

1 - INTRODUÇÃO

A NAER – Novo Aeroporto , S.A. solicitou ao LNEC a elaboração, com base na informação por ela disponibilizada, de um estudo sobre a viabilidade de implantação do novo Aeroporto em Rio Frio, tendo em conta a susceptibilidade à liquefacção, com a discriminação, nomeadamente, de estudos complementares a efectuar em fase de estudo prévio e em fase de projecto, de estimativas de custos adicionais de realização e de manutenção de infra-estruturas diferenciadores das duas opções de localização (Rio Frio e Ota), e com a definição, se possível, de termos de referência para a fase de projecto. Por sugestão do LNEC, o âmbito deste estudo foi posteriormente alargado, sendo proposta a realização de um estudo comparado da adequabilidade dos locais de implantação do novo Aeroporto dos pontos de vista geotécnico e de efeitos sísmicos de sítio.

Apresentam-se neste relatório os resultados dos estudos complementares desenvolvidos, relativos aos dois locais de implantação (Rio Frio e Ota), com a consideração dos seguintes sub-temas:

- síntese e avaliação da informação relevante do ponto de vista da casualidade sísmica;
- síntese e avaliação da informação geotécnica relevante;
- avaliação dos efeitos de sítio (amplificação local do movimento sísmico);
- avaliação da plausibilidade de ocorrência de fenómenos de liquefacção e quantificação da sua extensão;
- definição de eventuais medidas complementares (ensaios e trabalhos de campo) para aferição e minoração dos efeitos da acção sísmica;
- conclusão de índole comparativa sobre a adequabilidade dos locais para a implantação do aeroporto (do ponto de vista sísmico).

2 – SÍNTESE E AVALIAÇÃO DA INFORMAÇÃO RELEVANTE DO PONTO DE VISTA DA CASUALIDADE SÍSMICA

A avaliação da casualidade sísmica dos locais de implantação do Novo Aeroporto é levada a efeito através da caracterização probabilística da acção sísmica em afloramentos rochosos, em termos de espectros de resposta uniformes de aceleração horizontal e vertical, para um amortecimento crítico de 5%, e para uma probabilidade de excedência de 5% para dois períodos de vida útil da estrutura, admitidos iguais a 50 e a 100 anos. A influência de condições geológicas locais susceptíveis de induzir a amplificação dos movimentos sísmicos é considerada no capítulo correspondente à avaliação dos efeitos de sítio.

Descreve-se seguidamente a metodologia adoptada na análise probabilística e apresentam-se os resultados obtidos.

2 .1 – METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DA CASUALIDADE SÍSMICA

A metodologia para a análise probabilística baseia-se no estabelecimento de modelos para os diferentes fenómenos envolvidos, dos quais de destacam:

- modelos sismotectónicos de geração de sismos;
- leis de distribuição da ocorrência temporal dos sismos;
- leis de distribuição da magnitude sísmica;
- leis de atenuação da intensidade do movimento sísmico.

Com vista à modelação das zonas de geração sísmica devem ser identificados todos os acidentes potencialmente activos (locais e regionais) relevantes para a obra (falhas e sistemas de falhas) e analisada a história sísmica da região (datas de ocorrência, profundidades do foco, epicentros, magnitudes, sismogramas e durações).

Em geral, podem distinguir-se dois tipos de fontes: (i) as lineares, coincidindo com falhas ou troços de falha, caracterizadas por parâmetros como o comprimento de ruptura, a profundidade activa e a taxa de deslocamento anual, e (ii) a sismicidade local das fontes difusas ou sismicidade regional.

Na região continental portuguesa, dados os elevados períodos de recorrência dos fenómenos sísmicos presentes e a falta de evidências geológicas recentes comprovativas, é difícil estabelecer uma associação fundamentada entre as estruturas tectónicas activas e os epicentros, pelo que se optou neste estudo pela consideração de zonas de geração sísmica com características sismológicas, tectónicas e geológicas no interior da cada zona homogéneas, com equiprovável localização de epicentros, pelo que se recorre a uma distribuição espacial de ocorrências bidimensional uniforme.

Para caracterizar o processo de ocorrência foi utilizado o Catálogo Sísmico da Região Ibérica (Sousa *et al.*, 1992) e informação sobre a neotectónica da região de Portugal Continental (Cabral, 1993).

O modelo adoptado é constituído por doze zonas de geração sísmica, sendo dez de grande extensão geográfica e as restantes, de menor dimensão, mas com elevada concentração espacial dos sismos e coincidentes com as estruturas responsáveis pela geração dos maiores sismos históricos sentidos no Continente. Na Figura 1 apresenta-se um mapa de epicentros da região analisada (de sismos ocorridos entre 33 e 1991 com magnitude não inferior a 3,5) e o modelo de geração sísmica adoptado (Sousa, 1996).

Na modelação do processo de ocorrência temporal de sismos foi utilizado o modelo homogéneo de Poisson, o qual assume simplificada a independência entre acontecimentos, ignorando a tendência de agrupamento dos sismos (quer no tempo quer no espaço), sendo definido pela seguinte lei:

$$P(N_t = n, \lambda t) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^n}{n!}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \infty \quad (1)$$

onde $P(N_t = n, \lambda t)$ representa a probabilidade de ocorrência de n sismos no intervalo de tempo t e λ é a taxa média anual de ocorrência.

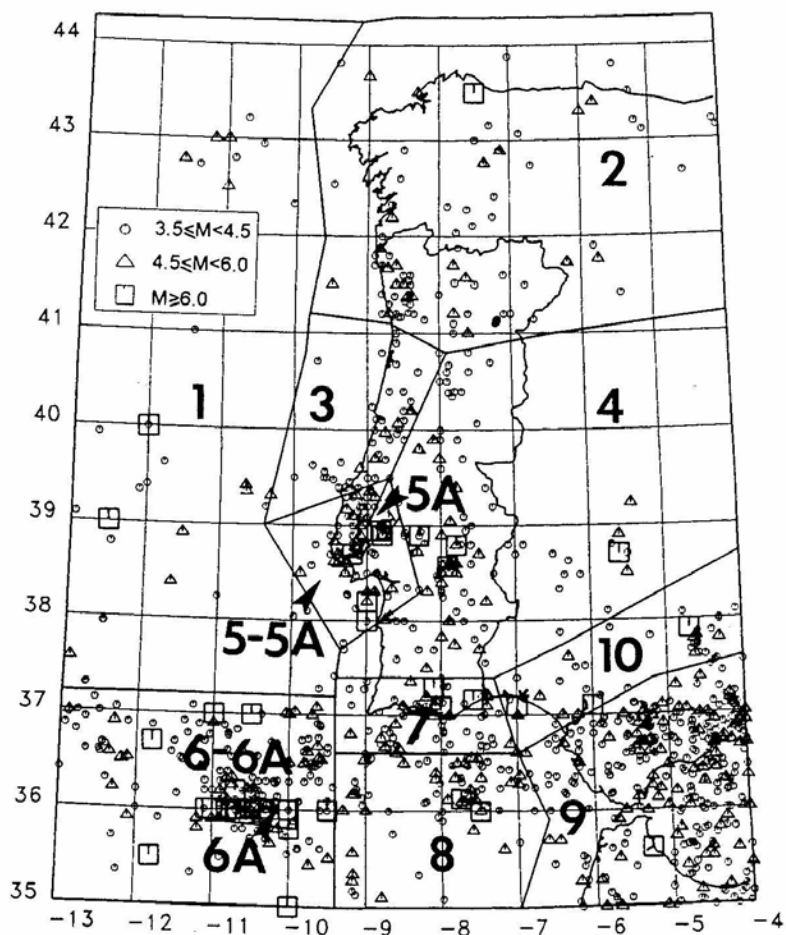


Figura 1 – Mapa de epicentros da região analisada (entre 33 e 1991 e para magnitudes não inferiores a 3,5) e modelo de zonas de geração sísmica (Sousa *et al.*, 1997)

Para salvaguardar a hipótese de independência entre acontecimentos, o modelo de Poisson não deverá ser utilizado para descrever a ocorrência de premonitores e de réplicas, pelo que se procedeu à identificação e à eliminação destes fenómenos do Catálogo Sísmico, recorrendo-se a janelas empíricas de tempo, de magnitude e de distância calibradas para a situação portuguesa (Sousa, 1996).

Os parâmetros do modelo foram determinados para cada zona de geração sísmica considerando exclusivamente o período instrumental do catálogo sísmico (período posterior a 1909), pelo facto deste catálogo não ser completo na gama das baixas magnitudes do período histórico. No Quadro 1 apresentam-se as taxas anuais de ocorrência obtidas.

Quadro 1 – Valores da taxa média anual de ocorrência para o período instrumental em cada uma das zonas de geração sísmica (Sousa *et al.*, 1997)

Zona	λ	Zona	λ	Zona	λ
1	0,50	5-5A	0,70	7	0,77
2	1,14	5A	0,26	8	0,86
3	0,54	6-6A	1,59	9	3,97
4	1,37	6A	0,71	10	0,57

Na avaliação da frequência da ocorrência de sismos de magnitude superior ou igual a um dado valor, m , foi adoptada a lei de Gutenberg e Richter (Gutenberg e Richter, 1944), truncada inferior e superiormente, com as seguintes expressões equivalentes:

$$\log N(m) = a + b(m - m_0) \quad (2a)$$

$$N(m) = e^{\alpha - \beta(m - m_0)} \quad (2b)$$

onde N é o número de sismos com magnitude maior ou igual a m para uma dada janela de tempo, m_0 é o limiar mínimo de magnitude, abaixo do qual se considera, do ponto de vista de engenharia, que um sismo não causa estragos, e a e b são constantes avaliadas para a zona sísmica em estudo, que traduzem, respectivamente, a actividade sísmica da região e a taxa relativa de ocorrência entre sismos de maior e de menor magnitude. As constantes α e β relacionam-se com as primeiras através de

$$\alpha = a \ln 10 \quad e \quad \beta = -b \ln 10 \quad (3)$$

Considerando a magnitude como variável aleatória e associando o número N com a probabilidade de ocorrência de sismos com magnitude maior ou igual a m , deduz-se a seguinte distribuição cumulativa de probabilidades, $F_M(m)$:

$$F_M(m) = \begin{cases} P(M < m | m_0 > M) = 0, & m < m_0 \\ P(M \leq m | m_0 \leq M \leq m_1) = \frac{1 - e^{-\beta(m - m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_1 - m_0)}}, & m_0 \leq m \leq m_1 \\ P(M < m | M > m_1) = 1, & m > m_1 \end{cases} \quad (4)$$

em que m_1 designa a magnitude do sismo máximo provável, estimada através de estudos de sismotectónica e de paleosismicidade.

A respectiva função de densidade de probabilidade, $f_M(m)$ é obtida derivando a expressão anterior, pelo que

$$f_M(m) = \frac{\beta e^{-\beta(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_1-m_0)}}, \quad m_0 \leq m \leq m_1 \quad (5)$$

Com base no catálogo histórico e instrumental, seleccionando-se como limite inferior da magnitude o valor 3,45 e limite superior a magnitude do sismo mais intenso que ocorreu no passado, com epicentro na zona analisada, procedeu-se à aplicação desta lei e à determinação dos parâmetros a e b pelo método dos mínimos quadrados, para cada uma das zonas de geração. O Quadro 2 contém a magnitude máxima considerada, a data de ocorrência deste sismo e os parâmetros estimados para cada uma das zonas de geração.

Quadro 2 – Magnitude máxima, data de ocorrência do sismo de magnitude máxima e valores de a e b da relação de Gutenberg-Richter para cada zona de geração (Sousa, 1996)

Zona	m_1	Data do sismo	a	b
1	7,0	1724.10.12	0,4908	-0,6636
2	6,0	1916.12.03	1,6329	-0,8415
3	5,6	1940.10.03	0,5825	-0,8940
4	7,0	1504.04.05	1,7833	-0,8370
5-5A	7,2	1858.11.11	0,9388	-0,9497
5A	7,0	1531.01.26	0,3148	-0,7585
6-6A	6,6	1915.07.11	1,6352	-0,6442
6A	8,5	1755.11.01	0,1471	-0,3373
7	7,8	1722.12.17	1,3004	-0,9213
8	7,1	1964.03.15	0,8735	-0,6431
9	6,2	1909.01.21	9,7550	-1,2233
10	7,0	1719.03.06	0,7180	-0,8664

A lei de atenuação exprime a dependência entre a intensidade do movimento do solo e um conjunto de variáveis, entre as quais se incluem a distância à fonte e a energia libertada, com a seguinte forma geral:

$$Y = m_Y(M, R, \mathbf{w}) + \varepsilon_Y \quad (6)$$

na qual Y representa a intensidade do movimento do solo, $m_Y(M, R, \mathbf{w})$ o valor estimado pelo modelo matemático, R a distância entre a fonte e o local, M a grandeza do sismo (magnitude ou intensidade epicentral), \mathbf{w} um vector de variáveis que caracterizam a fonte, a propagação das ondas no meio e as condições locais, e ε_Y é uma variável aleatória de erro, que representa as flutuações devidas a factores não considerados no modelo e as imprecisões de medição da variável dependente, Y .

