de grutas ou minas.

Os sismos de origem tectónica são causados pelo movimento relativo entre extensas placas de rocha constituintes da crosta terrestre, denominadas placas tectónicas. Estas flutuam sobre uma camada de magma, chamada astenosfera, de relativa fluidez, a qual permite que as placas tectónicas se movimentem em diferentes direções.

A libertação de energia num sismo pode ser explicada à luz da Teoria do Ressalto Elástico, desenvolvida por Reid (1911). Esta teoria, ilustrada na Figura 2.1, refere que o material terrestre em profundidade é sujeito a tensões, devido a movimentações diferenciais e lentas da crosta, conduzindo à deformação progressiva do material rochoso. À medida que a movimentação tectónica prossegue, a deformação acentua-se e acumula-se energia potencial, sem que exista deslocações na estrutura. Quando o nível de tensão ultrapassa o seu limite de elasticidade, dá-se a rotura frágil do material rochoso e verifica-se deformação permanente desse material, através do movimento relativo entre os blocos da falha. Como consequência, é libertada a energia acumulada sob a forma de calor e de ondas sísmicas [Kramer, 1996].

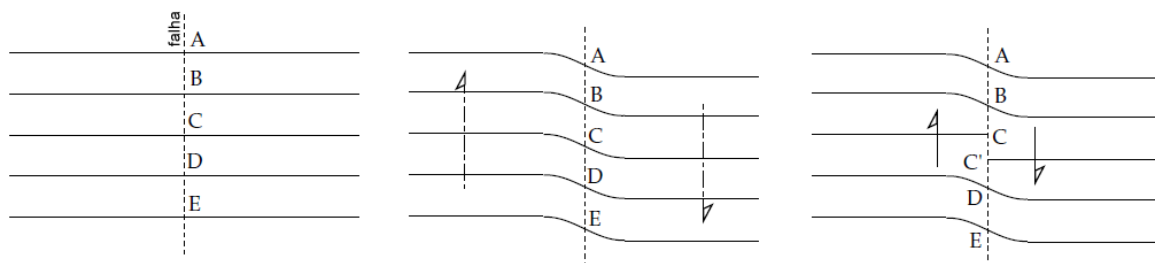


Figura 2.1 - Mecanismo de deformação devido a movimentos tectónicos. Adaptado de Lowrie (2007)

Tendo a litosfera terrestre um comportamento frágil, raramente se pode antecipar a ocorrência de uma rotura. Contudo, sabe-se que os sismos de origem tectónica são recorrentes, pelo que se pode, à partida, delimitar zonas de risco, particularmente em zonas próximas das fronteiras das placas.

As ondas sísmicas deslocam-se em todas as direções a partir do local de libertação de energia, denominado foco sísmico ou hipocentro. O local à superfície mais próximo da falha, geralmente situado na vertical do mesmo, designa-se de epicentro. A energia do movimento do solo é dissipada ao longo do seu percurso.

As ondas sísmicas são denominadas de corpo ou volume se tiverem origem no foco e se propagarem pelo interior da Terra em qualquer direção; e superficiais se resultarem da interação das ondas sísmicas profundas com a superfície da Terra, propagando-se à superfície ou muito próxima desta.

Após a libertação de energia, as ondas sísmicas são ainda classificadas de acordo com o modo como as partículas do solo oscilam em relação à direção de propagação do sismo.

As ondas primárias, longitudinais, de compressão, ou ondas P, são ondas de volume em que o material do terreno vibra no mesmo sentido em relação à propagação do sismo. Causam, deste modo, a compressão e a distensão dos materiais, provocando variações no volume do mesmo. São ondas que se caracterizam por se propagarem em meios sólidos, líquidos e gasosos.

As ondas secundárias, transversais, de corte, ou ondas S, são ondas de volume em que o material do terreno vibra transversalmente à direção de propagação da onda. Provocam distorções na forma dos materiais. São ondas que se caracterizam por se propagarem apenas em meios sólidos.

As ondas superficiais resultam da interação das ondas de volume com a superfície terrestre. Propagam-se à superfície e os deslocamentos provocados por estas ondas são responsáveis por grande parte da destruição à superfície terrestre.

O movimento do solo, devido à ocorrência de um sismo, pode ser descrito através de três processos distintos:

- (i) libertação de energia na fonte sísmica, desencadeada pela rotura de uma falha geológica e consequente geração de ondas sísmicas;
- (ii) propagação da energia sísmica através do meio desde a fonte até ao topo do substrato rochoso;
- (iii) propagação das ondas sísmicas pelo perfil de terreno até à superfície.

Os danos sísmicos provocados numa dada região podem ser descritos através da intensidade sísmica. Apesar da sua natureza qualitativa, a maior parte dos registos históricos de sismicidade estão expressos sob a forma de intensidade, pois datam de épocas anteriores à instalação de equipamentos que registam o movimento sísmico. A magnitude sísmica, por outro lado, avalia a quantidade de energia libertada no hipocentro de um sismo, tendo como referência movimentos sísmicos registados.

2.2) Registos sísmicos

São habitualmente três as formas mais comuns de caracterização numérica da ação sísmica [Guerreiro, 2011]:

- (i) série de acelerações: a descrição de um movimento sísmico pode ser efetuada através de séries temporais de acelerações, que, dada a sua natureza, se podem classificar em

registadas, simuladas e artificiais. As séries registadas são obtidas a partir de eventos reais e, deste modo, refletem com rigor a influência das características da fonte sísmica. As séries simuladas são geradas por meio da simulação física do mecanismo de geração de sismos e de propagação das ondas. As séries artificiais são geradas de modo a serem compatíveis com um dado espectro de resposta. Esta caracterização, apesar de direta, apenas contempla a informação sobre um dado sismo, num dado local, tornando-se um processo moroso quando se pretende analisar a variabilidade do movimento do solo;

(ii) densidade espectral de potência: esta caracterização permite exprimir o conteúdo energético do movimento excitador ou da resposta dinâmica, em função da frequência;

(iii) espectro de resposta: esta representação apresenta o valor máximo de uma dada grandeza, habitualmente deslocamentos ou acelerações, para osciladores com um grau de liberdade com diferentes valores de frequência fundamental. É também função do coeficiente de amortecimento do sistema.

Visto não ser possível reduzir a imprevisibilidade e recorrência dos sismos, é necessária a realização de estudos de mecanismos de geração e propagação dos mesmos, através da análise de [Oliveira *et al.*, 2012]:

(i) sismicidade histórica, isto é, relatos históricos de danos provocados por sismos passados, estando ausente qualquer registo instrumental da ação sísmica;

(ii) sismicidade instrumental, isto é, registos sísmicos mais recentes registados por sismógrafos;

(iii) falhas tectonicamente ativas, definindo as características de sismos originados por estas e o período de tempo entre sismos de iguais magnitudes.

A conjugação desta informação permite estimar as principais características dos sismos que atuam numa dada região e num dado período de tempo e, posteriormente, avaliar as consequências de futuros sismos.

O catálogo sísmico do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) para a região de Portugal Continental, referente às séries sísmicas registadas, foi analisado por Rodrigues *et al.* (2009) e cobre uma janela temporal de cerca de 2070 anos (63 A.C. a 2007). Nele estão registados 10 552 sismos com epicentros localizados dentro de um polígono limitado pelos paralelos 35°N e 44°N e pelos meridianos 19°O e 5°O. Após uma breve análise estatística deste catálogo, conclui-se que:

i) existem apenas dez sismos com magnitude superior ou igual a 7,5;

ii) os sismos com magnitude inferior a 3,5 constituem 85.1% dos registos do catálogo;

iii) a partir de ano de 1909, a taxa média de ocorrências, baseada em registos instrumentais, é de 104,5 sismos por ano;

iv) no período anterior a 1909, a taxa média de ocorrências, baseada em registos históricos, é de 0,2 sismos por ano.

Assim, o catálogo existente não descreve, de forma exaustiva, a sismicidade de Portugal Continental e os registos de sismos de magnitudes e distâncias relevantes são escassos. A caracterização da ação sísmica, para efeitos de projeto e verificação de segurança das estruturas de Engenharia Civil, é realizada para valores de magnitude relativamente elevados associado a períodos de retorno relativamente elevados o que impõe o conhecimento da sismicidade histórica. Como se referiu esta é bastante deficitária no que respeita ao nosso território, pela inexistência de dados e pela fraca qualidade dos dados existentes. O problema torna-se mais grave pois, mesmo para a sismicidade instrumental, são poucos os registos instrumentais de relevo para a caracterização completa dos movimentos sísmicos intensos nos locais.

É, portanto, necessário que em Portugal Continental se proceda à caracterização da ação sísmica, em termos de intensidade, frequência e variabilidade espacial por simulação numérica.

2.3) Formulação da equação de previsão da amplitude dos movimentos do solo

As amplitudes dos movimentos intensos do solo são geralmente previstas usando fórmulas empíricas, denominadas leis de atenuação sísmica, mas preferencialmente denominadas de equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo [Bommer e Crowley, 2006]. Estas preveem o movimento do solo como função de variáveis explicativas, como a magnitude, a distância, e, por vezes, a classificação de solos ou mecanismos de falha e um erro de desvio entre os resultados observados e a função ajustada. Na prática, estas equações são obtidas através da aplicação de regressões lineares a séries registadas de sismos. Devido à sua importância, estas equações devem ser atualizadas quando novos dados se tornam disponíveis.

De uma forma geral, a relação utilizada para representar o movimento do solo num determinado local, dada a ocorrência na fonte sismogénica, pode ser descrita por:

$$\log_{10} S = f(M, R, P) + \varepsilon \quad (2.1)$$

em que:

S é a intensidade do movimento do solo que se pretende prever, como a aceleração espectral ou valores de pico da aceleração, velocidade ou deslocamento;

M é a variável que descreve magnitude do sismo;

R é a distância entre a fonte e o local em análise, como a distância hipocentral ou menor distância à falha sísmica;

P é um conjunto de variáveis que caracteriza a fonte e/ou o local em análise, como o mecanismo focal da fonte sísmica ou condições geológicas locais;

ε é uma variável aleatória que reflete a natureza imprevisível do movimento do solo e as características do modelo utilizado, que se traduz numa dispersão em relação ao valor previsto

pelo modelo de atenuação. Admite-se que esta variável tem distribuição normal de média nula e variância σ_ε^2 .

Usualmente, a equação (2.1) é transformada de forma a que os seus termos tenham significado físico.

$$\log_{10} S = f_1(M) + f_2(R) + f_3(M, R) + f_4(P) + Q + \sigma_\varepsilon \quad (2.2)$$

em que:

$f_1(M)$ é uma função que descreve a amplitude do movimento do solo em função da energia libertada na fonte sísmica;

$f_2(R)$ tem em conta a variação da amplitude do movimento do solo com a distância do local à fonte sísmica, sendo esta composta, normalmente, por dois termos que consideram a atenuação geométrica (em que S é proporcional a $\log_{10} R$) e a atenuação inelástica (em que S é proporcional a R);

$f_3(M, R)$ é o termo que reflete a dependência entre a magnitude e a distância e que geralmente não é modelado nas equações de previsão;

$f_4(P)$ representa as características da fonte e/ou o local em análise;

Q representa uma constante não dependente dos parâmetros acima referidos;

σ_ε representa o parâmetro associado à incerteza;

Para a obtenção de equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo para Portugal Continental, foram aplicadas regressões aos dados na relação funcional do tipo:

$$\log_{10} SA = c_1 + c_2 M + c_3 M^2 + c_4 \log_{10} R + c_5 R \pm \sigma_\varepsilon + f(S) \quad (2.3)$$

em que,

SA representa a aceleração espectral, em cm/s^2 ;

R é aqui definida como a distância hipocentral, em km;

c_j , para $j = \{1; 2; 3; 4; 5\}$, representam os coeficientes de ajustamento das regressões que apenas têm em conta a propagação da onda sísmica até ao topo do substrato rochoso, detalhados seguidamente:

c_1 é o coeficiente que não depende da magnitude nem da distância;

c_2 representa o coeficiente directamente relacionado com a magnitude do sismo, pelo que se prevê que tenha um valor positivo;

c_3 permite limitar os valores obtidos da aceleração para magnitudes elevadas, assumindo um valor negativo;

c_4 está relacionado com a distância geométrica, pelo que se encontra diretamente relacionado com a distância à fonte. Não depende da frequência da ação e permite reduzir o valor da aceleração espectral sem alterar a sua forma, se assumir um valor negativo;

c_5 representa a atenuação inelástica, que representa a influência do meio sobre as características dos movimentos sísmicos em locais afastados da fonte. A dissipação da energia aumenta exponencialmente com a frequência [Anderson e Hough, 1984], esperando-se um coeficiente negativo. O efeito de atenuação inelástica será tanto maior quanto mais distante estiver o ponto de observação;

σ_ε é aqui definido como parâmetro associado à incerteza relacionado apenas com a propagação das ondas sísmicas até ao topo do substrato rochoso;

$f(S)$ é o termo que traduz os efeitos não lineares dos solos e foi definido de acordo com os tipos de terreno corrente do Eurocódigo 8, na forma:

$$f(S) = \begin{cases} b_{1,A} + b_{2,A}M + b_{3,A}M^2 + b_{4,A} \log_{10} R + b_{5,A}R \pm \sigma_{\varepsilon,A}, & \text{se terreno tipo A} \\ b_{1,B} + b_{2,B}M + b_{3,B}M^2 + b_{4,B} \log_{10} R + b_{5,B}R \pm \sigma_{\varepsilon,B}, & \text{se terreno tipo B} \\ b_{1,C} + b_{2,C}M + b_{3,C}M^2 + b_{4,C} \log_{10} R + b_{5,C}R \pm \sigma_{\varepsilon,C}, & \text{se terreno tipo C} \\ b_{1,D} + b_{2,D}M + b_{3,D}M^2 + b_{4,D} \log_{10} R + b_{5,D}R \pm \sigma_{\varepsilon,D}, & \text{se terreno tipo D} \\ b_{1,E} + b_{2,E}M + b_{3,E}M^2 + b_{4,E} \log_{10} R + b_{5,E}R \pm \sigma_{\varepsilon,E}, & \text{se terreno tipo E} \end{cases} \quad (2.4)$$

em que,

$b_{j,\varphi}$, para $j = \{1; 2; 3; 4; 5\}$ e $\varphi = \{A; B; C; D; E\}$, representam os coeficientes que apenas têm em conta a propagação das ondas sísmicas acima do substrato rochoso;

$\sigma_{\varepsilon,\varphi}$, para $\varphi = \{A; B; C; D; E\}$, representam os parâmetros associados à incerteza relacionados apenas com a propagação das ondas sísmicas acima do substrato rochoso.

2.4) Metodologia de falha-finita e modelo pontual estocástico

Visto que o catálogo existente para Portugal Continental, apresentado na secção 2.2, não descreve, de forma exaustiva, a sismicidade da região, não é correto deduzir equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo a partir de registos de eventos passados.

Por outro lado, a base de dados Europeia de registos de sismos não possui um número suficiente de eventos de elevada magnitude, pelo que a sua utilização em Portugal Continental exige a extrapolação para sismos desta magnitude, questionando-se a sua aplicabilidade, dadas as particularidades das fontes sismogénicas nacionais e a propagação dos movimentos sísmicos. De

facto, a extrapolação de uma equação empírica para sismos de grande intensidade e para outras regiões é bastante problemática, dada a falta de discriminação dos diferentes fenómenos de geração e propagação envolvidos na caracterização da ação sísmica [Carvalho, 2007].

Na falta de séries registadas, a obtenção de um catálogo sísmico tem de ser baseada em modelos teóricos, de forma a obter séries simuladas ou sintéticas, através da simulação e modelação de cenários sísmicos. No caso em estudo, as simulações foram previamente geradas por meio da simulação física do mecanismo da fonte e do percurso e realizadas com um programa de modelação estocástica de falha-finita.

O modelo estocástico de falha-finita utilizado descreve e simula movimentos de solo para um determinado cenário, desde a fonte sismogénica, tendo em conta a aleatoriedade associada a estes fenómenos.

A modelação de um espectro de movimentos registados na fonte deve ter em conta:

- (i) a geometria da falha, como a área de rotura, profundidade, orientação e inclinação da falha;
- (ii) heterogeneidades na rotura ao longo do plano de falha;
- (iii) direção da rotura, isto é, diretividade.

Esta variabilidade de parâmetros de entrada pode influenciar a amplitude, o conteúdo em frequência e a duração do movimento do solo.

Para além de serem considerados os processos da fonte sísmica, deve ter-se em conta a propagação da onda sísmica no meio rochoso.

Deste modo, Carvalho (2007) desenvolveu, para Portugal Continental, modelos estocásticos especificamente dirigidos à caracterização da ação sísmica não só em termos de valores de pico dos movimentos sísmicos intensos, como também da distribuição da energia desses movimentos pelas ordenadas espectrais, tendo ainda em conta aspetos que refletem a definição de sismo próximo e afastado.

Este tipo de modelos pode ser aplicado em regiões com escassos dados empíricos de movimentos intensos do solo, desde que, para o desenvolvimento de modelos regionais, seja adicionada informação da zona. O programa desenvolvido, segundo Carvalho (2007), tem como parâmetros de entrada:

- (i) as características da falha, em que se inclui o número de planos, o comprimento, a largura, a orientação, a inclinação e a localização de início de falhas e subfalhas;
- (ii) as coordenadas dos locais a considerar;
- (iii) a magnitude do sismo a simular;
- (iv) as funções do espectro de amplitude de Fourier e respetivos parâmetros necessários às suas definições.

Os parâmetros necessários para a utilização deste modelo foram calibrados utilizando os registos obtidos na rede acelerográfica nacional [Carvalho, 2007; Carvalho *et al.*, 2007].

Carvalho (2007) simulou os movimentos intensos do solo numa grelha de magnitudes, distâncias e frequências de interesse para os dois tipos de cenário preconizados no Eurocódigo 8, obtendo-se uma base de dados sintética de registos sísmicos em Portugal Continental (em afloramentos rochosos), constituída por:

- (i) 13 280 espectros de resposta de aceleração horizontal para sismos de magnitude elevada e epicentro a sudoeste do Cabo São Vicente;
- (ii) 4 843 espectros de resposta de aceleração horizontal para sismos de magnitude moderada a curtas distâncias.

Esta base de dados foi utilizada, no presente trabalho, como a ação sísmica indutora no topo do substrato rochoso, que solicitará o terreno e permitirá a obtenção dos espectros à superfície e a posterior dedução de equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo, considerando o tipo de terreno.

2.5) Regulamentação sísmo-resistente existente

Desde 1958 existe em Portugal Continental legislação que obriga ao dimensionamento sísmico de edifícios novos.

Atualmente, a legislação em vigor encontra-se apresentada no Eurocódigo 8. Este define as regras da elaboração de um projeto de estruturas para a resistência aos sismos dos edifícios e de outras obras de Engenharia Civil. É estabelecida, por exemplo, a quantificação da ação sísmica para Portugal Continental, salientando a necessidade de se considerarem dois tipos de ação sísmica devido à existência de dois cenários mais prováveis de geração de sismos que afetam o nosso país: um cenário “afastado”, referindo-se aos sismos com epicentro na região Atlântica e que corresponde à ação sísmica tipo 1, e um cenário “próximo”, que se refere aos sismos com epicentro no território português continental e que corresponde à ação sísmica tipo 2.

Para ter em conta os efeitos de sítio, o Eurocódigo 8 propõe a classificação apresentada no Quadro 2.1, tendo em conta o perfil estratigráfico e parâmetros geotécnicos do terreno, tais como o número de pancadas do ensaio *Standard Penetration Test*, N_{SPT} , e a velocidade média das ondas de corte até 30 m de profundidade, $v_{s,30}$. Neste trabalho apresentam-se os estudos realizados para os cinco tipos de terreno correntes, ficando de fora os tipos de terreno especiais por necessitarem de uma abordagem mais aprofundada.

Quadro 2.1 - Tipos de terreno corrente propostos pelo Eurocódigo 8

Tipo de terreno	Descrição do perfil estratigráfico	Parâmetros	
		$v_{s,30}$ (m/s)	N_{SPT}
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, caracterizados por um aumento gradual das propriedades mecânicas com a profundidade	360 – 800	> 50
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
D	Depósitos de solos não coesivos de compacidade baixa a média (com ou sem alguns estratos de solos coesivos moles), ou de solos predominantemente coesivos de consistência mole a dura	< 180	< 15
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	-	-

A velocidade média das ondas de corte até 30 m de profundidade é calculada de acordo com a expressão (2.5), em que h representa a espessura do estrato, j a numeração do estrato e $N_{máx}$ o número máximo de estratos em cada perfil até aos 30 m.

$$v_{s,30} = \frac{30}{\sum_{j=1, N_{máx}} \frac{h_j}{v_{s,j}}} \quad (2.5)$$

3) Simulação numérica dos efeitos de sítio

Existem vários registos da importância das condições geológicas locais nas ações sísmicas, sendo que o sismo de Loma Prieta, registado a 19 de outubro de 1989, a sul da cidade de São Francisco, nos Estados Unidos da América, evidencia claramente este efeito [Kramer, 1996].

Verificou-se que zonas equidistantes ao epicentro, com condições geológicas distintas, apresentaram diferentes variações do movimento do solo, como na zona das ilhas de Yerba Buena e de Treasure.

A zona da ilha de Yerba Buena resulta de um afloramento rochoso e na zona da ilha Treasure foi criado artificialmente um depósito de 13,7 m de profundidade com terreno arenoso solto, acima de um terreno de argila siltosa normalmente consolidada com 16,8 m de profundidade, suprajacente ao substrato rochoso.

As acelerações de pico, segundo a direção Este-Oeste, registadas na ilha de Yerba Buena foram de 0,06 g e em Treasure de 0,16 g, conforme apresentado nos sismogramas e espectros de resposta da Figura 3.1. Daqui, e de outros exemplos concretos, se infere que existem diferentes variações do movimento sísmico para condições geológicas distintas, podendo registrar-se grandes amplificações.

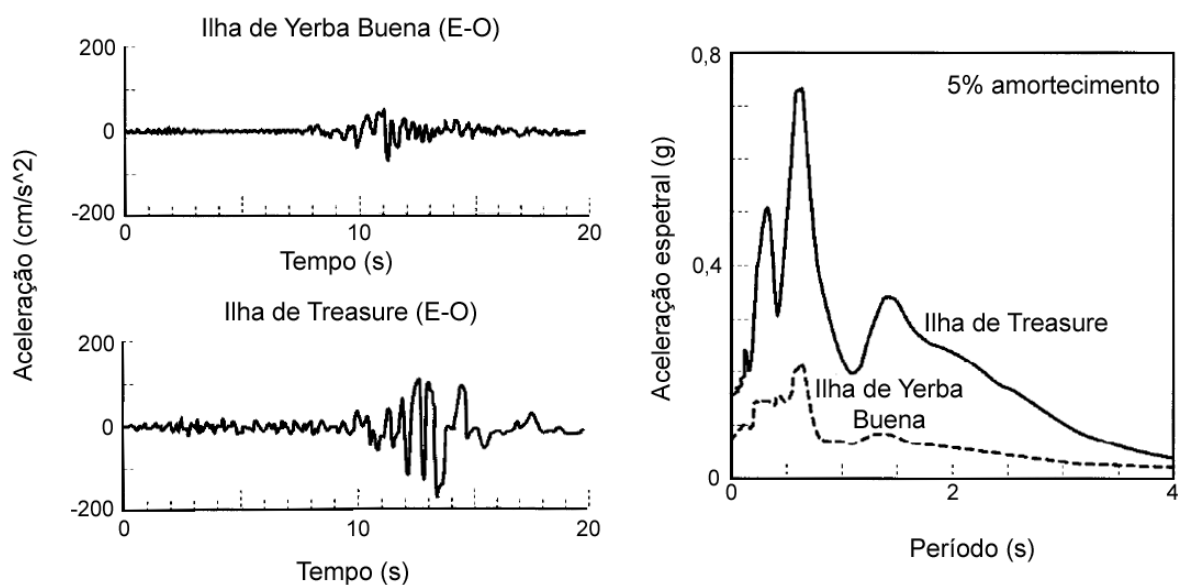


Figura 3.1 - Movimentos à superfície registados na Ilha de Yerba Buena e de Treasure durante o sismo de Loma Prieta de 1989: série de acelerações (à esquerda) e espectro de resposta (à direita). Adaptado de Seed *et al.* (1990)

Verifica-se então que os parâmetros associados ao perfil de terreno (como a estratificação, espessura das camadas, tipo de solo e suas propriedades) são fundamentais para a análise da atenuação sísmica. Deste modo, infere-se que o processo de amplificação ou atenuação da energia sísmica é também devido a efeitos locais, denominados efeitos de sítio, em que se verifica uma variação na intensidade das ondas que se propagam entre o substrato rochoso e a superfície.

Deste modo, o solo comporta-se como um filtro que amplifica a energia a determinadas frequências e atenua em outras. A Figura 3.2 apresenta um gráfico que demonstra a diferença de espectros de resposta de aceleração normalizada entre solos mais rígidos e outros mais brandos. Verifica-se que solos mais rígidos amplificam o movimento do solo para baixos períodos e outros mais brandos amplificam para períodos mais elevados. Observa-se também que a amplificação do movimento do solo em terrenos rochosos se apresenta num intervalo de período mais curto que do em solos brandos.

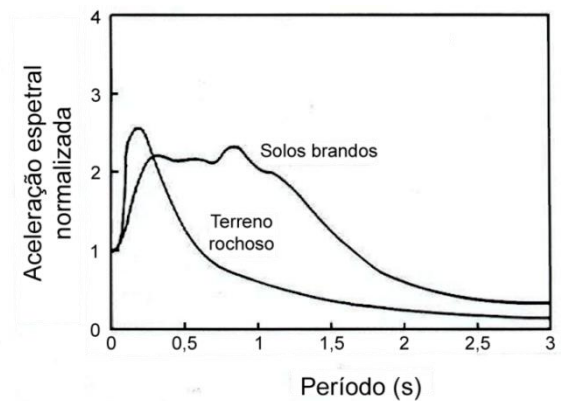


Figura 3.2 - Espectro de resposta de aceleração normalizada para rocha e solo brando. Adaptado de Seed *et al.* (1976)

Esta diferença pode ser explicada à luz do conceito de ressonância. Se um elemento for sujeito externamente a uma ação cuja frequência é próxima da frequência própria, a amplitude do movimento do elemento é máxima. De acordo com Kramer (1996), esta frequência é tanto maior quanto maior for a rigidez do elemento. Logo, para um elemento rocha ou tipo-rocha, de rigidez superior a um solo brando, a sua frequência própria é superior, isto é, o seu período próprio é inferior ao de um solo menos rígido.

Verifica-se, deste modo, uma filtragem da onda sísmica, devido ao contraste de rigidez entre a formação sedimentar superficial e a do substrato rochoso, provocando alterações às características da propagação das ondas.

3.1) Comportamento do solo sob solicitação sísmica

Analisando as ações que provocam distorções consideradas muito pequenas (até 10^{-5}), os solos apresentam um comportamento elástico, enquanto que, para ações que provoquem distorções pequenas a grandes, o comportamento já será considerado plástico. As ações sísmicas dão origem a grandes vibrações do terreno, pelo que o comportamento do solo é considerado não linear e histerético.

Pretende-se representar a tendência das curvas tensão tangencial-distorção, $\tau - \gamma$, conforme ilustra a Figura 3.3, através de parâmetros que permitam representar a evolução desses ciclos. O módulo de

distorção equivalente, G_{eq} , mede o declive médio de cada histerese, correspondendo ao módulo de distorção secante. Verifica-se que este parâmetro diminui com o aumento da distorção, sendo o seu valor máximo, $G_{máx}$, registado durante o primeiro ciclo.

$$G_{eq} = \frac{\tau_{máx}}{\gamma_{máx}} \text{ (por ciclo)} \quad (3.1)$$

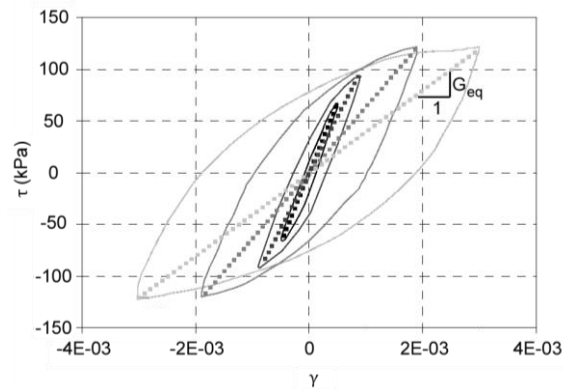


Figura 3.3 - Aumento da histerese de uma curva tensão tangencial – distorção de um solo. Adaptado de Iwasaki *et al.* (1978)

O coeficiente de amortecimento, ξ , está associado à energia dissipada, medida pela área envolvida pela histerese em cada ciclo.

$$\xi = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (3.2)$$

Na expressão (3.2), W é proporcional à energia de pico durante um ciclo e ΔW à energia de deformação dissipada durante um ciclo, conforme se encontra ilustrado na Figura 3.4. Verifica-se que este parâmetro cresce com o aumento da amplitude dos ciclos, devido ao aumento da área de cada histerese.

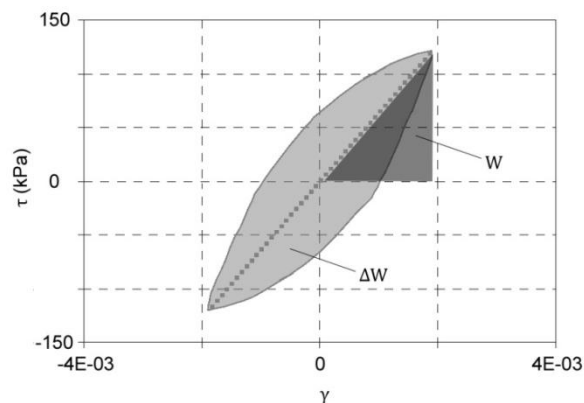


Figura 3.4 - Histerese de uma curva tensão tangencial – distorção de um solo. Adaptado de Iwasaki *et al.* (1978)

O módulo de distorção normalizado, $G_{eq}/G_{m\acute{a}x}$ ou, de uma forma mais simplificada, $G/G_{m\acute{a}x}$, e o coeficiente de amortecimento do solo são os parâmetros correntemente utilizados para representar o comportamento cíclico dos solos, por meio de curvas em função da distorção.

No decurso das últimas décadas, foram desenvolvidos estudos no sentido de identificar os parâmetros que mais afetam estas curvas e definir equações que permitissem estimar a dependência destes dois parâmetros de distorção. Estas curvas são habitualmente estimadas a partir de ensaios cíclicos sujeitos a deformação controlada ao fim de dez ciclos de amplitude constante.

Visto que os solos são materiais cujos parâmetros variam significativamente de uns para outros, foi necessário definir as grandezas que, de uma forma mais relevante, afetam esta variabilidade. Vucetic e Dobry (1991), por exemplo, realizaram um estudo da variação das propriedades do solo que afetam estas curvas empíricas, o qual se encontra resumido no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Fatores que afetam $G/G_{m\acute{a}x}$ e ξ em argilas normalmente consolidadas e ligeiramente sobreconsolidadas. Adaptado de Vucetic e Dobry (1991)

Efeito	Valor de $G/G_{m\acute{a}x}$, para um dado γ	Valor de ξ , para um dado γ
Aumento da tensão de confinamento	Constante ou aumenta	Constante ou diminui
Aumento do grau de sobreconsolidação	Não afeta	Não afeta
Aumento do índice de plasticidade	Aumenta	Diminui
Aumento do número de ciclos de carregamento	Diminui após N ciclos de γ elevado	Insignificante para valores moderados de N e γ

Analisa-se, de seguida, as curvas de degradação do módulo de distorção normalizado e de variação do coeficiente de amortecimento em função da distorção, propostas por Ishibashi e Zhang (1993) e Darendeli (2001).

3.1.1) Curvas propostas por Ishibashi e Zhang

O estudo efetuado por Ishibashi e Zhang (1993) resultou na definição destas curvas em função de parâmetros como o índice de plasticidade, IP , e a tensão média efetiva de confinamento, p' .

Ishibashi e Zhang apresentaram as equações (3.3) a (3.7) e verificaram que as mesmas se adequam não só a argilas normalmente consolidadas e areias, como a solos com uma percentagem considerável de enrocamentos e a argilas moderadamente sobreconsolidadas.

$$\frac{G}{G_{m\acute{a}x}} = L(\gamma, IP) (p')^{V(\gamma, IP)} \quad (3.3)$$

$$L(\gamma, IP) = 0,5 \left[1 + \tanh \left[\ln \left(\frac{0,000102 + U(IP)}{\gamma} \right)^{0,492} \right] \right] \quad (3.4)$$

$$U(IP) = \begin{cases} 0, & \text{se } IP = 0 \\ 3,37 \cdot 10^{-6} \cdot IP^{1,404}, & \text{se } 0 < IP (\%) \leq 15 \\ 7 \cdot 10^{-7} \cdot IP^{1,976}, & \text{se } 15 < IP (\%) \leq 70 \\ 2,7 \cdot 10^{-5} \cdot IP^{1,115}, & \text{se } IP (\%) > 70 \end{cases} \quad (3.5)$$

$$V(\gamma, IP) = 0,272 \left[1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0,000556}{\gamma} \right)^{0,41} \right] \right] e^{-0,0145 IP^{1,3}} \quad (3.6)$$

$$\xi = 0,333 \frac{1 + e^{-0,0145 IP^{1,3}}}{2} \left[0,586 \left(\frac{G}{G_{m\acute{a}x}} \right)^2 - 1,547 \left(\frac{G}{G_{m\acute{a}x}} \right) + 1 \right] \quad (3.7)$$

Apresentam-se, de seguida, as Figuras 3.5 e 3.6 que ilustram a elevada dependência destas curvas em relação aos parâmetros IP e p' .

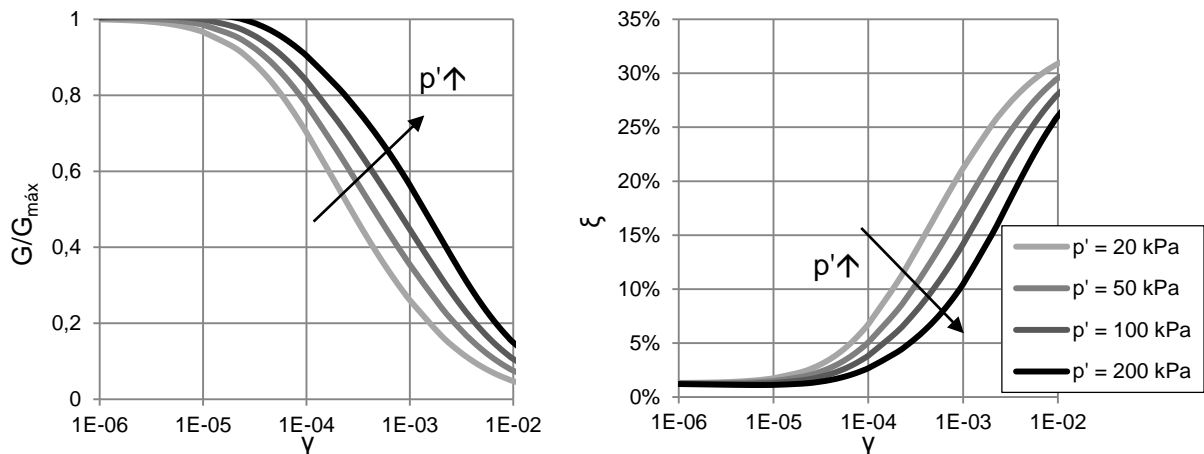


Figura 3.5 - Curvas de dependência do módulo de distorção normalizado e do coeficiente de amortecimento, para $IP = 0$, em função de p' [Ishibashi e Zhang, 1993]

Da análise da Figura 3.5, infere-se que, para um mesmo valor de distorção, a diminuição da tensão média efetiva de confinamento produz uma degradação mais acentuada do módulo de distorção e um aumento mais pronunciado acentuado do coeficiente de amortecimento de um solo com índice de plasticidade nulo. A mesma análise foi realizada para solos com índice de plasticidade superiores a zero, onde se observou a mesma tendência, porém menos acentuada que a apresentada na Figura 3.5.

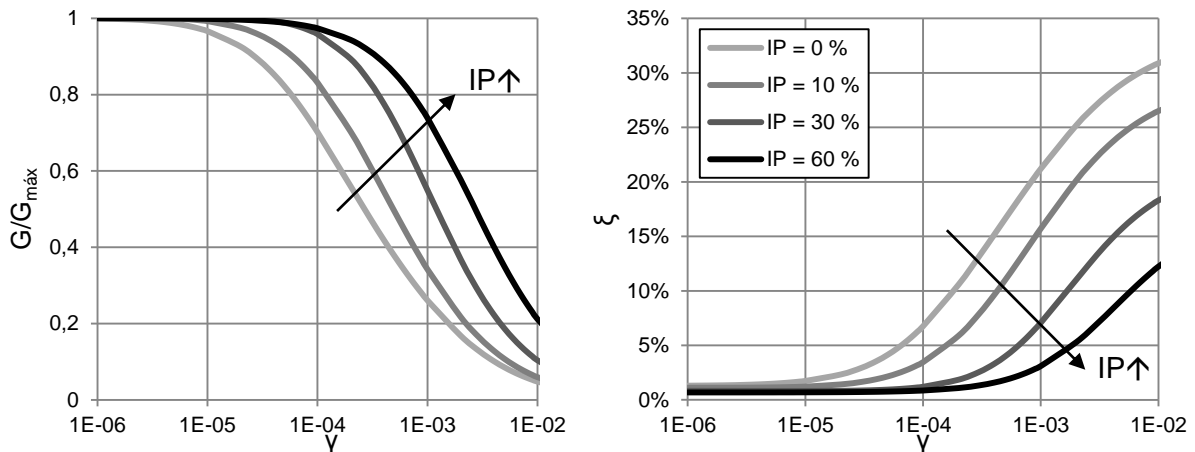


Figura 3.6 - Curvas de dependência do módulo de distorção normalizado e do coeficiente de amortecimento, para $p' = 20$ kPa, em função de IP [Ishibashi e Zhang, 1993]

Da análise da Figura 3.6, conclui-se que, para um mesmo valor de distorção, a diminuição do índice de plasticidade do solo produz uma diminuição mais rápida do módulo de distorção e um aumento mais acentuado do coeficiente de amortecimento de um solo com uma tensão média efetiva de confinamento de 20 kPa. A mesma análise foi realizada para solos com tensões superiores a 20 kPa, onde se observou a mesma tendência, porém menos acentuada que a apresentada na Figura 3.6.

3.1.2) Curvas propostas por Darendeli

O estudo realizado por Darendeli (2001) teve como objetivos reavaliar as curvas empíricas publicadas em anos anteriores e completar a escassa quantidade deste tipo de estudos, tendo em conta outros parâmetros ainda não analisados. Para tal, foram realizadas várias sondagens, de centenas de metros, de forma a serem recolhidas amostras intactas de solo e proceder-se à caracterização das suas propriedades, especialmente as dinâmicas.

As várias amostras recolhidas foram divididas em quatro grupos, consoante a sua classificação granulométrica:

- (i) areias com um conteúdo em finos inferior a 12%. Este tipo de solo será, a partir deste ponto, designado de “areias puras”;
- (ii) areias com um conteúdo em finos superior a 12%. Este tipo de solo será, a partir deste ponto, designado de “areias com finos”;
- (iii) siltes;
- (iv) argilas.

Foi posteriormente constatado que os parâmetros que afetam, de uma forma mais relevante, o comportamento não linear do solo são:

- (i) a granulometria;

- (ii) a tensão média efetiva de confinamento, p' , e, conseqüentemente, o coeficiente de impulso em repouso, k_0 ;
- (iii) o grau de sobreconsolidação, OCR ;
- (iv) o índice de plasticidade, IP ;
- (v) a frequência da ação, \bar{f} ;
- (vi) o número de ciclos de carga, N .

A estes parâmetros será realizada uma análise de sensibilidade na secção 4.2.1 do presente trabalho.

Darendeli propõe, deste modo, um conjunto de equações, apresentadas entre (3.8) e (3.19), bem como os valores apresentados no Quadro 3.2, que permitem estimar a média dos valores das curvas empíricas e a incerteza associada a estes valores. No âmbito do presente trabalho, remete-se a explicação dos parâmetros abaixo apresentados ao estudo apresentado por Darendeli (2001).

$$\frac{G}{G_{m\acute{a}x}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^{\phi_5}} \quad (3.8)$$

$$\gamma_r = (\phi_1 + \phi_2 \cdot IP \cdot OCR^{\phi_3}) \cdot \sigma_0'^{\phi_4} \quad (3.9)$$

$$\xi_{adjusted} = b \cdot \left(\frac{G}{G_{m\acute{a}x}}\right)^{0,1} \cdot \xi_{masing} + \xi_{min} \quad (3.10)$$

$$\xi_{min} = (\phi_6 + \phi_7 \cdot IP \cdot OCR^{\phi_8}) \cdot \sigma_0'^{\phi_9} \cdot [1 + \phi_{10} \cdot \ln(\bar{f})] \quad (3.11)$$

$$b = \phi_{11} + \phi_{12} \cdot \ln(N) \quad (3.12)$$

$$\xi_{masing} = c_1 \cdot \xi_{masing, \phi_5=1,0} + c_2 \cdot \xi_{masing, \phi_5=1,0}^2 + c_3 \cdot \xi_{masing, \phi_5=1,0}^3 \quad (\%) \quad (3.13)$$

$$\xi_{masing, \phi_5=1,0} = \frac{100}{\pi} \cdot \left[4 \frac{\gamma - \gamma_r \cdot \ln\left(\frac{\gamma + \gamma_r}{\gamma_r}\right)}{\frac{\gamma^2}{\gamma + \gamma_r}} - 2 \right] \quad (\%) \quad (3.14)$$

$$c_1 = -1,1143 \cdot \phi_5^2 + 1,8618 \cdot \phi_5 + 0,2523 \quad (3.15)$$

$$c_2 = 0,0805 \cdot \phi_5^2 - 0,0710 \cdot \phi_5 - 0,0095 \quad (3.16)$$

$$c_3 = -0,0005 \cdot \phi_5^2 + 0,0002 \cdot \phi_5 + 0,0003 \quad (3.17)$$

$$\sigma_{NG} = e^{\phi_{13}} + \sqrt{\frac{0,25}{e^{\phi_{14}}} - \frac{\left(\frac{G}{G_{m\acute{a}x}} - 0,5\right)^2}{e^{\phi_{14}}}} \quad (3.18)$$

$$\sigma_{\xi} = e^{\phi_{15}} + e^{\phi_{16}} \cdot \sqrt{\xi_{adjusted}} \quad (3.19)$$

Quadro 3.2 - Valores dos coeficientes das curvas propostas por Darendeli (2001)

	"Areias puras"		"Areias com finos"		Siltes		Argilas	
	Média	Variância	Média	Variância	Média	Variância	Média	Variância
ϕ_1	4,74E-02	9,62E-06	3,34E-02	2,06E-06	4,16E-02	5,18E-06	2,58E-02	5,68E-06
ϕ_2	-2,34E-03	1,63E-07	-5,79E-05	8,09E-09	6,89E-04	7,74E-09	1,95E-03	1,84E-08
ϕ_3	2,50E-01	1,00E-02	2,49E-01	9,94E-03	3,21E-01	7,56E-03	9,92E-02	1,64E-03
ϕ_4	2,34E-01	1,08E-03	4,82E-01	7,46E-04	2,80E-01	8,63E-04	2,26E-01	3,48E-04
ϕ_5	8,95E-01	4,30E-04	8,45E-01	1,49E-04	1,00E+00	4,10E-04	9,75E-01	1,60E-04
ϕ_6	6,88E-01	7,82E-03	8,89E-01	5,86E-03	7,12E-01	3,55E-03	9,58E-01	2,93E-03
ϕ_7	1,22E-02	2,43E-05	2,02E-02	1,91E-05	3,03E-03	2,65E-06	5,65E-03	2,79E-06
ϕ_8	-1,00E-01	2,50E-03	-1,00E-01	2,50E-03	-1,00E-01	2,50E-03	-1,00E-01	2,50E-03
ϕ_9	-1,27E-01	4,00E-03	-3,72E-01	1,83E-03	-1,89E-01	1,95E-03	-1,96E-01	5,21E-04
ϕ_{10}	2,88E-01	3,14E-03	2,33E-01	1,35E-03	2,34E-01	2,60E-03	3,68E-01	1,19E-03
ϕ_{11}	7,67E-01	1,59E-03	7,76E-01	7,71E-04	5,92E-01	8,09E-04	4,66E-01	2,69E-04
ϕ_{12}	-2,83E-02	2,79E-05	-2,94E-02	1,70E-05	-7,67E-04	1,61E-05	2,23E-02	7,13E-06
ϕ_{13}	-4,14E+00	4,17E-02	-3,98E+00	1,82E-02	-5,02E+00	8,98E+00	-5,65E+00	3,37E-02
ϕ_{14}	3,61E+00	5,97E-02	4,32E+00	3,30E-02	3,93E+00	2,47E-02	4,00E+00	1,21E-02
ϕ_{15}	-5,15E+00	8,80E+00	-5,34E+00	8,55E+00	-5,20E+00	8,76E+00	-5,00E+00	9,00E+00
ϕ_{16}	-2,32E-01	7,56E-03	-2,66E-01	3,40E-03	-6,42E-01	4,78E-03	-7,25E-01	1,92E-03

3.2) Propagação unidimensional da onda sísmica

Neste trabalho, a resposta sísmica local do terreno é modelada através da propagação unidimensional de ondas sísmicas, baseado no postulado de Schnabel *et al.* (1972), no qual o movimento horizontal num perfil de terreno tem como principal origem a propagação vertical de ondas de corte, isto é, com polarização horizontal. O movimento vertical tem origem na propagação vertical de ondas de compressão. Este postulado é válido se:

- (i) a rigidez dos geomateriais crescer em profundidade, de modo a originar fenómenos de refração sucessivos que alinhem a direção de propagação com a vertical;
- (ii) o solo apresentar uma estratificação horizontal. A maioria dos perfis de terreno constituídos por depósitos sedimentares recentes verificam esta condição.

3.2.1) Propagação de ondas de corte com polarização horizontal

As ondas de corte são caracterizadas por provocarem a movimentação de partículas no eixo perpendicular à sua direção de propagação.

Conforme ilustra a Figura 3.7, a tensão tangencial aplicada no plano vertical $z = z_0$ é $\sigma_{xz,0}$, pelo que no plano imediatamente seguinte, $z = z_0 + dz$, a mesma tensão é dada por $\sigma_{xz,0} + d\sigma_{xz,0} = \sigma_{xz,0} + (\partial\sigma_{xz}/\partial z) dz$. Aplicando o equilíbrio de forças num elemento barra com área transversal infinitesimal $a_z = \int dx dy$ e massa volúmica ρ , a resultante das forças externas é dada pelo somatório do produto entre tensões e áreas e a força interna induzida é dada pelo produto entre a massa e a aceleração das partículas do elemento.

A aceleração, segundo um dado eixo, é dada pela segunda derivada do deslocamento, em ordem ao tempo, t .

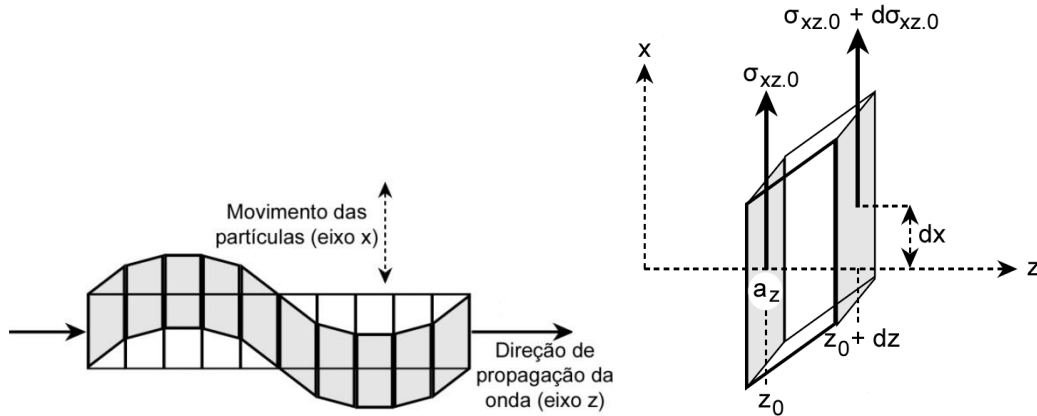


Figura 3.7 - Distorção provocada pela passagem de uma onda de corte (à esquerda). Deslocamentos e tensões aplicados num elemento infinitesimal (à direita). Adaptados de Lowrie (2007)

Obtém-se, então, a equação do movimento unidimensional sujeito a tensão tangencial, igualando a resultante das forças externas com a interna:

$$\left(\sigma_{xz,0} + \frac{\partial\sigma_{xz}}{\partial z} dz\right) a_z - \sigma_{xz,0} a_z = \rho a_z dz \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \Leftrightarrow \frac{\partial\sigma_{xz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (3.20)$$

Sabendo que, no caso em estudo:

- (i) A relação constitutiva que relaciona a tensão tangencial e distorção é dada por $\sigma_{xz} = G \gamma_{xz}$, em que G representa o módulo de distorção;
- (ii) A distorção é expressa por $\gamma_{xz} = 2 \varepsilon_{xz} = ((\partial u_x / \partial z) + (\partial u_z / \partial x)) = \partial u_x / \partial z$, visto que, para a propagação unidimensional da onda de corte, não existem deslocamentos segundo o eixo z , isto é, $u_z = 0$;
- (iii) A velocidade de propagação das ondas de corte, v_s , é dada por $v_s = \sqrt{G/\rho}$.

A equação (3.20) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} v_s^2 = \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (3.21)$$

3.2.2) Equação geral

De acordo com a bibliografia consultada [Kramer, 1996; Lowrie, 2007], as equações de propagação unidimensional de ondas de compressão e de corte com polarização vertical são idênticas à deduzida em (3.21), diferindo apenas na velocidade da onda em análise. Deste modo, a equação unidimensional do movimento de uma onda sísmica é dada, de um modo geral, pela solução da equação diferencial apresentada em (3.22)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3.22)$$

Em que v representa a velocidade de propagação da onda em análise. A solução geral da equação pode ser resolvida pelo princípio de D' Alembert [Lowrie, 2007] e é dada pela equação (3.23).

$$u(z, t) = g(vt \pm z) \quad (3.23)$$

Em que g representa uma função arbitrária que respeita a equação (3.22). Definindo a ação harmónica provocada pela fonte sismogénica por $Q(t) = Q_0 \text{sen}(\bar{\omega}t)$, em que $\bar{\omega}$ é a frequência angular da ação provocada, e sabendo que o número de onda é dado por $k = \bar{\omega}/v$, a função g pode ser escrita da seguinte forma, utilizando notação complexa:

$$u(z, t) = u_0 e^{i(\bar{\omega}t \pm kz)} \quad (3.24)$$

Acrescenta-se ainda que não existe uma solução única para a equação diferencial acima referida, existem outras soluções, tais como:

$$u(z, t) = u_0 \sin(\bar{\omega}t \pm kz) \quad (3.25)$$

$$u(z, t) = u_0 \cos(\bar{\omega}t \pm kz) \quad (3.26)$$

$$u(z, t) = A e^{i(\bar{\omega}t + kz)} + B e^{i(\bar{\omega}t - kz)} \quad (3.27)$$

As equações acima representadas respeita a equação diferencial do movimento, quer sejam usadas expressões trigonométricas ou exponenciais complexas, relacionadas através da lei de Euler. Recorrendo à sobreposição de funções lineares através do método de Fourier, que possibilita a decomposição de qualquer tipo de função periódica numa série de combinações de funções harmónicas, também é possível verificar a equação diferencial.

Adicionalmente pode definir-se uma expressão geral que engloba as soluções acima referidas:

$$u(z, t) = u(z)e^{i(\bar{\omega}t)} \quad (3.28)$$

3.3) Lei constitutiva visco-elástica

Um solo submetido a um carregamento dinâmico e cíclico pode ser descrito por uma lei constitutiva visco-elástica. Esta lei apresenta um bom grau de aproximação na representação do comportamento do solo e é amplamente utilizada dadas as simplificações que introduz.

Esse comportamento é descrito pelo modelo de Kelvin-Voigt [Kramer, 1996] sujeito a tensões de corte. Este reproduz um material que sofre distorções com uma parcela elástica, representada pelo módulo de distorção da mola, G , e outra viscosa, representada pela constante de viscosidade do amortecedor, μ . A relação tensão tangencial-distorção é dada por:

$$\tau = G\gamma + \mu \frac{\partial \gamma}{\partial t} \quad (3.29)$$

Considerando uma distorção harmónica representada por $\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t)$, em que ω representa a frequência angular, a expressão (3.29) pode ser modificada de forma a incluir esta distorção harmónica.

$$\tau = G\gamma_0 \sin(\omega t) + \mu\omega\gamma_0 \cos(\omega t) \quad (3.30)$$

A equação (3.30) apresenta forma elíptica, semelhante a cada ciclo das curvas tensão tangencial-distorção histeréticas. Deste modo, é possível relacionar esta expressão com a definição dos parâmetros W e ΔW , através de integrais de área:

$$\Delta W = \int_{t_0}^{t_0 + \frac{2\pi}{\omega}} \tau \frac{\partial \gamma}{\partial t} dt = \int_{t_0}^{t_0 + \frac{2\pi}{\omega}} [G\gamma_0 \sin(\omega t) + \mu\omega\gamma_0 \cos(\omega t)] \omega\gamma_0 \cos(\omega t) dt = \gamma_0\pi\mu^2\omega \quad (3.31)$$

$$W = \int_0^{\gamma_0} \tau d\gamma = \frac{1}{2}G\gamma_0^2 \quad (3.32)$$

Logo,

$$\xi = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} = \frac{1}{4\pi} \frac{2(\gamma_0\pi\mu^2\omega)}{G\gamma_0^2} = \frac{\mu\omega}{2G} \Leftrightarrow \mu = \frac{2G\xi}{\omega} \quad (3.33)$$

A lei constitutiva acima descrita vai ser aplicada no método linear equivalente, o qual permite avaliar a resposta sísmica unidimensional por meio de um processo iterativo, tendo em conta o método da

resposta complexa e as curvas da degradação do módulo de distorção normalizado e do coeficiente de amortecimento do solo em função da distorção.

3.4) Método da resposta complexa

O método da resposta complexa permite avaliar a resposta sísmica local, através da modelação da propagação unidimensional da onda sísmica, no qual se assume que o movimento horizontal do solo tem como principal origem a propagação vertical de ondas de corte em meio visco-elástico com estratificação horizontal sobrejacente a um semi-espaço elástico.

O modelo de terreno tem as seguintes características:

- (i) o perfil de terreno apresenta estratificação horizontal e extensão infinita;
- (ii) cada camada deve ser definida pelo seu módulo de distorção, coeficiente de amortecimento, massa volúmica e espessura.

Analisando o movimento horizontal do solo, recorrendo às expressões (3.20) e (3.29) e sabendo que $\gamma_{xz} = \partial u_x / \partial z$, obtém-se:

$$G \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} + \mu \frac{\partial^3 u_x}{\partial z^2 \partial t} = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (3.34)$$

Sabendo que a propagação de ondas sísmicas pode ser representada pela função harmónica descrita em (3.28), a equação (3.34) é definida por:

$$(G + i\bar{\omega}\mu) \frac{\partial^2 u_x(z)}{\partial z^2} = -\rho\bar{\omega}^2 u_x(z) \Leftrightarrow (G + iG2\xi) \frac{\partial^2 u_x(z)}{\partial z^2} = -\rho\bar{\omega}^2 u_x(z) \quad (3.35)$$

Definindo $G^* = (G(1 + i2\xi))$ como o módulo de distorção complexo, o número de onda complexo é dado por:

$$k^* = \frac{\bar{\omega}}{v_s^*} = \bar{\omega} \sqrt{\frac{\rho}{G^*}} \quad (3.36)$$

A solução geral da equação (3.35) é então dada por:

$$u_x(z, t) = Ae^{i(\bar{\omega}t + k^*z)} + Be^{i(\bar{\omega}t - k^*z)} \quad (3.37)$$

Como era esperado, a equação (3.37) corresponde a uma das soluções descritas na secção 3.2.2, em que A e B representam as amplitudes das ondas sísmicas ascendente e descendente, respetivamente.

Uma vez que a ação sísmica atravessa várias camadas de solos com características diferentes, representadas na Figura 3.8, é necessário definir uma função de transferência para o caso em que existam m camadas de solo suprajacentes ao substrato rochoso.

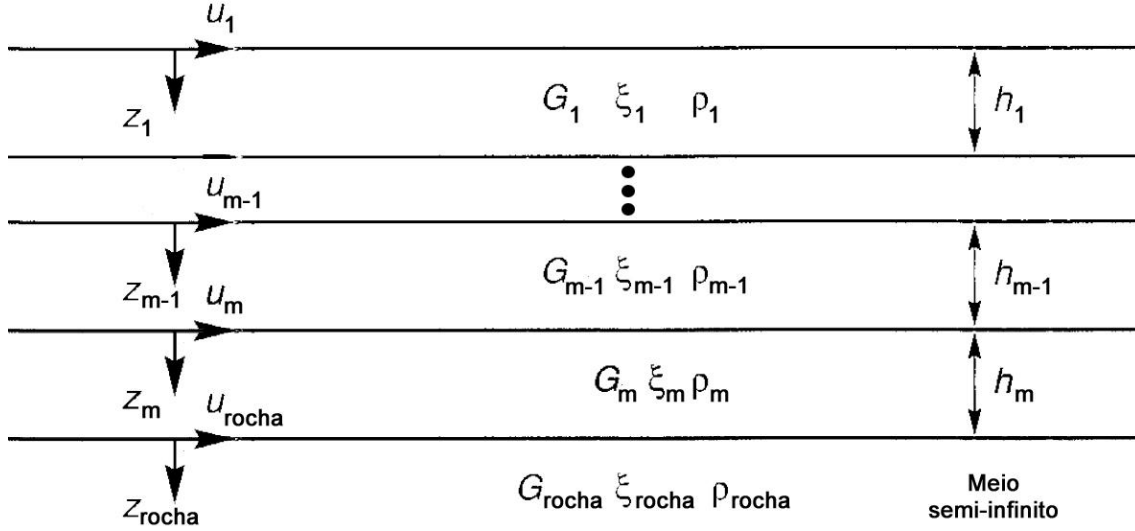


Figura 3.8 – Definição do depósito de solo com estratificação horizontal. Adaptado de Kramer (1996)

A expressão (3.37) é, então, modificada, tendo em conta a existência de um meio estratificado, em que cada camada m apresenta propriedades específicas.

$$u_m(z, t) = A_m e^{i(\bar{\omega}t + k_m^* z)} + B_m e^{i(\bar{\omega}t - k_m^* z)} \quad (3.38)$$

Sabe-se que a tensão tangencial é dada por:

$$\tau_m(z, t) = G_m^* \frac{\partial u_m}{\partial z} = ik_m^* G_m^* (A_m e^{i(\bar{\omega}t + k_m^* z)} - B_m e^{i(\bar{\omega}t - k_m^* z)}) \quad (3.39)$$

De forma a garantir continuidade entre as diferentes camadas, os deslocamentos e as tensões no topo de uma dada camada devem ser iguais aos da base da camada suprajacente, pelo que:

$$\begin{cases} u_{m-1}(z_{m-1} = h_{m-1}, t) = u_m(z_m = 0, t) \\ \tau_{m-1}(z_{m-1} = h_{m-1}, t) = \tau_m(z_m = 0, t) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} A_m + B_m = A_{m-1} e^{ik_{m-1}^* h_{m-1}} + B_{m-1} e^{-ik_{m-1}^* h_{m-1}} \\ A_m - B_m = \frac{k_{m-1}^* G_{m-1}^*}{k_m^* G_m^*} (A_{m-1} e^{ik_{m-1}^* h_{m-1}} - B_{m-1} e^{-ik_{m-1}^* h_{m-1}}) \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} A_m = \frac{1}{2}A_{m-1}(1 + \alpha_{m-1}^*)e^{ik_{m-1}^*h_{m-1}} + \frac{1}{2}B_{m-1}(1 - \alpha_{m-1}^*)e^{-ik_{m-1}^*h_{m-1}} \\ B_m = \frac{1}{2}A_m(1 - \alpha_{m-1}^*)e^{ik_{m-1}^*h_{m-1}} + \frac{1}{2}B_{m-1}(1 + \alpha_{m-1}^*)e^{-ik_{m-1}^*h_{m-1}} \end{cases} \quad (3.40)$$

Em que α_{m-1}^* é denominado como coeficiente de impedância complexo na interface de contacto entre as camadas $m - 1$ e m e é dado pela expressão (3.41).

$$\alpha_{m-1}^* = \frac{k_{m-1}^*G_{m-1}^*}{k_m^*G_m^*} \quad (3.41)$$

Recorrendo à condição de fronteira de superfície livre, que impõe que a tensão no topo da camada mais superficial tem de ser nula, obtém-se a expressão (3.42).

$$\begin{aligned} \tau_1(z = 0, t) = 0 &\Leftrightarrow G_1^*\gamma(z = 0, t) = 0 \Leftrightarrow G_1^* \frac{\partial u(z = 0, t)}{\partial z} = 0 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow [A_1 e^{i(\bar{\omega}t + k_1^*z)} - B_1 e^{i(\bar{\omega}t - k_1^*z)}]_{z=0} = 0 \Leftrightarrow A_1 e^{i(\bar{\omega}t)} - B_1 e^{i(\bar{\omega}t)} = 0 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow e^{i(\bar{\omega}t)} = 0 \vee A_1 - B_1 = 0 \Leftrightarrow A_1 = B_1 \end{aligned} \quad (3.42)$$

Aplicando as equações (3.40) desde a primeira camada até ao substrato rochoso, e tendo em conta a equação (3.42) e um registo sísmico à base do depósito de solo, obtém-se as equações de propagação unidimensional do sismo para cada camada.

O exemplo de uma função de transferência, $H(\bar{\omega})$, que permita calcular o deslocamento relativo entre o topo e a base do depósito de solo, é dada pela expressão (3.43).

$$H(\bar{\omega}) = \frac{u_1(z_1 = 0, t)}{u_m(z_m = h_m, t)} \quad (3.43)$$

Deste modo, através do método da resposta complexa e conhecendo o movimento sísmico na base do perfil de terreno, é possível prever a sua variação ao longo das camadas suprajacentes, conforme ilustra a Figura 3.9.

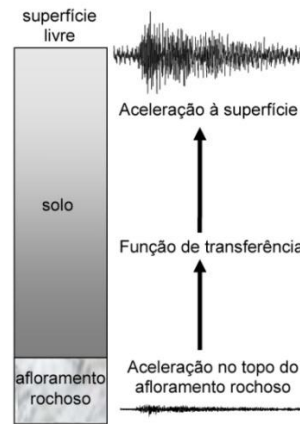


Figura 3.9 - Ilustração do método linear equivalente. Adaptado de McIntyre (2008)

Esta metodologia necessita, como um dos dados de entrada, de uma ação sísmica à base do depósito de solo. Nestes casos, o deslocamento provocado por esse registro sísmico corresponde ao valor da equação de propagação unidimensional do sismo para o topo do substrato rochoso.

No entanto, é comum efetuarem-se registros de movimentos sísmicos à superfície de afloramentos, sendo necessário determinar a função de transferência entre um afloramento rochoso e a base de um depósito de solo que apresente as mesmas propriedades físicas que o substrato rochoso (Figura 3.10).

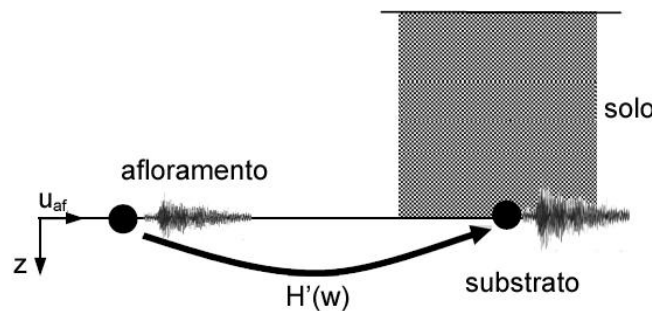


Figura 3.10 - Função de transferência entre afloramento rochoso sem e com depósito de solo suprajacente.

Adaptado de Gomes (2009)

A equação (3.38) aplicada no topo do afloramento é dada por:

$$u_{af}(z, t) = A_{af}e^{i(\bar{\omega}t+k_m^*z)} + B_{af}e^{i(\bar{\omega}t-k_m^*z)} \quad (3.44)$$

Com base na condição de fronteira de superfície livre, obtém-se:

$$\tau_{af}(z = 0, t) = 0 \Leftrightarrow A_{af} = B_{af} \quad (3.45)$$

Logo, a função de transferência, $H'(\bar{\omega})$, que permite obter o deslocamento na base do perfil de terreno a partir do deslocamento do afloramento, é dada por:

$$H'(\bar{\omega}) = \frac{u_{rocha}(z_{rocha} = 0, t)}{u_{af}(z = 0, t)} = \frac{A_{rocha}e^{i(\bar{\omega}t)} + B_{rocha}e^{i(\bar{\omega}t)}}{A_{af}e^{i(\bar{\omega}t)} + B_{af}e^{i(\bar{\omega}t)}} = \frac{A_{rocha} + B_{rocha}}{2A_{af}} \quad (3.46)$$

3.5) Método linear equivalente

O método linear equivalente é um processo iterativo que tem em conta a relação não linear entre as distorções aplicadas ao solo, o módulo de distorção secante e o coeficiente de amortecimento.

O processo iterativo visa compatibilizar as propriedades dinâmicas do solo usadas na análise linear, com o nível de deformação em todas as camadas da resposta a uma dada ação sísmica. A dependência da rigidez de corte e do amortecimento relativamente à deformação é efetuada através das curvas dependentes da distorção, já analisadas na secção 3.1.

São utilizadas duas vias para a realização da iteração referida: a via determinística e a estocástica.

3.5.1) Via determinística

Este processo realiza uma análise no domínio do tempo, em que a ação sísmica é expressa por uma série temporal, em geral de acelerações, e é calculada a distorção máxima no meio de cada camada.

Seguidamente são descritos os passos do processo iterativo:

(i) Arbitrar constantes G e ξ para cada camada. Uma forma possível de o fazer é arbitrar um valor de γ_0 na gama das pequenas deformações e obter $G_{c\acute{a}lculo}/G_{m\acute{a}x} = G/G_{m\acute{a}x}(\gamma_0)$ e $\xi_{c\acute{a}lculo} = \xi(\gamma_0)$;

(ii) Aplicar a análise de propagação utilizando os parâmetros arbitrados e obter $\gamma_1 = \beta\gamma_{m\acute{a}x}$ para cada camada. Esta parcela permite introduzir algumas correções verificadas entre os valores máximos de distorções aplicados por sismos e os simulados em laboratório. Enquanto que, num sismo, o solo atinge uma única vez a distorção máxima, laboratorialmente este valor é atingido dez vezes em resposta cíclica, pelo que os parâmetros que caracterizam a histeresse em ambos os casos devem ser diferentes. De acordo com Kramer (1996), o parâmetro β é usualmente balizado entre 0,5 e 0,7, sendo 0,65 o valor mais utilizado.

(iii) Se $\gamma_0 \approx \gamma_1$, então conclui-se que $G/G_{m\acute{a}x} = G_{c\acute{a}lculo}/G_{m\acute{a}x}$ e $\xi_{c\acute{a}lculo} = \xi$ e termina-se o processo iterativo. Caso contrário, arbitra-se $G_{c\acute{a}lculo}/G_{m\acute{a}x} = G/G_{m\acute{a}x}(\gamma_1)$ e $\xi_{c\acute{a}lculo} = \xi(\gamma_1)$;

(iv) Aplicar o método da resposta complexa para obter $\gamma_2 = \beta\gamma_{m\acute{a}x}$;

(v) Se $\gamma_1 \approx \gamma_2$, então conclui-se que $G/G_{m\acute{a}x} = G_{c\acute{a}lculo}/G_{m\acute{a}x}$ e $\xi_{c\acute{a}lculo} = \xi$ e termina-se a iteração. Caso contrário, repetem-se os procedimentos anteriores, sendo que γ_n corresponde à distorção obtida no fim da n -ésima iteração.

Embora a convergência não seja totalmente garantida,  frequente alcançr diferençs de 5 a 10% com três a cinco iterações. Aceita-se que o erro mínimo entre duas iterações consecutivas não deverá exceder 1%.

Existe *software* que aplica o método linear equivalente, destacando-se EERA [Bardet *et al.*, 2000], SHAKE [Schnabel *et al.*, 1972] e STRATA [Kottke *et al.*, 2010].

3.5.2) Via estocástica

Os processos estocásticos têm-se revelado adequados para descrever alguns fenmenos físicos. Em Engenharia Civil, têm sido essencialmente utilizados para proceder à caracterização das ações sísmicas e para estudar vibrações em estruturas.

Se os registos efetuados diferirem entre si, ainda que as condições iniciais sejam idênticas, então o processo diz-se estocástico, probabilístico ou de natureza aleatória. Uma sequência de registos sísmicos efetuados num dado local é o exemplo de um processo estocástico, onde todos os registos são diferentes.

Existe, então, uma imprevisibilidade relativamente às características de um dado evento, visto este não poder ser descrito através de uma relação matemática determinística. Estes processos são podem ser descritos através de propriedades estatísticas apropriadas, como a probabilidade de ocorrência. Essas propriedades estatísticas são habitualmente obtidas através de medianas do conjunto de todos os registos.

Existem, então, vantagens na aplicação de modelos estocásticos no caso em estudo, tal como a adequação do registo sísmico à imprevisibilidade das suas características e a eventual análise combinada de dados.

A via estocástica  aplicável a modelos em que o registo sísmico de entrada:

- (i) seja considerado como um processo de banda estreita;
- (ii) apresente uma distribuição de valores máximos gaussiana;
- (iii) seja considerado como um processo estacionário.

O primeiro ponto está relacionado com o domínio da frequência: um processo é considerado de banda estreita quando recebe a contribuição de vários sinais sinusoidais com frequências contidas numa zona limitada, isto é, quando o sinal tem nitidamente uma frequência predominante. Com efeito, quaisquer que sejam as características de uma excitação, seja ela de banda larga ou estreita, a sua filtragem através de um sistema linear resulta na maior parte das vezes num processo de banda estreita [Azevedo, 1996].

O segundo ponto está relacionado com a importância no conhecimento da distribuição dos valores máximos ou de pico, visto que, a maior parte das vezes, são os valores máximos de um registo sísmico que o caracterizam ou condicionam a segurança.

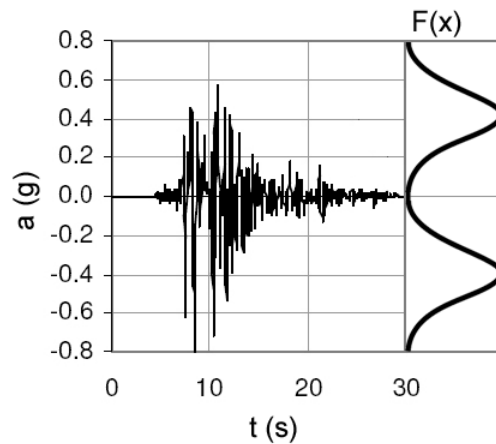


Figura 3.11 - Distribuição normal de valores máximos de um acelerograma

O terceiro ponto está relacionado com a independência do fator tempo: os processos estacionários são aqueles em que as propriedades estatísticas são invariantes relativamente a qualquer translação no tempo. Dessa forma, as propriedades estatísticas conjuntas para dois instantes diferentes não são uma função desses instantes mas sim da diferença temporal. Como exemplo de um processo estacionário, pode considerar-se as vibrações induzidas por uma máquina a trabalhar em regime permanente.

Os processos não estacionários são caracterizados por apresentarem as suas propriedades estatísticas a variar com o tempo e por essas propriedades, em dois instantes diferentes, serem função desses mesmos instantes e não da sua diferença temporal. Como exemplo de processo não estacionário, pode considerar-se as vibrações induzidas por sismos [Azevedo, 1996].

Por conveniência matemática, é correntemente utilizada a teoria dos processos estocásticos à análise das vibrações sísmicas.

A teoria dos processos estocásticos aplicada à caracterização de sismos foi utilizada por investigadores, como Boore e Atkinson (1987), Toro e McGuire (1987), e Atkinson e Boore (1995), para simular os valores máximos do movimento do solo a partir de modelos de fontes pontuais.