Admite-se que os valores de ε_γ são independentes das variáveis do modelo e independentes entre si, e que seguem uma distribuição normal de média nula e variância constante, pelo que a distribuição de Y em torno do valor central é gaussiana e independente da grandeza do sismo e da distância epicentral.

Devido à escassez de registos instrumentais em Portugal para modelar a atenuação do movimento do solo é possível adoptar dois procedimentos distintos: (i) considerar a intensidade macrosísmica como variável dependente e utilizar modelos de atenuação calibrados com dados de sismos portugueses; ou (ii) seleccionar uma grandeza instrumental para Y e utilizar leis de atenuação estimadas a partir de bases de dados mundiais de movimentos sísmicos intensos, consideradas representativas dos processos de atenuação verificados no Continente Português.

Dados os objectivos do presente estudo, julga-se mais adequada a caracterização da acção sísmica em termos de espectros de resposta, pelo que se optou pelo segundo procedimento, adoptando leis de atenuação, deduzidas por Ambraseys *et al.* (1996) e Ambraseys e Simpson (1996), que permitem prever as ordenadas espectrais da aceleração absoluta a partir da magnitude das ondas superficiais (M), da distância (R) e das condições geológicas locais (S_A e S_S), de acordo com a seguinte expressão:

$$\log(a_j) = C_{1,j} + C_{2,j}M + C_{3,j}R + C_{4,j} \log R + C_{A,j}S_A + C_{S,j}S_S + \sigma_j P \quad (7)$$

em que a_j é o espectro de resposta para a frequência j (em g), $R = \sqrt{d^2 + h_{0,j}^2}$ (sendo d a menor distância entre a estação e a projecção da rotura da falha e $h_{0,j}$ uma constante a ser determinada para cada frequência), σ_j é o desvio padrão da função logarítmica, P é uma constante (igual a 0, para o cálculo do valor médio, ou igual a 1, para a determinação do quantilho de 84%), $C_{1,j}$, $C_{2,j}$, $C_{3,j}$, $C_{4,j}$, $C_{A,j}$, $C_{S,j}$ e $h_{0,j}$ são constantes estimadas por análise de regressão para cada frequência. Na equação anterior o terceiro termo define a atenuação devida às características anelásticas do meio e o quarto termo a atenuação geométrica das ondas sísmicas.

Para a determinação das constantes, os referidos autores utilizaram uma base de dados com cerca de 420 registos triaxiais, correspondentes a 157 sismos da Europa e regiões adjacentes, e efectuaram uma análise regressiva, em dois passos, considerando como variável dependente a aceleração absoluta em ordenadas espectrais (em g) e um coeficiente de amortecimento crítico de 5%. Os resultados obtidos transcrevem-se, em função do período, T , correspondente à frequência j nos Quadros 3 e 4, respectivamente, para a componente horizontal e vertical da aceleração. O valor de $C_{3,j}$ foi tomado igual a zero, uma vez que a regressão conduziu, numa primeira etapa, a valores inaceitáveis para esta constante.

Quadro 3 – Coeficientes da lei de atenuação de Ambraseys *et al.* (1996) para componente horizontal da aceleração

T (s)	$C_{1,j}$	$C_{2,j}$	$C_{4,j}$	$h_{0,j}$	$C_{A,j}$	$C_{S,j}$	σ_j
0,10	-0,84	0,219	-0,954	4,5	0,078	0,027	0,27
0,11	-0,86	0,221	-0,945	4,5	0,098	0,036	0,27
0,12	-0,87	0,231	-0,960	4,7	0,111	0,052	0,27
0,13	-0,87	0,238	-0,981	5,3	0,131	0,068	0,27
0,14	-0,94	0,244	-0,955	4,9	0,136	0,077	0,27
0,15	-0,98	0,247	-0,938	4,7	0,143	0,085	0,27
0,16	-1,05	0,252	-0,907	4,4	0,152	0,101	0,27
0,17	-1,08	0,258	-0,896	4,3	0,140	0,102	0,27
0,18	-1,13	0,268	-0,901	4,0	0,129	0,107	0,27
0,19	-1,19	0,278	-0,907	3,9	0,133	0,130	0,28
0,20	-1,21	0,284	-0,922	4,2	0,135	0,142	0,27
0,22	-1,28	0,295	-0,911	4,1	0,120	0,143	0,28
0,24	-1,37	0,308	-0,916	3,9	0,124	0,155	0,28
0,26	-1,40	0,318	-0,942	4,3	0,134	0,163	0,28
0,28	-1,46	0,326	-0,946	4,4	0,134	0,158	0,29
0,30	-1,55	0,338	-0,933	4,2	0,133	0,148	0,30
0,32	-1,63	0,349	-0,932	4,2	0,125	0,161	0,31
0,34	-1,65	0,351	-0,939	4,4	0,118	0,163	0,31
0,36	-1,69	0,354	-0,936	4,5	0,124	0,160	0,31
0,38	-1,82	0,364	-0,900	3,9	0,132	0,164	0,31
0,40	-1,94	0,377	-0,888	3,6	0,139	0,172	0,31
0,42	-1,99	0,384	-0,897	3,7	0,147	0,180	0,32
0,44	-2,05	0,393	-0,908	3,9	0,153	0,187	0,32
0,46	-2,11	0,401	-0,911	3,7	0,149	0,191	0,32
0,48	-2,17	0,410	-0,920	3,5	0,150	0,197	0,32
0,50	-2,25	0,420	-0,913	3,3	0,147	0,201	0,32
0,55	-2,38	0,434	-0,911	3,1	0,134	0,203	0,32
0,60	-2,49	0,438	-0,881	2,5	0,124	0,212	0,32
0,65	-2,58	0,451	-0,901	2,8	0,122	0,215	0,32
0,70	-2,67	0,463	-0,914	3,1	0,116	0,214	0,32
0,75	-2,75	0,477	-0,942	3,5	0,113	0,212	0,32
0,80	-2,86	0,485	-0,925	3,7	0,127	0,218	0,32
0,85	-2,93	0,492	-0,920	3,9	0,124	0,218	0,32
0,90	-3,03	0,502	-0,920	4,0	0,124	0,225	0,32
0,95	-3,10	0,503	-0,892	4,0	0,121	0,217	0,32
1,00	-3,17	0,508	-0,885	4,3	0,128	0,219	0,32
1,10	-3,30	0,513	-0,857	4,0	0,123	0,206	0,32
1,20	-3,38	0,513	-0,851	3,6	0,128	0,214	0,31
1,30	-3,43	0,514	-0,848	3,6	0,115	0,200	0,31
1,40	-3,52	0,522	-0,839	3,4	0,109	0,197	0,31
1,50	-3,61	0,524	-0,817	3,0	0,109	0,204	0,31
1,60	-3,68	0,520	-0,781	2,5	0,108	0,206	0,31
1,70	-3,74	0,517	-0,759	2,5	0,105	0,206	0,31
1,80	-3,79	0,514	-0,730	2,4	0,104	0,204	0,32
1,90	-3,80	0,508	-0,724	2,8	0,103	0,194	0,32
2,00	-3,79	0,503	-0,728	3,2	0,101	0,182	0,32

**Quadro 4 – Coeficientes da lei de atenuação de Ambraseys e Simpson (1996)
para componente vertical da aceleração**

T (s)	$C_{1,j}$	$C_{2,j}$	$C_{4,j}$	$h_{0,j}$	$C_{A,j}$	$C_{S,j}$	σ_j
0,10	-1,18	0,267	-1,049	5,4	0,057	0,041	0,29
0,11	-1,17	0,260	-1,033	6,0	0,078	0,066	0,28
0,12	-1,21	0,262	-1,018	6,1	0,099	0,084	0,28
0,13	-1,21	0,269	-1,038	6,6	0,103	0,081	0,28
0,14	-1,32	0,276	-1,007	6,0	0,113	0,079	0,27
0,15	-1,42	0,278	-0,959	5,2	0,117	0,092	0,27
0,16	-1,49	0,283	-0,937	4,9	0,112	0,085	0,27
0,17	-1,50	0,283	-0,920	5,3	0,110	0,084	0,28
0,18	-1,56	0,286	-0,901	5,4	0,120	0,075	0,28
0,19	-1,59	0,289	-0,901	5,6	0,125	0,064	0,27
0,20	-1,61	0,291	-0,894	5,9	0,123	0,060	0,27
0,22	-1,72	0,303	-0,868	5,5	0,099	0,062	0,27
0,24	-1,83	0,318	-0,864	5,2	0,084	0,046	0,27
0,26	-1,89	0,321	-0,850	4,7	0,083	0,023	0,27
0,28	-1,90	0,323	-0,859	5,1	0,070	0,001	0,28
0,30	-1,93	0,340	-0,906	6,2	0,064	-0,003	0,28
0,32	-2,06	0,353	-0,887	5,7	0,056	-0,004	0,28
0,34	-2,15	0,361	-0,875	5,6	0,059	0,030	0,28
0,36	-2,28	0,370	-0,839	5,0	0,062	0,046	0,27
0,38	-2,36	0,371	-0,805	4,6	0,063	0,054	0,28
0,40	-2,43	0,375	-0,791	4,2	0,067	0,068	0,28
0,42	-2,49	0,380	-0,791	3,8	0,074	0,094	0,28
0,44	-2,54	0,388	-0,804	3,9	0,074	0,101	0,28
0,46	-2,59	0,396	-0,806	4,0	0,076	0,105	0,28
0,48	-2,61	0,401	-0,821	4,6	0,073	0,104	0,28
0,50	-2,64	0,402	-0,818	4,9	0,075	0,100	0,28
0,55	-2,76	0,412	-0,800	4,9	0,074	0,095	0,28
0,60	-2,77	0,413	-0,810	6,4	0,073	0,091	0,28
0,65	-2,88	0,422	-0,786	6,1	0,058	0,089	0,29
0,70	-2,94	0,425	-0,789	5,9	0,060	0,102	0,29
0,75	-3,02	0,435	-0,802	5,7	0,071	0,111	0,30
0,80	-3,09	0,432	-0,765	5,2	0,076	0,111	0,31
0,85	-3,13	0,430	-0,750	5,0	0,078	0,125	0,31
0,90	-3,23	0,439	-0,736	4,7	0,087	0,144	0,32
0,95	-3,32	0,444	-0,714	4,5	0,085	0,141	0,32
1,00	-3,36	0,449	-0,718	4,6	0,072	0,130	0,33
1,10	-3,45	0,448	-0,684	4,5	0,062	0,128	0,32
1,20	-3,48	0,443	-0,672	4,9	0,076	0,127	0,33
1,30	-3,51	0,443	-0,680	4,7	0,073	0,120	0,33
1,40	-3,50	0,443	-0,711	5,6	0,076	0,116	0,33
1,50	-3,55	0,440	-0,697	5,3	0,082	0,123	0,34
1,60	-3,56	0,431	-0,676	5,3	0,082	0,124	0,34
1,70	-3,60	0,426	-0,654	5,1	0,078	0,113	0,35
1,80	-3,65	0,425	-0,630	5,0	0,066	0,090	0,35
1,90	-3,67	0,421	-0,612	5,5	0,057	0,091	0,35
2,00	-3,69	0,418	-0,601	5,6	0,058	0,098	0,36

De acordo com as condições geológicas prevalecentes no local, seleccionadas em função da velocidade média de propagação das ondas de corte até 30 m de profundidade, as variáveis S_A e S_S assumem os valores do Quadro 5. No caso presente, tratando-se de afloramentos rochosos estas variáveis são nulas.

Quadro 5 – Valores das variáveis geológicas da lei de atenuação de Ambraseys et al. (1996)

Condições geológicas	Velocidade média das ondas de corte (m/s)	S_A	S_S
Rocha	$V_s > 750$	0	0
Solo rijo	$360 \leq V_s \leq 750$	1	0
Solo mole	$V_s < 360$	0	1

Os valores de pico das acelerações, deduzidos de igual forma, são dados por:

$$\log(a_h) = -1,48 + 0,266M_S - 0,922 \log R + 0,117S_A + 0,124S_S + 0,25P \quad (8)$$

com $R = \sqrt{d^2 + 3,5^2}$

$$\log(a_v) = -1,74 + 0,273M_S - 0,954 \log R + 0,076S_A + 0,058S_S + 0,26P \quad (9)$$

com $R = \sqrt{d^2 + 4,7^2}$.

O modelo matemático desenvolvido por Cornell (1968) para o cálculo da casualidade sísmica baseia-se no teorema da probabilidade total, traduzido matematicamente por:

$$P(A) = \int_X P(A|\mathbf{x}) f_x(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (10)$$

onde A é o acontecimento cuja probabilidade se pretende calcular, considerado como o facto da intensidade do movimento sísmico do solo, Y , exceder um dado nível de intensidade, y , num dado local ($A \equiv Y > y$), e \mathbf{X} é um vector de variáveis aleatórias contínuas, das quais depende o acontecimento, materializadas pelos parâmetros característicos do sismo, presentes no modelo geral de atenuação (nomeadamente, M e R). A integração é realizada para todos os valores de \mathbf{X} para os quais a intensidade Y excede y .

Assumindo que as variáveis aleatórias do vector \mathbf{X} são estatisticamente independentes, o teorema da probabilidade total permite calcular a probabilidade de excedência de um nível Y_0 de intensidade de referência através de

$$P(Y > Y_0) = \int_R \int_M P(Y > Y_0 | m, r) f_M(m) f_R(r) dm dr \quad (11)$$

Considere-se que os acontecimentos capazes de afectar o local em análise ocorrem numa região sísmica constituída por n zonas de geração. A taxa média de ocorrência de sismos, numa zona genérica k , ω_k , que originam no local intensidades superiores ou iguais ao nível de referência, Y_0 , é calculada multiplicando a probabilidade dada pela expressão anterior, aplicada à zona k , pela taxa média de ocorrência na unidade de tempo na zona, λ_k :

$$\omega_k = \lambda_k \int \int_{R M} P(Y > Y_0 | m, r)_{(k)} f_{M(k)}(m) f_{R(k)}(r) dm dr \quad (12)$$

A expressão anterior pode ser generalizada para a descrição espectral da intensidade do movimento no local se os valores das ordenadas espectrais forem independentes, aplicando-se a mesma expressão a cada uma das ordenadas espectrais j (Campos Costa e Pinto, 1997), de acordo com

$$\omega_{k,j} = \lambda_k \int \int_{R M} P(Y_j > Y_{0,j} | m, r)_{(k)} f_{M(k)}(m) f_{R(k)}(r) dm dr \quad (13)$$

Para a intensidade do movimento e a lei de atenuação escolhidas, a probabilidade condicional é avaliada através de

$$\begin{aligned} P(a_j > a_{0,j} | m, r) = \\ = 1 - \Phi \left(\frac{a_{0,j} - C_{1,j} - C_{2,j}M - C_{3,j}R - C_{4,j} \log R - C_{A,j}S_A - C_{S,j}S_S}{\sigma_j} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

A função densidade de probabilidade da magnitude do sismo, $f_{M(k)}$, é calculada através da equação (5), aplicada à zona em questão, e a função de densidade de probabilidade da distância hipocentral, $f_{R(k)}$, é obtida a partir da distribuição espacial dos epicentros da zona k relativamente ao local em estudo.

O cálculo final da distribuição de probabilidade de serem excedidos, pelo menos uma vez, determinados níveis de aceleração espectral, $a_{0,j}$, na unidade de tempo, devido à ocorrência aleatória de sismos em qualquer das n zonas de geração, baseia-se na propriedade do processo de Poisson não ser afectado pela agregação de processos de Poisson independentes, pelo que a taxa de ocorrência de um processo geral de Poisson do acontecimento a_j é igual à soma das taxas de ocorrência das zonas de geração, sendo a probabilidade total deduzida de acordo com

$$P(a_j > a_{0,j}) = 1 - e^{-\sum_{k=1}^n \omega_{k,j}} \quad (15)$$

Quando a unidade de tempo é o ano, a expressão anterior fornece a probabilidade anual de excedência.

Genericamente, entende-se por avaliação da segurança de uma estrutura o cálculo da probabilidade de os danos nela verificados excederem determinados

valores associados a estados limites. Os danos são função das acções impostas e das resistências estruturais mobilizadas, pelo que se revela necessário para além de caracterizar a intensidade da acção sísmica determinar a respectiva probabilidade de excedência num período de referência dado, em geral coincidente com o período de vida médio da estrutura.

Define-se período de retorno de uma intensidade de referência, $RP(Y_0)$, como sendo o inverso da probabilidade anual de ser excedida pelo menos uma vez no local em análise a intensidade Y_0 , sendo matematicamente expresso por:

$$RP(Y_0) = \frac{1}{P(Y > Y_0)} = \frac{1}{1 - e^{-\sum_{k=1}^n \omega_k}} = \frac{1}{1 - P(Y \leq Y_0)} \quad (16)$$

A transformação da distribuição de probabilidade anual na distribuição de probabilidade referente a um período de referência, τ , é calculada com base em

$$P(Y \leq Y_0)_\tau = \left(1 - \frac{1}{RP_0}\right)^\tau \quad (17)$$

No presente estudo foi considerada a probabilidade de excedência de 5% e períodos de referência de 50 e 100 anos, pelo que os períodos de retorno correspondentes são iguais a 975 e 1949 anos.

2.2 – RESULTADOS OBTIDOS

A avaliação da casualidade sísmica em Rio Frio e na Ota decorreu da implementação computacional do modelo matemático descrito e da aplicação do programa de cálculo automático existente no Centro de Estudos e Equipamentos de Engenharia Sísmica (C3ES) do LNEC, resultante da adaptação do Programa EQRISK, desenvolvido por McGuire (1976), por forma a permitir, para além da determinação de curvas de casualidade sísmica (por exemplo, curvas de igual probabilidade de excedência de diversos níveis da aceleração num dado período de referência para um determinado local), o cálculo de espectros de resposta uniformes.

Foram considerados dois locais (o de Rio Frio, com as coordenadas 38,634°N e 8,794°W, e o da Ota, com coordenadas 39,079°N e 8,960°W) e dois cenários sísmicos, contemplando o estipulado no RSA (1983):

- Acção sísmica Tipo 1 (próxima), para a sismicidade intraplaca, associada à actividade de falhas no interior da placa Euroasiática, que ocorre num raio de 50 km em torno dos locais, representativa de sismos de magnitude moderada, a pequena distância focal e com conteúdo rico em frequências elevadas;
- Acção sísmica Tipo 2 (longínqua), para a sismicidade interplacas, associada à interacção na fronteira entre as placas Africana e Euroasiática,

que ocorre a distâncias superiores a 50 km dos locais e numa área limitada pelos paralelos 35°N e 44°N e pelos meridianos 4°E e 13°W, representativa de sismos de maior magnitude, a maior distância focal e com conteúdo em frequências mais baixo nos locais.

Nas Figuras 2 e 3 representam-se, respectivamente, os valores de pico das componentes horizontal e vertical da aceleração em função do período de retorno para os dois locais e para os dois tipos de acção.

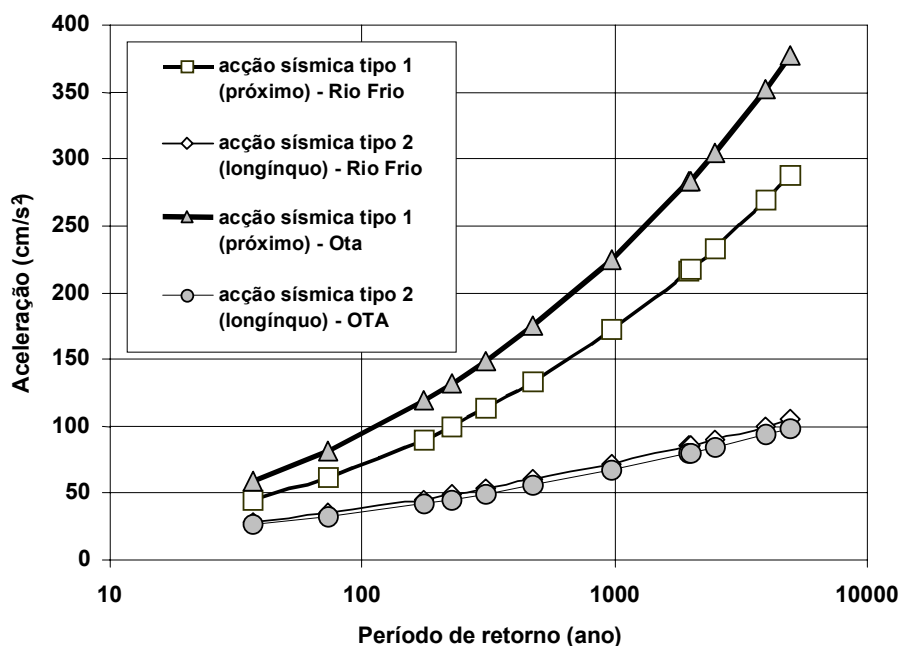


Figura 2 – Valores de pico da componente horizontal da aceleração em função do período de retorno em Rio Frio e na Ota para as acções sísmicas tipo 1 e tipo 2

As Figuras 4 e 5 representam os espectros de resposta, da componente horizontal da aceleração, nos dois locais, para um intervalo de tempo de referência, respectivamente, de 50 e de 100 anos, uma probabilidade de excedência de 5% e um coeficiente de amortecimento crítico de 5%. Os espectros correspondentes para a componente vertical são apresentados nas Figuras 6 e 7.

Nas Figuras 8 a 15 apresentam-se, adoptando uma representação tri-logarítmica, os espectros de resposta da componente horizontal da aceleração, nos dois locais, para ambos os tipos de acção sísmica, para os valores anteriormente considerados de probabilidade de excedência e de amortecimento e referidos a 50 e a 100 anos de período de vida útil. Para melhor enquadramento dos resultados são também aí representados os valores de pico da componente horizontal da aceleração, da velocidade e do deslocamento.

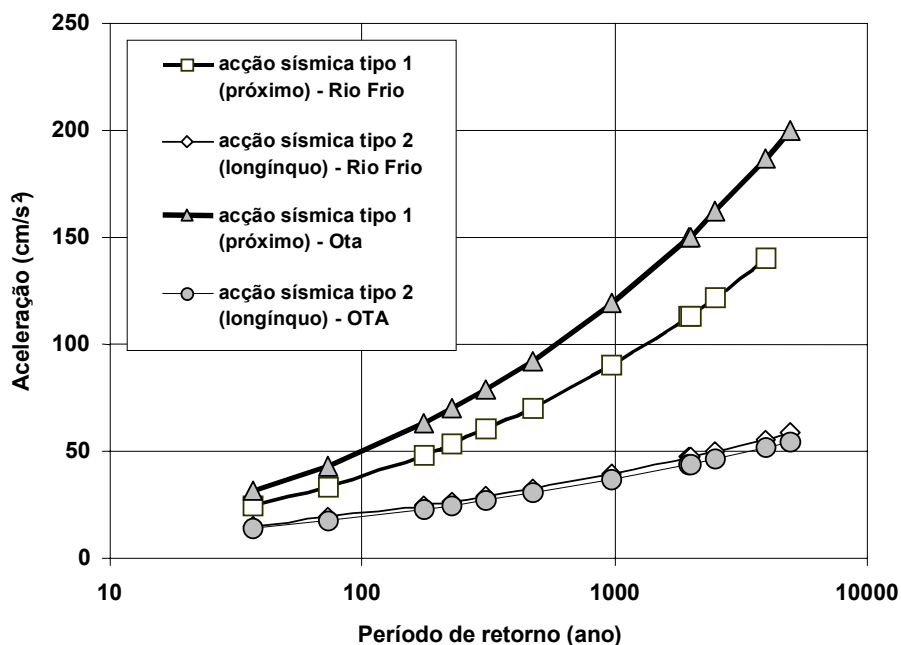


Figura 3 – Valores de pico da componente vertical da aceleração em função do período de retorno em Rio Frio e na Ota para as acções sísmicas tipo 1 e tipo 2

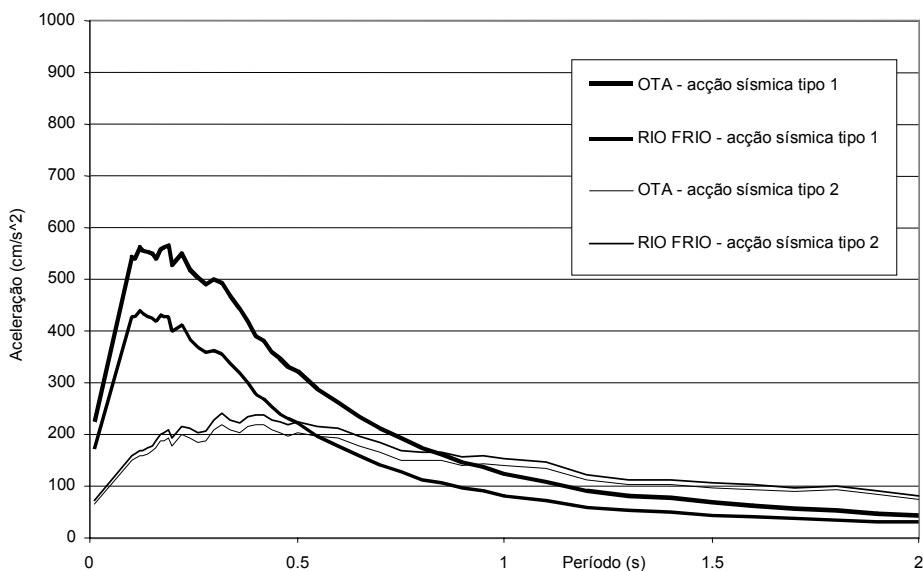


Figura 4 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração das acções tipo 1 e tipo 2 em Rio Frio e na Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%