Como parâmetro de entrada da via estocástica do método linear equivalente, a função densidade espectral de potência da ação, $S_a(\omega)$, é utilizada para se obter a função densidade espectral de potência da resposta, $S_r(\omega)$. Ambas as grandezas se relacionam pela expressão (3.47) [Guerreiro, 2011].

$$S_r(\bar{\omega}) = |H''(\bar{\omega})|^2 S_a(\bar{\omega}) \quad (3.47)$$

Em que $H''(\bar{\omega})$ representa a função de transferência complexa entre o movimento excitador e a resposta. Esta função pode apresentar vários formatos dependendo das grandezas em análise. A expressão (3.48) permite comparar a aceleração absoluta na base de um sistema com um grau de liberdade e de frequência angular própria ω_n , com o deslocamento relativo no topo. A expressão (3.49) permite obter a aceleração relativa no topo de um perfil de terreno, admitido como um oscilador de um grau de liberdade, a partir da aceleração absoluta na base.

$$H''(\bar{\omega}) = -\frac{1}{\omega_n^2 - \bar{\omega}^2 + 2i\xi\omega_n\bar{\omega}} \quad (3.48)$$

$$H''(\bar{\omega}) = \frac{\omega_n^2 + 2i\xi\omega_n\bar{\omega}}{\omega_n^2 - \bar{\omega}^2 + 2i\xi\omega_n\bar{\omega}} \quad (3.49)$$

A frequência própria com maior fator de participação modal é denominada de frequência fundamental e pode ser calculada pela expressão (3.50), em que T_n representa o período próprio de um estrato do perfil de terreno.

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T_n} = \frac{4h}{v_s} \quad (3.50)$$

Para cada profundidade de discretização, as funções de densidade espectral de potência da deformação por corte permitem obter os respectivos momentos espectrais de ordem 0 e 2, dados por (3.51), sendo j a ordem [Serra e Caldeira, 1997].

$$m_j = \int_0^{+\infty} \omega^j S_r(\omega) d\omega \quad (3.51)$$

Por fim, a equação que permite calcular a distribuição dos máximos da função densidade espectral de potência da ação é dada pela expressão (3.52) [Serra e Caldeira, 1997].

$$E(p) = \sqrt{2m_0 \left[\ln \left(\frac{d}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \right) - \ln(-\ln(p)) \right]} \quad (3.52)$$

Em que p representa o valor associado ao percentil em análise e d a duração do processo de resposta estacionário.

A equação (3.52) permite, então, obter um espectro de resposta a partir de um espectro de potência.

O processo estocástico adotado elimina o problema da representatividade determinística da ação sísmica a utilizar no método linear equivalente. Em Engenharia Civil, existe especial interesse na determinação da mediana dos máximos da resposta a um conjunto de ações sísmicas.

4) Análise e tratamento de dados

4.1) Análise das sondagens

A caracterização das condições locais do terreno foi efetuada a partir de sondagens. Os elementos de base para o presente trabalho resultaram de dois projetos nacionais promovidos pela Autoridade Nacional da Proteção Civil [Cansado Carvalho *et al.*, 2002; Sousa *et al.*, 2008] e consistem em:

- (i) 280 perfis de terreno da região do Algarve

Estes perfis foram recolhidos através de prospeção geológica e geotécnica, tendo sido reunidos no programa “GeoAlgarve”. Este programa foi realizado como suporte ao trabalho desenvolvido pela Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Algarve, no âmbito do Estudo de Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve [Estevão, 2007].

Na Figura 4.1 pode visualizar-se a distribuição dos perfis pela região do Algarve. Obtiveram-se também dados em profundidade sobre a litologia, estratificação, valores corrigidos do ensaio SPT, N_{60} , e velocidade de propagação da onda sísmica, de compressão, v_p , e de corte, v_s .

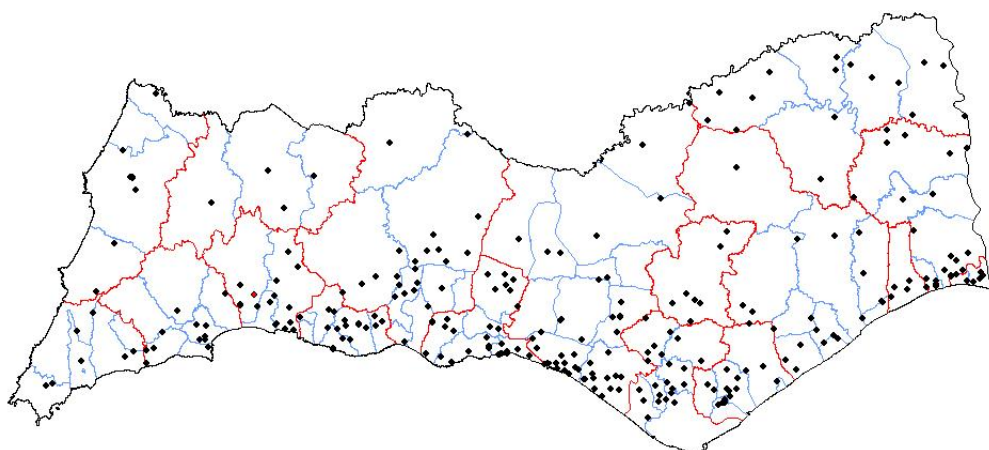


Figura 4.1 - Localização das sondagens analisadas na região algarvia [Estevão, 2007]

Apresenta-se no Quadro 4.1 um exemplo de um perfil estratigráfico.

Quadro 4.1 - Informações geológicas e geotécnicas do perfil nº27 da região algarvia

Perfil nº27	Concelho: Silves		Freguesia: Alcantarilha			
	Profundidade do topo do estrato (m)	Descrição geológica	h (m)	N_{60}	v_s (m/s)	v_p (m/s)
1	0	Argilas (Plio-Plistocénico)	15	20	218	465
2	15	Argilas (Plio-Plistocénico)	19	40	256	546
Substrato rochoso	34	Calcários, calcários dolomíticos e margas não carsificados	-	-	1670	3390

(ii) 49 perfis “tipo” de terreno da região do Algarve

Os 49 “tipos” de perfis resultaram de uma simplificação dos 280 perfis anteriormente analisados e apresentam informações em profundidade da estratificação, densidade relativa, índice de plasticidade e velocidade de corte de propagação da onda sísmica. Cada freguesia da região do Algarve ficou, assim, associada a um número mínimo de perfis necessário para representar a diversidade de situações nele encontradas do ponto de vista da modelação dos efeitos sísmicos de sítio [Sousa *et al.*, 2008].

Estes perfis apenas serviram, no presente trabalho, para complementar e extrair informação não incluída nos 280 perfis da mesma região, necessária à caracterização segundo o Eurocódigo 8. Foi verificado que foram adotadas algumas correlações de forma a obter parâmetros geotécnicos, como o índice de plasticidade e a densidade relativa dos estratos, d_r .

Encontra-se também incluído o valor do número de camadas em análise, m , a adotar no método linear equivalente, conforme se encontra descrito na equação (3.38).

No Quadro 4.2 apresenta-se o perfil “tipo” U que foi obtido a partir do perfil descrito no Quadro 4.1.

Quadro 4.2 - Informações geológicas e geotécnicas do perfil tipo “U” da região algarvia

Perfil “tipo” U	Concelho: Silves			Freguesia: Alcantarilha		
	Profundidade (m)	h (m)	$v_{s,médio}$ (m/s)	IP (%)	d_r	m
1	0	15	210	0	1,7	11
2	15	19	250	0	1,8	14
Substrato rochoso	34	-	800	-	2,2	0

(iii) 38 perfis “tipo” de terreno da área metropolitana de Lisboa

Estes “tipos” de terreno apresentam informações em profundidade da estratificação, densidade relativa, índice de plasticidade, velocidade de corte de propagação da onda sísmica e número de camadas [Cansado Carvalho *et al.*, 2002]. Não foi possível obter os dados iniciais que originaram a simplificação destes “tipos”, pelo que se desconhece a descrição geológica dos estratos.

Como exemplo, apresenta-se no Quadro 4.3 um perfil “tipo”.

Quadro 4.3 - Informações geológicas e geotécnicas do perfil tipo “D” do distrito de Lisboa

Perfil “tipo” D	Distrito: Lisboa					
	Profundidade (m)	h (m)	$v_{s,médio}$ (m/s)	IP (%)	d_r	m
1	0	4,5	111	40	1,8	4
2	4,5	2	210	40	1,8	2
3	6,5	3,5	243	40	1,8	3
4	10	6	249	0	1,8	6
Substrato rochoso	16	-	1000	0	2,2	0

4.2) Definição de parâmetros geotécnicos

4.2.1) Curvas de degradação do módulo de distorção normalizado e do coeficiente de amortecimento em função da distorção

Foi realizada uma análise de sensibilidade destas propriedades às curvas propostas por Darendeli (2001), tendo, como variáveis, os seguintes parâmetros do solo:

- i) a granulometria do solo;
- ii) a tensão média efetiva de confinamento, p' ;
- iii) o grau de sobreconsolidação, OCR ;
- iv) o índice de plasticidade, IP ;
- v) a frequência da ação, \bar{f} ;
- vi) o número de ciclos de carga, N .

4.2.1.1) Efeito da granulometria do solo

Darendeli (2001) propôs a divisão dos solos tendo em conta a sua granulometria, tal como se encontra apresentado na secção 3.1.2.

Os gráficos presentes na Figura 4.2 demonstram a variação do tipo de solo nas curvas empíricas propostas por Darendeli (2001).

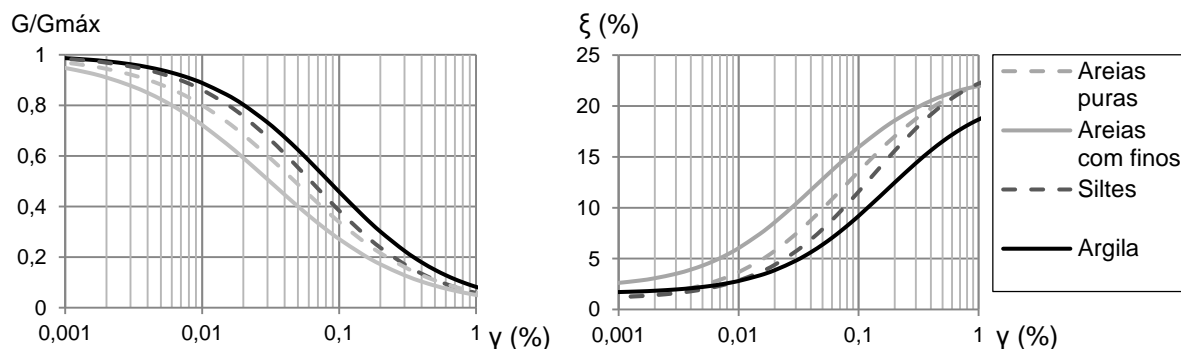


Figura 4.2 - Influência da granulometria do solo nas curvas apresentadas por Darendeli (2001), para $p' = 1$ atm, $OCR = 1$, $\bar{f} = 3$ Hz e $N = 10$, em todos os solos, e $IP = 0\%$ para as “areias puras” e $IP = 30\%$ para os restantes solos.

Da análise da figura apresentada, verifica-se uma clara influência da granulometria dos solos, pelo que esta diferenciação será incluída na modelação computacional do método linear equivalente.

Foram, no entanto, descartadas as curvas empíricas de siltes, pois as sondagens reunidas, que incluíam informações litológicas, não apresentavam este tipo de solo.

As areias do Plio-Plistocénico e do Holocénico foram incluídas no grupo de “areias puras”; as areias argilosas do Terciário foram incluídas no grupo “areias com finos”; as argilas do Plio-Plistocénico, as aluviões e lodos do Holocénico e os terraços fluviais do Plio-Plistocénico foram incluídos no grupo das argilas, proposto por Darendeli (2001).

Das sondagens que não apresentavam informações litológicas, realizou-se uma análise aproximada pelo valor de índice de plasticidade.

Teve-se em conta que o erro introduzido pelas simplificações acima indicadas não vai produzir uma grande diferença nos resultados finais, pois, de acordo com a análise apresentada por Idriss (2004), as propriedades do solo apresentam uma influência significativa, mas não fundamental, na análise da resposta sísmica local (ver Quadro 4.4). Deste modo, considerou-se suficiente a análise dos grupos “areias puras”, “areias com finos” e argilas.

Quadro 4.4 - Fatores que influenciam o cálculo da resposta sísmica local. Adaptado de Idriss (2004)

Fatores	Grau de influência
Ação sísmica no afloramento rochoso	Muito significativa
Perfil do terreno	Muito significativa
Propriedades do solo	Significativa
Métodos de análise	Muito significativa, caso sejam aplicados incorretamente

4.2.1.2) Efeito da tensão média efetiva

A análise do efeito da tensão média efetiva é efetuada para a gama de valores de interesse para este estudo. Neste âmbito, observou-se que:

- Das sondagens obtidas, a profundidade média de solo acima do substrato rochoso é de 22,61 m e 75% dos casos apresentam uma profundidade inferior a 28,63 m;
- De acordo com pesquisas bibliográficas realizadas, os valores típicos de coeficiente de impulso em repouso do solo são os descritos no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 - Valores típicos de coeficiente de impulso em repouso do solo [Rocscience e Chapman *et al.*, 2010]

Tipo de solo	Característica	k_0
Areias	Solta	0,35
	Medianamente compacta	0,4 a 0,5
	Densa	0,6
Argilas	Normalmente consolidadas	0,5 a 0,6
	Sobreconsolidadas	1 a 3

Adotando a profundidade de 28 m, um peso volúmico de solo médio de 20 kN/m³ e um valor de coeficiente de impulso em repouso unitário, obtém-se um valor da tensão média de confinamento de 560 kPa, pelo que se optou por realizar uma análise para os valores de:

$$p' = \{50, 100, 200, 400, 600\} \text{ kPa}$$

Nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 apresenta-se o efeito da variação da tensão média efetiva de confinamento nas curvas empíricas dos três tipos de solo selecionados.

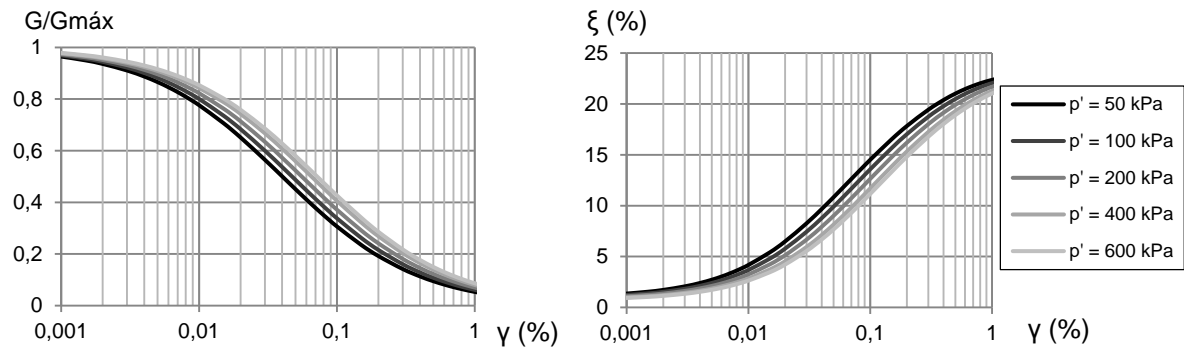


Figura 4.3 - Variação de p' nas curvas apresentadas por Darendeli (2001), para um solo do tipo “areias puras”, $IP = 0\%$, $OCR = 1$, $\bar{f} = 3$ Hz e $N = 10$

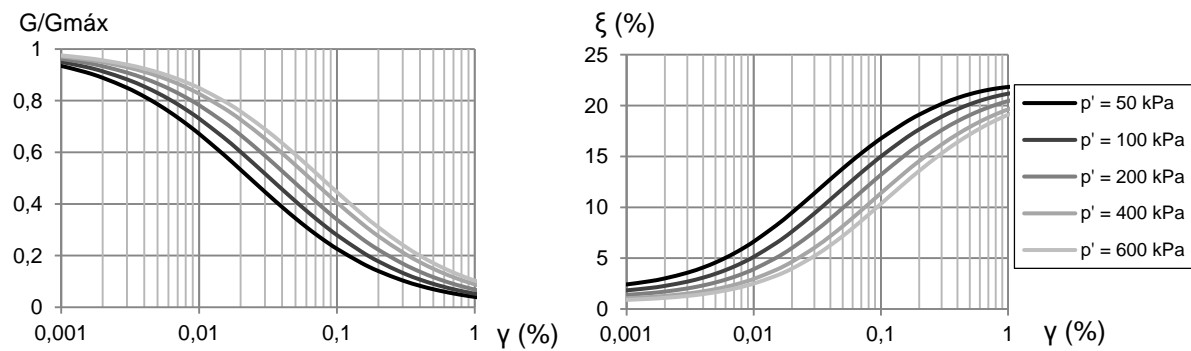


Figura 4.4 - Variação de p' nas curvas apresentadas por Darendeli (2001), para um solo do tipo “areias com finos”, $IP = 10\%$, $OCR = 1$, $\bar{f} = 3$ Hz e $N = 10$

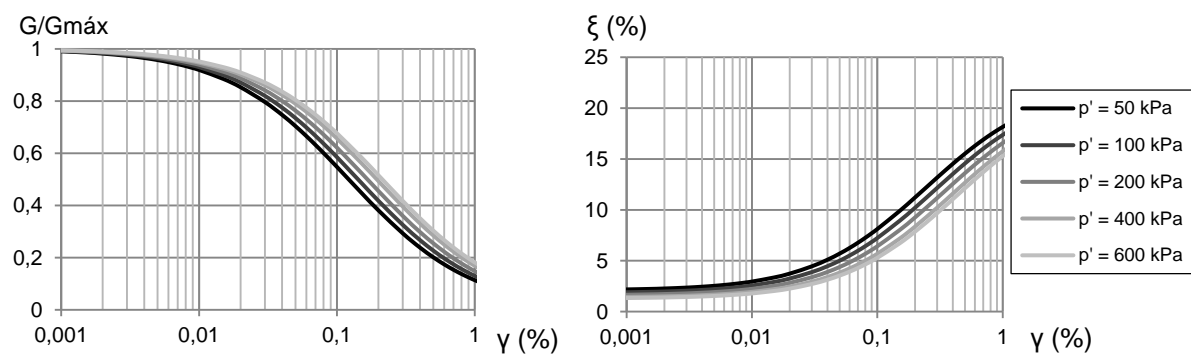


Figura 4.5 - Variação de p' nas curvas por Darendeli (2001), para um solo do tipo argilas, $IP = 60\%$, $OCR = 1$, $\bar{f} = 3$ Hz e $N = 10$

Verifica-se que o aumento da tensão média efetiva de confinamento produz, nos três tipos de solo em análise, uma variação significativa em ambas as curvas em estudo. Esta variação é mais notória nos solos do tipo “areias com finos”.

4.2.1.3) Impacto do grau de sobreconsolidação

Tendo em conta que Vucetic e Dobry (1991) concluíram que o grau de sobreconsolidação do solo não apresenta influência significativa sobre as curvas empíricas em análise, escolheu-se realizar uma análise numa gama de valores entre a unidade e a dezena, com saltos de 2,5.

Visto que, no caso das “areias puras”, o valor do índice de plasticidade é inferior a 12%, pode-se verificar que o resultado do produto entre o índice de plasticidade e o grau de sobreconsolidação, segundo as expressões (3.9) e (3.11), não é significativo. De facto, o grau de sobreconsolidação em “areias puras” não tem expressão física.

Nas Figuras 4.6 e 4.7 apresenta-se o efeito da variação do grau de sobreconsolidação nas curvas empíricas dos solos “areias com finos” e argilas.

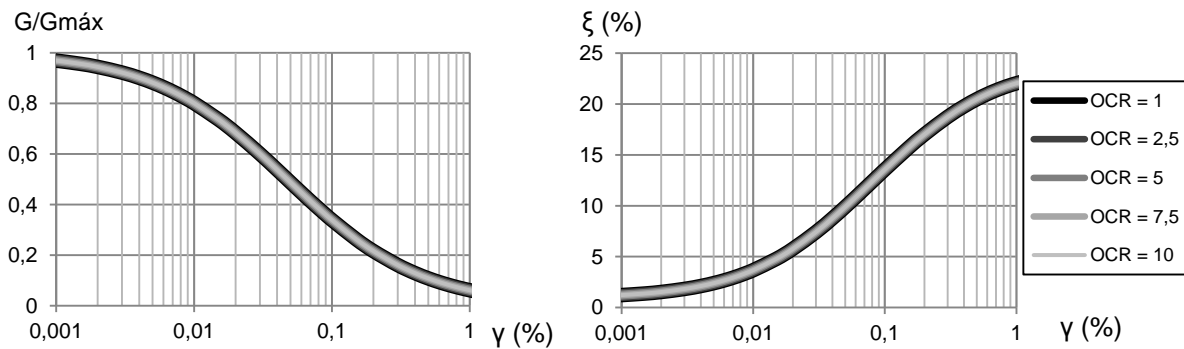


Figura 4.6 - Variação de OCR nas curvas apresentadas por Darendeli (2001), para um solo do tipo “areias com finos”, $IP = 10\%$, $p' = 1 \text{ atm}$, $\bar{f} = 3 \text{ Hz}$ e $N = 10$

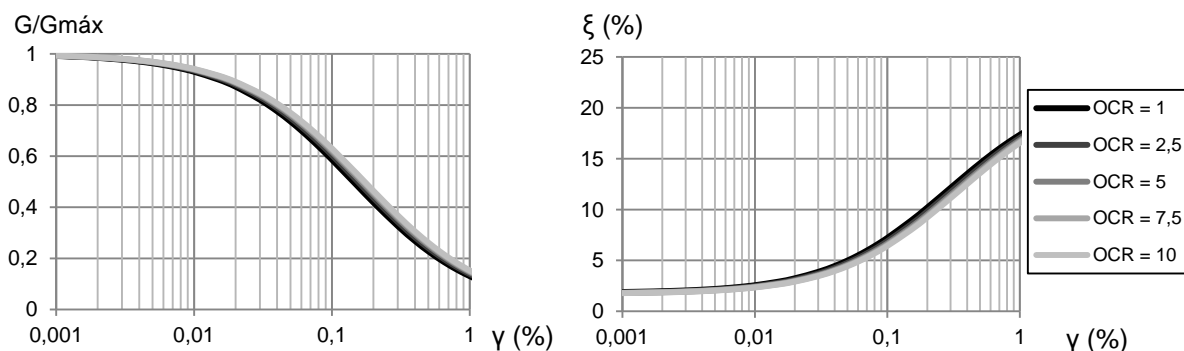


Figura 4.7 - Variação de OCR nas curvas apresentadas por Darendeli (2001), para um solo do tipo argilas, $IP = 60\%$, $p' = 1 \text{ atm}$, $\bar{f} = 3 \text{ Hz}$ e $N = 10$

Inferre-se que o aumento do grau de sobreconsolidação não produz uma variação significativa em ambas as curvas e nos dois tipos de solo, tal como foi constatado por Vucetic e Dobry (1991).

4.2.1.4) Efeito do índice de plasticidade

Tendo em conta os valores do índice de plasticidade apresentados nas sondagens, optou-se por realizar uma análise deste parâmetro entre o valor 0 e 60%, com saltos de 10%. Dos resultados obtidos para o tipo de solo “areias puras”, verificou-se que as curvas, para um índice de plasticidade superior a 10%, não apresentam uma forma convencional, pelo que não são analisadas.

Nas Figuras 4.8 e 4.9 apresenta-se o efeito da variação do índice de plasticidade nas curvas empíricas dos solos “areias com finos” e argilas.

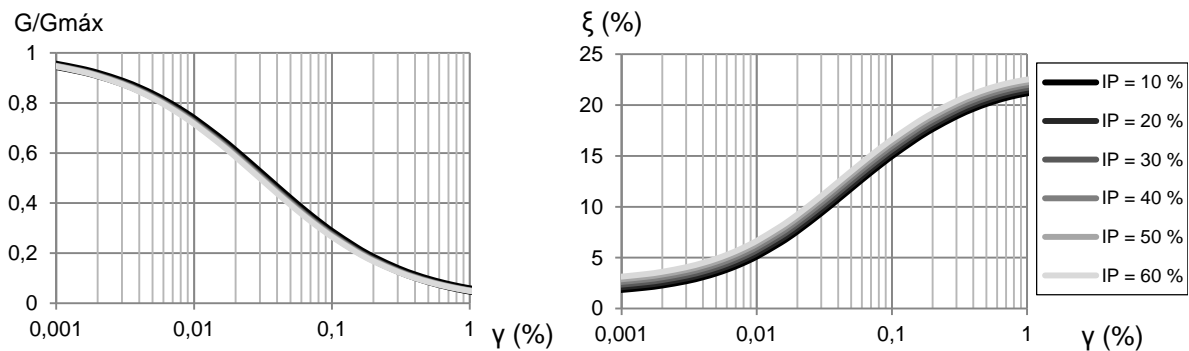


Figura 4.8 - Variação de IP nas curvas apresentadas por Darendeli (2001), para um solo do tipo “areias com finos”, $p' = 1$ atm, $OCR = 1$, $\bar{f} = 3$ Hz e $N = 10$

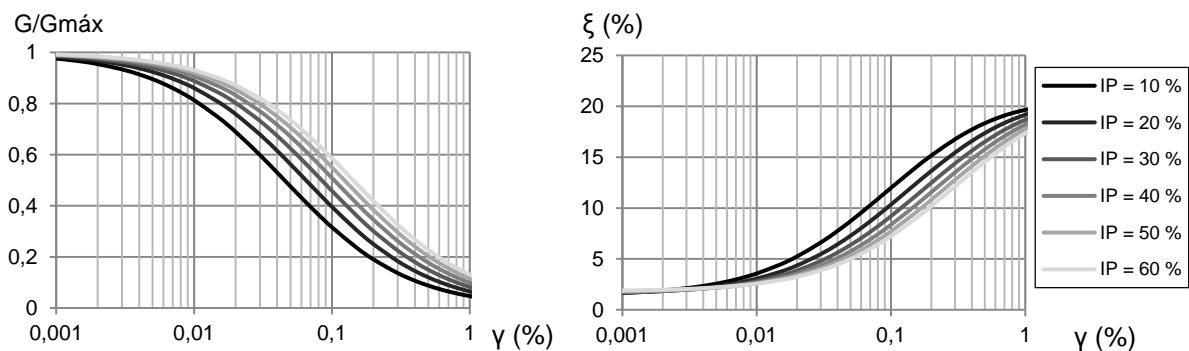


Figura 4.9 - Variação de IP nas curvas apresentadas por Darendeli (2001), para um solo do tipo argilas, $p' = 1$ atm, $OCR = 1$, $\bar{f} = 3$ Hz e $N = 10$

Observa-se que o aumento do índice de plasticidade produz uma variação significativa nos solos do tipo “argilas”. Em solos do tipo “areias com finos” o efeito é menos acentuado e, no caso da curva de degradação do módulo de distorção, poderá ser desprezável.

4.2.1.5) Efeito da frequência da ação

Tendo em conta que o valor de 3 Hz é uma frequência predominante em grande parte de sismos e que corresponde à frequência própria de muitas estruturas, é relevante analisar um intervalo de valores próximo desta frequência. A Figura 4.10 exemplifica a influência desse fator.

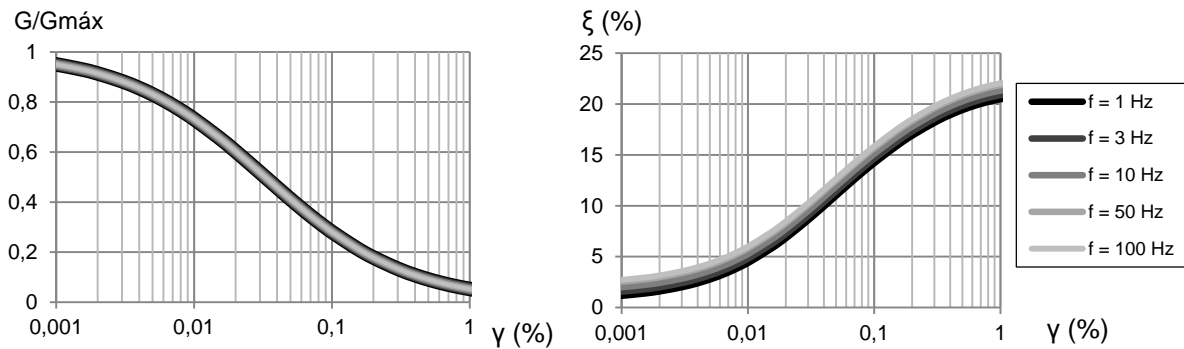


Figura 4.10 - Variação de \bar{f} nas curvas apresentadas por Darendeli (2001), para um solo do tipo “areias com finos”, $p' = 1$ atm, $OCR = 1$, $IP = 10\%$ e $N = 10$

Verificando-se a mesma variação para os restantes tipos de solos, observa-se que o aumento da frequência da ação não produz uma alteração significativa em ambas as curvas, podendo, no caso da curva de degradação do módulo de distorção, ser desprezável.

4.2.1.6) Efeito do número de ciclos de carga

Tendo em conta que, laboratorialmente, os ensaios de torção cíclica atingem os dez ciclos de carga e os de coluna ressonante atingem os mil ciclos de carga [Darendeli, 2001], obtiveram-se os gráficos representados na Figura 4.11.

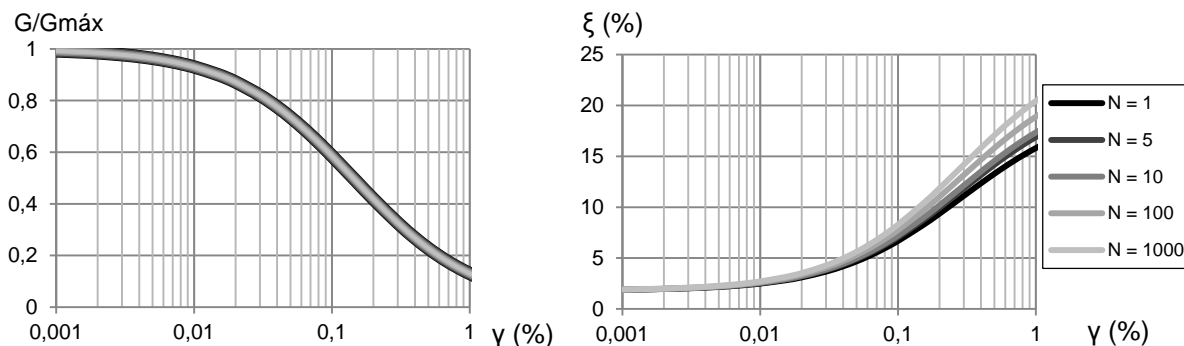


Figura 4.11 - Variação de N nas curvas apresentadas por Darendeli (2001), para um solo do tipo argilas, $p' = 1$ atm, $OCR = 1$, $IP = 60\%$ e $\bar{f} = 3$ Hz

Verificando-se a mesma variação para os restantes tipos de solos, infere-se que o aumento do número do ciclo de carga não produz uma alteração significativa em ambas as curvas, podendo, no caso da curva de degradação do módulo de distorção, ser desprezável.

4.2.1.7) Curvas dependentes da distorção utilizadas nos cálculos

De acordo com a análise realizada, foram definidas dez curvas para diferentes granulometrias e gama de valores de IP e de σ'_v , para se utilizar nos cálculos subseqüentes, conforme apresentadas no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 - Curvas consideradas e valores de parâmetros de solo

Curva	Solo	IP (%)	σ'_v (kPa)
1	Areias puras	[0,10[[0;70[
2	Areias puras	[0,10[[70;200[
3	Areias puras	[0,10[[200;∞[
4	Areias com finos	[10,30[[0;50[
5	Areias com finos	[10,30[[50;150[
6	Areias com finos	[10,30[[150;300[
7	Areias com finos	[10,30[[300;∞[
8	Argilas	[30,60]	[0;70[
9	Argilas	[30,60]	[70;200[
10	Argilas	[30,60]	[200;∞[

Os valores utilizados para a modelação de cada curva empírica estão apresentados no Quadro 4.7. Note-se que se constatou que os parâmetros k_0 , OCR , \bar{f} e N não têm influência significativa nas curvas, pelo que foram escolhidos valores dentro de uma gama aceitável.

Quadro 4.7 - Valores adotados para a modelação das curvas do Quadro 4.6

Curva	IP (%)	σ'_v (kPa)	p' (atm)	k_0	OCR	\bar{f} (Hz)	N
1	0	35	0,23	0,5	1	3	10
2	0	135	0,89	0,5	1	3	10
3	0	300	1,97	0,5	1	3	10
4	10	25	0,18	0,6	1	3	10
5	10	100	0,72	0,6	1	3	10
6	10	225	1,63	0,6	1	3	10
7	10	400	2,89	0,6	1	3	10
8	40	35	0,30	0,8	1,5	3	10
9	40	135	1,15	0,8	1,5	3	10
10	40	300	2,57	0,8	1,5	3	10

4.2.2) Correlações aplicadas

Os 280 perfis de terreno disponíveis têm a distribuição litológica apresentada na Figura 4.12, tendo em conta o somatório das espessuras associado a cada estrato.

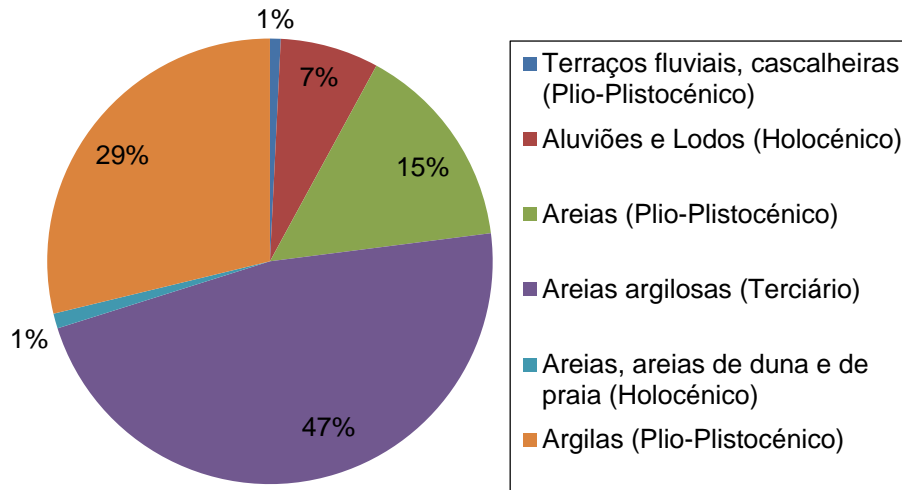


Figura 4.12 - Distribuição litológica dos estratos das sondagens recolhidas, tendo em conta a espessura dos estratos

Sendo a maior parte dos solos constituído por areias argilosas (Terciário), argilas (Plio-Plistocénico), areias (Plio-Plistocénico) e aluvião e lodos (Holocénico), vai proceder-se a uma análise mais detalhada destes tipos de solo.

Foi anteriormente mencionado que os 49 perfis “tipo” de terreno da região do Algarve foram obtidos através dos 280 perfis de terreno da mesma região, pelo que se tentou perceber quais as correlações aplicadas.

Apesar de existir alguma dificuldade na ligação entre ambos os conjuntos de perfis, conseguiu inferir-se que:

- (i) a todos os substratos rochosos foi atribuída uma densidade relativa de 2,2;
- (ii) à maioria das aluviões e lodos (Holocénico) foi atribuída um índice de plasticidade de 40% e uma densidade relativa de 1,6 ou 1,7;
- (iii) à maioria das argilas (Plio-Plistocénico) foi atribuída um índice de plasticidade de 40% e uma densidade relativa de 1,7;
- (iv) à maioria das areias argilosas (Terciário) foi atribuída um índice de plasticidade de 10% e densidade relativa entre 1,7 e 1,9;
- (v) maioria das areias (Plio-Plistocénico) foi atribuída um índice de plasticidade de 0% e uma densidade relativa de 1,9.

Para além das correlações aplicadas, procurou-se também validar os valores escolhidos com intervalos usuais de valores.

Recorreu-se aos valores do Quadro 4.5, bem como aos dos Quadro 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11, que resultaram de uma compilação de várias pesquisas bibliográficas.

Quadro 4.8 - Classificação Unificada de solos

Classificação Unificada	SC, SM, SP e SW	ML e MH	CL e CH
Fração granulométrica predominante	Areia	Silte	Argila
Percentagem retida no peneiro #200 (%)	> 50	≤ 50	
Índice de plasticidade, <i>IP</i> (%)	-	≤ 7	≥ 4

Quadro 4.9 - Classificação AASHTO de solos

Classificação AASHTO	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7-6
Fração granulométrica predominante	Areia	Silte		Argilas	
Percentagem passada no peneiro #200 (%)	≤ 35	> 36			
Índice de plasticidade, <i>IP</i> (%)	Não plástico	≤ 10	≤ 10	> 11	> 11

Quadro 4.10 - Valores típicos de índice de plasticidade para solos siltosos e argilosos [Kulhawy e Mayne, 1990]

<i>IP</i> (%)	Fração granulométrica predominante
0	Silte
1 a 5	Silte argilosa
5 a 10	Silte e argila
10 a 20	Argila e silte
20 a 40	Argila siltosa
> 40	Argila

Quadro 4.11 - Valores típicos de massa volúmica para solos [Subramanian ,2010]

Tipo de solo	ρ (kg/m ³)	
	Gama de valores	Valor típico
Areia solta	1700 a 2000	1800
Areia densa	1900 a 2200	2100
Argila mole	1600 a 1900	1750
Argila dura	1900 a 2250	2000
Cascalho	1900 a 2250	2100

Por fim, os valores arbitrados para os parâmetros densidade relativa, coeficiente de impulso em repouso, grau de sobreconsolidação e índice de plasticidade encontram-se definidos no Quadro 4.12.