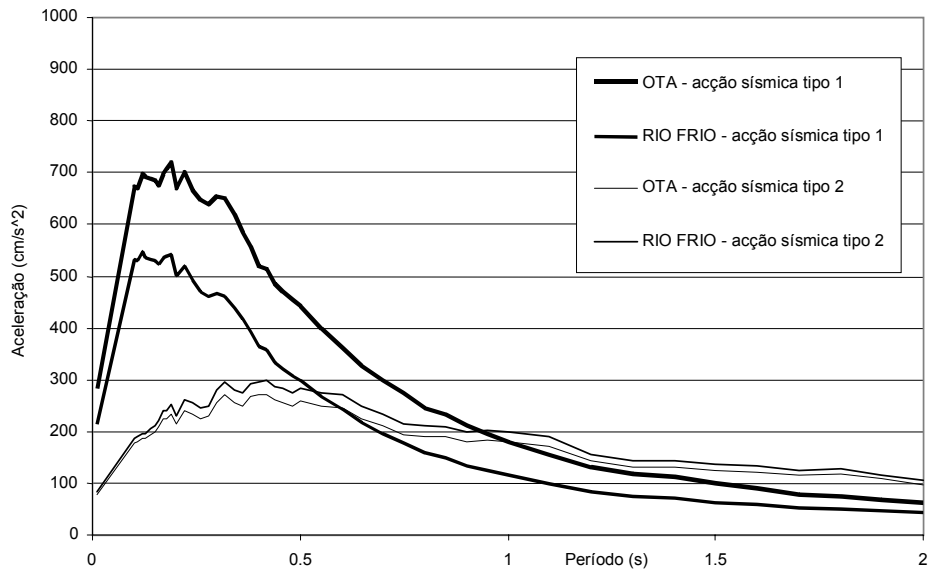


Figura 5 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração das ações tipo 1 e tipo 2 em Rio Frio e na Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 100 anos e um amortecimento de 5%

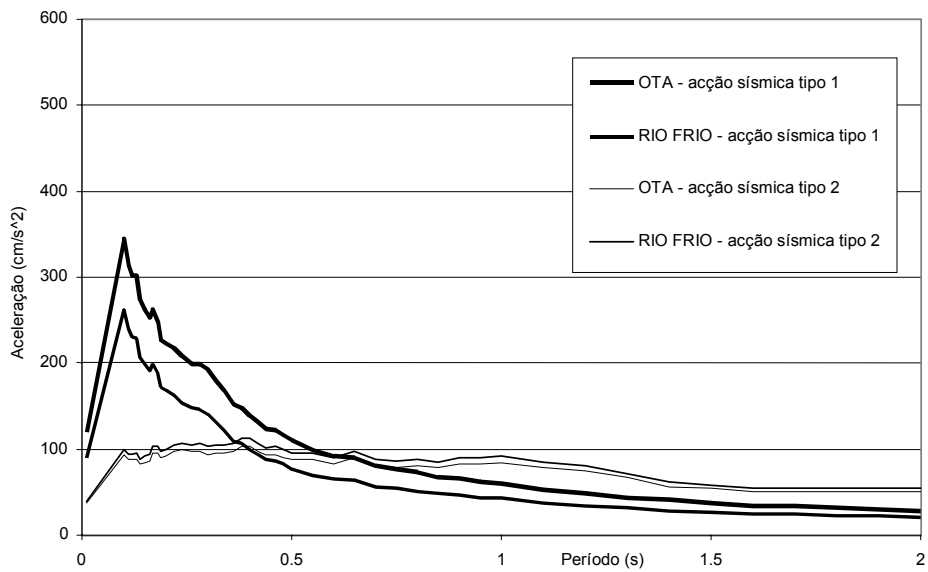


Figura 6 – Espectros de resposta da componente vertical da aceleração das ações tipo 1 e tipo 2 em Rio Frio e na Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%

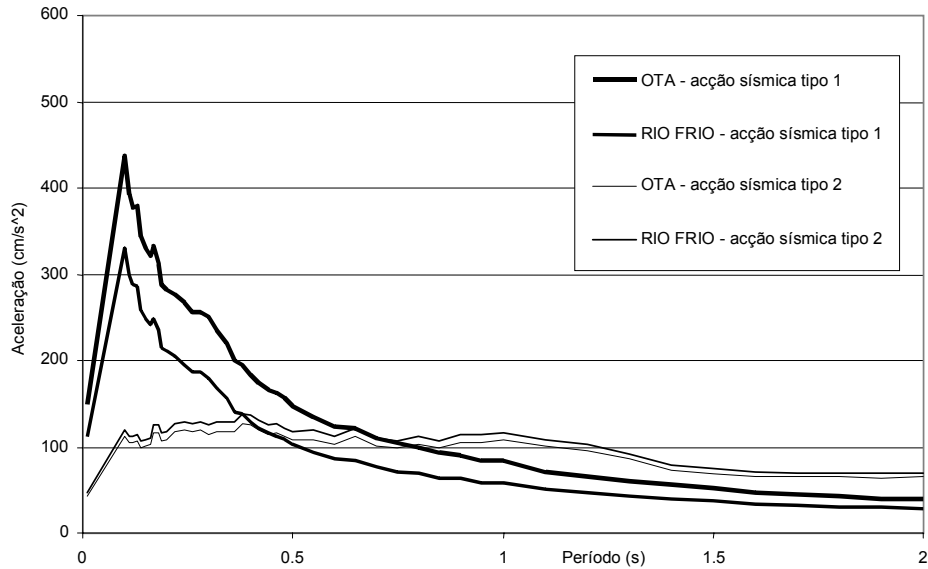


Figura 7 – Espectros de resposta da componente vertical da aceleração das acções tipo 1 e tipo 2 em Rio Frio e na Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 100 anos e um amortecimento de 5%

A partir de cada um dos espectros de resposta apresentados foram gerados grupos de 10 séries temporais, tomadas como acelerogramas sintéticos, para posterior avaliação dos efeitos de sítio e da susceptibilidade à liquefacção dos locais. Os valores médios dos espectros de resposta de cada um dos grupos encontram-se igualmente representados nas referidas figuras, bem como os espectros correspondentes ao valor médio de cada ordenada espectral somado e subtraído do respectivo desvio padrão. Como se pode observar, a convergência entre o espectro a atingir e os obtidos pelas séries é excelente.

A metodologia adoptada para a geração das séries é semelhante à implementada no programa SIMQKE (1976). Basicamente, trata-se de um algoritmo iterativo de ajuste das ordenadas do espectro de resposta de cada série às ordenadas de um dado espectro de resposta, através da aplicação de um factor correctivo, numericamente igual à razão entre o quadrado das ordenadas dos espectros de resposta (estimado e alvo), aplicado à função densidade espectral de potência obtida na iteração anterior (Campos Costa, 1994).

Dado que as leis de duração dos sismos de grande intensidade não estão calibradas para o território português devido à escassez de dados do catálogo sísmico, foram adoptadas as recomendações regulamentares para a geração dos acelerogramas, considerados como processos estocásticos gaussianos e estacionários e com a duração de 10 segundos para a acção sísmica do tipo 1 e de 30 segundos para a acção sísmica do tipo 2.

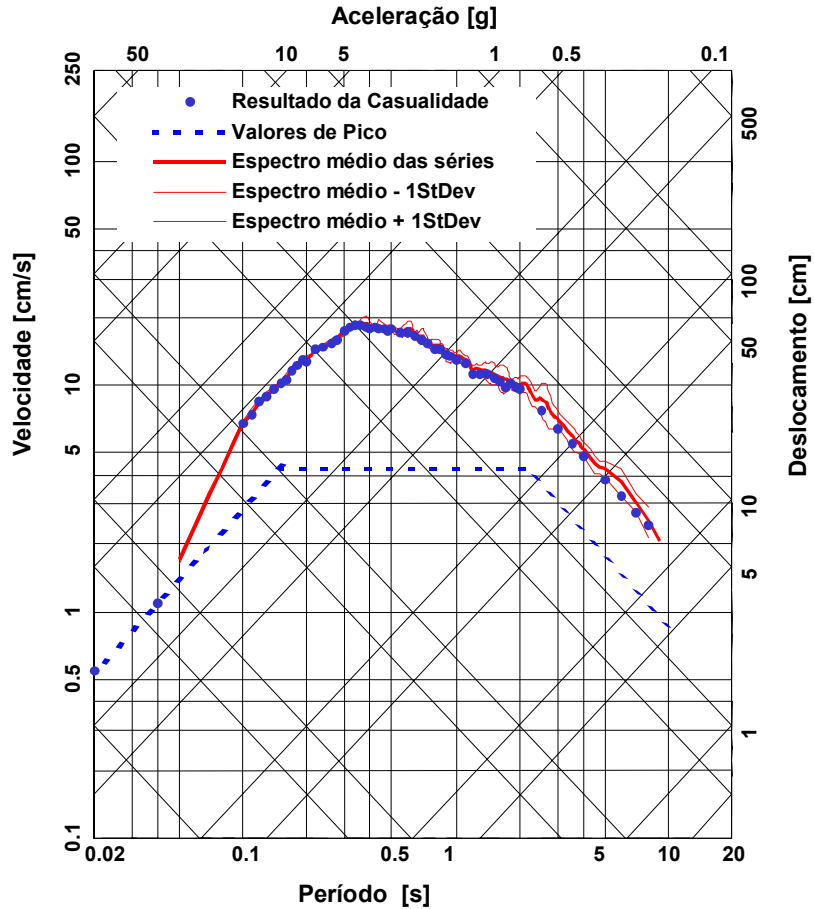


Figura 8 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração das acção tipo 1 em Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%

A comparação dos espectros obtidos, para uma probabilidade de excedência de 5%, para um período de vida útil de 50 anos, com os espectros do RSA (1983) para a zona sísmica A e o terreno tipo I (espectros referidos ao mesmo período de retorno) permite concluir que:

- as ordenadas espectrais correspondentes a frequências superiores a 1,25 Hz, obtidas para a acção sísmica tipo 1, na Ota, excedem sempre (com um máximo de cerca de 33%) as ordenadas do espectro regulamentar; para valores inferiores o espectro regulamentar nunca é superado;
- em Rio Frio, os valores daquelas ordenadas, para o mesmo tipo de acção, são sistematicamente inferiores aos indicados pelo RSA;
- para a acção tipo 2, os valores máximos das ordenadas espectrais, obtidas em ambos os locais, e das ordenadas regulamentares são muito mais próximos, ordenando-se por ordem crescente do seguinte modo: Ota, Rio Frio e RSA.

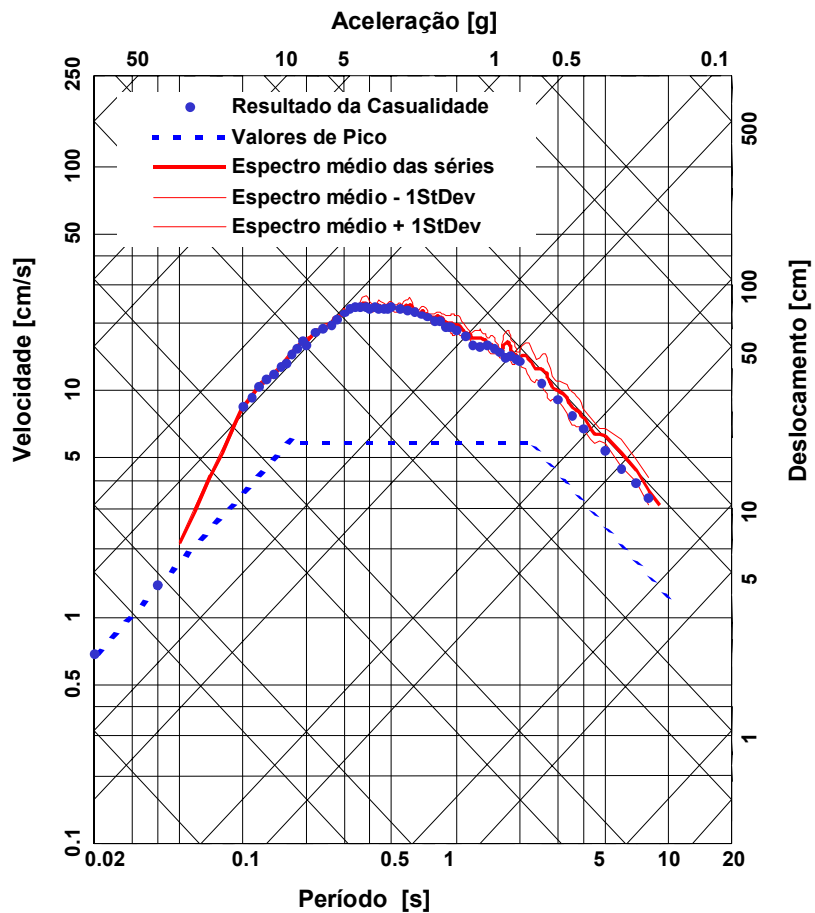


Figura 9 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração das acção tipo 1 em Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 100 anos e um amortecimento de 5%

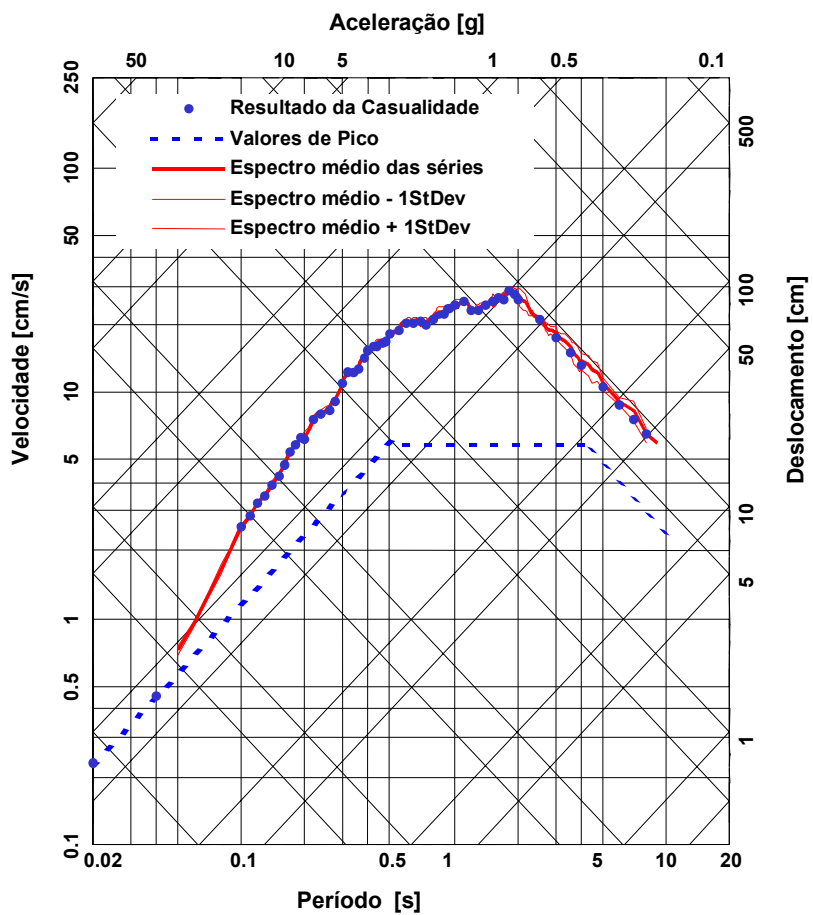


Figura 10 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração das acção tipo 2 em Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%

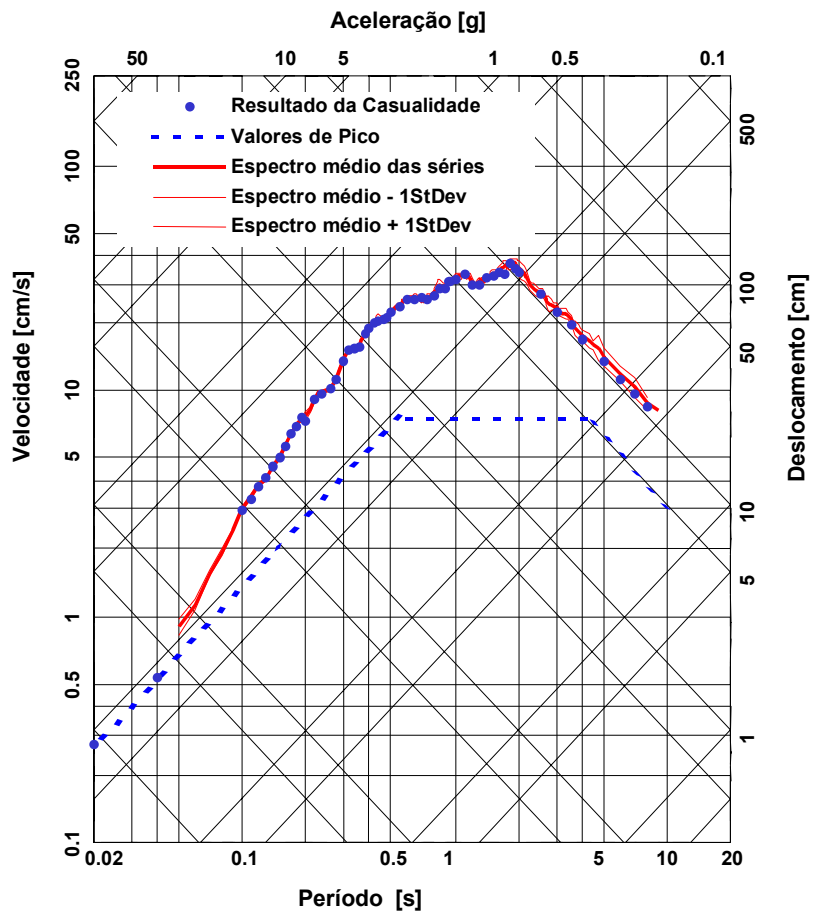


Figura 11 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração das acção tipo 2 em Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 100 anos e um amortecimento de 5%

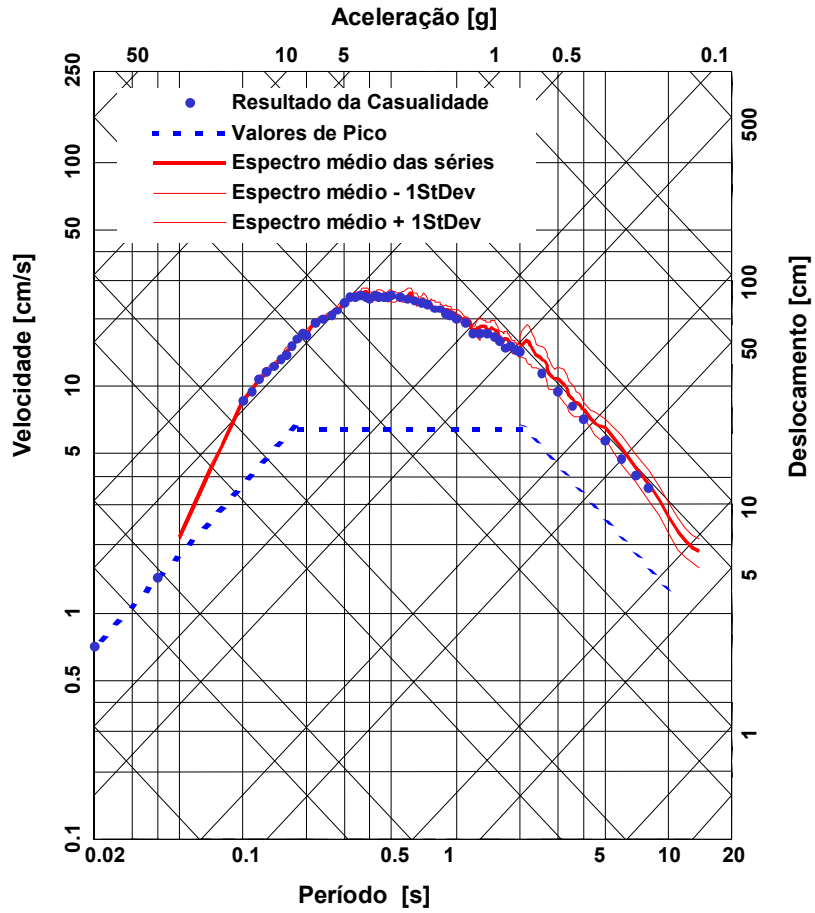


Figura 12 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração das acção tipo 1 na Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%

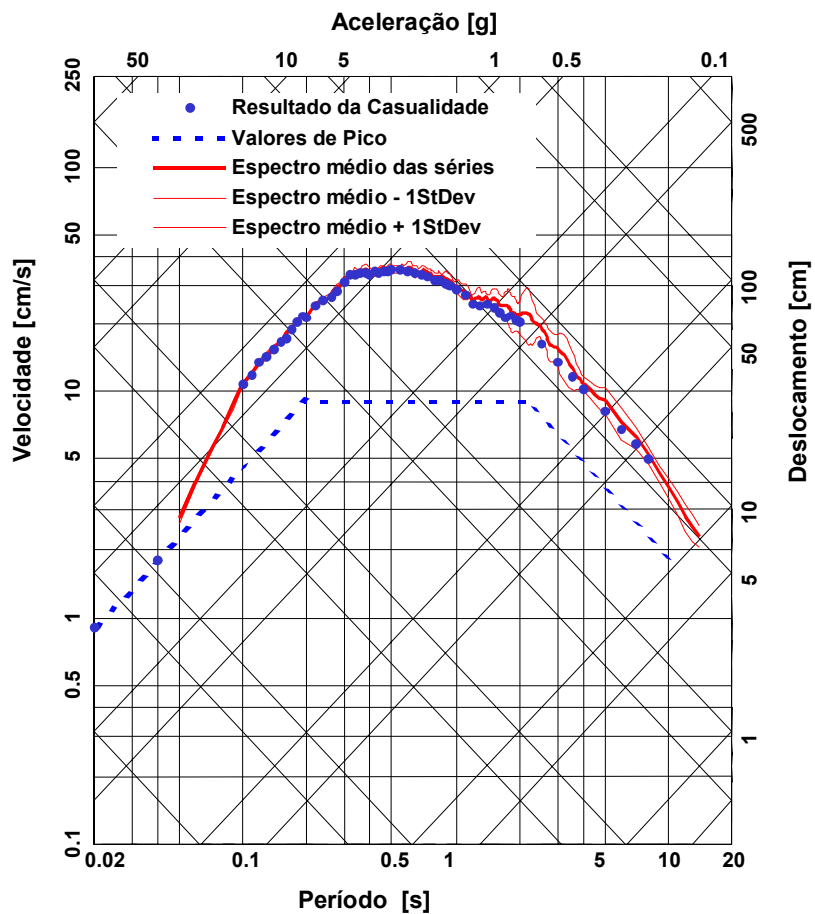


Figura 13 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração das acção tipo 1 na Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 100 anos e um amortecimento de 5%

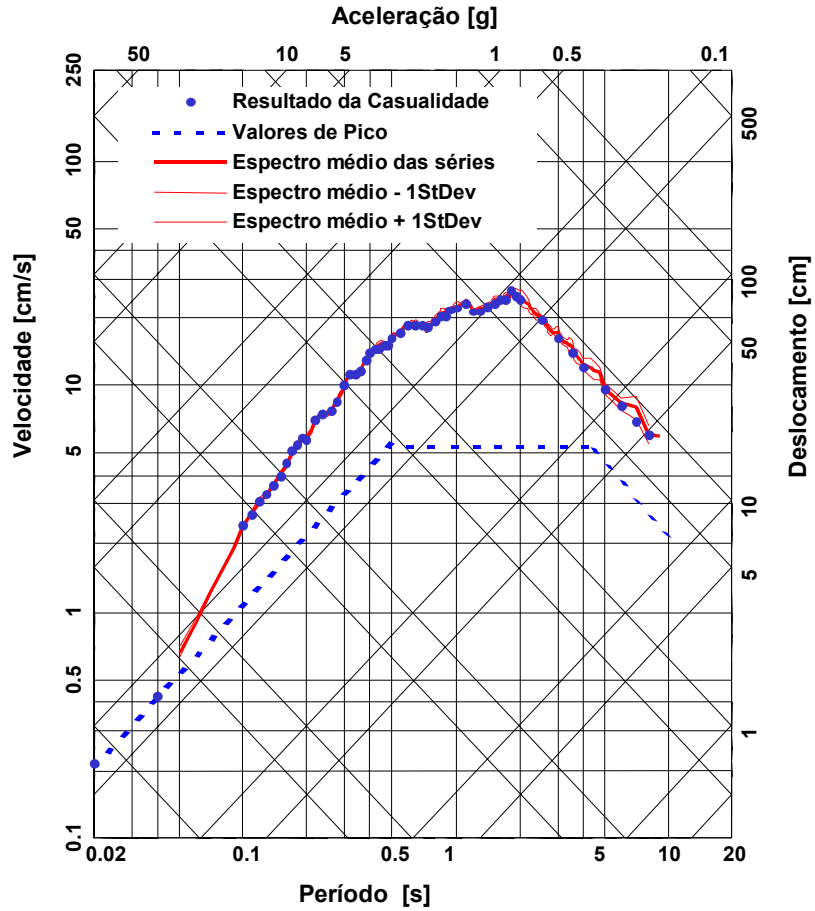


Figura 14 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração das acção tipo 2 na Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%

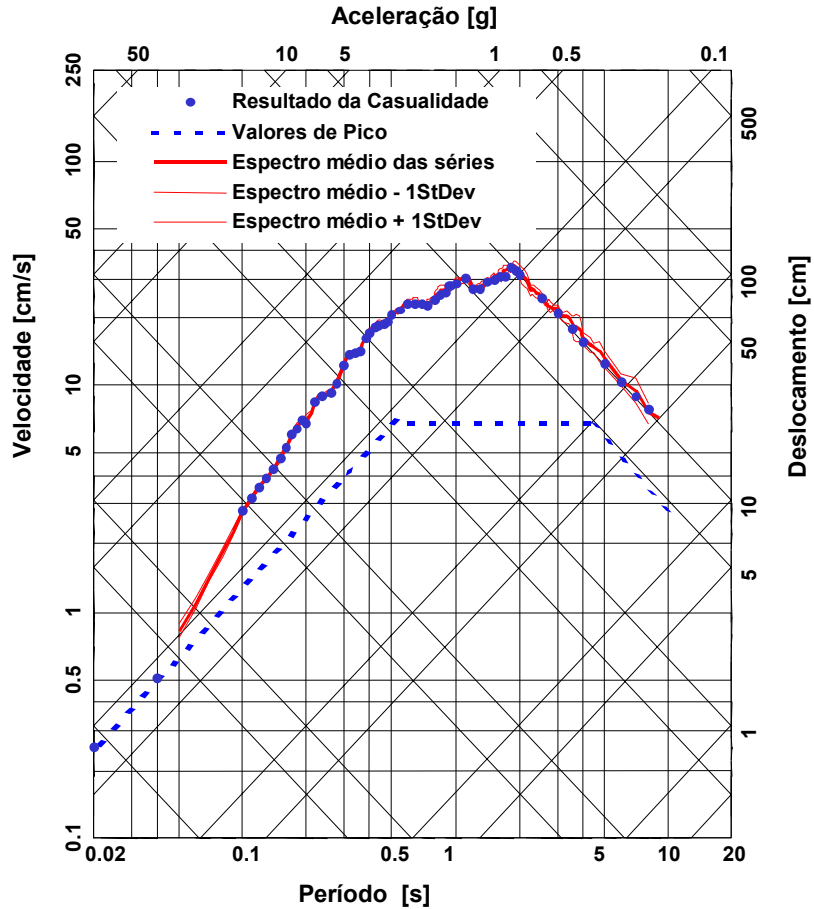


Figura 15 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração das acção tipo 2 na Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 100 anos e um amortecimento de 5%

3 – SÍNTESE E AVALIAÇÃO DA INFORMAÇÃO GEOTÉCNICA RELEVANTE

Com vista à avaliação dos efeitos de sítio e ao estudo da liquefação, resume-se e interpreta-se seguidamente a informação geotécnica mais relevante nos locais de implantação de Rio Frio e da Ota. A consideração de sondagens não directamente interessadas pela construção do Aeroporto visa a recolha de informação adicional capaz de permitir a extrapolação de resultados e a dedução da respectiva estratigrafia em zonas não prospectadas.