Quadro 4.12 - Valores de parâmetros geotécnicos adotados consoante a litologia do solo

Litologia	d_r	k_0	OCR	IP (%)
Aluvião e lodos (Holocénico) e Terraços fluviais, cascalheiras (Plio-Plistocénico)	1,6	0,8	1	40
Argilas (Plio-Plistocénico)	1,7	0,8	2	40
Areias argilosas, rubeificadas (Terciário)	1,9	0,6	1	10
Areias, areias de duna e de praia (Holocénico) e Areias (Plio-Plistocénico)	1,8	0,5	1	0
Substrato rochoso	2,2	-	-	-

A espessura de cada camada em análise, necessária à definição do parâmetro m , foi definida de modo a obter-se uma boa discretização das propriedades dos geomateriais em profundidade, pelo que se adotou a espessura das camadas em 1,4 m.

Deste modo, a cada perfil de terreno foi associado a informação mínima necessária para a caracterização do local do ponto de vista sísmico-geotécnico.

4.3) Distribuição dos perfis de terreno pelas classes de terreno tipo do Eurocódigo 8

Pretende-se classificar cada um dos perfis de terreno recolhidos tendo em conta a classificação apresentada no Quadro 2.1.

Foi, inicialmente, realizada uma simplificação dos perfis, tendo em conta um compromisso ideal entre a quantidade de informação e a sua representatividade. Os critérios geológicos e geotécnicos aplicados na simplificação dos perfis encontram-se seguidamente detalhados:

(i) 280 perfis de terreno da região do Algarve

- Foram retirados da análise os perfis unicamente constituídos por rocha, isto é, sem camada de solo, por não serem relevantes para o presente trabalho;
- Foram também desprezados os perfis cuja litologia e velocidade de propagação da onda de corte do substrato rochoso eram desconhecidas.

(ii) 38 perfis “tipo” de terreno da área metropolitana de Lisboa

- Foram simplificadas as camadas com menos de 1 m de espessura, por homogeneização;
- Não tendo informações litológicas sobre o substrato rochoso, admitiu-se que o substrato rochoso correspondia à camada cujo v_s era superior ou igual a 800 m/s.

Em suma, foram reunidos 172 perfis geotécnicos da área metropolitana de Lisboa e região algarvia, tendo sido classificados de acordo com os cinco tipos de terreno corrente definidos no Eurocódigo 8.

Para rápido tratamento dos dados, foi criado um algoritmo para realizar essa classificação, tendo em conta a seguinte ordem sequencial de critérios:

- (i) tipo de terreno E: terreno limitado inferiormente por rocha, com $v_s \leq 800$ m/s, e que apresenta uma camada argilosa, com $IP > 0$, de espessura limitada entre 5 e 20 m e de compactidade média a baixa, admitindo-se com $v_s > 150$ m/s. De modo a excluir casos específicos, foi ainda limitado o $v_{s,30}$ ao valor máximo de 500 m/s;
- (ii) tipo de terreno D: terreno com $v_{s,30} \leq 180$ m/s;
- (iii) tipo de terreno C: terreno com $v_{s,30} \leq 360$ m/s;
- (iv) tipo de terreno B: terreno com $v_{s,30} < 800$ m/s;
- (v) tipo de terreno A: restantes casos.

No Anexo A encontram-se detalhados os 172 perfis de terreno, com os respetivos parâmetros geotécnicos e a sua classificação.

O estudo mais detalhado da classificação dos referidos perfis pode ser encontrado em Delfim (2014).

A classificação dos 172 perfis geotécnicos encontra-se apresentada na Figura 4.13.

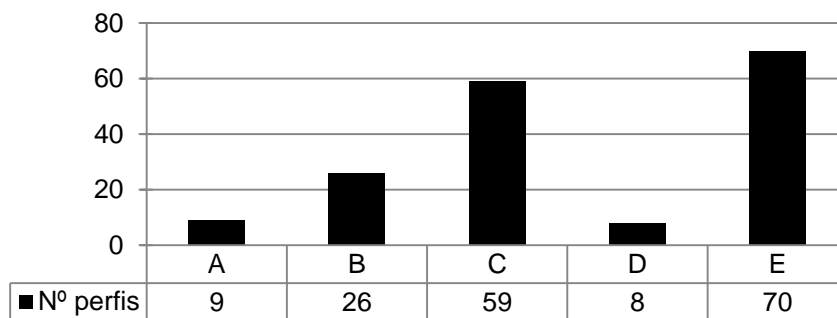


Figura 4.13 - Distribuição dos perfis pelos tipos de terreno do Eurocódigo 8

A distribuição de perfis de terreno pelos tipos A e D do Eurocódigo 8 é reduzida, pelo que a análise resultante destes perfis terá de ser analisada tendo em conta a fraca amostragem. Admite-se que os restantes perfis apresentam uma amostragem adequada.

Foi também realizada a divisão de perfis segundo a classificação apresentada por Pitilakis (2013), tal como se encontra descrito em Delfim (2014). Esta classificação considera os tipos de terreno do Eurocódigo 8, mas inclui também subclasses para ter em conta a posição do substrato rochoso.

No entanto, dada a baixa quantidade de sondagens disponíveis, não foi possível obter para cada subclasse a quantidade adequada de dados para que a análise tivesse significado.

4.4) Análise da ação sísmica ao nível do topo do substrato rochoso

Foram utilizadas séries simuladas, ao nível do topo do substrato rochoso, para os dois tipos de ação sísmica definida no Eurocódigo 8 (EN 1998-1), obtidas através da aplicação da metodologia de falha-finita [Carvalho, 2007]. Estes dados consistem em:

- (i) 13 280 espectros de resposta de aceleração horizontal para sismos de magnitude elevada e epicentro a sudoeste do Cabo São Vicente, mais concretamente, para magnitudes entre 5,5 e 8,7 e distâncias hipocentrais entre 50 e 700 km. Estes espectros enquadram-se na ação sísmica tipo 1 do Eurocódigo 8;
- (ii) 4 843 espectros de resposta de aceleração horizontal para sismos de magnitude moderada a curtas distâncias, isto é, uma distância hipocentral inferior a 200 km e magnitude entre 4,1 e 7,5. Estes espectros enquadram-se na ação sísmica tipo 2 do Eurocódigo 8.

Cada um destes espectros de resposta contém valores de aceleração, SA , em cm/s^2 , para 18 valores de frequência.

Na Figura 4.14, encontra-se o exemplo de um espectro de resposta de acelerações, ao nível do topo do substrato rochoso, correspondente ao sismo afastado de magnitude 5,5 e distância hipocentral de 104,66 km.

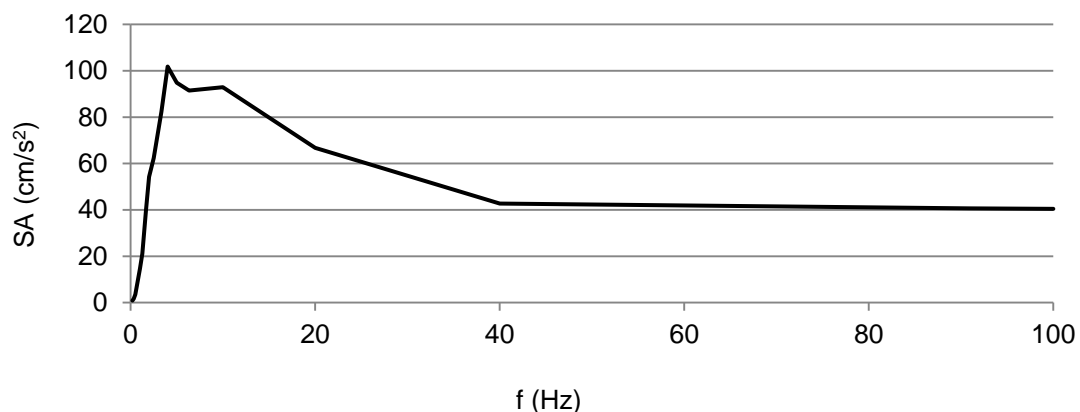


Figura 4.14 - Espectro de resposta de acelerações ao nível do topo do substrato rochoso, correspondente à ação sísmica tipo 1, para $M = 5,5$ e $R = 104,66$ km

4.5) Aplicação do método linear equivalente

A propagação de ações sísmicas pelo terreno acima do substrato rochoso foi modelada pelo método linear equivalente, que tem em conta o comportamento não linear dos solos, traduzido pelas curvas de degradação do módulo de distorção e do coeficiente de amortecimento do solo.

O modelo de propagação vertical de ondas de corte com polarização horizontal inserido na ferramenta LNECLoss [Campos Costa et al., 2004], aplicada neste trabalho, utiliza uma abordagem

estocástica deste método para a estimativa dos valores máximos da resposta ao longo do tempo. A equação (3.52), para um valor de p igual 50% representa a mediana.

Para todos os perfis geotécnicos de cada tipo de solo será considerada a ação já existente ao nível do substrato rochoso que se propaga até à superfície através do respetivo perfil de terreno.

A Figura 4.15 apresenta um esquema ilustrativo dos passos realizados pelo programa LNECLoss, escrito em linguagem *Fortran*.

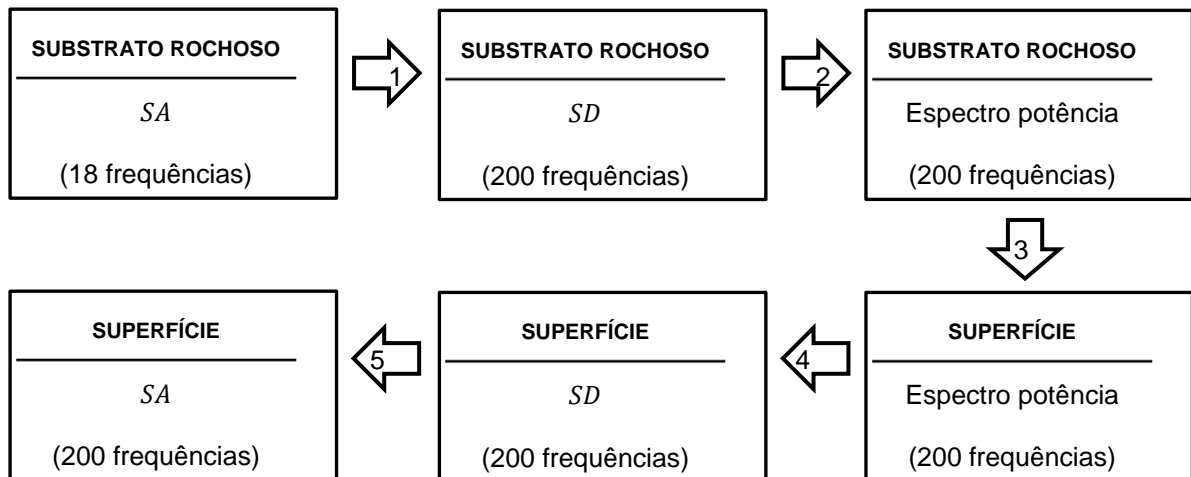


Figura 4.15 - Esquema ilustrativo dos passos do programa LNECLoss

Pretende-se, de seguida, detalhar alguns dos processos fundamentais do programa.

Sendo o parâmetro de entrada um espectro de resposta de aceleração da ação sísmica, SA , ao nível do substrato rochoso, é necessário a sua transformação em função densidade espectral de potência da ação, habitualmente designada como espectro de potência da ação, para a aplicação da versão estocástica do método linear equivalente. Deste modo, no primeiro passo da Figura 4.15, os 18 valores de SA foram interpolados para obtenção de 200 valores e, posteriormente, transformados em espectros de resposta de deslocamento, SD , através da expressão (4.1) [Guerreiro, 2011].

$$SD = \frac{SA}{\omega^2} \quad (4.1)$$

No segundo passo da Figura 4.15, recorreu-se a um processo iterativo, que consiste na sucessiva correção de um espectro de potência inicialmente definido até que seja compatível com um espectro de resposta. As alterações a este espectro inicial são obtidas por comparação entre o espectro de resposta da ação sísmica e o valor da mediana do máximo que se obtém através da aplicação de (3.52) ao espectro de potência obtido em cada iteração. A obtenção de espectros de resposta a partir de espectros de potência é direta e encontra-se descrita na secção 3.5.2.

No terceiro passo da Figura 4.15 é aplicada a versão estocástica do método linear equivalente. Este é traduzido por algoritmos que calculam a função de transferência entre a base da camada i de um

dado perfil de terreno e o topo da mesma, confirmando que a distorção máxima não ultrapassa o limite de validade de aplicação do método.

No quarto passo da Figura 4.15, é obtido o espectro de resposta através do espectro de potência. O espectro de resposta, tal como já foi referido anteriormente, é definido pelo conjunto dos valores máximos da resposta, isto é, o valor médio da distribuição de extremos dado por (3.52), para $p = 50\%$.

No quinto passo da Figura 4.15 do programa é obtido o espectro de resposta em aceleração, à superfície, a partir do espectro de resposta de deslocamento, novamente pela expressão (4.1).

No Anexo B apresentam-se alguns exemplos de algoritmos presentes no programa que recorrem a expressões deduzidas no presente trabalho.

Foram realizadas algumas alterações ao código do programa LNECLoss de modo a incluir as seguintes operações:

- (i) a possibilidade de introduzir diferentes valores de p na equação (3.52);
- (ii) a inclusão de dez curvas de degradação do módulo de distorção e amplificação do coeficiente de amortecimento em função do IP e de σ_v' , conforme indicado no Quadro 4.6. O programa estava inicialmente definido para apenas considerar três curvas, em função do valor de IP ;
- (iii) a introdução de um algoritmo que permita a leitura externa de um ficheiro com os dados geotécnicos fornecidos e correlacionados dos 172 perfis de terreno.

Por fim, as 200 frequências em análise no referido programa encontram-se entre os 0,1018 e os 50 Hz. Por uma questão de tratamento de dados mais simplificada, optou-se apenas pela análise de 22 destas frequências:

$$f = \left\{ \begin{array}{l} 0,201; 0,240; 0,334; 0,522; 0,954; 1,285; 1,669; 1,953; 2,421; 3,311; \\ 3,906; 5,025; 6,250; 7,299; 8,403; 9,901; 12,5; 14,925; 20; 30,303; 40; 50 \end{array} \right\} \text{ Hz}$$

A escolha dos referidos valores de frequência visa descrever adequadamente a forma dos espectros de resposta.

Esta modelação permitiu criar uma base de dados sintética de valores de aceleração espectral à superfície, em função do ambiente sísmico, da magnitude do sismo, da distância hipocentral e do tipo de terreno.

Esta base de dados de espectros ao nível do topo do perfil de terreno, para os dois tipos de ação sísmica definidos no Eurocódigo 8, é constituída por:

- (i) 2 284 160 espectros de resposta para o sismo considerado afastado (ação sísmica 1);
- (ii) 832 996 espectros de resposta para o sismo considerado próximo (ação sísmica 2).

Como exemplo, a Figura 4.16 demonstra um espectro de resposta de aceleração, ao nível do topo do substrato rochoso e do perfil de terreno nº5, classificado como tipo de terreno C, correspondente ao sismo afastado de magnitude 5,5 e a uma distância hipocentral de 104,66 km.

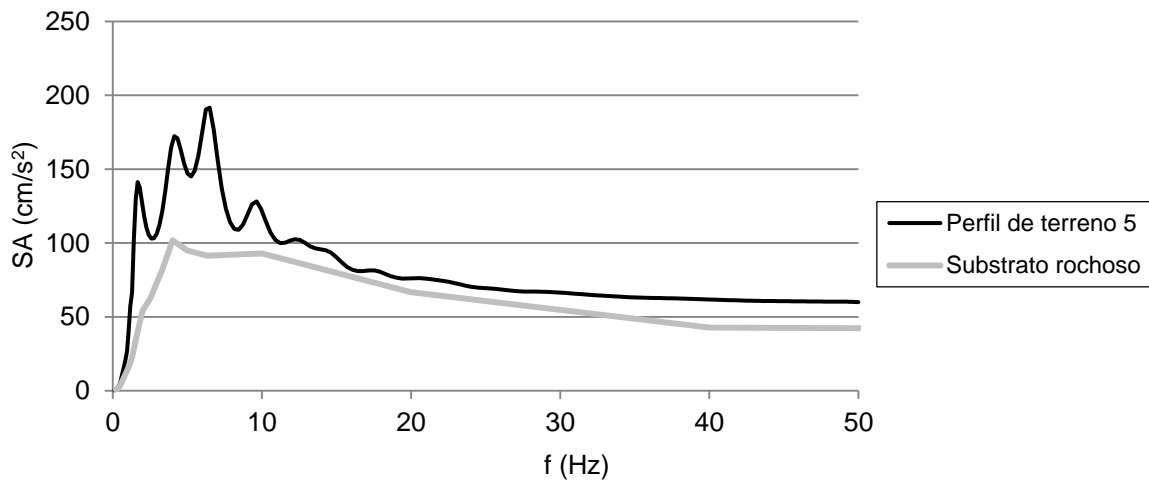


Figura 4.16 - Espectro de resposta de aceleração ao nível do topo do perfil de terreno nº5 e do substrato rochoso, correspondente à ação sísmica tipo 1, para $M = 5,5$ e $R = 104,66$ km

Foram, posteriormente, organizados os dados por tipo de terreno e frequência, de modo a serem aplicadas regressões multi-lineares, para os vários períodos do espectro, e a obter expressões apresentadas em (2.3) e (2.4), incorporando os efeitos não lineares dos solos como uma das variáveis da equação de previsão da amplitude dos movimentos do solo. O Quadro 4.13 permite representar sinteticamente a forma de organização dos dados fornecidos pelo programa LNECLoss e dos dados necessários à aplicação das regressões.

Quadro 4.13 - Forma de organização dos dados

Espectro de resposta ao nível do topo do substrato rochoso	
Dados fornecidos pelo programa LNECLoss	Dados necessários à aplicação das regressões
Tipo de ação sísmica definido pelo Eurocódigo 8	Tipo de ação sísmica definido pelo Eurocódigo 8
Magnitude	Frequência
Distância hipocentral	Magnitude
Frequência e aceleração espectral	Distância hipocentral e aceleração espectral
Espectro de resposta à superfície	
Dados fornecidos pelo programa LNECLoss	Dados necessários à aplicação das regressões
Tipo de ação sísmica definido pelo Eurocódigo 8	Tipo de ação sísmica definido pelo Eurocódigo 8
Magnitude	Frequência e tipo de terreno
Distância hipocentral	Magnitude
Perfil de terreno	Distância hipocentral e aceleração espectral
Frequência e aceleração espectral	

O código *Fortran* utilizado para a organização dos dados encontra-se no Anexo C. Foram criados algoritmos distintos para a organização da base de dados de espectros de resposta ao nível do topo do substrato rochoso e à superfície, visto que a primeira necessita de uma menor alocação de memória e não apresenta dados organizados por perfis de terreno.

Para os espectros de resposta à superfície, o código permitiu ainda a reunião de perfis de terreno que pertencem à mesma classificação indicada pelo Eurocódigo 8, isto é, agrupou os perfis nos cinco tipos de terreno corrente.

4.6) Aplicação de regressões multi-lineares

Para a realização de regressões multi-lineares, recorreu-se às ferramentas estatísticas presentes no *software Excel* de *Microsoft Office*, no qual foi utilizada uma folha de cálculo já programada para esse efeito [Malfeito, 2015]. As ferramentas existentes em código *Visual Basic for Applications* permitiram realizar as regressões, para cada conjunto de dados agrupados por frequências.

De seguida, pretende-se ilustrar um exemplo do processo realizado para a obtenção dos coeficientes das equações (2.3) e (2.4), nos Quadros 4.14 e 4.15. O caso apresentado refere-se à obtenção dos referidos coeficientes para o topo do substrato rochoso e para sismo próximo.

Quadro 4.14 - Resumo da introdução de dados para o início da regressão multi-linear

T (s)	M	M^2	R (km)	$\log_{10} R$	SA (cm/s ²)	$\log_{10} SA$
4,968	4,1	16,81	173,02	2,238	0,0015	-2,8239
4,968	4,1	16,81	156,45	2,194	0,0015	-2,8239
4,968	4,1	16,81	143,39	2,157	0,0019	-2,7212
4,968	4,1	16,81	134,88	2,13	0,0021	-2,6778
4,968	4,1	16,81	131,79	2,12	0,002	-2,6990
4,968	4,1	16,81	134,5	2,129	0,0019	-2,7212

Quadro 4.15 - Regressão linear efetuada para o primeiro valor de frequência

Estatística de regressão			
R múltiplo	0,9822		
Quadrado de R	0,9647		
Quadrado de R ajustado	0,9646		
Desvio padrão	0,2176		
	Coeficientes	95% inferior	95% superior
Interseção	-7,4567	-7,6733	-7,2400
M	2,1762	2,1042	2,2483
M^2	-0,0903	-0,0965	-0,0842
R	0,0017	0,0015	0,0020
$\log_{10} R$	-1,2978	-1,3444	-1,2513

Os coeficientes das equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo (GMPEs) obtidos, de acordo com as equações (2.3) e (2.4), encontram-se detalhados nos Quadros 4.16 a 4.27.

Quadro 4.16 - Coeficientes das GMPEs para sismo próximo e afastado, no topo do substrato rochoso

f (Hz)	Sismo afastado						Sismo próximo					
	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	σ_ε	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	σ_ε
0,201	-8,261	2,297	-0,110	-0,657	-0,001	0,205	-7,457	2,176	-0,090	-1,298	0,002	0,218
0,240	-8,178	2,313	-0,114	-0,617	-0,001	0,202	-7,765	2,329	-0,106	-1,235	0,002	0,218
0,334	-7,585	2,230	-0,112	-0,549	-0,001	0,201	-8,217	2,589	-0,133	-1,124	0,001	0,219
0,522	-5,875	1,872	-0,093	-0,465	-0,001	0,201	-7,983	2,686	-0,150	-0,991	0,000	0,221
0,954	-3,927	1,455	-0,069	-0,401	-0,002	0,208	-7,114	2,606	-0,154	-0,906	0,000	0,226
1,285	-2,898	1,237	-0,055	-0,410	-0,002	0,210	-6,256	2,411	-0,142	-0,879	-0,001	0,228
1,669	-1,431	0,926	-0,035	-0,478	-0,002	0,213	-5,371	2,192	-0,128	-0,866	-0,001	0,230
1,953	-0,986	0,832	-0,029	-0,489	-0,002	0,215	-4,765	2,036	-0,117	-0,867	-0,001	0,233
2,421	-0,591	0,747	-0,024	-0,494	-0,002	0,217	-3,953	1,821	-0,102	-0,875	-0,001	0,236
3,311	-0,241	0,672	-0,019	-0,492	-0,002	0,220	-2,992	1,571	-0,083	-0,893	-0,001	0,240
3,906	-0,116	0,645	-0,017	-0,489	-0,002	0,221	-2,522	1,447	-0,074	-0,910	-0,001	0,242
5,025	0,022	0,614	-0,015	-0,486	-0,003	0,222	-1,980	1,305	-0,064	-0,929	-0,001	0,245
6,250	0,110	0,595	-0,014	-0,482	-0,003	0,223	-1,562	1,202	-0,056	-0,963	-0,002	0,247
7,299	0,116	0,589	-0,014	-0,496	-0,003	0,223	-1,360	1,152	-0,052	-0,982	-0,002	0,249
8,403	0,120	0,585	-0,014	-0,510	-0,002	0,223	-1,211	1,113	-0,049	-0,994	-0,002	0,251
9,901	0,127	0,580	-0,013	-0,526	-0,002	0,223	-1,068	1,076	-0,046	-1,004	-0,002	0,254
12,5	0,138	0,573	-0,013	-0,548	-0,002	0,223	-1,037	1,067	-0,045	-1,036	-0,002	0,256
14,925	0,149	0,569	-0,012	-0,564	-0,002	0,224	-1,016	1,060	-0,045	-1,059	-0,002	0,258
20,0	0,167	0,562	-0,012	-0,588	-0,002	0,224	-0,985	1,050	-0,044	-1,091	-0,002	0,263
22,222	0,174	0,560	-0,012	-0,597	-0,002	0,225	-1,081	1,071	-0,045	-1,098	-0,002	0,261
25,0	0,183	0,557	-0,012	-0,607	-0,002	0,225	-1,210	1,101	-0,047	-1,107	-0,001	0,259
30,303	0,194	0,554	-0,011	-0,619	-0,002	0,226	-1,382	1,142	-0,050	-1,118	-0,001	0,256
40,0	0,210	0,549	-0,011	-0,636	-0,002	0,227	-1,683	1,216	-0,056	-1,136	-0,001	0,252
50,0	0,135	0,564	-0,012	-0,629	-0,002	0,226	-1,722	1,220	-0,056	-1,131	-0,001	0,251

Quadro 4.17 - Coeficientes das GMPEs para sismo próximo e afastado, no topo de um terreno do tipo A

f (Hz)	Sismo afastado						Sismo próximo					
	$b_{1,A}$	$b_{2,A}$	$b_{3,A}$	$b_{4,A}$	$b_{5,A}$	$\sigma_{\varepsilon,A}$	$b_{1,A}$	$b_{2,A}$	$b_{3,A}$	$b_{4,A}$	$b_{5,A}$	$\sigma_{\varepsilon,A}$
0,201	0,029	-0,006	0,000	-0,002	0,000	0,000	0,106	-0,022	0,002	-0,017	0,000	0,000
0,240	0,027	-0,006	0,000	-0,002	0,000	0,000	0,102	-0,022	0,002	-0,015	0,000	0,000
0,334	0,022	-0,005	0,000	-0,002	0,000	0,000	0,098	-0,023	0,002	-0,012	0,000	0,000
0,522	0,016	-0,003	0,000	-0,001	0,000	0,000	0,079	-0,019	0,001	-0,010	0,000	0,000
0,954	0,016	-0,003	0,000	-0,002	0,000	0,000	0,056	-0,013	0,001	-0,008	0,000	0,000
1,285	0,029	-0,006	0,000	-0,003	0,000	0,000	0,047	-0,009	0,001	-0,009	0,000	0,000
1,669	0,026	-0,005	0,000	-0,003	0,000	0,001	0,043	-0,007	0,001	-0,010	0,000	0,000
1,953	0,034	-0,006	0,001	-0,004	0,000	0,001	0,042	-0,006	0,000	-0,011	0,000	0,000
2,421	0,050	-0,009	0,001	-0,006	0,000	0,001	0,046	-0,005	0,000	-0,014	0,000	0,000
3,311	0,089	-0,017	0,001	-0,011	0,000	0,003	0,064	-0,004	0,000	-0,021	0,000	0,001
3,906	0,121	-0,023	0,002	-0,015	0,000	0,004	0,080	-0,004	0,000	-0,027	0,000	0,001
5,025	0,188	-0,034	0,003	-0,023	0,000	0,007	0,117	-0,006	0,000	-0,039	0,000	0,002
6,250	0,265	-0,047	0,004	-0,033	0,000	0,012	0,163	-0,008	0,001	-0,050	0,000	0,005
7,299	0,332	-0,057	0,005	-0,041	0,000	0,017	0,206	-0,012	0,001	-0,056	0,000	0,009
8,403	0,393	-0,063	0,005	-0,049	0,000	0,026	0,252	-0,016	0,001	-0,058	0,000	0,016
9,901	0,432	-0,059	0,005	-0,051	0,000	0,043	0,304	-0,021	0,002	-0,050	0,000	0,032
12,5	0,471	-0,046	0,003	-0,025	0,000	0,080	0,382	-0,027	0,002	-0,009	0,000	0,082
14,925	0,537	-0,044	0,003	-0,013	0,000	0,079	0,452	-0,040	0,003	0,036	0,000	0,082
20,0	0,224	0,044	-0,005	0,102	0,000	0,095	0,484	-0,057	0,003	0,162	-0,001	0,113

22,222	0,256	0,020	-0,004	0,107	0,000	0,058	0,501	-0,072	0,004	0,162	-0,001	0,082
25,0	0,286	-0,002	-0,002	0,081	0,000	0,017	0,510	-0,087	0,005	0,134	-0,001	0,038
30,303	0,259	-0,006	-0,001	0,070	0,000	0,008	0,533	-0,099	0,007	0,112	-0,001	0,022
40,0	0,585	-0,091	0,004	0,050	0,000	0,017	0,723	-0,142	0,009	0,094	-0,001	0,024
50,0	0,638	-0,094	0,005	0,026	0,000	0,044	0,732	-0,144	0,009	0,087	-0,001	0,036

Quadro 4.18 - Coeficientes das GMPEs, para sismo próximo e afastado, no topo de um terreno do tipo B

f (Hz)	Sismo afastado						Sismo próximo					
	$b_{1,B}$	$b_{2,B}$	$b_{3,B}$	$b_{4,B}$	$b_{5,B}$	$\sigma_{\varepsilon,B}$	$b_{1,B}$	$b_{2,B}$	$b_{3,B}$	$b_{4,B}$	$b_{5,B}$	$\sigma_{\varepsilon,B}$
0,201	0,193	-0,047	0,003	-0,005	0,000	0,004	0,227	-0,056	0,004	-0,004	0,000	0,007
0,240	0,193	-0,046	0,003	-0,006	0,000	0,007	0,227	-0,057	0,004	-0,005	0,000	0,008
0,334	0,130	-0,027	0,002	-0,005	0,000	0,015	0,230	-0,058	0,004	-0,007	0,000	0,013
0,522	-0,045	0,024	-0,002	0,008	0,000	0,031	0,143	-0,028	0,002	-0,004	0,000	0,036
0,954	0,113	-0,021	0,001	-0,003	0,000	0,007	0,092	-0,014	0,000	-0,004	0,000	0,012
1,285	0,064	-0,006	0,000	-0,012	0,000	0,004	0,107	-0,020	0,001	-0,014	0,000	0,002
1,669	0,026	0,007	-0,001	-0,006	0,000	0,012	0,080	-0,005	0,000	-0,015	0,000	0,012
1,953	0,050	0,002	0,000	-0,005	0,000	0,014	0,084	-0,003	0,000	-0,015	0,000	0,012
2,421	0,052	0,003	-0,001	-0,006	0,000	0,016	0,088	0,000	-0,001	-0,019	0,000	0,012
3,311	-0,046	0,034	-0,003	-0,001	0,000	0,024	0,119	-0,005	0,000	-0,022	0,000	0,010
3,906	-0,002	0,024	-0,002	0,012	0,000	0,033	0,088	0,013	-0,002	-0,016	0,000	0,019
5,025	-0,066	0,044	-0,004	0,034	0,000	0,048	0,083	0,018	-0,002	-0,004	0,000	0,032
6,250	-0,034	0,038	-0,004	0,050	0,000	0,062	0,102	0,018	-0,003	0,018	0,000	0,049
7,299	-0,031	0,042	-0,005	0,059	0,000	0,065	0,137	0,008	-0,002	0,038	0,000	0,048
8,403	-0,131	0,072	-0,007	0,077	0,000	0,071	0,126	0,010	-0,002	0,061	0,000	0,048
9,901	-0,262	0,107	-0,010	0,120	0,000	0,082	0,087	0,020	-0,003	0,100	0,000	0,068
12,5	-0,222	0,094	-0,010	0,161	0,000	0,064	0,085	0,020	-0,004	0,141	0,000	0,056
14,925	-0,089	0,056	-0,008	0,167	0,000	0,050	0,096	0,015	-0,004	0,161	-0,001	0,037
20,0	0,061	0,018	-0,005	0,144	0,000	0,046	0,192	-0,027	-0,001	0,183	-0,001	0,028
30,303	-0,042	0,036	-0,005	0,141	0,000	0,031	0,249	-0,058	0,002	0,185	-0,001	0,015
40,0	0,011	0,010	-0,003	0,135	0,000	0,014	0,335	-0,087	0,004	0,175	-0,001	0,004
50,0	0,053	-0,001	-0,002	0,124	0,000	0,015	0,324	-0,084	0,004	0,166	-0,001	0,007

Quadro 4.19 - Coeficientes das GMPEs para sismo próximo e afastado, no topo de um terreno do tipo C

f (Hz)	Sismo afastado						Sismo próximo					
	$b_{1,C}$	$b_{2,C}$	$b_{3,C}$	$b_{4,C}$	$b_{5,C}$	$\sigma_{\varepsilon,C}$	$b_{1,C}$	$b_{2,C}$	$b_{3,C}$	$b_{4,C}$	$b_{5,C}$	$\sigma_{\varepsilon,C}$
0,201	0,792	-0,194	0,013	-0,006	0,000	0,004	0,852	-0,243	0,016	0,058	0,000	0,004
0,240	0,846	-0,208	0,014	-0,011	0,000	0,006	0,846	-0,240	0,016	0,047	0,000	0,004
0,334	0,953	-0,231	0,016	-0,030	0,000	0,014	0,842	-0,233	0,017	0,025	0,000	0,006
0,522	0,801	-0,172	0,013	-0,057	0,000	0,033	0,694	-0,172	0,013	-0,012	0,000	0,018
0,954	-0,172	0,124	-0,009	0,017	0,000	0,046	0,483	-0,073	0,006	-0,005	0,000	0,048
1,285	-0,472	0,206	-0,018	0,098	0,000	0,049	0,273	0,009	-0,002	0,034	0,000	0,050
1,669	-0,575	0,216	-0,020	0,159	0,000	0,057	0,103	0,063	-0,008	0,067	0,000	0,062
1,953	-0,634	0,219	-0,021	0,178	0,000	0,055	0,027	0,080	-0,009	0,078	0,000	0,064
2,421	-0,735	0,231	-0,022	0,190	0,000	0,045	-0,083	0,102	-0,011	0,083	0,000	0,064
3,311	-1,035	0,299	-0,027	0,205	0,000	0,012	-0,177	0,112	-0,012	0,085	0,000	0,025
3,906	-1,191	0,333	-0,030	0,231	0,000	0,008	-0,223	0,118	-0,013	0,099	0,000	0,018
5,025	-1,311	0,347	-0,033	0,291	0,000	0,006	-0,325	0,143	-0,016	0,134	0,000	0,020
6,250	-1,422	0,360	-0,034	0,329	0,000	0,007	-0,344	0,132	-0,015	0,169	0,000	0,017
7,299	-1,262	0,305	-0,031	0,351	0,000	-0,006	-0,436	0,155	-0,018	0,195	0,000	0,008
8,403	-1,124	0,258	-0,028	0,340	0,000	-0,014	-0,427	0,139	-0,017	0,204	0,000	-0,005
9,901	-1,220	0,276	-0,028	0,340	0,000	-0,010	-0,502	0,142	-0,017	0,209	0,000	-0,005
12,5	-1,071	0,222	-0,024	0,358	0,000	-0,013	-0,545	0,143	-0,018	0,251	0,000	-0,007
14,925	-1,116	0,227	-0,024	0,358	0,000	-0,014	-0,609	0,143	-0,017	0,266	0,000	-0,008
20,0	-1,102	0,214	-0,023	0,362	0,000	-0,018	-0,667	0,140	-0,017	0,298	0,000	-0,014
30,303	-1,240	0,243	-0,024	0,371	0,000	-0,019	-0,708	0,143	-0,016	0,311	0,000	-0,018

40,0	-1,336	0,265	-0,025	0,379	0,000	-0,019	-0,670	0,135	-0,015	0,317	0,000	-0,017
50,0	-1,315	0,262	-0,024	0,369	0,000	-0,020	-0,676	0,137	-0,015	0,313	0,000	-0,014