3.1 – INFORMAÇÃO GEOTÉCNICA EM RIO FRIO

De acordo com o “*Estudo Preliminar de Impacte Ambiental. Localização: Rio Frio*” (Instituto de Ciências da Terra e do Espaço, 1999b), para a implantação do novo aeroporto em Rio Frio são consideradas duas áreas alternativas: a primeira com orientação W-E e a segunda com orientação N-S, prevendo-se que a área das pistas e a construção das estruturas de apoio estejam situadas entre as cotas 25,0 e 30,0 m. Os terrenos previstos desenvolvem-se essencialmente entre as curvas de nível de cotas 17,0 e 37,0 m.

Com base na Carta Geológica, a profundidades de interesse para a avaliação dos efeitos de sítio, no documento “*Estudos de Localização - NAL, Geologia e Hidrologia. Rio Frio*” (ANA, 1994b), foram identificadas formações Terciárias, Plistocénicas e Recentes, de grande uniformidade geológica.

As formações Terciárias incluem o Miocénico Médio e Superior e o Pliocénico. O Miocénico é constituído por biocalcarenitos, arenitos carbonatados ou argilosos e argilas castanhas, margas e arenitos margosos, com cores esbranquiçadas, castanho avermelhadas ou amarelas e esverdeadas. Encontram-se a profundidades superiores a 170 m. O Pliocénico representa as unidades dominantes pela extensão, tem disposição aproximadamente horizontal, e é constituído por sedimentos ou estratos de origem marinha, materializados por areias mais ou menos grosseiras, em regra feldspáticas e alguns arenitos, às vezes argilosos, cimentados ou consolidados por uma matriz ferruginosa, com algumas lenticulas de argilas amarelas, cinzentas, esverdeadas ou castanhas. A maioria dos terrenos em afloramento na região são formações areno-argilosas pliocénicas, assentes discordantemente sobre formações miocénicas, constituídas por espesso complexo greso-argiloso e greso-calcário.

As formações do Quaternário incluem o Plistocénico e o Holocénico. O Plistocénico é constituído por arenitos argilosos avermelhados, com abundantes cascalheiras subangulosas para o topo e ainda argilas. O Holocénico é constituído por areias e cascalheiras que ocupam áreas reduzidas junto à Ribeira da Marateca, a Sul, e junto ao Vale do Rio Frio e Campo de Tiro de Alcochete, a Norte e Noroeste. No local da obra, estas formações Quaternárias apresentam fraca espessura, no geral inferior a 10 m.

As acumulações aluvionares recentes, constituídas predominantemente por areias e alguns lodos, colmatam as linhas de água actuais, devendo atingir no máximo espessuras da ordem dos 5 m.

Os solos granulares variam entre pouco densos e muito densos, sendo predominantemente médios ou muito densos. Os solos argilosos variam entre rijos e duros, predominantemente muito rijos ou duros. As argilas têm teores em água próximos do limite plástico, indicando que se encontram sobreconsolidadas, pelo que a sua compressibilidade é relativamente baixa.

Na zona do aeroporto as cotas piezométricas oscilam entre 18,50 e 22,20 m e o nível freático do aquífero superficial encontra-se a uma profundidade média de 3 m. O sistema aquífero existente é do tipo multicamada e engloba as formações mio-

pliocénicas. Na zona superficial, e de forma irregular, encontram-se níveis argilosos que lhe podem conferir a característica de aquífero confinado. A relativa continuidade desses níveis argilosos justificam a existência de algumas lagoas e também a manutenção de um nível freático bastante próximo da superfície, observável em valas de drenagem e medido num poço de grande diâmetro em Forninho. A recarga do aquífero processa-se, essencialmente, por infiltração directa das precipitações. As zonas drenantes localizam-se a profundidades que vão dos 50 aos 400 m.

Com vista à caracterização geotécnica das camadas superficiais foram executados trabalhos de prospecção, entre 14 de Junho e 14 de Setembro de 1972 (Sondagens e Fundações A. Cavaco, Lda, 1972), os quais incluíram a realização de 22 furos de sondagem (S-1B, S-2, S-3, S-4B, S-6B, S-7, 1-1, 1-2, 1-3, 2-1, 2-2, 2-3, 3-2, 3-2, AC-1, AC-2, 4-1, 4-2, S-3C, S-4BC, S-6BC e 2-1C), a execução de ensaios de penetração dinâmica (ensaios SPT) e a recolha de amostras remexidas e indeformadas.

As sondagens foram realizadas à percussão mecânica, com equipamento ligeiro.

Os ensaios SPT foram executados, em geral, de 1,50 em 1,50 m, excepto nos furos designados com a letra B, onde foi adoptado um espaçamento menor, de 0,50 m.

Foram colhidos três sacos, de aproximadamente 100 kgf, de terreno superficial nas proximidades das sondagens S-1B, S-3 e 3-2. Sobre estas amostras foram realizados ensaios de compactação de Proctor (compactação pesada).

As restantes amostras remexidas foram obtidas ao longo dos furos de sondagem, mediante a utilização do amostrador normalizado que permite a realização simultânea dos ensaios SPT. No laboratório, sobre estas amostras, foram realizados ensaios de identificação (análise granulométrica e limites de consistência: limite de liquidez (W_L), limite de plasticidade e limite de retracção (W_R)) e de determinação do teor em água.

Com o objectivo de caracterizar as camadas argilosas presentes, com um amostrador de tubo aberto de parede fina ("Shelby tube"), nos furos de sondagem designados com a letra C, foram colhidas amostras indeformadas. Sobre estes solos foram realizados ensaios edométricos, com a determinação do índice de compressão, C_c , e ensaios de compressão simples, com a determinação da coesão não drenada, c_u .

A estratigrafia detectada, a localização do nível freático e os resultados dos ensaios realizados nas sondagens, ou com as amostras nelas recolhidas, encontram-se resumidos no Anexo A do presente relatório. Como resultado dos ensaios SPT transcrevem-se, para além do número de pancadas correspondentes aos últimos 30 cm de uma penetração total de 45 cm, entre parêntesis, o número de pancadas correspondente aos 15 cm iniciais. Nos casos em que durante a execução destes ensaios se produziu o atravessamento de mais de uma camada, os resultados são reproduzidos nas duas camadas mobilizadas. O limite de retracção é incluído nos quadros do Anexo A, colocado entre parêntesis juntamente com o teor em água

natural do solo, indicando assim, indirectamente, o grau de sobreconsolidação do solo.

Para a identificação da evolução estratigráfica do local em profundidade foram ainda analisados os solos atravessados por 4 furos de captação de água. Estes furos foram realizados em 3 locais diferentes: no local 1, situam-se os furos ACOW1 (Observation Well), com uma profundidade final de 419 m (atravessando 240 m de formações pliocénicas areno-argilosas e o restante de grés calcário-margoso miocénico), e ACTW1 (Test Well), com uma profundidade final de 361,65 m; no local 2, situa-se o furo ACOW2, com 238 m de profundidade (sendo 225 m em formações pliocénicas areno-argilosas); e no local 3, situa-se o furo ACOW3, com 260 m de profundidade (180 m dos quais em formações pliocénicas areno-argilosas). No decurso da furação foi detectada a presença de níveis semi-cativos ou cativos de elevada permeabilidade. A estratigrafia destes furos de captação é igualmente apresentada no Anexo A.

Complementarmente na zona de implantação do Novo Aeroporto, entre 2 e 22 de Agosto de 1972 (Oliveira *et al.*, 1973) foi levada a efeito uma campanha de prospecção sísmica, pelo método de refração sísmica, com a utilização de ondas sísmicas longitudinais. Cada perfil sísmico, com um comprimento de 55 m e de orientação N-S, foi definido por 12 geofones alinhados e afastados de 5 m. As ondas foram produzidas pelo rebentamento de pequenas cargas explosivas na extremidade de cada um dos perfis a 5 m do último geofone. Investigou-se uma profundidade de cerca de 15 m. Os resultados obtidos nas proximidades das sondagens anteriormente referidas constam igualmente do Anexo A.

Dos dados de caracterização geotécnica disponíveis, os resultados dos ensaios SPT revelam-se, em geral (a excepção ocorre quando se detecta a presença de camadas de lodos), os mais úteis na avaliação dos efeitos de sítio e da susceptibilidade à liquefacção, uma vez que permitem a estimativa dos valores de cálculo da velocidade de propagação das ondas de corte e, com base nesta, do módulo de distorção máximo (G_{max}) e do quociente de resistência cíclica (CRR).

Para tal, os resultados dos ensaios de penetração dinâmica (SPT) devem ser normalizados e sempre apresentados referidos a condições semelhantes, isto é, para uma mesma tensão efectiva geostática, considerada igual a 100 kPa, para uma mesma energia transmitida por queda do amostrador, considerada igual a 60% da energia aplicada, para uma determinada gama de diâmetros do furo, compreendida entre 65 e 125 mm, para uma determinada gama de comprimento das varas, podendo variar entre 10 e 30 m, e para um determinado tipo de amostrador, devidamente revestido. Sempre que tais condições não se verificam os valores encontrados têm que ser corrigidos através de (Youd e Idriss, 1996):

$$(N_1)_{60} = N C_N C_E C_B C_R C_S \quad (18)$$

onde $(N_1)_{60}$ representa o resultado do ensaio SPT devidamente normalizado, N o número de pancadas medido no decurso do ensaio, C_N o factor de correcção devido à tensão efectiva geostática, calculado com base em:

$$C_N = \sqrt{\frac{100}{\sigma'_{v0}}} \quad (\text{em kPa}) \quad (19)$$

(onde σ'_{v0} é a tensão efectiva vertical geostática), C_E o factor de correcção devido à energia transmitida ser diferente de 60%, C_B o factor de correcção devido ao diâmetro do furo ter dimensões superiores a 125 mm, C_R o factor de correcção para varas de comprimento inferior a 10 m ou superior a 30 m e C_s o factor de correcção devido à utilização de um amostrador sem camisa.

Em geral, as relações empíricas que correlacionam o número de pancadas, N , dos ensaios SPT com a velocidade de propagação das ondas de corte, V_s , são do tipo (TC4, 1999):

$$V_s = aN^b \quad (20)$$

onde a e b são constantes, propostas por diversos autores, para determinados tipos de solos de idade geológica diferenciada (Imai e Yoshimura, 1970; Ohba and Toriumi, 1970; Ohta e Goto, 1978; Imai, 1977; Fialho Rodrigues, 1979; Okamoto *et al.*, 1989).

O valor de G_{max} é deduzido a partir de V_s com base em

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (21)$$

em que ρ representa a massa volúmica do solo.

Nos Quadros 6 a 23 apresenta-se, em correspondência com as sondagens levadas a efeito, um resumo das características mais relevantes para a avaliação dos efeitos de sítio em cada um dos perfis geotécnicos: as camadas constituintes, a respectiva espessura, o tipo de solo (ao qual se associa directamente curvas de variação das propriedades dinâmicas com o nível de deformação de corte), as profundidades e número de pancadas medidos nos ensaios de penetração dinâmica, os valores normalizados $(N_1)_{60}$ e os valores estimados do módulo de distorção máximo, G_{max} . Na avaliação de G_{max} foram utilizados os parâmetros a e b da equação (20) julgados mais adequados ao tipo de solo encontrado.

Nos Quadros 24 a 31 resumem-se os resultados obtidos, em termos de espessura de camadas e respectivas velocidades de propagação de ondas longitudinais, V_p , por aplicação do método de refacção sísmica nas proximidades de sondagens. Incluiu-se ainda uma breve descrição do solo, uma vez que a sua tipologia influencia o coeficiente de Poisson, ν , a considerar para o cálculo dos valores, também contidos nos mesmos Quadros, da velocidade de propagação das ondas de corte, V_s , e do módulo de distorção máximo, G_{max} .