Quadro 4.20 - Coeficientes das GMPEs para sismo próximo e afastado, no topo de um terreno do tipo D

f (Hz)	Sismo afastado						Sismo próximo					
	$b_{1,D}$	$b_{2,D}$	$b_{3,D}$	$b_{4,D}$	$b_{5,D}$	$\sigma_{\varepsilon,D}$	$b_{1,D}$	$b_{2,D}$	$b_{3,D}$	$b_{4,D}$	$b_{5,D}$	$\sigma_{\varepsilon,D}$
0,201	1,577	-0,403	0,027	0,013	0,000	0,017	1,046	-0,279	0,017	0,129	-0,001	0,015
0,240	1,503	-0,377	0,026	0,008	0,000	0,025	1,103	-0,292	0,019	0,103	-0,001	0,018
0,334	0,999	-0,218	0,015	0,004	0,000	0,041	1,171	-0,302	0,022	0,055	-0,001	0,032
0,522	-0,356	0,191	-0,016	0,078	0,000	0,066	0,617	-0,085	0,006	0,026	0,000	0,075
0,954	-0,541	0,248	-0,025	0,183	0,000	0,012	0,016	0,148	-0,018	0,094	0,000	0,021
1,285	-1,453	0,473	-0,042	0,229	0,000	0,028	-0,109	0,145	-0,016	0,091	0,000	0,036
1,669	-1,949	0,585	-0,051	0,286	0,000	0,012	-0,213	0,162	-0,018	0,113	0,000	0,029
1,953	-1,963	0,571	-0,052	0,342	0,000	0,003	-0,473	0,238	-0,025	0,140	0,000	0,006
2,421	-1,301	0,367	-0,039	0,353	0,000	0,000	-0,525	0,262	-0,030	0,175	0,000	0,010
3,311	-2,052	0,546	-0,051	0,381	0,000	0,013	-0,634	0,255	-0,028	0,168	0,000	0,002
3,906	-2,279	0,598	-0,057	0,435	0,000	0,018	-0,625	0,233	-0,027	0,214	0,000	0,013
5,025	-1,520	0,361	-0,041	0,464	0,000	-0,017	-0,674	0,251	-0,032	0,271	0,000	-0,024
6,250	-1,514	0,335	-0,040	0,495	0,000	-0,013	-0,900	0,293	-0,035	0,300	0,000	-0,022
7,299	-1,301	0,263	-0,034	0,488	0,000	-0,019	-0,892	0,271	-0,034	0,323	0,000	-0,020
8,403	-1,438	0,292	-0,035	0,466	0,000	-0,026	-0,868	0,234	-0,030	0,327	0,000	-0,024
9,901	-1,243	0,227	-0,030	0,480	0,000	-0,032	-0,948	0,251	-0,032	0,359	0,000	-0,026
12,5	-1,411	0,265	-0,032	0,470	0,000	-0,037	-1,015	0,240	-0,029	0,371	0,000	-0,029
14,925	-1,467	0,274	-0,032	0,467	0,000	-0,042	-0,994	0,214	-0,027	0,391	0,000	-0,036
20,0	-1,726	0,339	-0,035	0,465	0,000	-0,044	-1,175	0,242	-0,028	0,403	0,000	-0,041
30,303	-1,994	0,408	-0,039	0,477	0,000	-0,044	-1,276	0,273	-0,029	0,406	0,000	-0,042
40,0	-2,113	0,438	-0,041	0,488	0,000	-0,044	-1,176	0,251	-0,026	0,414	0,000	-0,041
50,0	-2,100	0,439	-0,041	0,478	0,000	-0,044	-1,186	0,258	-0,027	0,408	0,000	-0,038

Quadro 4.21 - Coeficientes das GMPEs para sismo próximo e afastado, no topo de um terreno do tipo E

f (Hz)	Sismo afastado						Sismo próximo					
	$b_{1,E}$	$b_{2,E}$	$b_{3,E}$	$b_{4,E}$	$b_{5,E}$	$\sigma_{\varepsilon,E}$	$b_{1,E}$	$b_{2,E}$	$b_{3,E}$	$b_{4,E}$	$b_{5,E}$	$\sigma_{\varepsilon,E}$
0,201	0,510	-0,118	0,008	-0,020	0,000	0,003	0,893	-0,260	0,019	0,017	0,000	0,005
0,240	0,529	-0,124	0,008	-0,021	0,000	0,003	0,872	-0,254	0,018	0,013	0,000	0,004
0,334	0,574	-0,136	0,009	-0,029	0,000	0,006	0,840	-0,244	0,018	0,005	0,000	0,004
0,522	0,551	-0,125	0,009	-0,046	0,000	0,011	0,676	-0,190	0,014	-0,013	0,000	0,004
0,954	0,469	-0,084	0,007	-0,073	0,000	0,027	0,658	-0,172	0,014	-0,035	0,000	0,011
1,285	0,227	-0,003	0,001	-0,066	0,000	0,042	0,638	-0,153	0,013	-0,043	0,000	0,024
1,669	-0,211	0,118	-0,008	-0,009	0,000	0,060	0,560	-0,116	0,010	-0,032	0,000	0,050
1,953	-0,343	0,152	-0,012	0,044	0,000	0,072	0,455	-0,071	0,006	-0,012	0,000	0,076
2,421	-0,440	0,173	-0,015	0,119	0,000	0,076	0,351	-0,023	0,001	0,028	0,000	0,090
3,311	-0,493	0,172	-0,017	0,207	0,000	0,069	0,174	0,042	-0,006	0,088	0,000	0,080
3,906	-0,615	0,196	-0,019	0,230	0,000	0,060	0,094	0,057	-0,008	0,107	0,000	0,062
5,025	-0,834	0,241	-0,023	0,256	0,000	0,059	-0,047	0,082	-0,009	0,126	0,000	0,055
6,250	-0,943	0,259	-0,024	0,277	0,000	0,060	-0,157	0,102	-0,011	0,148	0,000	0,057
7,299	-1,041	0,277	-0,026	0,303	0,000	0,053	-0,202	0,105	-0,011	0,167	0,000	0,050
8,403	-1,035	0,267	-0,026	0,337	0,000	0,049	-0,261	0,118	-0,013	0,192	0,000	0,053
9,901	-0,874	0,216	-0,023	0,342	0,000	0,025	-0,257	0,112	-0,013	0,209	0,000	0,036
12,5	-0,891	0,210	-0,022	0,343	0,000	-0,002	-0,308	0,107	-0,013	0,226	0,000	-0,001
14,925	-0,811	0,183	-0,020	0,342	0,000	-0,007	-0,322	0,101	-0,012	0,245	0,000	-0,007
20,0	-0,807	0,176	-0,019	0,345	0,000	-0,008	-0,396	0,106	-0,013	0,273	0,000	-0,010
30,303	-0,766	0,159	-0,017	0,361	0,000	-0,012	-0,352	0,088	-0,011	0,305	-0,001	-0,014

40,0	-0,811	0,166	-0,017	0,367	0,000	-0,013	-0,280	0,067	-0,009	0,314	-0,001	-0,015
50,0	-0,763	0,155	-0,016	0,360	0,000	-0,014	-0,285	0,069	-0,010	0,312	-0,001	-0,012

4.7) Limitações da análise efetuada

No presente trabalho, a análise crítica dos resultados vale a pena ser mencionada, visto que grande parte do tratamento dos dados é feita com recurso a algoritmos. Tanto a classificação das sondagens, como a aplicação do método linear equivalente e de regressões multi-lineares recorrem a linguagem computacional, pelo que foi necessário validar esses resultados e averiguar erros sistemáticos.

Para uma correta análise dos resultados obtidos, é também relevante ter em conta a origem dos dados iniciais recolhidos e dos pressupostos teóricos admitidos. Para a obtenção dos resultados apresentados na secção 4.6, foram tidas em conta algumas simplificações, de modo a remeter este trabalho apenas ao objetivo proposto, e aproximações, já apresentadas ao longo do trabalho.

De um modo resumido, foram admitidas as seguintes simplificações:

- Na caracterização geotécnica, algumas propriedades dos geomateriais foram correlacionadas e alguns estratos suprimidos, no caso de camadas com espessura irrelevante;
- Na análise de ondas sísmicas, apenas são consideradas ondas de corte sem polarização vertical, pelo que as ondas de compressão e superficiais não são analisadas;
- Não foram considerados os efeitos de pressão intersticial. No caso de argilas e areias sujeitas a deformações pequenas a médias, a geração de pressão intersticial não é significativa. Quando se geram pressões intersticiais, os métodos apresentados no presente trabalho já não são aplicáveis, uma vez que a resposta do solo é fortemente alterada.

5) Equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo

5.1) Determinação das equações de previsão

Nesta secção apresenta-se as equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo obtidas por regressão da resposta determinada através da metodologia descrita na secção 4.

No Quadro 4.16 pode analisar-se que os coeficientes c_2 , c_3 , c_4 e c_5 apresentam a tendência esperada, mencionada na secção 2.3:

- (i) o coeficiente c_2 exhibe valores positivos, representando o aumento da aceleração espectral com o aumento da energia libertada no hipocentro;
- (ii) o coeficiente c_3 assume valores negativos e é matematicamente representado por uma concavidade negativa, limitando os valores da aceleração espectral para magnitudes elevadas;
- (iii) os coeficientes c_4 e c_5 apresentam valores negativos, uma vez que a aceleração espectral é degradada pela rigidez dos geomateriais que atravessa, pelo que para distâncias superiores é expectável que essa degradação seja mais significativa. Estes coeficientes representam as parcelas de atenuação geométrica e inelástica, respetivamente. O coeficiente c_4 apresenta valores em módulo superiores aos do coeficiente c_5 , pelo que se pode inferir que a atenuação geométrica é predominante face à atenuação inelástica;
- (iv) os valores de desvio padrão, σ_ε , para as equações até ao topo do substrato rochoso, apresentam um ligeiro aumento com o aumento da frequência de análise. Quando comparados com outros valores de desvio padrão obtidos para este tipo de equações [Carvalho, 2007], verifica-se que existe uma semelhança na ordem de grandeza do valor.

Comparando os resultados do Quadro 4.16, entre sismo afastado e próximo, verifica-se que:

- (i) o coeficiente c_2 apresenta valores menores para o sismo afastado, comparativamente ao próximo, excetuando para a frequência mais baixa (0,201 Hz);
- (ii) o coeficiente c_3 apresenta valores menores em módulo para o sismo afastado, comparativamente ao próximo, excetuando para frequências inferiores a 0,334 Hz;
- (iii) o coeficiente c_4 apresenta valores menores em módulo para o sismo afastado, comparativamente ao próximo, para todas as frequências;
- (iv) o coeficiente c_5 apresenta, na sua generalidade, maiores valores em módulo para o sismo afastado, comparativamente ao próximo;
- (v) os valores de desvio padrão, σ_ε , são menores para o sismo afastado, comparativamente ao próximo, para todas as frequências.

Com estas verificações, pode-se inferir que existe uma menor influência da magnitude, magnitude ao quadrado e atenuação geométrica num sismo afastado do que num próximo.

Os coeficientes $b_{1,\varphi}$, $b_{2,\varphi}$, $b_{3,\varphi}$ e $b_{4,\varphi}$ dos Quadros 4.17 a 4.21, para os cinco tipos de terreno, apresentam uma grande variabilidade, pelo que serão analisados sob a forma gráfica.

Realça-se ainda que o coeficiente $b_{5,\varphi}$ dos Quadros 4.17 a 4.21 não mostrou significado estatístico. A equação (2.4) perde esse coeficiente e toma a forma da equação (5.1).

$$f(S) = \begin{cases} b_{1,A} + b_{2,A}M + b_{3,A}M^2 + b_{4,A} \log_{10} R \pm \sigma_{\varepsilon,A}, & \text{se terreno tipo A} \\ b_{1,B} + b_{2,B}M + b_{3,B}M^2 + b_{4,B} \log_{10} R \pm \sigma_{\varepsilon,B}, & \text{se terreno tipo B} \\ b_{1,C} + b_{2,C}M + b_{3,C}M^2 + b_{4,C} \log_{10} R \pm \sigma_{\varepsilon,C}, & \text{se terreno tipo C} \\ b_{1,D} + b_{2,D}M + b_{3,D}M^2 + b_{4,D} \log_{10} R \pm \sigma_{\varepsilon,D}, & \text{se terreno tipo D} \\ b_{1,E} + b_{2,E}M + b_{3,E}M^2 + b_{4,E} \log_{10} R \pm \sigma_{\varepsilon,E}, & \text{se terreno tipo E} \end{cases} \quad (5.1)$$

Para se poder analisar as equações obtidas, é necessário ter em conta a influência do número de amostragem dos dados na dispersão:

- (i) o número de perfis de terreno do tipo A é insuficiente para que a análise possa ter o rigor desejado, podendo-se apenas inferir uma possível tendência. Estes perfis apresentam apenas um estrato acima do substrato rochoso de 2,0 m de espessura, em média, pelo que a metodologia aplicada pode originar uma propagação cujo efeito pode não ser representativo;
- (ii) os perfis de terreno do tipo B, C e E apresentam resultados mais robustos, uma vez que a amostragem é boa e a metodologia aplicada é adequada;
- (iii) a metodologia aplicada em terrenos do tipo D é adequada, no entanto o número de perfis deste tipo é insuficiente, podendo-se apenas inferir uma possível tendência.

Deste modo, as análises doravante descritas apresentam uma menor incerteza para os terrenos do tipo B, C e E, comparativamente aos do tipo A e D.

Aplicando os coeficientes obtidos nos Quadros 4.16 a 4.21 às equações (2.3) e (5.1), obtiveram-se, a título de exemplo, os gráficos apresentados nas Figuras 5.1 e 5.2, sem inclusão do desvio padrão. A ação sísmica afastada irá simplificar-se denominar-se como AS1 e a próxima como AS2.

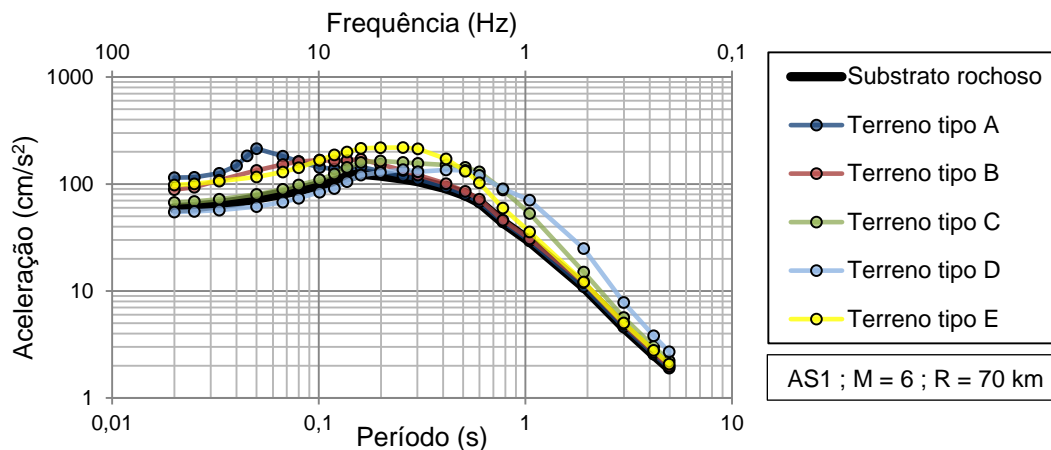


Figura 5.1 - Valores espectrais de aceleração para os tipos de terreno A a E do Eurocódigo 8, considerando as GMPEs para o sismo afastado e um evento de $M = 6$ e $R = 70$ km, sem inclusão do desvio padrão

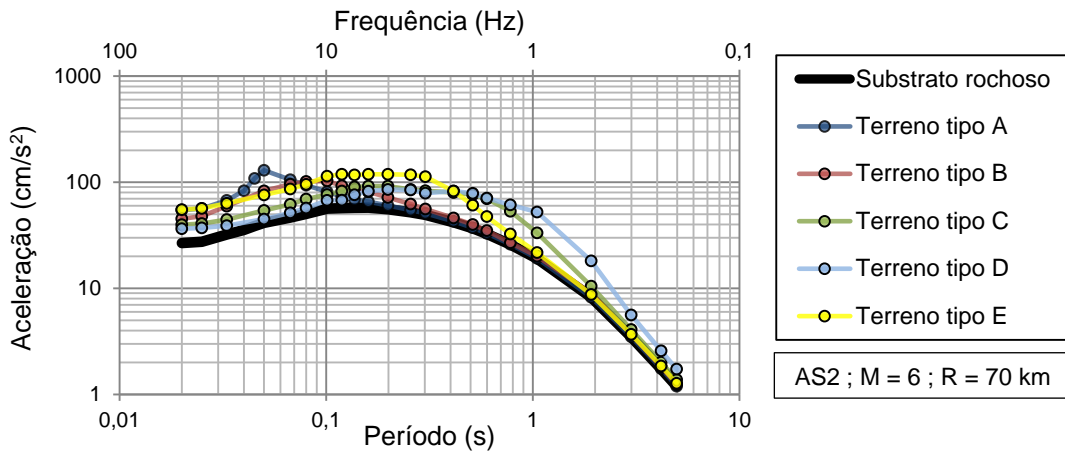


Figura 5.2 - Valores espectrais de aceleração para os tipos de terreno A a E do Eurocódigo 8, considerando as GMPEs para o sismo próximo e um evento de $M = 6$ e $R = 70$ km, sem inclusão do desvio padrão

Nas Figuras 5.1 e 5.2 pode observar-se que a representação gráfica das equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo cresce entre períodos curtos e períodos de cerca de 0,2 s, decrescendo posteriormente. Os resultados obtidos demonstram valores superiores de aceleração espectral para o sismo afastado, em comparação com o sismo próximo.

Foram analisados vários cenários distintos onde se verificou que a aceleração espectral cresce com o incremento da magnitude para todos os perfis de terreno apresentados. Observou-se também que esta mesma grandeza decresce com o incremento da distância à fonte para todos os perfis de terreno apresentados.

As Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 pretendem demonstrar, a título de exemplo, a variação resultante da inclusão dos coeficientes σ_ε e $\sigma_{\varepsilon,\varphi}$, associados ao desvio padrão, às equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo para tipos de terreno B, C e E.

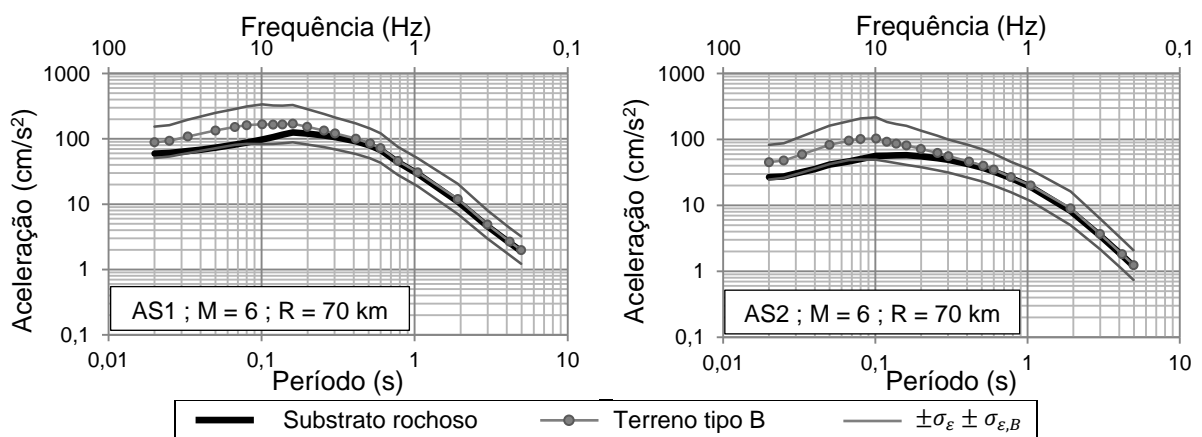


Figura 5.3 - Valores espectrais de aceleração para o tipo de terreno B do Eurocódigo 8, considerando as GMPEs para o sismo afastado (à esquerda) e próximo (à direita) e para $M = 6$ e $R = 70$ km, com inclusão do desvio padrão

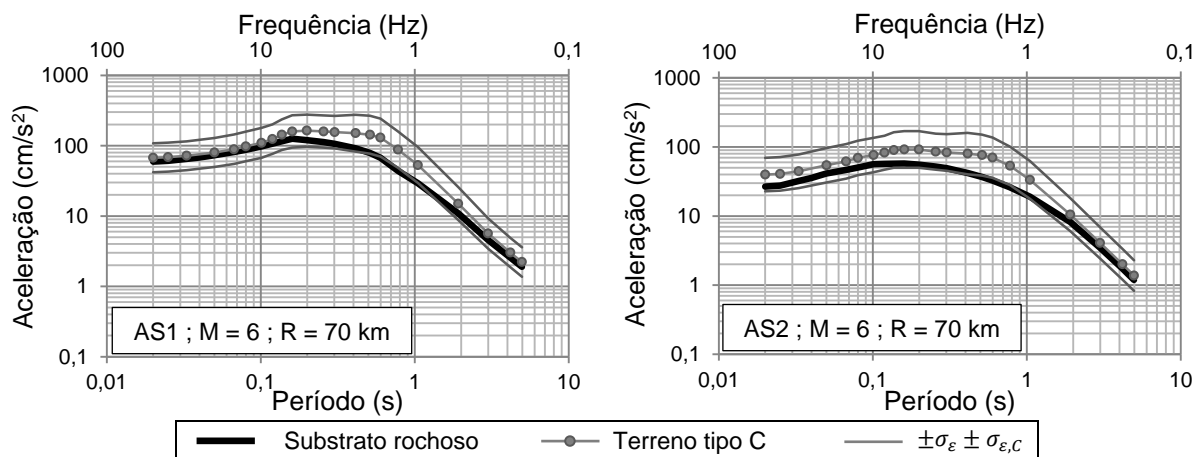


Figura 5.4 - Valores espectrais de aceleração para o tipo de terreno C do Eurocódigo 8, considerando as GMPEs para o sismo afastado (à esquerda) e próximo (à direita) e para $M = 6$ e $R = 70$ km, com inclusão do desvio padrão

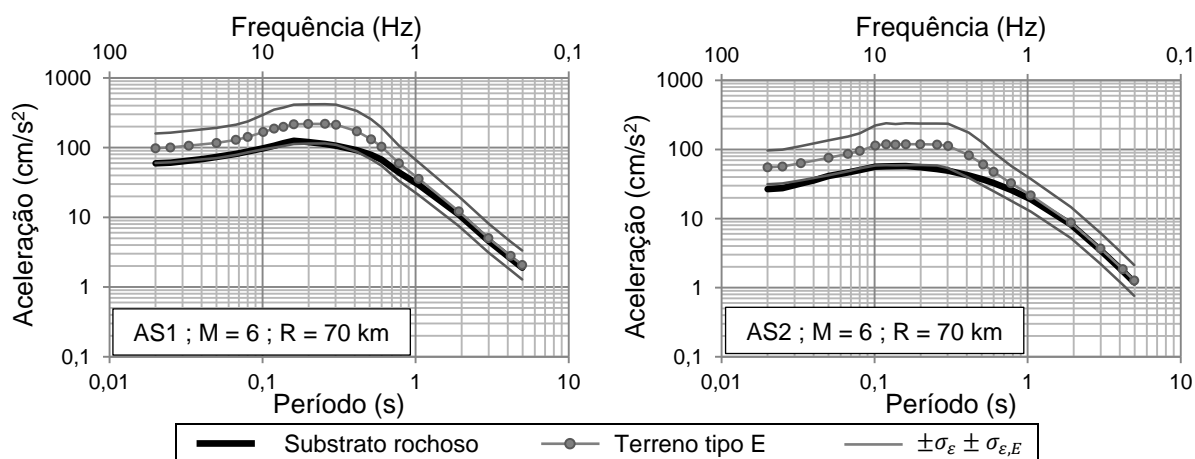


Figura 5.5 - Valores espectrais de aceleração para o tipo de terreno E do Eurocódigo 8, considerando as GMPEs para o sismo afastado (à esquerda) e próximo (à direita) e para $M = 6$ e $R = 70$ km, com inclusão do desvio padrão

Nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5, a soma e subtração do desvio padrão corresponde à probabilidade de não excedência de 16 e 84% respetivamente, se a distribuição for normal. A contribuição dos coeficientes σ_ε e $\sigma_{\varepsilon,\varphi}$ nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 provocam uma variação significativa dos valores de aceleração espectral. Esta variação é, em média, 1,714 vezes superior, para o sismo afastado, e 1,814 vezes superior, para o sismo próximo. O tipo de terreno não apresenta uma variação significativa nestes coeficientes, apresentando um valor entre 0,181 e 0,319, para o sismo afastado, e de 0,218 e 0,376, para o sismo próximo.

No Anexo D encontram-se detalhadas as representações gráficas das equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo com os respetivos desvios padrão. Apenas se apresentam os resultados para um evento sísmico de $M = 6$ e $R = 70$ km, visto que os coeficientes σ_ε e $\sigma_{\varepsilon,\varphi}$ são independentes da magnitude e da distância hipocentral.

Para melhor analisar o comportamento dos tipos de terreno, traduzido pelas equações de previsão para diferentes eventos sísmicos, apresenta-se nas Figuras 5.6 e 5.7 a razão entre os valores das acelerações espectrais à superfície do terreno, SA_{superf} , e no topo do substrato rochoso, SA_{base} . Esta consideração permite uma análise de efeitos de ressonância apenas devido ao perfil de terreno acima do substrato rochoso. A amplificação do movimento sísmico corresponderá a $SA_{superf} / SA_{base} > 1$ e a atenuação corresponderá a $SA_{superf} / SA_{base} < 1$.

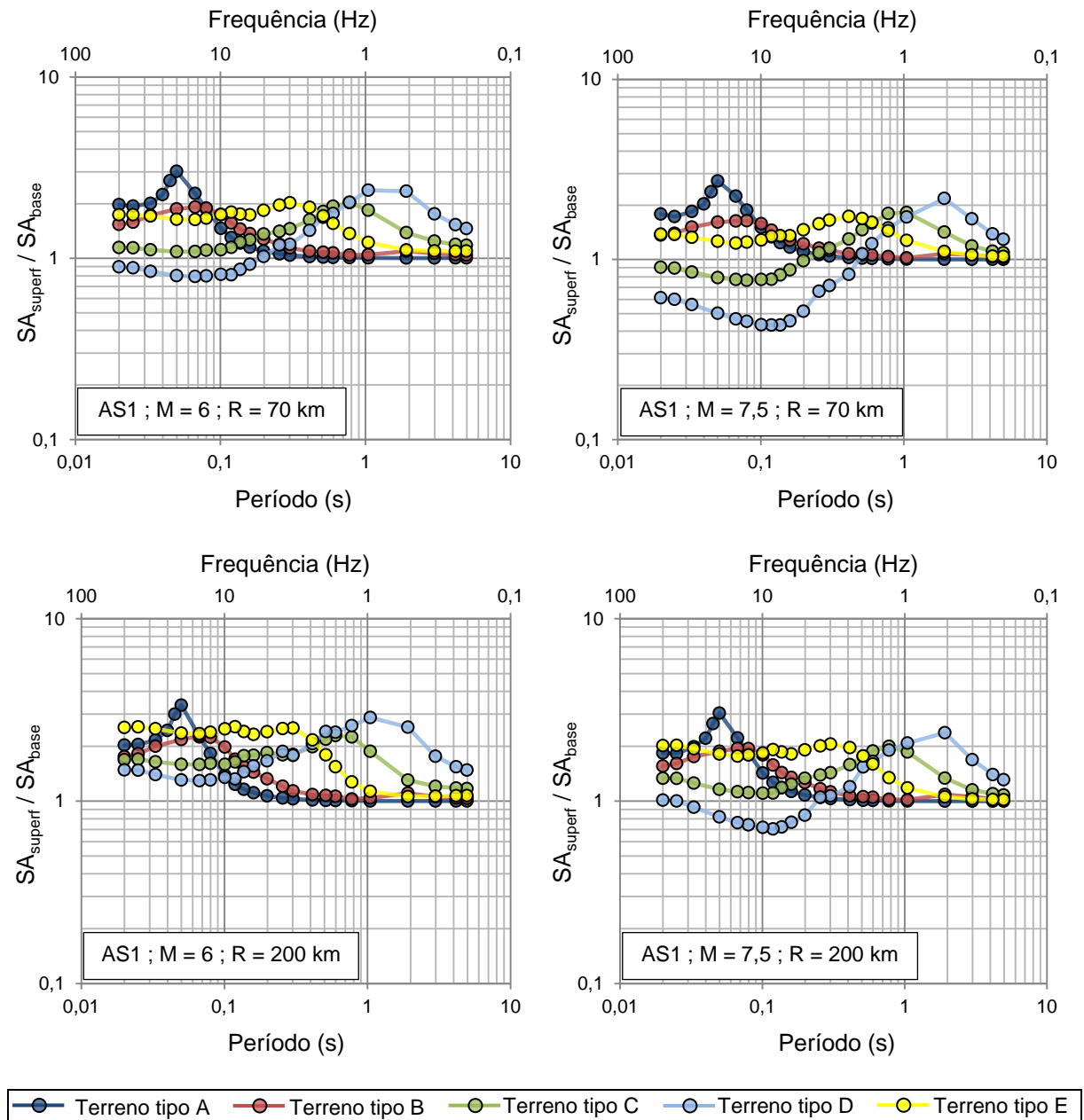


Figura 5.6 - Razão entre aceleração espectral à superfície e a aceleração no topo do substrato rochoso para os terrenos tipo A a E do Eurocódigo 8, considerando as GMPEs obtidas para o sismo afastado e eventos de magnitude 6 e 7,5 e distância hipocentral de 70 e 200 km

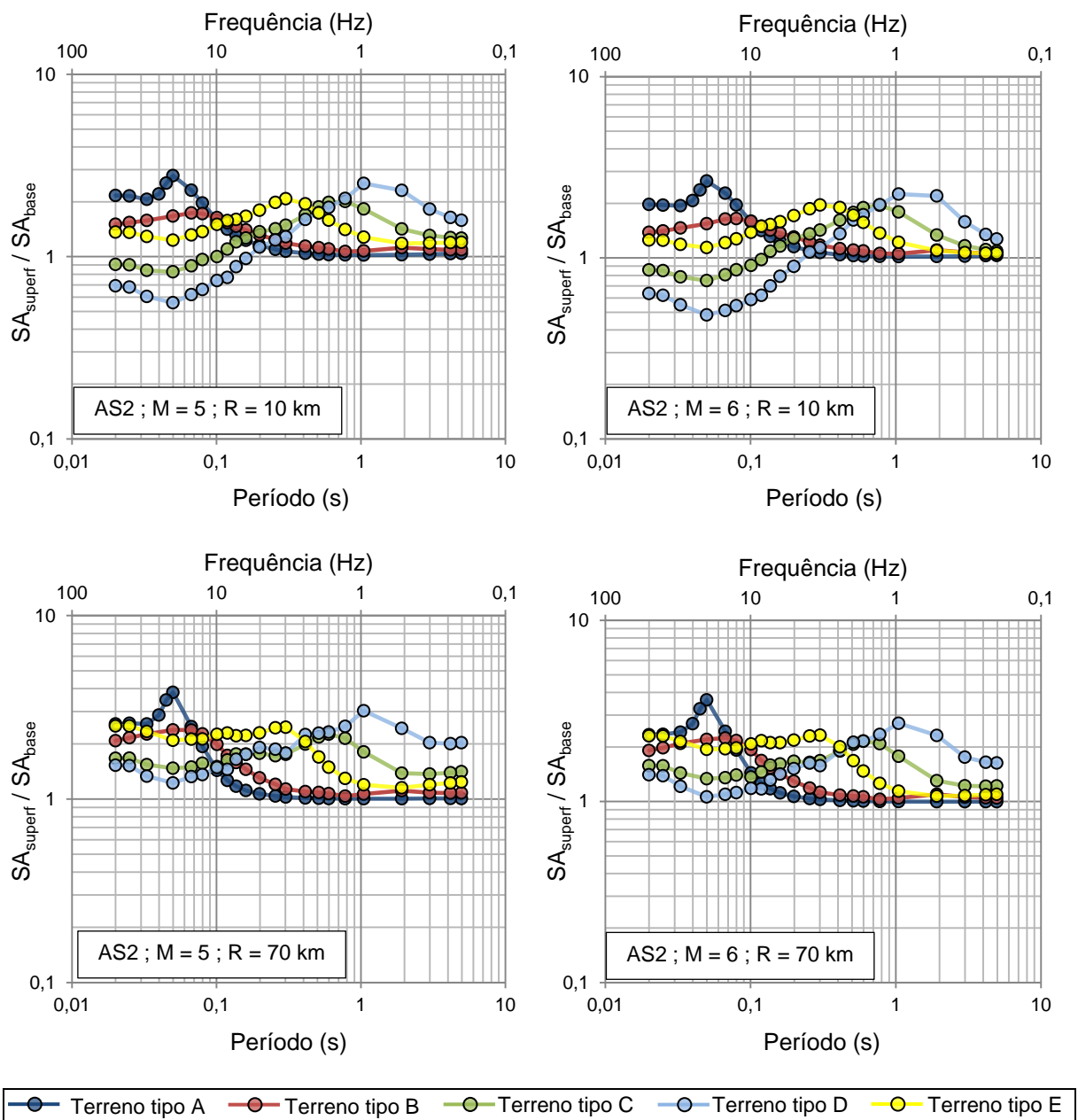


Figura 5.7 - Razão entre aceleração espectral à superfície e a aceleração no topo do substrato rochoso para os terrenos tipo A a E do Eurocódigo 8, considerando as GMPEs obtidas para o sismo próximo e eventos de magnitude 5 e 6 e distância hipocentral de 10 e 70 km

Analisando as Figuras 5.6 e 5.7, é possível retirar as seguintes conclusões:

- (i) para a maioria dos cenários analisados, apenas os perfis de terreno tipo C e D atenuam o movimento do solo para baixos períodos;
- (ii) a influência do tipo de terreno torna-se menos relevante para períodos elevados, verificando-se uma tendência assintótica para $SA_{superf} / SA_{base} = 1$;

(iii) para todos os cenários considerados, o período para o qual se verifica o valor máximo da equação de previsão da amplitude dos movimentos do solo, doravante denominado como “pico”, varia consoante o tipo de terreno. Por outro lado, existe pouca variação deste período com o tipo de ação sísmica, magnitude e distância hipocentral. O Quadro 5.1 apresenta os valores da grandeza em questão, consoante o tipo de terreno.

Quadro 5.1 - Resumo dos períodos associados ao máximo valor de aceleração espectral

Tipo de terreno	“Picos” registados (s)	“Pico” mais frequente (s)
A	0,05	0,05
B	0,05; 0,067; 0,08	0,067
C	0,599; 0,778; 1,048	0,778
D	1,048; 1,917	1,048
E	0,302; 0,413	0,302

Verifica-se que, para os tipos de terreno mais brandos (tipo C e D), existe uma amplificação máxima do movimento do solo para períodos superiores, quando comparados com os terrenos tipo A e B, pois para estes dois tipos de terreno existe uma amplificação máxima para baixos períodos. Note-se que os tipos de terreno E são caracterizados pela existência de um estrato rígido subjacente a um estrato aluvionar com 5 a 20 m de espessura, pelo que apresentam uma zona de patamar mais extensa do que nos terrenos tipos C e D.

Estas diferenças podem ser explicadas de acordo com o período próprio de propagação da onda sísmica num solo, que é superior para solos mais brandos. Conforme foi elucidado na secção 3 do presente trabalho, o período próprio de um dado elemento é inversamente proporcional à raiz quadrada da sua rigidez [Kramer, 1996]. Esta análise valida os resultados obtidos no Quadro 5.1.

(iv) a variação dos valores da aceleração espectral é mais visível nos solos brandos para as magnitudes mais elevadas e à mesma distância hipocentral. Para distâncias mais curtas e igual magnitude verifica-se a mesma situação. Os solos mais rígidos mantêm sempre o mesmo tipo de comportamento para qualquer magnitude ou distância, amplificando o sismo para baixos períodos.

Confirma-se, deste modo, a não linearidade do comportamento dos solos, sendo que, de uma forma mais relevante, os solos mais brandos amplificam significativamente os valores de aceleração para períodos elevados e atenuam os valores de aceleração nos baixos períodos, especialmente para as magnitudes mais elevadas ou para as distâncias hipocentrais mais curtas. De uma forma geral, a amplificação e atenuação são mais notórias para períodos inferiores a 1,048 s.

5.2) Comparação com a ação regulamentar do Eurocódigo 8

A comparação dos resultados obtidos com a ação regulamentar definida no Anexo Nacional do Eurocódigo 8 é efetuada através da forma de espectros de resposta de aceleração.

O Quadro 5.2 mostra a magnitude definida no Anexo NA.I da Parte 5 do Eurocódigo 8 para as cidades de Lisboa e Faro. Por uma questão de simplificação, adotou-se uma classe de importância II, por se tratar da classe aplicada à maioria dos edifícios correntes, o que corresponde a um período de retorno de 475 anos.

Quadro 5.2 - Valores de magnitude de referência para a classe de importância II

Município	Ação sísmica 1	Ação sísmica 2
Lisboa	7,5	5,2
Faro	7,5	5,2

Para a obtenção dos espectros de resposta de aceleração regulamentares foi ainda admitido um coeficiente de amortecimento constante de 5%.

A título de exemplo, a Figura 5.8 compara o espectro de resposta de acelerações obtido no presente trabalho e o regulamentar, para uma ação sísmica afastada, no distrito de Faro, de $M = 7,5$ e $R = 70$ km e tipo de terreno C. Os restantes gráficos comparativos representados no Anexo E têm em conta a ação sísmica de referência de Faro para um evento sísmico de $M = 7,5$ e $R = 70$ km e de Lisboa para os restantes eventos.

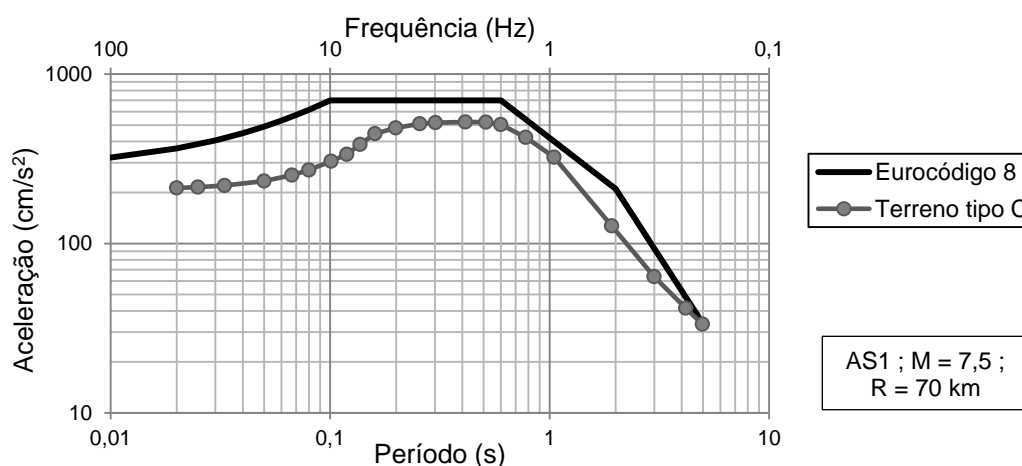


Figura 5.8 - Comparação entre o espectro de resposta de aceleração obtido e o regulamentar para o sismo afastado e um evento de $M = 7,5$ e $R = 70$ km

O Quadro 5.3 permite fazer um resumo das comparações efetuadas entre ambos os espectros de resposta.

Quadro 5.3 - Comparação entre o espectro de resposta de aceleração obtido e o regulamentar

Tipo de terreno	Amostragem de sondagens	Ação sísmica	M	R (km)	Comentário
A	9	AS1	7,5	70	Espectro obtido acima do regulamentar até 0,25 s
				200	Espectro obtido abaixo do regulamentar
		AS2	5,2	10	Espectro obtido acima do regulamentar entre 0,04 e 0,07 s
				70	Espectro obtido abaixo do regulamentar
B	26	AS1	7,5	70	Espectro obtido ajustado ao do regulamentar
				200	Espectro obtido abaixo do regulamentar
		AS2	5,2	10	Espectro obtido abaixo do regulamentar
				70	Espectro obtido abaixo do regulamentar
C	59	AS1	7,5	70	Espectro obtido abaixo do regulamentar
				200	Espectro obtido abaixo do regulamentar
		AS2	5,2	10	Espectro obtido abaixo do regulamentar
				70	Espectro obtido abaixo do regulamentar
D	8	AS1	7,5	70	Espectro obtido abaixo do regulamentar
				200	Espectro obtido abaixo do regulamentar
		AS2	5,2	10	Espectro obtido abaixo do regulamentar
				70	Espectro obtido abaixo do regulamentar
E	70	AS1	7,5	70	Espectro obtido abaixo do regulamentar
				200	Espectro obtido abaixo do regulamentar
		AS2	5,2	10	Espectro obtido abaixo do regulamentar
				70	Espectro obtido abaixo do regulamentar

Da análise ao Quadro 5.3 se conclui que, para os tipos de terreno C, D e E, os espectros de resposta regulamentares do Anexo Nacional do Eurocódigo 8 apresentam valores superiores.

Para o tipo de terreno B, os espectros de resposta regulamentares também se apresentam adequados aos obtidos durante o presente trabalho, porém para um evento com $M = 7,5$ e $R = 70$ km e para um período até 0,15 s não se verifica uma folga adequada, propondo-se a revisão do espectro regulamentar.

Com o reduzido número de sondagens classificadas como tipo de terreno A, verifica-se uma tendência da amplificação da aceleração para períodos próximos do “pico” em zonas mais próximas do hipocentro. Pode-se apenas propor um estudo mais aprofundado para, posteriormente, se efetuar correções ao espectro de resposta regulamentar. A análise deverá recolher um maior número de sondagens deste tipo de terreno e medir com um maior rigor a velocidade de corte da rocha através de métodos de prospeção geofísica, como ensaios de reflexão e refração sísmica. O mesmo raciocínio poderá ser aplicado aos perfis classificados como tipo de terreno D.

6) Conclusões e desenvolvimentos futuros

O guia de recomendações norte-americano [SSHAC, 1997] afirma que em zonas de baixa ou moderada sismicidade, os modelos de base sismológica são vias aconselhadas para a obtenção dos valores de aceleração espectral para a região, particularmente quando não há registos sísmicos em quantidade e qualidade suficientes para as magnitudes e distâncias de interesse para Engenharia Civil.

Naturalmente que a principal virtude da utilização desta metodologia, nomeadamente para Portugal Continental, reside no facto das previsões dos conteúdos espectrais dos movimentos sísmicos intensos se estenderem às magnitudes e distâncias de interesse para a Engenharia Civil (períodos de retorno entre 475 anos e 10 000 anos), colmatando assim as deficiências existentes na base de dados da região.

Deste modo, com a base de dados sintética, resultante da simulação dos movimentos intensos do solo para uma grelha de magnitudes, distâncias e frequências para dois cenários diferentes (cenário afastado e próximo, representativos da ação sísmica tipo 1 e tipo 2 do Eurocódigo 8), foram obtidas equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo distintas para os dois ambientes sísmicos, para Portugal Continental, para o substrato rochoso.

A análise dinâmica de estruturas geotécnicas, em particular sob a ação dos sismos, constitui, igualmente, um aspeto importante do dimensionamento estrutural. Assim, foram reunidos 172 perfis geotécnicos da área metropolitana de Lisboa e da região do Algarve e, tendo sido posteriormente classificados de acordo com os tipos de terreno definidos no Eurocódigo 8, modelou-se a resposta das camadas de solo com uma abordagem estocástica na aplicação do método linear equivalente. Obteve-se, desta forma, uma base de dados sintética de movimentos intensos do solo à superfície, permitindo a obtenção de equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo fundamentais para a realização de estudos rigorosos de perigosidade sísmica. Estes estudos são importantes não só a nível regulamentar, mas também em todas as áreas de gestão e planeamento de emergência, contribuindo, assim, para a diminuição da maior incerteza sistémica na avaliação da perigosidade sísmica e risco sísmico em Portugal Continental.

A realização do presente trabalho mostra um adequado ajustamento à forma dos espectros de resposta do Eurocódigo 8. Em geral, o Eurocódigo 8 está acima dos espectros calculados.

Pese embora a escassez de dados, o cruzamento dos registos sísmicos com o conhecimento do tipo de terreno onde está localizada a estação sísmica e a comparação dos valores reais com a aplicação das equações obtidas será um dos trabalhos futuros, bem como a classificação dos perfis geotécnicos segundo outros critérios [Pitilakis, 2013].

Como desenvolvimentos futuros, propõe-se:

- (i) calcular ou estimar os períodos próprios de cada tipo de terreno e propor uma nova classificação tendo em conta esta propriedade, dada a sua importância no presente trabalho;

- (ii) a realização de um estudo que inclua o efeito da polarização vertical de ondas de corte, bem como de ondas de superfície;
- (iii) realizar uma campanha de prospeção, de modo a aumentar a amostragem dos dados;
- (iv) a aplicação das equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo para um caso específico, de modo a obter acelerogramas úteis para a análise dinâmica de uma dada estrutura;
- (v) realizar estudos de perigosidade sísmica e risco sísmico tendo em conta as equações de previsão da amplitude dos movimentos do solo obtidas no presente estudo.

7) Referências bibliográficas

- Anderson, J. G., Hough, S. E., 1984. *A model for the shape of the Fourier Amplitude Spectrum of Acceleration at high frequencies*. Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 74, pp. 1969-1993.
- Atkinson, G. M., Boore, D. M., 1995. *Ground-motion relations for eastern North America*. Bull. Seism. Soc. Am.
- Azevedo, J. J. R. T., 1996. *Vibrações Aleatórias - Dinâmica Estocástica*. Mestrado em Engenharia de Estruturas, Instituto Superior Técnico.
- Bardet, J. P., Ichii, K., and Lin, C. H., 2000. *EERA: A Computer program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analysis of Layered soil deposits*. Department of Civil Engineering, University of Southern California.
- Bommer, J. J., Crowley, H., 2006. *The influence of ground-motion variability in earthquake loss modelling*. Bulletin of Earthquake Engineering; Vol. 4, pp. 231-248.
- Boore, D. M., Atkinson, G. M., 1987. *Stochastic prediction of ground motion and spectral response parameters at hard-rock sites in eastern North America*. Bull. Seism. Soc. Am.
- Campos Costa, A., Sousa, M.L., Carvalho, A., Bilé Serra, J., Martins, A. e Carvalho, E.C., 2004. *Simulador de cenários sísmicos integrado num sistema de informação geográfica*. 6ESES. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães, pp. 455-464.
- 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 Vinhos e Torres Vedras*. Relatório LNEC, 280/2002.
- Carvalho, A., 2007. *Modelação estocástica da ação sísmica em Portugal Continental*. Dissertação de doutoramento, Instituto Superior Técnico.
- Carvalho, A., Campos Costa, A., Oliveira, C. S., 2007. *Leis de atenuação espectrais para Portugal Continental*. 7º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica.
- Chapman, D., Metje, N., Stärk, A., 2010. *Introduction to Tunnel Construction*. CRC Press.
- Darendeli, M. B., 2001. *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves*. University of Texas at Austin.
- Delfim, R., 2014. *Estudo da resposta sísmica local na área metropolitana de Lisboa e na região do Algarve*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico.
- EN 1998-1. *Eurocódigo 8 - Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios*. Instituto Português da Qualidade, Portugal.
- Estevão, J. M. C., 2007. *GeoAlgarve, Base de Dados da Caracterização Geológica-Geotécnica do Algarve*. Escola Superior de Tecnologia, UALG.

- Gomes, R., 2009. *Modelação Numérica da Resposta Sísmica do Terreno e de Túneis Circulares*. Dissertação de doutoramento, Instituto Superior Técnico.
- Guerreiro, L., 2011. *Acção sísmica*. Engenharia Sísmica de Pontes, Mestrado em Engenharia de Estruturas, Instituto Superior Técnico.
- Idriss, I. M. 2004. *Influence of local site conditions on earthquake ground motions*. K. L. Lee Memorial Seminar, Los Angeles Sections of ASCE, Long Beach, California, USA.
- Ishibashi, I., Zhang, X., 1993. *Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay*. Soils and Foundations, JSSMFE, Vol. 33(1), pp. 182-191.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Takagi, Y., 1978. *Shear moduli of sands under cyclic torsional shear loading*. Soils and Foundations, JSSMFE, Vol. 18(1), pp. 39-56.
- Kramer, S.L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, Inc.
- Kottke, A., Rathje, E. M., 2010. *Strata*. <https://nees.org/resources/strata>
- Kulhawy, F. H., Mayne, P. W., 1990. *Manual on estimating soil properties for foundation design*. Cornell University, USA.
- Lourenço, D. P., 2012. *Avaliação do risco sísmico em Portugal*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.
- Lowrie, W., 2007. *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge University Press, Segunda edição.
- Malfeito, N., 2015. *Equações de Previsão dos Movimentos Sísmicos à Superfície para a Região Autónoma dos Açores*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- McIntyre, J. L., 2008. *An Evaluation Of Earthquake Ground-Motion Site Effects At Two Sites Underlain By Deep Soils In Western Kentucky*. University of Kentucky Master's Theses. Artigo 562.
- Oliveira, C. S., Coelho, E., Costa, A., Costa, P. T., Lopes, M., Gomes, R. C., Bairrão, R., 2012. *A Segurança Sísmica na Reabilitação de Edifícios*. Técnica, Revista de Engenharia.
- Oliveira, C. S., Coelho, E., Costa, A., Costa, P. T., Lopes, M., Gomes, R. C., Bairrão, R., 2012. *A Segurança Sísmica na Reabilitação de Edifícios*. Revista Pedra & Cal nº53.
- Pitilakis, K., Riga, E., Anastasiadis, A., 2013. *New code site classification, amplification factors and normalized response spectra based on a worldwide ground-motion database*. Springer Science + Business Media Dordrecht.
- Reid, H. F., 1991. *The elastic-rebound theory of earthquakes*. University of California Press.
- Rocscience. *In-situ Stress States in Soils*. RS2 (Phase2 v9) Theory.
- Rodrigues, I., Sousa, M.L., Carvalho, A., Carrilho, F., 2009. *Parâmetros das leis de Frequência-Magnitude para as Novas Zonas de Sismogénese Delineadas para a Região do Algarve*. APMG, 6º

Simpósio de Meteorologia e Geofísica / 10º Encontro Luso-Espanhol de Meteorologia, Costa da Caparica, Portugal.

Seed, H. B., Ugas, C., Lysmer, J., 1976. *Site dependent spectra for earthquake resistant design*. Seismol. Soc. America Bull., Vol. 98, pp. 221-244.

Serra, J. P. B., Caldeira, L. M. M. S., 1997. *Resposta sísmica de camadas de solo por meio de uma abordagem estocástica*. Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia, nº81.

Schnabel, P. B., Lysmer, J., Seed, H. B., 1972. *SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites*. In Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley, California.

Sousa, M. L., Carvalho, A., Bilé Serra, J. P., Martins, A., Mateus, M., 2008. *Estudo do risco sísmico e de tsunamis do Algarve (ESRTA), Relatório Final*. LNEC, relatório 295/2008 – NESDE.

SSHAC, 1997. *Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis. Guidance on uncertainty and use of experts*. Lawrence Livermore Nat. Lab.. Report NUREG/CR-6372 – Report UCRL-ID-122160, Vol. I, Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC), Livermore.

Subramanian, N., 2010. *Design of Steel Structures*. Appendix C, Properties of Soils. Oxford University Press.

Toro, G. R., McGuire, R. K. 1987. *Calculational procedures for seismic hazard analysis and its uncertainty in the Eastern United States*. Berlin, Elsevier Science Publishing Co. Developments in Geotechnical Engineering, v.44.

Vucetic, M., Dobry, R., 1991. *Effects of soil plasticity on cyclic response*. Journal Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, nº1, pp. 89-107.

ANEXO A – Perfis de terreno

Perfis de terreno da região do Algarve																	
Nº	z (m)	Lit. (*)	d_r	IP (%)	v_s (m/s)	n	$v_{s,30}$ (m/s)	Class. EC8	Nº	z (m)	Lit. (*)	d_r	IP (%)	v_s (m/s)	n	$v_{s,30}$ (m/s)	Class. EC8
1	0,00	α	1,6	40	136,0	9	255,4	E	18	0,00	β	1,7	40	166,0	1	1041,1	A
	13,10	η	2,2	0	800,0	0				2,00	θ	2,2	0	1670,0	0		
2	0,00	β	1,7	40	209,0	9	375,4	E	19	0,00	β	1,7	40	233,0	11	408,9	E
	12,00	η	2,2	0	800,0	0				15,00	θ	2,2	0	1670,0	0		
3	0,00	α	1,6	40	155,0	19	171,1	D	20	0,00	β	1,7	40	155,0	1	1011,1	A
	26,50	η	2,2	0	800,0	0				2,00	θ	2,2	0	1670,0	0		
4	0,00	α	1,7	40	166,0	4	581,4	E	21	0,00	β	1,7	40	285,0	32	285,0	C
	6,20	θ	2,2	0	1670,0	0				44,15	θ	2,2	0	1670,0	0		
5	0,00	α	1,7	40	223,0	20	231,6	C	22	0,00	β	1,7	40	233,0	11	408,9	E
	27,50	γ	1,6	40	402,0	16				15,00	θ	2,2	0	1670,0	0		
	50,50	η	2,2	0	800,0	0				0,00	α	1,6	40	115,0	5		
6	0,00	β	1,7	40	189,0	6	406,1	E	23	7,00	ϵ	1,8	0	242,0	10	243,8	C
	9,00	η	2,2	0	800,0	0				20,70	θ	2,2	0	1670,0	0		
7	0,00	δ	1,9	10	223,0	8	473,0	E	24	0,00	β	1,7	40	242,0	19	266,5	C
	11,70	θ	2,2	0	1670,0	0				26,77	θ	2,2	0	1670,0	0		
8	0,00	β	1,7	40	165,0	3	753,6	B	25	0,00	β	1,7	40	179,0	7	455,6	E
	4,00	θ	2,2	0	1670,0	0				9,60	θ	2,2	0	1670,0	0		
9	0,00	β	1,7	40	218,0	11	235,5	C	26	0,00	α	1,6	40	121,0	7	333,3	E
	15,00	β	1,7	40	256,0	14				9,40	θ	2,2	0	1670,0	0		
	34,00	θ	2,2	0	1670,0	0				0,00	α	1,6	40	140,0	8		
10	0,00	β	1,7	40	227,0	14	332,3	E	27	10,70	θ	2,2	0	1670,0	0	341,0	E
	19,00	θ	2,2	0	1670,0	0				0,00	α	1,6	40	127,0	9		
11	0,00	β	1,7	40	180,0	4	701,8	E	28	12,20	β	1,7	40	223,0	10	185,8	C
	5,00	θ	2,2	0	1670,0	0				26,30	θ	2,2	0	1670,0	0		
12	0,00	β	1,7	40	158,0	1	1039,8	A	29	0,00	ζ	1,8	0	185,0	7	379,5	E
	1,90	θ	2,2	0	1670,0	0				10,00	η	2,2	0	800,0	0		
13	0,00	β	1,7	40	162,0	2	602,3	B	30	0,00	β	1,7	40	213,0	6	547,2	E
	2,50	η	2,2	0	800,0	0				9,00	θ	2,2	0	1670,0	0		
14	0,00	β	1,7	40	155,0	1	1011,1	A	31	0,00	α	1,6	40	109,0	4	493,1	E
	2,00	θ	2,2	0	1670,0	0				5,00	θ	2,2	0	1670,0	0		
15	0,00	β	1,7	40	322,0	51	322,0	C	32	0,00	ϵ	1,8	0	233,0	13	353,7	E
	72,00	θ	2,2	0	1670,0	0				18,10	θ	2,2	0	1670,0	0		
16	0,00	β	1,7	40	209,0	9	439,9	E	33	0,00	ϵ	1,8	0	249,0	12	409,1	E
	12,00	θ	2,2	0	1670,0	0				16,20	θ	2,2	0	1670,0	0		
17	0,00	β	1,7	40	265,0	21	265,0	C	34	0,00	β	1,7	40	192,0	4	657,6	E
	30,00	θ	2,2	0	1670,0	0				6,00	θ	2,2	0	1670,0	0		

(*): Ver legenda de litologia na página A.4

Perfis de terreno da região do Algarve																	
Nº	z (m)	Lit. (*)	d _r	IP (%)	v _s (m/s)	n	v _{s,30} (m/s)	Class. EC8	Nº	z (m)	Lit. (*)	d _r	IP (%)	v _s (m/s)	n	v _{s,30} (m/s)	Class. EC8
35	0,00	α	1,6	40	166,0	13	251,7	E	53	0,00	δ	1,9	10	270,0	28	270,0	C
	18,66	θ	2,2	0	1670,0	0				38,50	η	2,2	0	800,0	0		
36	0,00	ζ	1,8	0	185,0	12	282,8	E	54	0,00	β	1,7	40	256,0	18	288,7	C
	16,50	η	2,2	0	800,0	0				25,00	η	2,2	0	800,0	0		
37	0,00	ε	1,8	0	258,0	17	296,9	C	55	0,00	δ	1,9	10	283,0	30	283,0	C
	24,20	η	2,2	0	800,0	0				42,00	η	2,2	0	800,0	0		
38	0,00	β	1,7	40	211,0	7	498,4	E	56	0,00	δ	1,9	10	213,0	6	437,9	E
	10,20	θ	2,2	0	1670,0	0				9,00	η	2,2	0	800,0	0		
39	0,00	β	1,7	40	187,0	4	719,3	E	57	0,00	δ	1,9	10	256,0	18	288,7	C
	5,00	θ	2,2	0	1670,0	0				25,00	η	2,2	0	800,0	0		
40	0,00	β	1,7	40	242,0	13	367,8	E	58	0,00	δ	1,9	10	237,0	12	349,8	E
	18,40	κ	2,2	0	2100,0	0				16,25	η	2,2	0	800,0	0		
41	0,00	β	1,7	40	222,0	7	526,1	E	59	0,00	ε	1,8	0	236,0	11	364,5	E
	10,00	θ	2,2	0	1670,0	0				15,00	η	2,2	0	800,0	0		
42	0,00	β	1,7	40	229,0	10	377,0	E	60	0,00	β	1,7	40	274,0	26	274,0	C
	13,50	η	2,2	0	800,0	0				36,00	η	2,2	0	800,0	0		
43	0,00	β	1,7	40	226,0	11	355,1	E	61	0,00	δ	1,9	10	197,0	6	428,4	E
	14,80	η	2,2	0	800,0	0				8,50	η	2,2	0	800,0	0		
44	0,00	β	1,7	40	223,0	10	414,6	E	62	0,00	δ	1,9	10	277,0	27	277,0	C
	14,00	θ	2,2	0	1670,0	0				37,75	η	2,2	0	800,0	0		
45	0,00	ε	1,8	0	377,0	86	377,0	B	63	0,00	δ	1,9	10	248,0	18	280,2	C
	120,00	θ	2,2	0	1670,0	0				25,00	η	2,2	0	800,0	0		
46	0,00	β	1,7	40	267,0	22	267,0	C	64	0,00	δ	1,9	10	316,0	54	316,0	C
	31,35	θ	2,2	0	1670,0	0				75,00	θ	2,2	0	1670,0	0		
47	0,00	ε	1,8	0	275,0	10	480,3	E	65	0,00	δ	1,9	10	283,0	30	283,0	C
	14,65	θ	2,2	0	1670,0	0				42,00	θ	2,2	0	1670,0	0		
48	0,00	β	1,7	40	187,0	4	719,3	E	66	0,00	δ	1,9	10	144,0	1	1234,1	A
	5,00	θ	2,2	0	1670,0	0				1,00	θ	2,2	0	1670,0	0		
49	0,00	β	1,7	40	340,0	77	340,0	C	67	0,00	δ	1,9	10	289,0	34	289,0	C
	108,00	θ	2,2	0	1670,0	0				47,00	θ	2,2	0	1670,0	0		
50	0,00	δ	1,9	10	273,0	25	273,0	C	68	0,00	δ	1,9	10	362,0	107	362,0	B
	35,00	θ	2,2	0	1670,0	0				149,20	θ	2,2	0	1670,0	0		
51	0,00	ε	1,8	0	263,0	13	386,9	E	69	0,00	β	1,7	40	174,0	2	612,6	B
	18,60	θ	2,2	0	1670,0	0				2,55	η	2,2	0	800,0	0		
52	0,00	δ	1,9	10	254,0	17	305,9	C	70	0,00	δ	1,9	10	304,0	44	304,0	C
	24,00	θ	2,2	0	1670,0	0				61,50	η	2,2	0	800,0	0		

(*): Ver legenda de litologia na página A.4

Perfis de terreno da região do Algarve																	
Nº	z (m)	Lit. (*)	d_r	IP (%)	v_s (m/s)	n	$v_{s,30}$ (m/s)	Class. EC8	Nº	z (m)	Lit. (*)	d_r	IP (%)	v_s (m/s)	n	$v_{s,30}$ (m/s)	Class. EC8
71	0,00	δ	1,9	10	262,0	20	274,6	C	89	0,00	β	1,7	40	237,0	14	313,8	E
	27,95	η	2,2	0	800,0	0				19,57	η	2,2	0	800,0	0		
72	0,00	β	1,7	40	155,0	1	626,3	B	90	0,00	β	1,7	40	217,0	9	385,6	E
	2,00	η	2,2	0	800,0	0				12,00	η	2,2	0	800,0	0		
73	0,00	δ	1,9	10	274,0	26	274,0	C	91	0,00	δ	1,9	10	278,0	28	278,0	C
	36,00	η	2,2	0	800,0	0				38,67	η	2,2	0	800,0	0		
74	0,00	β	1,7	40	180,0	4	701,8	E	92	0,00	δ	1,9	10	305,0	44	305,0	C
	5,00	θ	2,2	0	1670,0	0				62,00	η	2,2	0	800,0	0		
75	0,00	β	1,7	40	195,0	6	553,5	E	93	0,00	δ	1,9	10	299,0	40	299,0	C
	8,00	θ	2,2	0	1670,0	0				56,00	η	2,2	0	800,0	0		
76	0,00	δ	1,9	10	250,0	19	282,0	C	94	0,00	δ	1,9	10	335,0	56	335,0	C
	26,00	θ	2,2	0	1670,0	0				78,00	η	2,2	0	800,0	0		
77	0,00	δ	1,9	10	271,0	34	271,0	C	95	0,00	δ	1,9	10	308,0	47	308,0	C
	48,00	θ	2,2	0	1670,0	0				65,50	η	2,2	0	800,0	0		
78	0,00	δ	1,9	10	326,0	49	326,0	C	96	0,00	α	1,6	40	86,0	2	254,3	C
	68,00	θ	2,2	0	1670,0	0				3,00	ε	1,8	0	325,0	57		
79	0,00	β	1,7	40	197,0	5	608,5	E		83,00	η	2,2	0	800,0	0		
	7,00	θ	2,2	0	1670,0	0			97	0,00	ε	1,8	0	319,0	43	319,0	C
80	0,00	β	1,7	40	195,0	6	553,5	E		60,00	η	2,2	0	800,0	0		
	8,00	θ	2,2	0	1670,0	0			98	0,00	δ	1,9	10	281,0	34	281,0	C
81	0,00	β	1,7	40	162,0	2	940,5	A		47,55	η	2,2	0	800,0	0		
	2,50	θ	2,2	0	1670,0	0			99	0,00	δ	1,9	10	321,0	51	321,0	C
82	0,00	β	1,7	40	176,0	2	851,2	A		71,00	η	2,2	0	800,0	0		
	3,40	θ	2,2	0	1670,0	0			100	0,00	β	1,7	40	180,0	3	548,2	B
83	0,00	β	1,7	40	246,0	14	343,7	E		4,00	η	2,2	0	800,0	0		
	20,00	θ	2,2	0	1670,0	0			101	0,00	β	1,7	40	187,0	4	517,3	E
84	0,00	β	1,7	40	180,0	4	701,8	E		5,00	η	2,2	0	800,0	0		
	5,00	θ	2,2	0	1670,0	0			102	0,00	β	1,7	40	185,0	4	641,0	E
85	0,00	β	1,7	40	254,0	17	308,5	C		6,00	θ	2,2	0	1670,0	0		
	23,75	θ	2,2	0	1670,0	0			103	0,00	δ	1,9	10	236,0	14	344,5	E
86	0,00	ε	1,8	0	198,0	4	718,8	E		19,00	θ	2,2	0	1670,0	0		
	5,34	θ	2,2	0	1670,0	0			104	0,00	α	1,6	40	94,0	8	248,0	E
87	0,00	β	1,7	40	192,0	4	263,8	C		10,50	κ	2,2	0	2100,0	0		
	6,00	δ	1,9	10	291,0	35			105	0,00	β	1,7	40	106,0	1	656,7	B
	54,60	θ	2,2	0	1670,0	0				1,00	η	2,2	0	800,0	0		
88	0,00	β	1,7	40	161,0	1	632,6	B	106	0,00	β	1,7	40	181,0	1	651,5	B
	2,00	η	2,2	0	800,0	0				2,00	η	2,2	0	800,0	0		

(*): Ver legenda de litologia na página A.4

Perfis de terreno da região do Algarve																	
Nº	z (m)	Lit.	d_r	IP (%)	v_s (m/s)	n	$v_{s,30}$ (m/s)	Class. EC8	Nº	z (m)	Lit.	d_r	IP (%)	v_s (m/s)	n	$v_{s,30}$ (m/s)	Class. EC8
107	0,00	ζ	1,8	0	148,0	3	359,6	E	121	0,00	β	1,7	40	156,0	1	663,1	B
	4,50	ζ	1,8	0	103,0	2				1,50	η	2,2	0	800,0	0		
	7,00	η	2,2	0	800,0	0				251,6	E	122	0,00	ε	1,8	0	176,0
0,00	α	1,6	40	143,0	9	3,50	η	2,2	0				800,0	0			
12,00	ε	1,8	0	181,0	2	658,5	B	123	0,00				α	1,6	40	91,0	6
15,00	η	2,2	0	800,0	0				8,50	η	2,2	0	800,0	0			
109	0,00	β	1,7	40	151,0	1	356,5	E	124	0,00	β	1,7	40	140,0	3	468,6	B
	1,50	η	2,2	0	800,0	0				4,50	η	2,2	0	800,0	0		
110	0,00	α	1,6	40	115,0	6	348,1	E	125	0,00	γ	1,6	40	192,0	1	1577,5	A
	8,50	κ	2,2	0	2100,0	0				1,00	κ	2,2	0	2100,0	0		
111	0,00	δ	1,9	10	192,0	4	558,5	B	126	0,00	β	1,7	40	210,0	4	544,9	E
	6,00	δ	1,9	10	185,0	4				5,00	η	2,2	0	800,0	0		
	12,00	η	2,2	0	800,0	0				607,5	B	127	0,00	δ	1,9	10	182,0
0,00	β	1,7	40	170,0	3	2,80	η	2,2	0				800,0	0			
112	3,50	η	2,2	0	800,0	0	425,0	B	128	0,00	ε	1,8	0	189,0	4	502,3	E
	0,00	α	1,6	40	105,0	3				5,50	η	2,2	0	800,0	0		
113	4,00	η	2,2	0	800,0	0	583,7	B	129	0,00	β	1,7	40	176,0	4	468,1	E
	0,00	β	1,7	40	170,0	2				6,00	η	2,2	0	800,0	0		
114	3,00	η	2,2	0	800,0	0	539,4	B	130	0,00	α	1,6	40	93,0	7	202,7	E
	0,00	β	1,7	40	173,0	3				10,00	ε	1,8	0	176,0	3		
115	4,00	η	2,2	0	800,0	0	558,8	E	131	13,50	η	2,2	0	800,0	0	602,3	B
	0,00	β	1,7	40	206,0	6				0,00	δ	1,9	10	162,0	2		
116	9,00	κ	2,2	0	2100,0	0	493,6	E	132	2,50	η	2,2	0	800,0	0	637,6	B
	0,00	δ	1,9	10	207,0	5				0,00	β	1,7	40	166,0	1		
117	6,50	η	2,2	0	800,0	0	567,1	B	133	2,00	η	2,2	0	800,0	0	259,9	E
	0,00	β	1,7	40	177,0	3				0,00	α	1,6	40	120,0	8		
118	3,50	η	2,2	0	800,0	0	683,9	B	134	11,00	η	2,2	0	800,0	0	539,4	B
	0,00	β	1,7	40	182,0	1				0,00	β	1,7	40	173,0	3		
119	1,50	η	2,2	0	800,0	0	226,4	E									
	0,00	α	1,6	40	93,0	7											
120	10,00	η	2,2	0	800,0	0											

Legenda de litologia – Terreno acima do substrato rochoso	
α: Aluviões e Lodos (Holocénico)	δ: Areias argilosas (Terciário)
β: Argilas (Plio-Plistocénico)	ε: Areias (Plio-Plistocénico)
γ: Terraços fluviais, cascalheiras (Plio-Plistocénico)	ζ: Areias, areias de duna e de praia (Holocénico)
Legenda de litologia – Substrato rochoso	
η: Calcários carsificados	κ: Xistos e grauvaques
θ: Calcários, calcários dolomíticos e margas não carsificados	

Perfis de terreno da Área Metropolitana de Lisboa																				
Nº	z (m)	d_r	IP (%)	v_s (m/s)	n	$v_{s,30}$ (m/s)	Class. EC8	Nº	z (m)	d_r	IP (%)	v_s (m/s)	n	$v_{s,30}$ (m/s)	Class. EC8					
135	0,00	1,8	0	327,0	4	806,4	A	145	0,00	1,8	0	222,0	3	365,2	E					
	3,50	2,2	0	1000,0	0				3,50	1,8	30	356,0	2							
136	0,00	2,0	40	197,0	4	352,2	C		6,50	1,8	0	184,0	5			365,2	E			
	3,50	1,9	30	167,4	6				11,40	1,6	30	117,0	1							
	8,90	2,0	0	600,0	0				13,80	2,4	0	1500,0	0							
137	0,00	1,8	40	111,0	4	292,8	E		0,00	1,8	0	242,0	6	429,7	E					
	4,50	1,8	40	231,0	5				6,40	2,0	0	336,0	10							
	10,00	1,8	0	249,0	6				16,40	2,0	0	1000,0	0							
	16,00	2,2	0	1000,0	0				147	0,00	1,6	50	155,0			7	264,4	C		
138	0,00	1,8	40	265,0	5	209,5	C			6,80	1,8	40	290,4	3	264,4	C				
	4,50	1,6	50	137,0	7					14,20	1,8	50	282,8	9						
	11,50	1,8	40	223,0	3					23,70	2,0	0	600,0	0						
	15,00	1,8	0	172,0	2				148	0,00	1,8	0	196,0	4			237,2	C		
	20,00	1,8	40	253,0	6					3,80	1,8	40	150,0	3						
	26,00	2,0	0	600,0	0			6,90		1,8	40	269,4	11							
139	0,00	1,8	30	232,0	13	298,2	C	17,60		1,8	0	267,0	12	237,2	C					
	13,00	2,0	0	360,0	15			29,60		1,8	40	229,9	19							
	28,50	2,2	0	1000,0	0			49,10		2,0	0	600,0	0							
140	0,00	1,8	0	236,5	18	335,6	E	149	0,00	1,8	0	266,0	7			239,7	C			
	18,40	2,4	0	1000,0	0				7,50	1,8	40	232,0	26							
141	0,00	1,8	30	212,3	5	374,0	E		34,50	2,0	30	263,1	6					239,7	C	
	4,50	1,9	40	314,7	9				41,50	2,0	0	600,0	0							
	13,50	2,0	30	287,0	5				150	0,00	1,8	40	248,0	7	318,7					E
	19,10	2,2	0	1000,0	0					7,50	1,8	0	210,0	11						
142	0,00	1,8	0	292,0	8	412,4	E	18,50		2,2	0	1000,0	0	243,5		C				
	8,40	1,6	50	158,0	4			151		0,00	2,0	0	136,0				3			
	12,60	2,2	0	1000,0	0				3,00	1,6	40	135,0	3							
143	0,00	1,8	30	240,6	20	211,3	C		7,50	2,2	30	250,0	13		243,5		C			
	20,00	1,8	50	170,0	18			20,50	2,0	0	600,0	0								
	38,00	1,8	30	147,0	7			152	0,00	1,7	30	188,1	16					180,8	C	
	45,00	2,2	0	1000,0	0				16,00	1,8	0	224,0	7							
144	0,00	1,6	30	197,0	7	179,8	D		23,00	1,6	50	141,0	9	180,8		C				
	7,00	1,6	0	175,0	7				32,00	1,8	30	185,1	25							
	14,00	1,6	50	142,0	6			57,00	2,0	0	600,0	0								
	20,00	2,0	30	204,0	20			153	0,00	1,8	30	188,0	13		252,5		C			
	40,00	2,2	0	254,0	14				13,10	1,9	32	268,7	10							
	54,00	2,0	0	600,0	0				23,30	2,0	0	600,0	0							