Na propagação em meios elásticos, V_s é dada em função de V_p e de ν por

$$V_s = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} V_p \quad (22)$$

Os resultados obtidos pelo método de refração sísmica mostraram-se bastante uniformes, evidenciando, depois de ultrapassada a camada superficial (com velocidades geralmente inferiores a 400 m/s e uma espessura média de 1 m), a existência de uma camada com velocidades de propagação e módulos de distorção da ordem de grandeza dos calculados com base nos resultados dos ensaios SPT.

Salienta-se que em solos saturados as ondas P se transmitem essencialmente através da fase líquida (registando valores próximos ou superiores a 1500 m/s) e não fornecem indicações sobre as características mecânicas da estrutura do solo, pelo que a realização de ensaios de prospecção sísmica com o tipo de ondas indicado permite caracterizar os solos não saturados e detectar a profundidade do nível freático ou dos aquíferos presentes. Assim, as características da última camada presente nos Quadros 24 a 31 referem-se apenas à propagação destas ondas na água, sendo desprovidas de significado na determinação das propriedades do esqueleto sólido.

Quadro 6 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem S-1B

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	0,25	Terra vegetal				160
2	1	Areia muito fina	0,5	13	38,2	
			1	48	99,75	
3	0,35	Areia muito fina	1,5	104	175,2	540
4	0,5	Areia grossa c/ seixo	2	286	413,4	
5	0,5	Areia fina a média c/ seixo	2,5	120	154,3	
6	1,15	Areia fina a média argilosa	3	184	215,3	230
			3,5	45	48,62	
7	0,7	Areia fina c/ seixo	4	65	74,27	
8	0,65	Areia fina a média argilosa	4,5	74	79,54	
			5	63	64,17	
9	1,9	Areia fina a média argilosa	5,5	39	37,85	
			6	60	62,26	
			6,5	34	35,3	
			7	65	66,19	

Quadro 7 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem S-2

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	(N ₁) ₆₀	G _{max} (MPa)
1	0,2	Areia muito fina				180
2	1,5	Areia muito fina	1,5	37	60,8	
3	0,15	Areia muito fina				
4	1,75	Areia muito fina argilosa	3	28	32,7	
5	0,7	Areia grossa argilosa				
6	0,5	Argila	4,5	37	40,1	
7	0,5	Areia fina a média				
8	0,6	Areia fina argilosa				
9	0,55	Areia fina argilosa	6	39	41	
10	0,55	Areia fina a média argilosa	7	37	38,8	

Quadro 8 – Valores de (N₁)₆₀ e de G_{max} ao longo da sondagem S-3

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	(N ₁) ₆₀	G _{max} (MPa)
1	0,3	Terra vegetal				110
2	1	Areia média a grossa				
3	0,3	Areia fina a média	1,5	11	18,6	
4	2,3	Areia muito fina argilosa	2	40	58,3	
			3	21,5	25,5	
5	0,9	Areia fina a grossa c/ seixos argilosa	4,5	18	19,7	
6	5,95	Argila	6	19	18,3	115
			7,5	27	23,2	
			9	32	25	
			10,5	27	20,6	
7	1,85	Argila	12	25,5	18,2	
8	0,4	Areia fina				
9	2	Areia fina argilosa				

Quadro 9 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem S-4B

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	0,3	Terra vegetal				140
2	0,8	Areia fina	0,5	9	26,4	
			1	17	35,2	
3	0,3	Areia fina c/ seixo				290
4	1,25	Areia fina argilosa	1,5	53,5	90,1	
			2	83	120	
			2,5	66	84,9	
5	1,65	Areia fina a média argilosa	3	65	76	
			3,5	62	67	
			4	55	62,9	
6	0,4	Areia fina a média argilosa	4,5	87	93,6	185
7	3,4	Areia fina a média argilosa	5	51,5	52,5	
			5,5	42	40,9	
			6	55,5	57,8	
			6,5	48	48	
			7	40	38,6	
			7,5	39,5	36,8	
8	0,3	Areia média a grossa argilosa				
9	0,6	Areia fina a média argilosa	8,5	41	35,9	
10	0,2	Areia média a grossa c/seixos	9	46	41,1	
11	0,1	Argila				
12	1,2	Areia fina a média	9,5	46	40,5	
			10	98	89,7	

Quadro 10 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem 4-1

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	0,3	Terra vegetal				270
2	0,45	Areia grossa				
3	1,4	Areia grossa argilosa	1,5	47	79,3	
4	0,55	Areia grossa mto argilosa				
5	3,4	Argila	3	30	35,6	155
			4,5	26	28,4	
			6	37	38,9	
6	0,9	Areia mto fina mto argilosa				
7	1,1	Argila arenosa	7,5	33	31	
8	1,2	Argila mto arenosa	9	67	57,4	225
9	0,55	Areia grossa mto argilosa				
10	0,15	Areia mto fina	10	62	54,5	

Quadro 11 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem S-6B

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	0,35	Terra vegetal				142
2	0,15	Areia fina				
3	0,5	Areia fina c/ seixo	0,5	10	29,4	
4	0,45	Argila arenosa	1	16	33,2	
5	0,95	Argila pouco arenosa	1,5	27	45,7	190
			2	46	67,2	
6	3,4	Argila arenosa	2,5	35	45,6	
			3	37,5	44,6	
			3,5	30	33	
			4	52	60,5	
			4,5	47,5	52,1	
			5	47	48,9	
7	0,9	Argila	5,5	37	36,7	
			6	42	44,5	
8	1,95	Argila	6,5	30,5	31,1	80
			7	24	23,5	
			7,5	15,5	14,7	
			8	12	11	
9	2,35	Areia mto fina argilosa	8,5	23	20,5	
			9	14	12,1	
			9,5	14	11,8	
			10	7	6,06	
10	0,5	Argila arenosa	10,5	8	6,77	
			11	31	25,6	
			11,5	108	87,3	280

Quadro 12 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem S-7

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	(N ₁) ₆₀	G _{max} (MPa)
1	0,5	Terra vegetal				215
2	0,7	Areia mto fina				
3	0,3	Areia mto fina c/ seixo				
4	0,85	Areia fina a média com seixos	1,5	27	45,8	
5	4,65	Areia fina a média mto argilosa	3	53	62,7	150
			4,5	48	52,2	
			6	35	36,7	
6	1,5	Areia fina a média mto argilosa	7,5	33	30,9	
7	1	Areia fina a média mto argilosa	9	30	25,9	
8	3,3	Areia fina a média mto argilosa	10,5	45	39,4	
			12	38	32,2	
9	0,4	Areia fina a média mto argilosa c/ seixos				
10	0,2	Areia fina a média mto argilosa				
11	0,8	Argila arenosa	13,5	38	28,5	
12	0,8	Areia fina a média argilosa	15	44	32	

Quadro 13 – Valores de (N₁)₆₀ e de G_{max} ao longo da sondagem 1-1

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	(N ₁) ₆₀	G _{max} (MPa)
1	0,3	Terra vegetal				200

Quadro 13 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem 1-1

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
2	0,25	Argila arenosa				
3	1,9	Argila arenosa	1,5	25	41,9	
4	0,7	Areia fina argilosa	3	42	49,5	
5	0,45	Areia fina a média				
6	0,2	Areia fina a média argilosa				
7	3,2	Areia fina a média argilosa	4,5	41	44,6	
			6	59	62,1	
			7	47	45,8	

Quadro 14 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem 1-2

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	0,3	Terra vegetal				130
2	1,9	Areia fina	1,5	22	37	
3	0,3	Areia fina				
4	0,7	Areia fina	3	16	19,4	
5	0,4	Areia argilosa				
6	1,2	Areia fina a média	4,5	65	79,9	210
7	1,7	Areia fina a média	6	31	39	
8	0,5	Areia fina mto argilosa	7	42	45,8	

Quadro 15 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem 1-3

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	1	Terra vegetal				190

2	1,6	Argila	1,5	27	45,5	
3	0,6	Areia fina argilosa	3	37	43,7	
4	1,3	Areia fina argilosa				
5	0,8	Areia fina a média argilosa	4,5	42	46,1	
6	0,5	Areia fina argilosa				
7	0,5	Areia média a fina	6	35	39,3	
8	0,7	Areia média a fina	7	69	74,2	

Quadro 16 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem 2-1

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	0,2	Terra vegetal				180
2	0,5	Areia fina c/ seixos				
3	0,95	Areia grossa c/seixos	1	24	49,4	
			1,5	22	41,2	
4	0,25	Areia fina argilosa				120
5	0,8	Argila				
6	2,2	Argila	3	13,5	20,5	
			4,5	21,5	32	
7	1,4	Argila arenosa	5,5	16	21,9	
			6	31	45,6	
8	0,7	Argila arenosa	7	22,5	30,9	170

Quadro 17 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem 2-2

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	0,3	Terra vegetal				340

2	1,1	Areia mto fina a média argilosa				
3	1	Areia fina a média argilosa	1,5	84	138	
4	1,95	Areia fina mto argilosa	3	61	70,4	
5	0,85	Areia fina a média mto argilosa	4,5	27	28,8	165
6	1,8	Argila muito arenosa	6	33	35,9	
			7	46	48,2	

Quadro 18 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem 2-3

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	0,4	Terra vegetal				230
2	0,2	Areia fina				
3	0,4	Areia fina argilosa				
4	0,45	Argila muito arenosa				
5	1,1	Areia fina mto argilosa	1,5	31	51,6	
6	0,25	Areia fina mto argilosa				
7	0,25	Areia argilosa	3	49	57,4	
8	0,7	Argila arenosa				
9	2,05	Areia fina	4,5	59	63,4	
10	1,2	Areia argilosa fina a média	6	39	40,4	155
			7	29	28,3	

Quadro 19 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem 3-1

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	0,35	Terra vegetal				350

2	1,65	Areia fina c/ seixos argilosa	1,5	112	182	
3	0,9	Areia grossa argilosa				
4	0,25	Areia muito fina pouco argilosa	3	65	74,2	
5	1,95	Areia muito fina pouco argilosa	4,5	86	90,7	
6	1,25	Areia muito fina pouco argilosa	6	73	82,8	
7	0,45	Areia fina argilosa				
8	0,2	Areia fina argilosa	7	34	36,9	

Quadro 20 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem 3-2

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	0,3	Terra vegetal				175
2	0,8	Areia fina argilosa				
3	0,9	Argila muito arenosa	1,5	25	38,2	
4	1	Argila compacta				
5	1,8	Areia muito argilosa	3	40	42,9	
			4,5	53	52,4	
6	0,8	Argila mto arenosa				225
7	1,4	Areia fina muito argilosa	6	54	57,5	
			7	56	56,8	

Quadro 21 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem AC-1

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	0,35	Terra vegetal				170

2	0,75	Argila mto arenosa				
3	0,6	Areia fina argilosa	1,5	23	38,5	
4	0,1	Argila mto arenosa				
5	1,2	Areia fina muito argilosa				
6	2,5	Areia mto fina mto argilosa	3	30	40,4	350
			4,5	119	160	
7	3,7	Areia fina muito argilosa	6	133	179	
8	0,3	Areia fina muito argilosa	7	69	68	

Quadro 22 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem AC-2

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	0,3	Terra vegetal				320
2	0,7	Argila c/ seixos				
3	0,85	Argila arenosa	1,5	62	93,5	
4	0,15	Areia mto fina				175
5	0,7	Areia média				
6	3,7	Areia argilosa	3	37	39,2	230
			4,5	56	54,9	
			6	68	64,6	
7	4,3	Areia muito argilosa	7	61	55,3	

Quadro 23 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem 4-2

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	0.3	Areia mto fina				400
2	0.6	Argila				
3	0.75	Areia fina argilosa	1.5	342	563	

Quadro 23 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem 4-2

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
4	1.25	Areia mto fina um pouco argilosa				
5	1.5	Areia mto fina argilosa	3	42	48.5	205
6	0.5	Areia mto fina um pouco argilosa	4.5	46	49.2	
7	0.5	Areia mto fina argilosa				
8	0.45	Argila arenosa				
9	1.65	Areia fina a média	6	38	37.5	135
			7	20	18.4	

Quadro 24 – Valores de V_S e de G_{max} nas proximidades da sondagem S-4B com base na prospecção sísmica

Camada	Espessura (m)	Descrição	V_P (m/s)	V_S (m/s)	G_{max} (MPa)
1	1,52	Areia fina	340	180	60
2	6,22	Areia fina a média argilosa	750	360	235
3		Areia fina a média	1530	820	1200

Quadro 25 – Valores de V_S e de G_{max} nas proximidades da sondagem 4-1 com base na prospecção sísmica

Camada	Espessura (m)	Descrição	V_P (m/s)	V_S (m/s)	G_{max} (MPa)
1	1,54	Areia grossa	350	190	65
2		Argila arenosa	780	350	240

Quadro 26 – Valores de V_S e de G_{max} nas proximidades da sondagem S-6B com base na prospecção sísmica