Perfis de terreno da Área Metropolitana de Lisboa																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
Nº	z (m)	d_r	IP (%)	v_s (m/s)	n	$v_{s,30}$ (m/s)	Class. EC8	Nº	z (m)	d_r	IP (%)	v_s (m/s)	n	$v_{s,30}$ (m/s)	Class. EC8																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
154	0,00	1,8	0	310,0	2	156,1	D	164	0,00	1,8	0	254,0	7	186,4	C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	2,00	1,6	30	148,0	21				6,80	1,8	34	202,8	6			13,20	1,6	38	160,1	7	20,00	1,6	40	154,0	6	42,80	2,2	0	1000,0	0	155	0,00	1,8	41	216,3	15	208,7	C	165	0,00	1,7	30	177,6	19	239,4	C	15,10	1,8	32	201,6	18	33,40	2,4	0	1500,0	0	156	0,00	1,8	40	187,6	8	308,8	C	166	0,00	1,8	30	288,0	6	654,7	E	8,80	1,9	30	265,4	7	15,90	2,0	0	600,0	0	157	0,00	1,8	0	179,0	4	273,5	C	167	0,00	1,8	0	292,0	3	209,5	C	4,00	1,6	50	102,0	2	6,00	1,8	30	225,0	6	12,00	1,8	30	307,9	7	19,00	2,0	0	600,0	0	158	0,00	1,6	50	102,0	6	216,5	E	168	0,00	1,7	0	138,0	2	348,9	C	5,50	1,8	0	155,0	2	6,00	1,8	0	172,0	4	8,00	2,0	0	600,0	0	159	0,00	1,6	50	159,0	27	173,6	D	169	0,00	2,0	30	224,0	6	266,3	C	5,50	1,8	31	135,3	21	7,50	1,8	31	135,3	21	15,20	2,2	0	1000,0	0	160	0,00	1,6	50	159,0	27	173,6	D	170	0,00	1,6	30	120,0	25	120,0	D	27,00	2,2	0	1000,0	0	30,00	1,8	20	243,0	15	161	0,00	1,8	0	221,0	3	696,3	B	171	0,00	1,6	30	120,0	30	120,0	D	2,70	1,8	40	296,0	2	4,20	2,2	0	1000,0	0	162	0,00	1,8	0	188,0	15	221,4	C	172	0,00	1,6	30	80,0	20	84,1	D	15,00	1,8	50	159,0	6	22,70	2,2	0	1000,0	0	163	0,00	1,8	0	158,0	7	363,0	B	172	28,00	1,8	20	295,0	5	7,00	2,0	0	600,0	0	35,00	1,8	0	304,0	25	68,00	2,4	0	1000,0	0	0,00	1,6	30	173,0	4	154,7	D		4,50	1,6	50	122,0	44	15,70	1,8	30	188,0	26	42,00	1,8	34	188,3	19	61,50	2,0	0	600,0	0																																																																		
	6,80	1,8	34	202,8	6				13,20	1,6	38	160,1	7			20,00	1,6	40	154,0	6	42,80	2,2	0	1000,0	0	155	0,00	1,8	41	216,3		15	208,7	C	165	0,00				1,7	30	177,6	19	239,4			C	15,10	1,8	32	201,6	18	33,40	2,4	0	1500,0		0	156	0,00	1,8	40				187,6	8	308,8	C	166			0,00	1,8	30	288,0	6	654,7	E	8,80	1,9	30		265,4	7	15,90	2,0	0				600,0	0	157	0,00	1,8			0	179,0	4	273,5	C	167	0,00	1,8	0	292,0	3	209,5	C	4,00	1,6	50	102,0	2	6,00	1,8		30	225,0	6	12,00	1,8				30	307,9	7	19,00	2,0			0	600,0	0	158	0,00	1,6	50	102,0	6	216,5	E	168	0,00	1,7	0		138,0	2	348,9	C	5,50				1,8	0	155,0	2	6,00			1,8	0	172,0	4	8,00	2,0	0	600,0	0	159	0,00	1,6	50	159,0	27		173,6	D	169	0,00	2,0				30	224,0	6	266,3	C			5,50	1,8	31	135,3	21	7,50	1,8	31	135,3	21		15,20	2,2	0	1000,0	0				160	0,00	1,6	50	159,0			27	173,6	D	170	0,00	1,6	30	120,0	25	120,0		D	27,00	2,2	0	1000,0				0	30,00	1,8	20	243,0			15	161	0,00	1,8	0	221,0	3	696,3	B	171		0,00	1,6	30	120,0	30				120,0	D	2,70	1,8	40	296,0	2	4,20	2,2	0	1000,0	0	162	0,00	1,8	0	188,0	15	221,4	C	172	0,00	1,6	30	80,0				20	84,1	D	15,00	1,8	50	159,0	6	22,70	2,2	0	1000,0	0	163	0,00	1,8	0	158,0	7	363,0	B	172	28,00	1,8	20	295,0	5	7,00	2,0	0	600,0	0	35,00	1,8	0	304,0	25	68,00	2,4	0	1000,0	0	0,00	1,6	30	173,0	4	154,7	D		4,50	1,6	50	122,0	44	15,70	1,8	30	188,0	26	42,00	1,8	34	188,3	19	61,50	2,0	0	600,0	0																
	13,20	1,6	38	160,1	7				20,00	1,6	40	154,0	6			42,80	2,2	0	1000,0	0	155	0,00	1,8	41	216,3		15	208,7	C	165		0,00				1,7				30	177,6	19	239,4		C	15,10		1,8	32	201,6	18	33,40	2,4	0	1500,0	0		156		0,00	1,8	40				187,6	8				308,8	C	166	0,00	1,8	30	288,0			6	654,7	E		8,80	1,9	30	265,4	7				15,90	2,0		0	600,0			0	157	0,00				1,8	0	179,0	4	273,5			C	167	0,00	1,8	0	292,0	3		209,5	C	4,00	1,6	50				102,0	2	6,00	1,8	30			225,0	6	12,00		1,8	30	307,9	7	19,00				2,0	0	600,0		0	158			0,00				1,6	50	102,0	6	216,5			E	168	0,00	1,7	0	138,0	2	348,9	C		5,50	1,8	0	155,0	2					6,00	1,8				0	172,0	4					8,00	2,0	0	600,0	0	159	0,00	1,6	50	159,0		27	173,6	D	169	0,00					2,0	30	224,0	6			266,3				C	5,50	1,8	31	135,3				21	7,50	1,8	31				135,3	21	15,20	2,2	0			1000,0		0	160	0,00	1,6	50					159,0	27	173,6	D	170						0,00	1,6	30	120,0	25	120,0	D	27,00	2,2	0		1000,0	0	30,00	1,8	20				243,0	15	161	0,00				1,8			0	221,0	3	696,3	B	171	0,00	1,6	30	120,0		30	120,0	D	2,70	1,8				40	296,0	2	4,20	2,2	0	1000,0	0	162	0,00	1,8	0	188,0	15	221,4	C	172	0,00	1,6	30	80,0	20	84,1	D	15,00				1,8	50	159,0	6	22,70	2,2	0	1000,0	0	163	0,00	1,8	0	158,0	7	363,0	B	172	28,00	1,8	20	295,0	5	7,00	2,0	0	600,0	0	35,00	1,8	0	304,0	25	68,00	2,4	0
	20,00	1,6	40	154,0	6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
42,80	2,2	0	1000,0	0	155	0,00	1,8	41	216,3	15	208,7	C	165	0,00	1,7	30	177,6	19	239,4	C		15,10	1,8	32	201,6	18	33,40				2,4	0	1500,0	0	156	0,00	1,8	40	187,6	8	308,8	C	166	0,00	1,8	30	288,0	6	654,7	E	8,80	1,9	30	265,4	7	15,90	2,0		0	600,0	0	157	0,00	1,8	0	179,0	4	273,5	C	167				0,00	1,8	0	292,0	3	209,5	C	4,00	1,6		50	102,0	2	6,00	1,8				30	225,0		6	12,00			1,8		30				307,9	7	19,00	2,0						0	600,0	0	158	0,00	1,6			50	102,0	6	216,5	E	168	0,00	1,7	0	138,0	2	348,9	C	5,50	1,8	0		155,0	2	6,00	1,8	0				172,0	4	8,00	2,0	0				600,0	0	159	0,00	1,6	50	159,0	27		173,6	D			169	0,00	2,0	30	224,0				6	266,3	C	5,50	1,8	31				135,3	21	7,50	1,8	31	135,3	21	15,20			2,2	0	1000,0	0	160	0,00	1,6		50	159,0	27	173,6	D	170				0,00	1,6	30	120,0	25	120,0	D	27,00	2,2	0	1000,0		0	30,00	1,8		20	243,0	15	161	0,00	1,8	0	221,0	3	696,3	B	171	0,00	1,6	30	120,0	30	120,0	D	2,70	1,8	40	296,0	2		4,20	2,2	0	1000,0	0	162		0,00	1,8							0	188,0	15	221,4	C	172	0,00			1,6	30	80,0	20	84,1	D	15,00	1,8	50	159,0	6	22,70	2,2	0		1000,0				0	163	0,00	1,8	0	158,0				7	363,0	B	172		28,00			1,8	20				295,0	5	7,00	2,0	0	600,0	0	35,00		1,8	0	304,0	25	68,00				2,4	0	1000,0	0	0,00			1,6				30	173,0	4	154,7	D		4,50	1,6	50		122,0	44	15,70	1,8	30				188,0	26	42,00	1,8	34	188,3	19	61,50	2,0	0	600,0	0						
155	0,00	1,8	41	216,3		15	208,7	C	165	0,00				1,7	30	177,6	19	239,4			C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
	15,10	1,8	32	201,6		18				33,40				2,4	0	1500,0	0		156	0,00		1,8	40	187,6	8	308,8	C	166	0,00	1,8	30	288,0	6	654,7		E	8,80	1,9	30	265,4				7	15,90	2,0	0	600,0	0	157	0,00	1,8	0	179,0	4	273,5	C	167	0,00	1,8	0		292,0	3	209,5	C	4,00				1,6	50	102,0	2	6,00	1,8	30	225,0			6	12,00	1,8	30	307,9	7	19,00	2,0	0	600,0	0	158	0,00	1,6	50	102,0	6	216,5	E		168	0,00	1,7	0	138,0	2	348,9	C		5,50	1,8			0	155,0	2		6,00	1,8			0	172,0	4				8,00	2,0	0	600,0	0			159	0,00	1,6	50	159,0	27	173,6	D	169	0,00	2,0	30	224,0	6	266,3	C	5,50	1,8	31	135,3	21	7,50		1,8	31	135,3	21	15,20	2,2			0	1000,0		0	160	0,00	1,6	50	159,0	27	173,6			D	170	0,00	1,6	30	120,0	25	120,0	D	27,00	2,2	0	1000,0	0	30,00	1,8	20	243,0	15	161		0,00	1,8	0	221,0	3	696,3				B	171	0,00	1,6	30	120,0	30	120,0			D	2,70	1,8	40	296,0	2	4,20	2,2	0	1000,0	0	162		0,00	1,8	0	188,0	15				221,4	C	172	0,00	1,6			30	80,0	20	84,1	D	15,00	1,8	50	159,0	6	22,70		2,2	0	1000,0	0	163	0,00	1,8	0	158,0	7	363,0	B				172	28,00	1,8	20	295,0	5	7,00			2,0	0	600,0	0	35,00	1,8	0	304,0	25	68,00	2,4	0	1000,0	0		0,00	1,6	30	173,0	4	154,7	D					4,50	1,6	50	122,0	44	15,70	1,8	30	188,0	26	42,00	1,8	34	188,3	19	61,50	2,0	0	600,0	0																																																					
	33,40	2,4	0	1500,0	0	156				0,00	1,8	40	187,6	8	308,8	C	166	0,00		1,8	30	288,0	6	654,7	E				8,80	1,9	30	265,4	7		15,90		2,0	0	600,0	0	157	0,00	1,8	0	179,0	4	273,5	C	167		0,00	1,8	0	292,0	3				209,5	C	4,00		1,6	50			102,0				2	6,00	1,8	30	225,0	6	12,00	1,8			30	307,9	7	19,00	2,0	0	600,0	0	158	0,00	1,6		50	102,0	6	216,5	E			168		0,00	1,7	0	138,0	2			348,9	C	5,50	1,8	0	155,0	2	6,00		1,8	0	172,0	4	8,00	2,0	0				600,0	0	159	0,00	1,6				50	159,0	27	173,6	D				169	0,00	2,0	30	224,0			6	266,3	C	5,50	1,8	31		135,3	21	7,50	1,8	31	135,3			21	15,20		2,2		0	1000,0	0	160	0,00						1,6	50	159,0	27	173,6			D	170	0,00	1,6	30	120,0	25	120,0	D	27,00		2,2	0	1000,0	0	30,00	1,8		20	243,0	15			161	0,00	1,8	0	221,0		3	696,3		B	171	0,00	1,6	30	120,0	30	120,0	D	2,70		1,8	40	296,0	2	4,20	2,2	0	1000,0	0				162	0,00	1,8	0	188,0	15	221,4			C	172	0,00	1,6	30	80,0	20	84,1	D	15,00	1,8		50	159,0	6	22,70	2,2			0	1000,0	0		163	0,00	1,8	0	158,0	7	363,0	B	172	28,00	1,8	20	295,0	5	7,00	2,0	0	600,0	0	35,00	1,8	0		304,0	25	68,00	2,4	0							1000,0	0	0,00	1,6	30	173,0	4	154,7	D		4,50	1,6	50	122,0	44	15,70	1,8	30	188,0	26	42,00	1,8	34	188,3	19	61,50	2,0	0	600,0	0																																											
156	0,00	1,8	40	187,6	8		308,8	C	166	0,00	1,8	30	288,0	6				654,7		E																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	8,80	1,9	30	265,4	7					15,90	2,0	0	600,0	0					157		0,00	1,8	0	179,0	4	273,5	C	167	0,00	1,8	0	292,0	3	209,5	C	4,00	1,6	50	102,0	2		6,00	1,8	30	225,0	6					12,00	1,8	30	307,9	7						19,00	2,0	0	600,0			0	158	0,00	1,6	50	102,0	6	216,5	E	168	0,00	1,7	0	138,0	2	348,9	C	5,50	1,8	0	155,0	2		6,00	1,8		0	172,0	4							8,00	2,0	0	600,0	0					159	0,00	1,6	50	159,0	27	173,6	D	169	0,00	2,0	30	224,0	6	266,3	C	5,50	1,8	31		135,3	21	7,50	1,8		31	135,3	21							15,20	2,2	0	1000,0			0			160	0,00	1,6	50	159,0	27	173,6	D	170	0,00	1,6	30	120,0	25	120,0	D	27,00	2,2	0	1000,0		0	30,00	1,8	20	243,0	15	161	0,00	1,8	0		221,0	3			696,3	B	171	0,00	1,6			30	120,0	30	120,0	D	2,70	1,8	40	296,0	2	4,20	2,2	0	1000,0		0	162	0,00	1,8	0	188,0		15			221,4	C	172	0,00	1,6			30	80,0	20	84,1	D	15,00	1,8	50	159,0	6	22,70	2,2	0	1000,0		0	163	0,00	1,8	0		158,0	7			363,0	B	172	28,00	1,8			20	295,0		5	7,00	2,0	0	600,0			0	35,00	1,8			0	304,0	25	68,00	2,4				0	1000,0	0	0,00	1,6	30	173,0	4	154,7	D		4,50	1,6	50	122,0	44	15,70	1,8	30				188,0	26	42,00	1,8	34	188,3	19	61,50	2,0	0				600,0	0																																																													
	15,90	2,0	0	600,0	0	157				0,00	1,8	0	179,0	4	273,5	C	167	0,00		1,8	0	292,0	3	209,5	C				4,00	1,6	50	102,0	2			6,00	1,8	30	225,0	6		12,00	1,8	30	307,9	7					19,00	2,0	0	600,0	0						158	0,00	1,6	50			102,0		6	216,5	E	168	0,00				1,7	0	138,0	2	348,9			C	5,50	1,8	0	155,0		2	6,00	1,8	0	172,0	4			8,00	2,0		0	600,0	0	159	0,00	1,6	50	159,0				27	173,6	D	169	0,00				2,0	30	224,0	6	266,3			C	5,50	1,8		31	135,3	21	7,50	1,8	31	135,3	21			15,20	2,2	0		1000,0	0	160	0,00	1,6	50	159,0				27	173,6	D	170	0,00				1,6	30	120,0	25	120,0			D	27,00	2,2	0	1000,0	0	30,00	1,8	20	243,0	15		161	0,00	1,8	0	221,0	3	696,3	B				171	0,00	1,6	30	120,0	30	120,0			D	2,70	1,8	40	296,0	2	4,20	2,2	0	1000,0	0		162	0,00	1,8	0	188,0	15	221,4	C				172	0,00	1,6	30	80,0	20	84,1			D	15,00	1,8	50	159,0	6	22,70	2,2	0	1000,0	0		163	0,00	1,8	0	158,0	7	363,0	B				172	28,00	1,8	20	295,0	5		7,00	2,0	0	600,0	0			35,00	1,8	0			304,0	25	68,00	2,4	0				1000,0	0	0,00	1,6	30	173,0	4	154,7				D		4,50	1,6	50	122,0	44	15,70				1,8	30	188,0	26	42,00	1,8	34	188,3	19	61,50				2,0	0	600,0	0																																																											
157	0,00	1,8	0	179,0	4		273,5	C	167	0,00	1,8	0	292,0	3				209,5		C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	4,00	1,6	50	102,0	2					6,00	1,8	30	225,0	6							12,00	1,8	30						307,9	7	19,00	2,0	0			600,0	0	158	0,00	1,6	50	102,0	6	216,5	E	168	0,00	1,7	0	138,0	2	348,9	C	5,50	1,8	0	155,0	2	6,00	1,8		0	172,0	4	8,00	2,0	0		600,0				0				159	0,00	1,6	50					159,0	27	173,6	D	169	0,00	2,0	30	224,0	6	266,3	C	5,50	1,8	31	135,3	21	7,50	1,8		31	135,3	21	15,20	2,2	0		1000,0				0				160	0,00	1,6	50					159,0	27	173,6	D	170	0,00	1,6	30	120,0	25	120,0	D	27,00	2,2	0	1000,0	0	30,00	1,8		20	243,0	15	161	0,00	1,8	0	221,0				3	696,3	B	171	0,00	1,6	30	120,0		30	120,0		D	2,70	1,8	40	296,0	2	4,20	2,2	0	1000,0	0		162	0,00	1,8	0	188,0			15	221,4	C		172	0,00	1,6	30	80,0		20	84,1		D	15,00	1,8	50	159,0	6	22,70	2,2	0	1000,0	0		163	0,00	1,8	0	158,0			7	363,0	B		172	28,00	1,8	20	295,0		5	7,00		2,0	0	600,0	0	35,00	1,8	0	304,0	25	68,00			2,4	0	1000,0	0	0,00							1,6	30	173,0	4	154,7	D		4,50	1,6	50	122,0	44	15,70	1,8	30	188,0	26	42,00	1,8	34	188,3	19	61,50	2,0	0	600,0	0																																																																																																	
	6,00	1,8	30	225,0	6					12,00	1,8	30	307,9	7							19,00	2,0	0						600,0	0	158	0,00	1,6			50	102,0		6	216,5	E	168	0,00				1,7	0	138,0	2	348,9			C	5,50	1,8	0	155,0	2	6,00		1,8	0	172,0	4	8,00	2,0	0	600,0				0	159	0,00	1,6		50	159,0	27		173,6	D		169	0,00				2,0	30	224,0	6	266,3			C	5,50	1,8	31	135,3	21	7,50		1,8	31	135,3	21	15,20	2,2	0	1000,0				0	160	0,00	1,6		50	159,0	27		173,6	D		170	0,00				1,6	30	120,0	25	120,0			D	27,00	2,2	0	1000,0	0	30,00	1,8	20	243,0	15		161	0,00	1,8	0	221,0	3	696,3	B				171	0,00	1,6	30	120,0	30		120,0		D	2,70	1,8	40	296,0	2	4,20	2,2	0	1000,0	0		162	0,00	1,8	0	188,0	15	221,4			C		172	0,00	1,6	30	80,0	20		84,1		D	15,00	1,8	50	159,0	6	22,70	2,2	0	1000,0	0		163	0,00	1,8	0	158,0	7	363,0			B		172	28,00	1,8	20	295,0	5	7,00	2,0	0	600,0	0	35,00	1,8	0	304,0	25	68,00	2,4			0	1000,0	0	0,00	1,6							30	173,0	4	154,7				D		4,50	1,6	50	122,0	44	15,70	1,8	30	188,0	26	42,00	1,8	34	188,3	19	61,50	2,0	0	600,0	0																																																																																															
	12,00	1,8	30	307,9	7					19,00	2,0	0	600,0	0					158		0,00	1,6	50			102,0	6	216,5	E	168		0,00	1,7	0	138,0	2	348,9		C				5,50				1,8	0	155,0	2					6,00	1,8	0	172,0	4	8,00	2,0	0	600,0	0	159	0,00	1,6	50	159,0	27	173,6	D	169		0,00	2,0		30	224,0	6	266,3			C		5,50				1,8	31	135,3	21					7,50	1,8	31	135,3	21	15,20	2,2	0	1000,0	0	160	0,00	1,6	50	159,0	27	173,6	D	170		0,00	1,6		30	120,0	25	120,0			D		27,00				2,2	0	1000,0	0					30,00	1,8	20	243,0	15	161	0,00	1,8	0	221,0			3	696,3	B	171	0,00							1,6	30	120,0	30	120,0					D	2,70	1,8	40	296,0	2	4,20	2,2	0	1000,0			0	162	0,00	1,8	0							188,0	15	221,4	C	172					0,00	1,6	30	80,0	20	84,1	D	15,00	1,8	50			159,0	6	22,70	2,2	0							1000,0	0	163	0,00	1,8	0	158,0	7	363,0	B	172	28,00	1,8	20	295,0	5	7,00	2,0		0	600,0	0	35,00	1,8			0	304,0	25		68,00	2,4	0							1000,0	0	0,00	1,6	30	173,0	4	154,7	D		4,50	1,6	50	122,0	44	15,70	1,8	30	188,0	26	42,00	1,8	34	188,3		19	61,50	2,0			0	600,0	0																																																																																		
	19,00	2,0	0	600,0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
158	0,00	1,6	50	102,0	6	216,5	E	168	0,00	1,7	0	138,0	2	348,9	C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	5,50	1,8	0	155,0	2				6,00	1,8	0	172,0	4			8,00	2,0	0		600,0	0	159	0,00	1,6	50	159,0	27				173,6	D	169	0,00	2,0	30		224,0		6	266,3	C	5,50	1,8	31	135,3	21	7,50	1,8	31	135,3	21	15,20	2,2	0	1000,0	0	160	0,00	1,6	50	159,0	27	173,6		D	170	0,00	1,6	30				120,0	25	120,0	D	27,00	2,2	0		1000,0	0		30,00	1,8	20	243,0	15	161	0,00	1,8	0	221,0	3	696,3	B	171	0,00	1,6	30	120,0	30	120,0	D	2,70	1,8	40	296,0	2	4,20	2,2	0	1000,0	0	162	0,00	1,8	0	188,0	15	221,4	C	172	0,00	1,6	30	80,0	20	84,1	D	15,00	1,8	50	159,0	6	22,70	2,2	0	1000,0	0	163	0,00	1,8	0	158,0	7	363,0	B	172	28,00	1,8	20	295,0	5	7,00	2,0	0	600,0	0	35,00	1,8	0	304,0	25	68,00	2,4	0	1000,0	0	0,00	1,6	30	173,0	4	154,7	D		4,50	1,6	50	122,0	44	15,70	1,8	30	188,0	26	42,00	1,8	34	188,3	19	61,50	2,0	0	600,0	0																																																																																																																																																																																							
	6,00	1,8	0	172,0	4				8,00	2,0	0	600,0	0			159	0,00	1,6	50	159,0	27		173,6	D	169	0,00	2,0	30	224,0	6				266,3	C	5,50	1,8	31	135,3	21			7,50	1,8	31	135,3	21	15,20	2,2	0	1000,0	0	160	0,00	1,6	50	159,0		27	173,6	D	170	0,00		1,6			30	120,0	25	120,0	D	27,00	2,2	0			1000,0	0	30,00	1,8	20	243,0	15	161	0,00	1,8	0	221,0		3	696,3	B	171	0,00				1,6	30	120,0	30	120,0			D	2,70	1,8	40	296,0	2	4,20	2,2	0	1000,0		0	162	0,00	1,8	0				188,0	15	221,4	C	172			0,00	1,6	30	80,0	20	84,1	D	15,00	1,8	50		159,0	6	22,70	2,2	0				1000,0	0	163	0,00	1,8	0	158,0	7	363,0	B	172	28,00	1,8	20	295,0	5	7,00	2,0	0	600,0	0	35,00	1,8	0	304,0				25	68,00	2,4	0	1000,0	0	0,00	1,6	30	173,0	4	154,7	D		4,50	1,6	50	122,0	44	15,70	1,8	30	188,0	26	42,00	1,8	34	188,3	19	61,50	2,0	0	600,0	0																																																																																																																																																																									
	8,00	2,0	0	600,0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
159	0,00	1,6	50	159,0	27	173,6	D	169	0,00	2,0	30	224,0	6	266,3	C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	5,50	1,8	31	135,3	21				7,50	1,8	31	135,3	21				15,20	2,2	0	1000,0	0	160				0,00	1,6	50	159,0	27	173,6	D	170			0,00	1,6	30	120,0	25	120,0	D	27,00	2,2	0	1000,0	0	30,00	1,8	20	243,0	15	161	0,00	1,8	0	221,0	3	696,3	B	171	0,00	1,6	30	120,0	30	120,0	D	2,70	1,8	40	296,0	2	4,20	2,2	0	1000,0	0	162	0,00	1,8	0	188,0	15	221,4	C	172	0,00	1,6	30	80,0	20	84,1	D	15,00	1,8	50	159,0	6	22,70	2,2	0	1000,0	0	163	0,00	1,8	0	158,0	7	363,0	B	172	28,00	1,8	20	295,0	5	7,00	2,0	0	600,0	0	35,00	1,8	0	304,0	25	68,00	2,4	0	1000,0	0	0,00	1,6	30	173,0	4	154,7	D			4,50	1,6	50	122,0	44				15,70	1,8		30	188,0	26	42,00	1,8				34	188,3	19	61,50	2,0	0	600,0	0																																																																																																																																																																																																																				
	7,50	1,8	31	135,3	21				15,20	2,2	0	1000,0	0			160	0,00	1,6	50	159,0	27		173,6	D	170	0,00	1,6	30	120,0	25				120,0	D	27,00	2,2	0	1000,0	0			30,00	1,8	20	243,0	15	161	0,00	1,8	0	221,0		3	696,3	B	171	0,00				1,6	30	120,0	30	120,0			D	2,70	1,8	40	296,0	2	4,20	2,2	0	1000,0		0	162	0,00	1,8	0				188,0	15	221,4	C	172			0,00	1,6	30	80,0	20	84,1	D	15,00	1,8	50		159,0	6	22,70	2,2	0				1000,0	0	163	0,00	1,8	0	158,0	7	363,0	B	172	28,00	1,8	20	295,0	5	7,00	2,0	0	600,0	0	35,00	1,8	0	304,0				25	68,00	2,4	0	1000,0	0	0,00	1,6	30	173,0	4		154,7	D		4,50	1,6				50	122,0	44	15,70	1,8	30	188,0	26	42,00	1,8	34	188,3	19	61,50	2,0	0	600,0	0																																																																																																																																																																																																										
	15,20	2,2	0	1000,0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
160	0,00	1,6	50	159,0	27	173,6	D	170	0,00	1,6	30	120,0	25	120,0	D																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	27,00	2,2	0	1000,0	0				30,00	1,8	20	243,0	15			161	0,00	1,8	0	221,0	3	696,3	B	171	0,00	1,6	30	120,0	30	120,0	D	2,70	1,8	40	296,0	2	4,20	2,2	0	1000,0	0	162	0,00	1,8	0	188,0	15	221,4	C	172	0,00	1,6	30	80,0	20	84,1	D	15,00	1,8	50	159,0	6	22,70	2,2	0	1000,0	0	163	0,00	1,8	0	158,0	7	363,0	B	172	28,00	1,8	20	295,0	5	7,00	2,0	0	600,0	0	35,00	1,8	0	304,0	25	68,00	2,4	0	1000,0	0	0,00	1,6	30	173,0	4	154,7	D			4,50	1,6	50	122,0	44				15,70	1,8		30	188,0	26	42,00	1,8				34	188,3	19	61,50	2,0	0	600,0	0																																																																																																																																																																																																																																																									
	30,00	1,8	20	243,0	15																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
161	0,00	1,8	0	221,0	3	696,3	B	171	0,00	1,6	30	120,0	30	120,0	D																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	2,70	1,8	40	296,0	2				4,20	2,2	0	1000,0	0			162	0,00	1,8	0	188,0	15	221,4	C	172	0,00	1,6	30	80,0	20	84,1	D	15,00	1,8	50	159,0	6	22,70	2,2	0	1000,0	0	163	0,00	1,8	0	158,0	7	363,0	B	172	28,00	1,8	20	295,0	5	7,00	2,0	0	600,0	0	35,00	1,8	0	304,0	25	68,00	2,4		0	1000,0	0	0,00	1,6				30	173,0	4	154,7	D		4,50	1,6	50	122,0	44	15,70	1,8	30	188,0	26	42,00	1,8	34	188,3	19	61,50	2,0	0	600,0				0																																																																																																																																																																																																																																																																																				
	4,20	2,2	0	1000,0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
162	0,00	1,8	0	188,0	15	221,4	C	172	0,00	1,6	30	80,0	20	84,1	D																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	15,00	1,8	50	159,0	6				22,70	2,2	0	1000,0	0			163	0,00	1,8	0	158,0	7	363,0	B	172	28,00	1,8	20	295,0	5	7,00	2,0	0	600,0	0	35,00	1,8	0	304,0	25	68,00	2,4		0	1000,0	0	0,00	1,6				30	173,0	4	154,7	D		4,50	1,6	50	122,0	44	15,70	1,8	30	188,0	26	42,00	1,8	34	188,3	19	61,50	2,0	0	600,0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	22,70	2,2	0	1000,0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
163	0,00	1,8	0	158,0	7	363,0	B	172	28,00	1,8	20	295,0	5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
	7,00	2,0	0	600,0	0				35,00	1,8	0	304,0	25	68,00	2,4		0	1000,0	0	0,00	1,6				30	173,0	4	154,7	D		4,50	1,6	50	122,0	44	15,70	1,8	30	188,0	26	42,00	1,8	34	188,3	19	61,50	2,0	0	600,0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
	35,00	1,8	0	304,0	25				68,00	2,4	0	1000,0	0	0,00	1,6		30	173,0	4	154,7	D					4,50	1,6				50	122,0	44	15,70	1,8	30	188,0	26	42,00	1,8	34	188,3	19	61,50	2,0	0	600,0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
	68,00	2,4	0	1000,0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
	0,00	1,6	30	173,0	4				154,7	D		4,50	1,6	50	122,0	44																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
15,70	1,8	30	188,0	26																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
42,00	1,8	34	188,3	19																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
61,50	2,0	0	600,0	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									

ANEXO B – Exemplos de código *Fortran* do programa LNECLoss

A equação (3.36), que permite obter o número de onda complexo, k^* , é dada por:

```
complex(8) function k(o,r,gg)
implicit none
real(8) o,r
complex(8) gg
k=cdsqrt(o*o*r/gg)
end function
```

A equação (3.41), que permite obter o coeficiente de impedância complexo, α_{m-1}^* , é dada por:

```
complex(8) function alpha(k1,k2,g1,g2)
implicit none
complex(8) k1,k2,g1,g2
alpha=k1*g1/(k2*g2)
end function
```

A equação (3.40), que permite obter as amplitudes das ondas sísmicas ascendente e descendente por camada, é dada por:

```
subroutine ef(beta,e,f,h,iter,niter,np,ro,s,v)
implicit none
integer np,iter,niter,iome,i
complex(8) a,a11,a12,a21,a22
complex(8),dimension(150,npgauss):: e,f
complex(8) gi,gii,ki,kii,ci
real(8),dimension(150):: h,ro,v,beta
real(8),dimension(npgauss):: ftransf,s
ci=dcmplx(0.0d0,1.0d0)
do iome=1,npgauss
e(1,iome)=dcmplx(1.0d0,0.0d0)
f(1,iome)=dcmplx(1.0d0,0.0d0)
do i=2,np
gi=g(ro(i-1),v(i-1),beta(i-1))
```

```

gii=g(ro(i),v(i),beta(i))
ki=k(omega(iome),ro(i-1),gi)
kii=k(omega(iome),ro(i),gii)
a=aLpha(ki,kii,gi,gii)
a11=5.0d-1*(1.0d0+a)*cdexp((ki*h(i-1))*ci)
a12=5.0d-1*(1.0d0-a)*cdexp((-ki*h(i-1))*ci)
a21=5.0d-1*(1.0d0-a)*cdexp((ki*h(i-1))*ci)
a22=5.0d-1*(1.0d0+a)*cdexp((-ki*h(i-1))*ci)
e(i,iome)=a11*e(i-1,iome)+a12*f(i-1,iome)
f(i,iome)=a21*e(i-1,iome)+a22*f(i-1,iome)
end do
end do
return
end SUBROUTINE

```

As equações (3.38) e (3.43), que permitem obter as funções de transferência por camada, bem como a transformação indicada em (3.46), são dadas por:

```

subroutine ftransf_def(beta,e,f,fgama,h,np,ro,v)
implicit none
integer np,i,iome
complex(8) ci,cgama,ki,gi,ee,ff
complex(8),dimension(150,npgauss)::e,f
real(8),dimension(150,npgauss)::fgama
real(8),dimension(150)::h,ro,beta,v
ci=dcmplx(0.0d0,1.0d0)
do iome=1,npgauss
do i=1,np
ee=e(i,iome)/(2.0d0*e(np,iome))
ff=f(i,iome)/(2.0d0*f(np,iome))
gi=g(ro(i),v(i),beta(i))
ki=k(omega(iome),ro(i),gi)
cgama=ee*cdexp(ci*ki*h(i)/2.0d0)-ff*cdexp(-ci*ki*h(i)/2.0d0)

```

```

cgama=ci*ki*cgama

fgama(i,iome)=cdabs(-cgama/omega(iome)**2)

end do

end do

return

end SUBROUTINE

```

As equações (3.47), (3.51) e (3.52), que permitem obter o espectro de resposta, são dadas por:

```

subroutine defmax(fgama,np,peak_def,s,T,probab)

implicit none

integer i,np,iome

real(8),dimension(npgauss)::s

real(8),dimension(150,npgauss)::fgama

real(8),dimension(150)::peak_def

real(8) m0,m2,T,def,probab

do i=1,np

m0=0.0d0

m2=0.0d0

do iome=1,npgauss

def=1.0d0/dpi*s(iome)/1.0d4*fgama(i,iome)*fgama(i,iome)

m0=m0+w(iome)*def

m2=m2+w(iome)*omega(iome)*omega(iome)*def

end do

peak_def(i)=max_value(T,m0,m2,probab)

end do

return

end SUBROUTINE

real(8) function max_value(T,m0,m2,probab)

real(8) T,m0,m2,q,probab

Q=DSQRT(M2/M0)

```

```
if(T*Q/DPI.GE.1.0d0) then
max_value=DSQRT(2.0D0*M0*(DLOG(T*Q/DPI)-DLOG(-DLOG(probab))))
else
max_value=DSQRT(2.0D0*M0*(-DLOG(-DLOG(probab))))
end if
end function
```

ANEXO C – Código *Fortran* para organização da base de dados resultante do programa LNECLoss

- Algoritmo para espectros de resposta ao nível do topo do substrato rochoso e para sismo próximo

```
program E
implicit none
character*30 namein,nameinA
character*2 num0
character*4 num1
character*5 num2
character*6 num3
integer i,j,k,numero
real(4),dimension(1000000):: acc1,dist1,m1,t1,f1
integer contador1
real(8)::numero1
integer,dimension(13)::valorm1
valorm1 = (/ 41, 45, 47, 51, 55, 57, 61, 63, 65, 67, 69, 73, 75 /)
do j=1,1000000
acc1(j)=0.0
dist1(j)=0.0
t1(j)=0.0
m1(j)=0.0
f1(j)=0.0
end do
contador1=1
do j=1,13
k=valorm1(j)
write(num0(1:2),'(i2)')k
namein=num0//"EspectroACCBedRock.txt"
open(UNIT=k+1,FILE=namein,status='old',action='read')
read(k+1,*) !Le o cabeçalho dos txt
```

```

do i=1,81500
  read(k+1,*,end=999)
m1(contador1),dist1(contador1),f1(contador1),accl(contador1)

  t1(contador1)=1/f1(contador1)

  contador1=contador1+1

end do

999 close(k+1)

write(*,*) "contador", contador1

end do

60 format (f7.3, f4.1, f7.2, f8.2, f7.3, f11.4)

do i=1,200

  write(*,*) f1(i)

  numero1=f1(i)*10000.0

  numero=int(numero1)

  write(*,*) "numero",numero

  if(f1(i).lt.1.0) then

    write(num1(1:4),'(i4)') numero

    nameinA="freq">//num1//"BedrockProx.txt"

  elseif (f1(i).lt.10.0) then

    write(num2(1:5),'(i5)') numero

    nameinA="freq">//num2//"BedrockProx.txt"

  else

    write(num3(1:6),'(i6)')numero

    nameinA="freq">//num3//"BedrockProx.txt"

  end if

  open(UNIT=i*100,FILE=nameinA)

  write(i*100,*) "Periodo(s) Mag Mag^2 Distância(km) log10Dist RSA"

  do j=i,contador1-1,200

    write(i*100,60)

t1(j),m1(j),m1(j)*m1(j),dist1(j),log10(dist1(j)),accl(j)

  end do

```

```

close (i*100)

end do

end program E

```

- Algoritmo para espectros de resposta ao nível do topo do perfil de terreno (superfície) e para sismo afastado

```

program B

implicit none

character*30 namein,namein1,nameinA,nameinB
character*30 nameinC, nameinD,nameinE,dadoscla
character*2 num0
character*4 num1
character*5 num2
character*6 num3

integer i,j,k,numero,l,class1,u
real(4),dimension(28552000):: acc1,f1,dist1,m1,t1
integer,dimension(28552000)::perfill1
real(8)::numerol

integer,dimension(16)::valorm1

integer,dimension(172)::nestrato,clas

valorm1 = (/ 55, 57, 59, 61, 63, 65, 67, 69, 71, 75, 77, 79, 81, 83, 85, 87
/)

write (*,*) "Introduza o nome do ficheiro com a correspondencia de
classificacao"

read(*,*) dadoscla

    open(unit=10,file=dadoscla)

    do l=1,172

        read(10,*) nestrato(l),clas(l)

    end do

do j=1,28552000

acc1(j)=0.0

```

```

f1(j)=0.0
dist1(j)=0.0
t1(j)=0.0
m1(j)=0.0
perfill(j)=0
end do
60 format (f7.3, f4.1, f7.2, f8.2, f7.3, f11.4, f11.4)
j=1
    k=valorm1(j)
    write(num0(1:2), '(i2)') k
    namein=num0//"EspectroACCSup.txt"
    open(UNIT=k+1,FILE=namein,status='old',action='read')
    read(k+1,*) !Le o cabeçalho dos txt
    do i=1,28552000
        read(k+1,*,end=999) perfill(i),m1(i),dist1(i),f1(i),acc1(i)
        t1(i)=1/f1(i)
    end do
    999 close(k+1)
    do i=1,200
        write(*,*) f1(i)
        numerol=f1(i)*10000.0
        numero=int(numerol)
        write(*,*) "numero",numero
        if(f1(i).lt.1.0) then
            write(num1(1:4), '(i4)') numero
            nameinA="freq"//num1//"soloA.txt"
            nameinB="freq"//num1//"soloB.txt"
            nameinC="freq"//num1//"soloC.txt"
            nameinD="freq"//num1//"soloD.txt"
            nameinE="freq"//num1//"soloE.txt"

```

```

elseif (f1(i).lt.10.0) then

    write(num2(1:5),'(i5)') numero

    nameinA="freq">//num2//"soloA.txt"
    nameinB="freq">//num2//"soloB.txt"
    nameinC="freq">//num2//"soloC.txt"
    nameinD="freq">//num2//"soloD.txt"
    nameinE="freq">//num2//"soloE.txt"

else

    write(num3(1:6),'(i6)') numero

    nameinA="freq">//num3//"soloA.txt"
    nameinB="freq">//num3//"soloB.txt"
    nameinC="freq">//num3//"soloC.txt"
    nameinD="freq">//num3//"soloD.txt"
    nameinE="freq">//num3//"soloE.txt"

end if

open(UNIT=i*100,FILE=nameinA)
open(UNIT=i*100+1,FILE=nameinB)
open(UNIT=i*100+2,FILE=nameinC)
open(UNIT=i*100+3,FILE=nameinD)
open(UNIT=i*100+4,FILE=nameinE)

do j=i,28552000,200

    do l=1,172

        if (perfill(j).eq.nestrato(l)) then

            class1=clas(l)

            end if

        end do

        if (class1.eq.1) then

            write(i*100,60)
t1(j),m1(j),m1(j)*m1(j),dist1(j),log10(dist1(j)),acc1(j),log10(acc1(j))

            elseif (class1.eq.2) then

```

```

        write(i*100+1,60)
t1(j),m1(j),m1(j)*m1(j),dist1(j),log10(dist1(j)),acc1(j),log10(acc1(j))
        elseif (class1.eq.3) then
            write(i*100+2,60)
t1(j),m1(j),m1(j)*m1(j),dist1(j),log10(dist1(j)),acc1(j),log10(acc1(j))
            elseif (class1.eq.4) then
                write(i*100+3,60)
t1(j),m1(j),m1(j)*m1(j),dist1(j),log10(dist1(j)),acc1(j),log10(acc1(j))
                elseif (class1.eq.5) then
                    write(i*100+4,60)
t1(j),m1(j),m1(j)*m1(j),dist1(j),log10(dist1(j)),acc1(j),log10(acc1(j))
                    end if
            end do
        end do
    end do
write (*,*) j
do u=2,16
    k=valorm1(u)
    write(num0(1:2),'(i2)')k
    namein1=num0//"EspectroACCSup.txt"
    open(UNIT=k+1,FILE=namein1,status='old',action='read')
    read(k+1,*) !Le o cabeçalho dos txt
    do i=1,28552000
        read(k+1,*,end=998) perfill(i),m1(i),dist1(i),f1(i),acc1(i)
        t1(i)=1/f1(i)
    end do
    998 close(k+1)
    do i=1,200
        do j=i,28552000,200
            do l=1,172
                if (perfill(j).eq.nestrato(l)) then
                    class1=clas(l)

```

```

        end if
    end do

    if (class1.eq.1) then
        write(i*100,60)
t1(j),m1(j),m1(j)*m1(j),dist1(j),log10(dist1(j)),acc1(j)

        elseif (class1.eq.2) then
            write(i*100+1,60)
t1(j),m1(j),m1(j)*m1(j),dist1(j),log10(dist1(j)),acc1(j)

            elseif (class1.eq.3) then
                write(i*100+2,60)
t1(j),m1(j),m1(j)*m1(j),dist1(j),log10(dist1(j)),acc1(j)

                elseif (class1.eq.4) then
                    write(i*100+3,60)
t1(j),m1(j),m1(j)*m1(j),dist1(j),log10(dist1(j)),acc1(j)

                    elseif (class1.eq.5) then
                        write(i*100+4,60)
t1(j),m1(j),m1(j)*m1(j),dist1(j),log10(dist1(j)),acc1(j)

                        end if
    end do

    end do

write (*,*) u

end do

end program B

```


ANEXO D – Figuras representantes das GMPEs com inclusão do desvio padrão

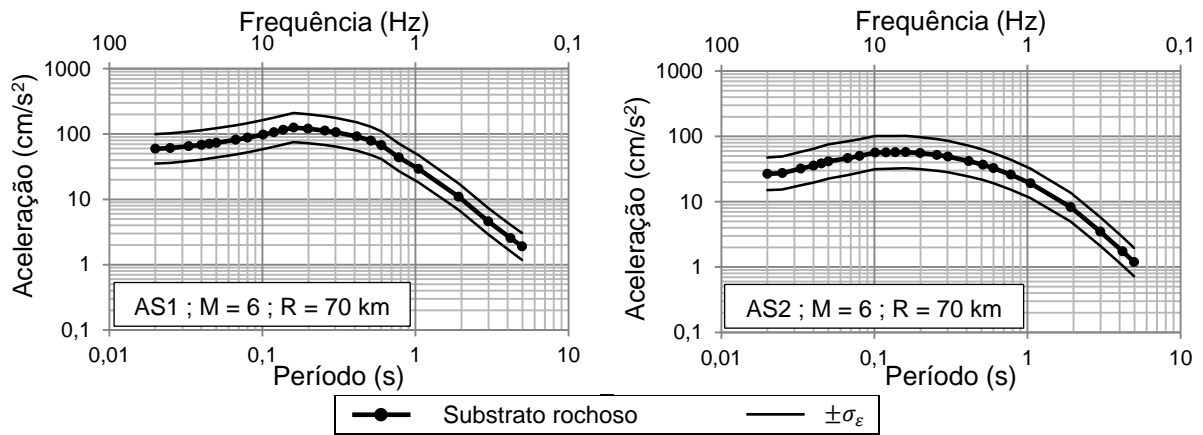


Figura D.1 - Valores espectrais de aceleração para o topo do substrato rochoso, considerando as GMPEs para o sismo afastado (à esquerda) e próximo (à direita) e para $M = 6$ e $R = 70$ km, com inclusão do desvio padrão

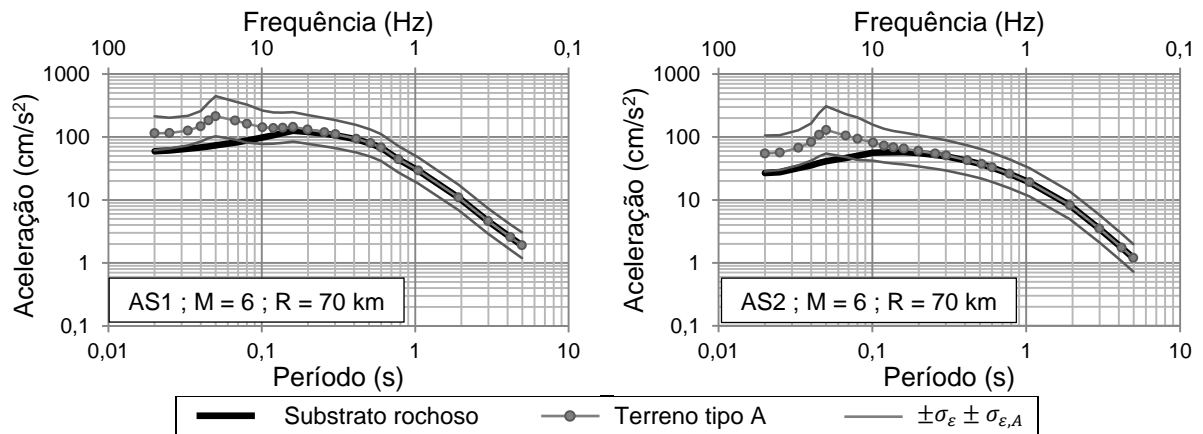


Figura D.2 - Valores espectrais de aceleração para o tipo de terreno A do EC8, considerando as GMPEs para o sismo afastado (à esquerda) e próximo (à direita) e para $M = 6$ e $R = 70$ km, com inclusão do desvio padrão

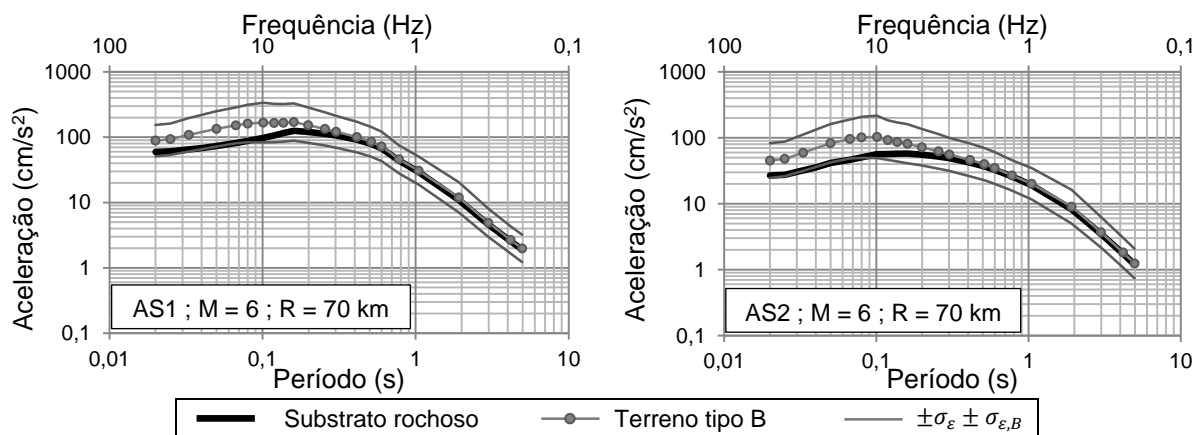


Figura D.3 - Valores espectrais de aceleração para o tipo de terreno B do EC8, considerando as GMPEs para o sismo afastado (à esquerda) e próximo (à direita) e para $M = 6$ e $R = 70$ km, com inclusão do desvio padrão

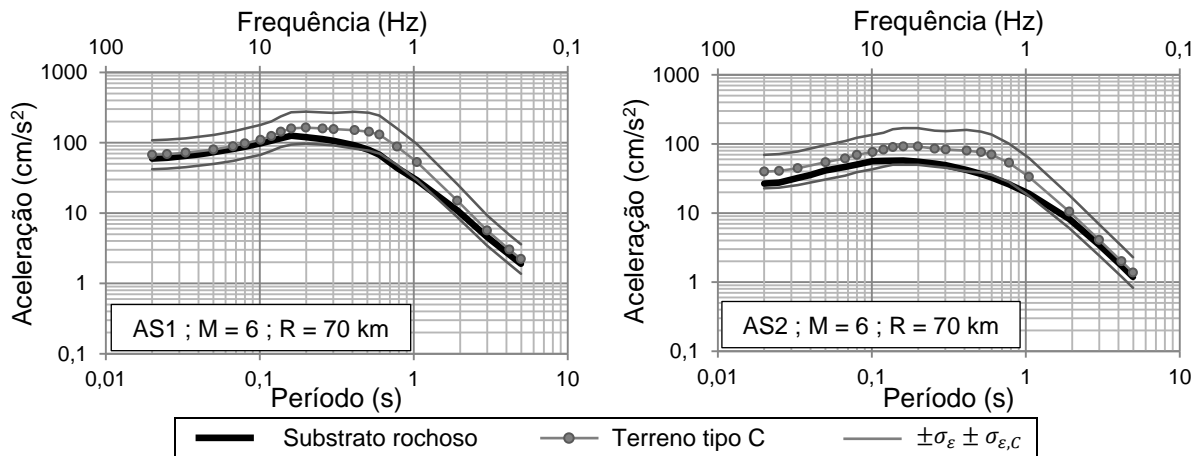


Figura D.4 - Valores espectrais de aceleração para o tipo de terreno C do EC8, considerando as GMPEs para o sismo afastado (à esquerda) e próximo (à direita) e para $M = 6$ e $R = 70$ km, com inclusão do desvio padrão

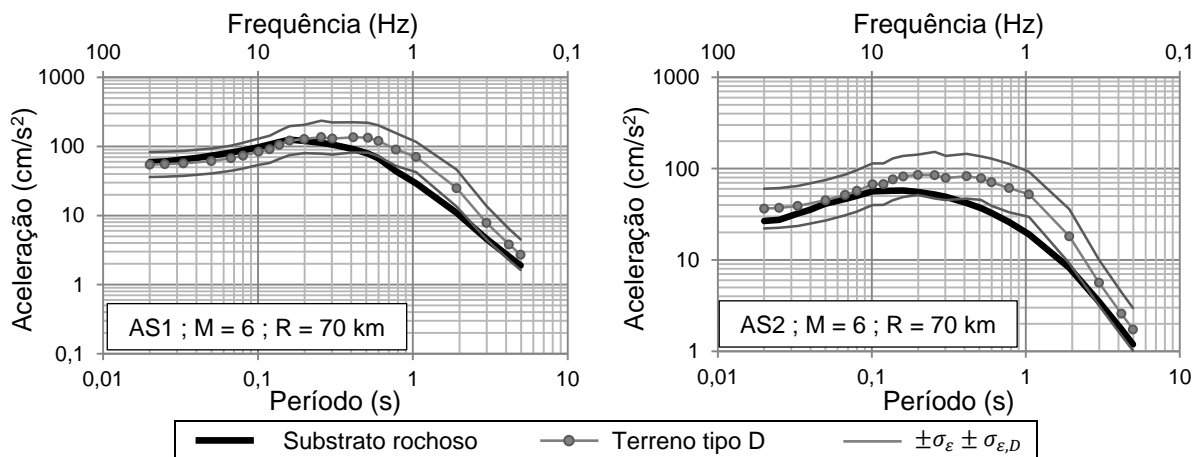


Figura D.5 - Valores espectrais de aceleração para o tipo de terreno D do EC8, considerando as GMPEs para o sismo afastado (à esquerda) e próximo (à direita) e para $M = 6$ e $R = 70$ km, com inclusão do desvio padrão

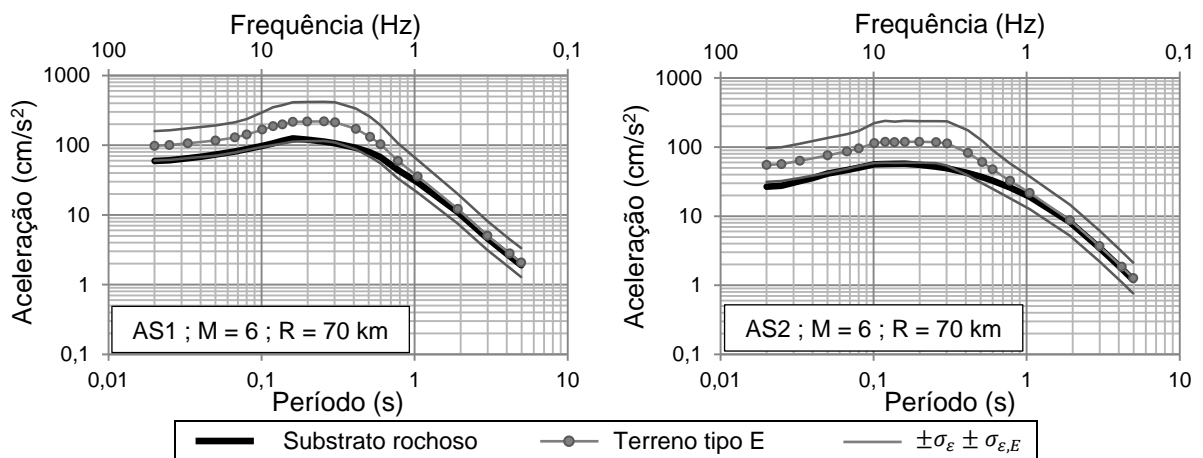


Figura D.6 - Valores espectrais de aceleração para o tipo de terreno E do EC8, considerando as GMPEs para o sismo afastado (à esquerda) e próximo (à direita) e para $M = 6$ e $R = 70$ km, com inclusão do desvio padrão

ANEXO E – Comparação entre o espectro de resposta obtido e o regulamentar, definido pelo Eurocódigo 8

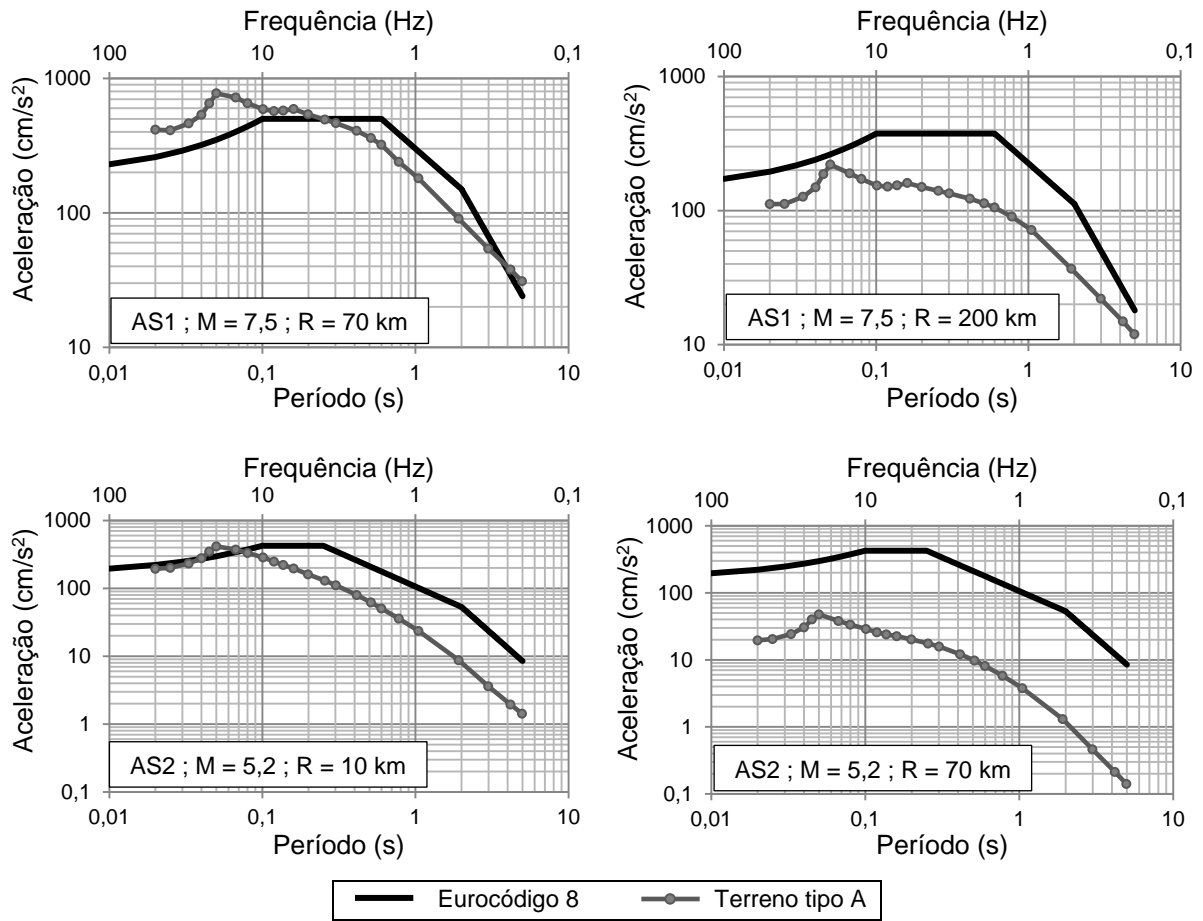
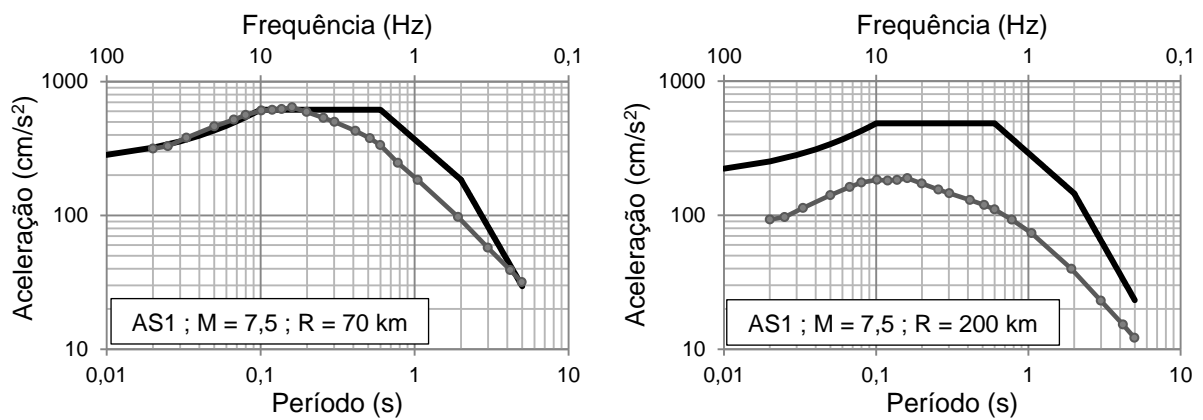


Figura E.1 - Valores espectrais de aceleração regulamentar e obtidos por modelação para o tipo de terreno A do Eurocódigo 8, considerando as GMPEs para sismo afastado (em cima) e próximo (em baixo)



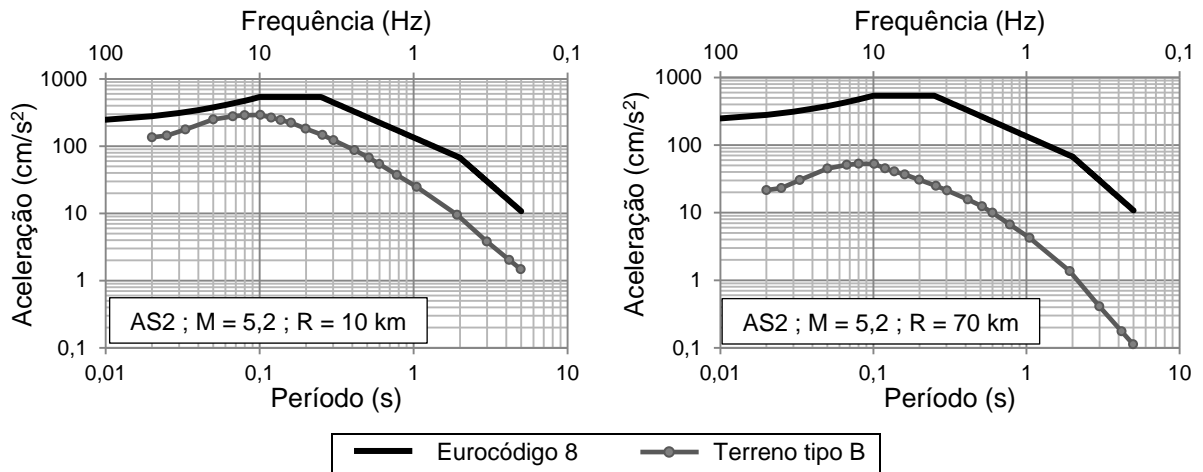


Figura E.2 - Valores espectrais de aceleração regulamentar e obtidos por modelação para o tipo de terreno B do Eurocódigo 8, considerando as GMPEs para sismo afastado (em cima) e próximo (em baixo)

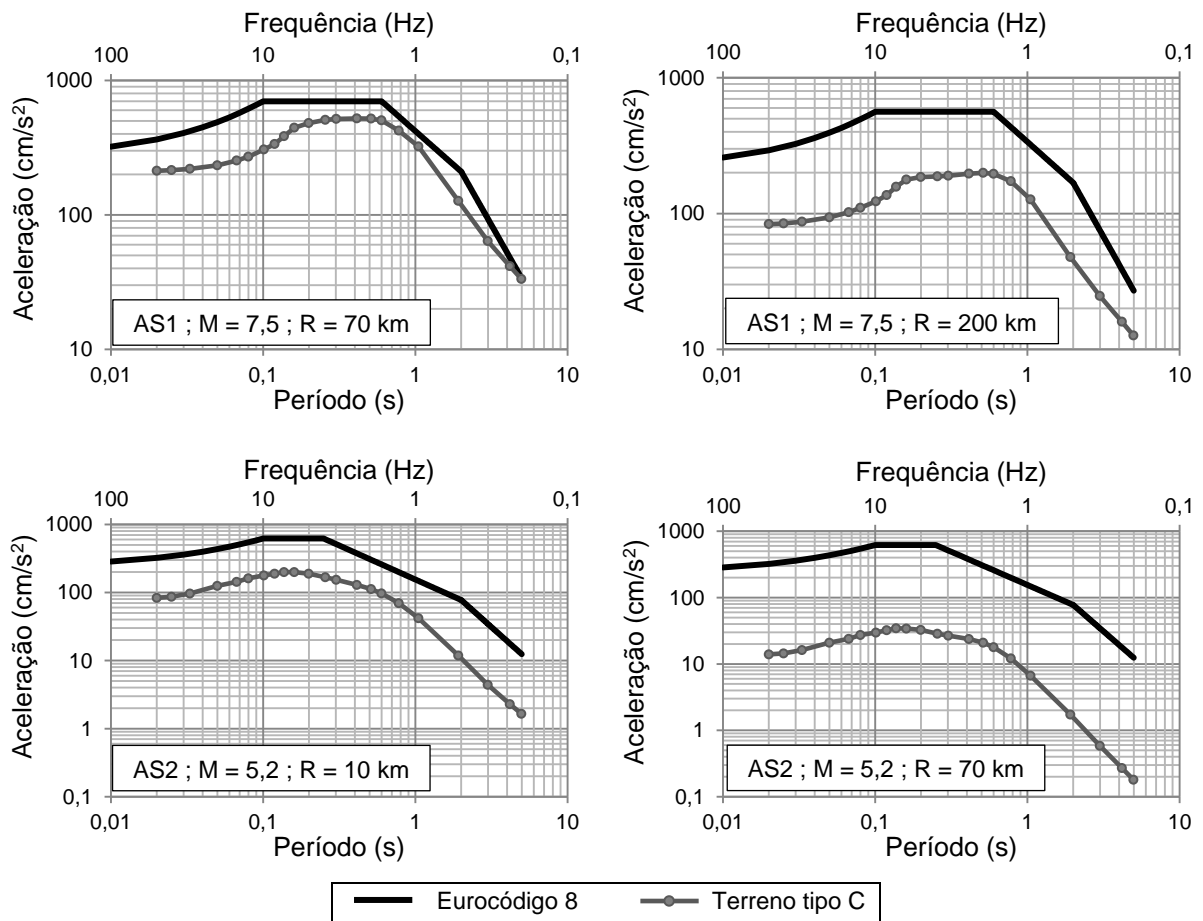


Figura E.3 - Valores espectrais de aceleração regulamentar e obtidos por modelação para o tipo de terreno C do Eurocódigo 8, considerando as GMPEs para sismo afastado (em cima) e próximo (em baixo)

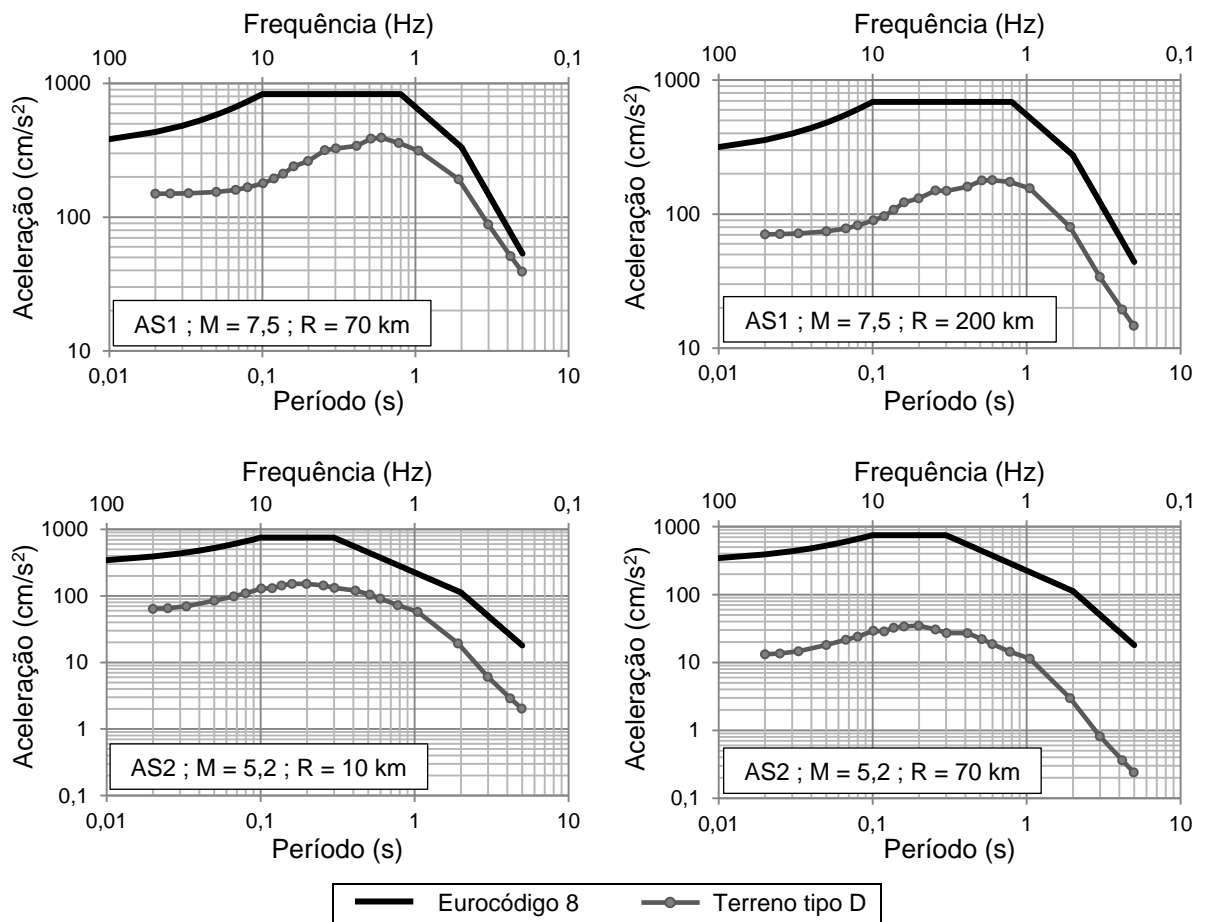
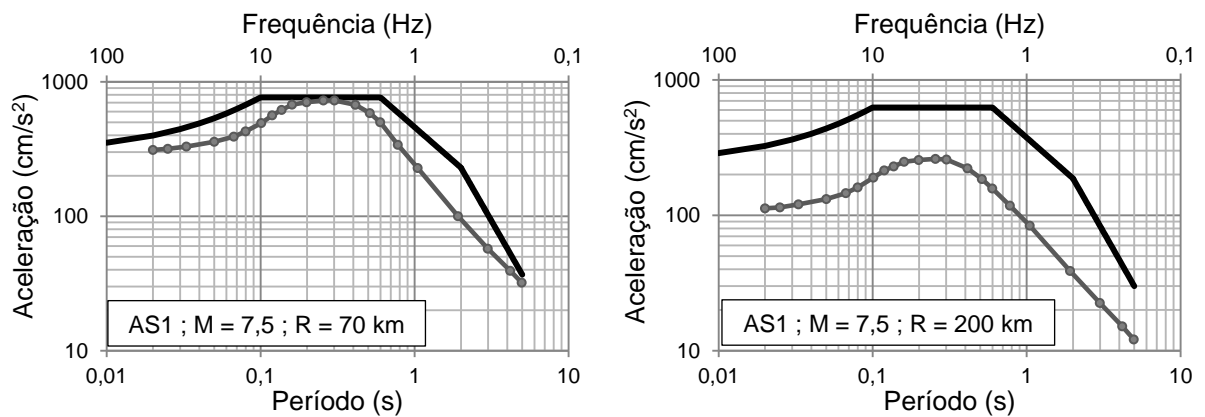


Figura E.4 - Valores espectrais de aceleração regulamentar e obtidos por modelação para o tipo de terreno D do Eurocódigo 8, considerando as GMPEs para sismo afastado (em cima) e próximo (em baixo)



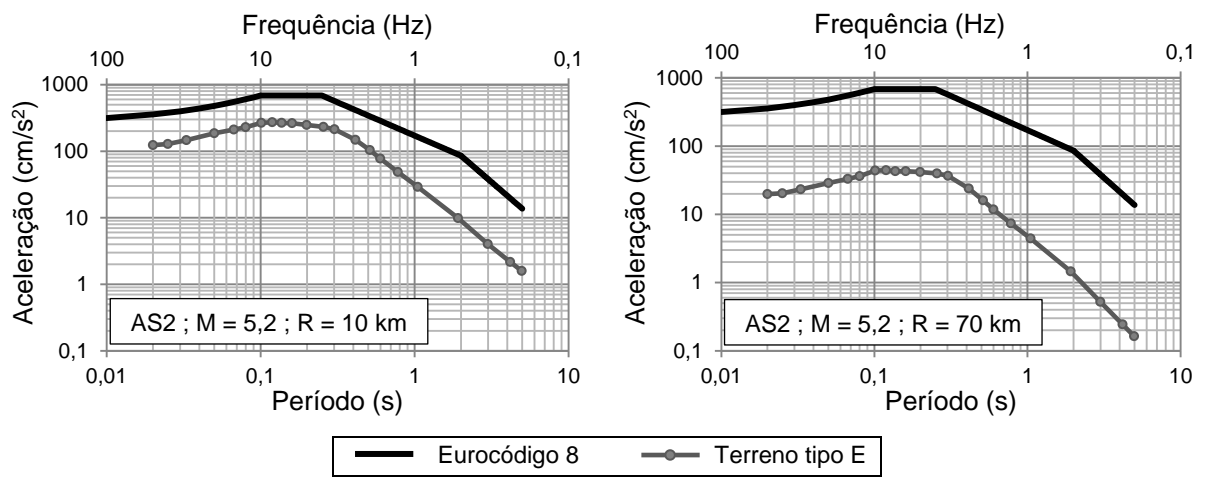


Figura E.5 - Valores espectrais de aceleração regulamentar e obtidos por modelação para o tipo de terreno E do Eurocódigo 8, considerando as GMPEs para sismo afastado (em cima) e próximo (em baixo)