Camada	Espessura (m)	Descrição	V_P (m/s)	V_S (m/s)	G_{max} (MPa)
1	0,83	Areia fina c/ seixo	440	235	100

Quadro 26 – Valores de V_S e de G_{max} nas proximidades da sondagem S-6B com base na prospecção sísmica

Camada	Espessura (m)	Descrição	V_P (m/s)	V_S (m/s)	G_{max} (MPa)
2	8,61	Argila arenosa	550	224	90
3		Areia fina a média	1400	670	784

Quadro 27 – Valores de V_S e de G_{max} nas proximidades da sondagem S-7 com base na prospecção sísmica

Camada	Espessura (m)	Descrição	V_P (m/s)	V_S (m/s)	G_{max} (MPa)
1	1,61	Areia fina a média	325	175	55
2	11,54	Areia fina a média	785	420	315
3		Areia fina a média	1630	870	1364

Quadro 28 – Valores de V_S e de G_{max} nas proximidades da sondagem 2-2 com base na prospecção sísmica

Camada	Espessura (m)	Descrição	V_P (m/s)	V_S (m/s)	G_{max} (MPa)
1	1,08	Areia fina argilosa	500	240	110
2	5,63	Argila arenosa	730	300	165
3			1680	810	1240

Quadro 29 – Valores de V_S e de G_{max} nas proximidades da sondagem 3-2 com base na prospecção sísmica

Camada	Espessura (m)	Descrição	V_P (m/s)	V_S (m/s)	G_{max} (MPa)
1	1,56	Areia fina argilosa	380	185	60
2	8,95	Argila arenosa	860	350	225
3		Areia fina a média	1900	915	1590

Quadro 30 – Valores de V_S e de G_{max} nas proximidades da sondagem AC-1 com base na prospecção sísmica

Camada	Espessura (m)	Descrição	V _P (m/s)	V _S (m/s)	G _{max} (MPa)
1	11,08	Argila arenosa	710	290	155
2		Argila arenosa	1760	720	945

Quadro 31 – Valores de V_S e de G_{max} nas proximidades da sondagem AC-2 com base na prospecção sísmica

Camada	Espessura (m)	Descrição	V _P (m/s)	V _S (m/s)	G _{max} (MPa)
1	10,28	Argila arenosa	650	310	180
2		Argila arenosa	1800	735	1040

3.2 – INFORMAÇÃO GEOTÉCNICA NA OTA

De acordo com o “*Estudo Preliminar de Impacte Ambiental. Localização: Ota*” (Instituto de Ciências da Terra e do Espaço, 1999a), a concepção do Novo Aeroporto na Ota abrange uma área com cerca de 2,5 x 5,5 km², onde se situam duas pistas, com eixos distanciados de 1 700 m e com 3 600 m de comprimento, ligeiramente inclinadas: Pista nº 1, a poente, entre as cotas 25 a Norte, passando pela cota 26 e terminando à cota 22; e a Pista nº 2, a Nascente, com cota inicial de 14, intermédia de 17 e final de 14. A Pista nº 1 assentará em plataformas de escavação (de profundidade máxima de cerca de 20 m) excepto no atravessamento da Ribeira de Alvarinho. A Pista nº 2 desenvolver-se-á essencialmente em aterro. A espessura dos aterros atingirá 23 m nos vales das Ribeiras de Alenquer e de Alvarinho. A área insere-se numa zona de morfologia suavemente ondulada, levemente inclinada para leste, de cotas variáveis entre 76 e 10, atingindo pontualmente valores inferiores, até um mínimo de 4, nos vales das Ribeiras da Ota e de Alenquer.

Com base na Carta Geológica e segundo o documento “*Estudos de Localização - NAL, Geologia e Hidrologia. Ota*” (ANA, 1994a), a região em análise corresponde a uma zona deprimida que forma parte da Bacia Terciária do Baixo Tejo, envolvida a Poente e a Sul pelos relevos do maciço calcário jurássico e ocupada por terrenos Terciários, Quaternários e de formação recente.

O contacto entre as formações Terciárias e o maciço calcário faz-se pela estreita faixa do Complexo Paleogénico argilo-gresoso-arcósico, sobre o qual assenta o complexo Miocénico, essencialmente, constituído por camadas alternantes de argilas, grés e areias.

As formações Quaternárias estão representadas por terraços fluviais e aluviões. Os terraços fluviais são constituídos por argilas, areias e seixos, no bordo Sul da mancha Miocénica (entre esta e a superfície aluvial do Tejo), e por areias com seixos rolados na margem direita da Ribeira da Ota.

As aluviões ocorrem ao longo das linhas de água e são de natureza areno-argilosa, com frequentes intercalações de lodos. Apresentam, em geral, pequena espessura, excepto nas três Ribeiras mais importantes (Ribeiras da Ota, de Alenquer e de Alvarinho), onde as referidas intercalações podem atingir no máximo 20 m de espessura.

Os solos granulares variam entre pouco densos e muito densos. Os solos argilosos e lodosos variam, de acordo com a profundidade, entre moles e rijos.

Na zona do aeroporto o nível freático superficial encontra-se a uma profundidade média de 3,40 m. Distinguem-se três sistemas hidrogeológicos: (i) aquíferos cársicos; (ii) sistema multicamada; (iii) aquíferos porosos. O primeiro sistema está associada ao maciço calcário da Ota e de Alenquer, e caracteriza-se por possuir uma elevada taxa de infiltração e por ser de circulação rápida a muito rápida, com grandes variações de níveis e de caudais de descarga. O sistema aquífero multicamada tem uma espessura superior a 200 m, englobando alternâncias de arenitos argilosos finos, argilas, margas, areias e alguns níveis de seixos, e caracteriza-se por ser de reduzida produtividade. Os aquíferos porosos ocorrem nos sistemas aluvionares, lodosos e areno-lodosos, associados ao Rio Tejo.

Com vista à caracterização geotécnica das camadas superficiais foram executados trabalhos de prospecção, entre Abril e Maio de 1990 (GKN KELLER SRL, Hidrologia Subterrânea e Geotecnia; 1990), os quais incluíram a realização de 19 furos de sondagem (SP2 a SP20), a execução de ensaios de penetração dinâmica (ensaios SPT), a recolha de amostras remexidas e indeformadas e a instalação de piezómetros.

As sondagens foram realizadas à percussão mecânica.

Os ensaios SPT foram executados com 1,00 m de espaçamento.

As amostras remexidas foram obtidas ao longo dos furos de sondagem, mediante a utilização do amostrador normalizado que permite a realização simultânea dos ensaios SPT. No laboratório, sobre algumas destas amostras, foram realizados ensaios de identificação, de determinação do teor em água, de compactação pesada e ensaios CBR. Nos resultados apresentados não é referenciada a profundidade das amostras, pelo que se desconhece a que formação estratigráfica se referem.

Com o objectivo de caracterizar as camadas lodosas presentes na sondagem SP7 foram colhidas duas amostras indeformadas às profundidades de 1,50 e 5,50 m. Sobre estes solos foram realizados ensaios de identificação, de determinação do peso volúmico e do teor em água, e ensaios de corte directo, consolidados rápidos.

A estratigrafia detectada, a localização do nível freático e os resultados dos ensaios realizados nas sondagens, ou com as amostras nelas recolhidas, encontram-se resumidos no Anexo B do presente relatório. Como resultado dos ensaios SPT transcrevem-se, para além do número de pancadas correspondentes aos últimos 30 cm

de uma penetração total de 45 cm, sempre que este número é superior a 60, entre parêntesis, a nega (ou seja a penetração conseguida com 60 pancadas).

Seguindo uma metodologia idêntica à descrita em 3.1, os Quadros 32 a 50 apresentam-se, em correspondência com as sondagens levadas a efeito, um resumo das características mais relevantes para a avaliação dos efeitos de sítio em cada um dos perfis geotécnicos: as camadas constituintes, a respectiva espessura, o tipo de material (ao qual se associa directamente curvas de variação das propriedades dinâmicas com o nível de deformação sísmica), as profundidades e número de pancadas medidos nos ensaios de penetração dinâmica, os valores normalizados $(N_1)_{60}$ e os valores estimados do módulo de distorção máximo, G_{max} .

Nos locais onde as 60 pancadas não foram suficientes para se atingir a penetração de 30 cm, estimou-se o número de pancadas correspondente à referida penetração, N_{30cm} , com base no valor da nega e admitindo uma resistência à penetração constante e igual a $60/nega$, isto é:

$$N_{30cm} = \frac{60 \times 30}{nega} \quad (23)$$

Excluindo as camadas lodosas, a avaliação de G_{max} foi efectuada com base na equação (20) e com os parâmetros a e b julgados mais adequados ao tipo de solo encontrado. Com base em resultados de ensaios de prospecção sísmica realizados em formações lodosas do Vale do Tejo, estimou-se que a velocidade das ondas de corte se situe entre 80 e 140 m/s, pelo que G_{max} oscila entre 9,6 e 30 MPa, sendo transcrito nos Quadros seguintes o valor indicativo de 15 MPa.

Quadro 32 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem SP2

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	1	Silte argiloso c/ mat. Org.				60
2	3	Areia fina leve/ silto-argilosa, mto solta a solta	1	2	4,2	
			2	6	10,1	
			3	9	13,4	
3	2	Areia de gran. var. c/ conc. e seixo mto solta a median. compacta	4	1	1,5	140
			5	18	25,2	
4	4,39	Areia fina silto-argilosa median. a mto compacta,	6	24	34,9	265
			7	41	55,8	
			8	55	70,7	
			9	72	87,9	
			10	75	92,0	

Quadro 33 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem SP3

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	(N ₁) ₆₀	G _{max} (MPa)
1	0,4	Silte argiloso c/ mat. org.				35
2	4,6	Areia fina silto-argilosa mto solta	1	1	2,1	
			2	3	4,8	
			3	4	5,7	
3	2	Areia fina siltosa, lev. Lodosa median. compacta	4	3	4,4	115
			5	12	16,5	
4	1	Cascalheira em matriz arenosa median. compacta	6	20	28,6	160
			7	27	36,2	
5	3,4	Areia grossa argilosa	8	51	64,8	275
			9	72	86,7	
			10	60	72,5	
			11	72	83,3	

Quadro 34 – Valores de (N₁)₆₀ e de G_{max} ao longo da sondagem SP4

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	(N ₁) ₆₀	G _{max} (MPa)
1	0,4	Areia fina siltosa c/ mat. org.				255
2	3,6	Areia fina siltosa compacta a mto compacta	1	54	111,0	
			2	48	69,5	
			3	46	54,4	
3	1	Areia grossa a média, mto compacta	4	90	104,3	
4	2	Areia fina silto-argilosa compacta	5	50	54,8	
			6	44	51,3	
5	3	Areia fina siltosa c/ seixo compacta a mto compacta	7	42	46,8	
			8	72	76,9	
			9	55	56,5	
6	5	Silte argiloso c/nódulos arenosiltosos rijo	10	52	54,2	
			11	72	72,4	
			12	60	58,4	
			13	60	56,6	
			14	60	55,0	
7	4	Areia fina siltosa mto compacta	15	72	64,2	
			16	105,9	92,1	
			17	105,9	89,8	
8	1	Silte argiloso rijo	18	72	59,7	
			19	94,7	76,7	
9	0,36	Areia fina siltosa mto compacta	20	85,7	68,0	

Quadro 35 – Valores de (N₁)₆₀ e de G_{max} ao longo da sondagem SP5

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	(N ₁) ₆₀	G _{max} (MPa)
1	1	Silte areno-argiloso c/ mat.org.				95
2	2	Areia média a fina silto-argilosa solta a median.compacta	1 2	9 11	18,7 16,1	
3	3	Areia fina siltosa compacta	3 4 5	30 28 33	35,9 32,5 34,0	165
4	3	Silte argiloso rijo	6 7 8	41 40 49	43,0 38,7 44,2	
5	3,36	Areia fina a média, silto-argilosa mto compacta	9 10 11 12	52 66,7 72 98,6	44,2 56,5 58,1 76,1	235

Quadro 36 – Valores de (N₁)₆₀ e de G_{max} ao longo da sondagem SP6

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	(N ₁) ₆₀	G _{max} (MPa)
1	0,8	Areia fina siltosa c/ mat. Org.				95
2	1,2	Areia fina siltosa c/ seixo solta	1	8	16,6	
3	4	Areia fina siltosa c/ seixo median. a muito compacta	2 3 4 5	50 60 44 22	73,2 71,4 51,3 22,9	210
4	1	Silte argiloso muito duro	6	23	24,4	
5	6	Areia fina silto-argilosa median. compacta a compacta	7 8 9 10 11 12	22 20 23 42 51 47	21,5 18,2 19,7 35,9 41,5 36,6	140
6	3	Areia fina a média muito compacta	13 14 15	180 180 180	134,5 129,5 127,3	
7	1	Areia de gran. Var. silto-argilosa muito compacta	16	120	83,5	
8	3,34	Silte argiloso rijo	17 18 19 20	42 51 72 94,74	28,7 34,4 47,8 62,0	

Quadro 37 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem SP7

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	1	Silte argiloso c/ mat. Org.				15
2	6,2	Lodo argiloso c/ conchas muito mole a médio	1	6	13,7	
			2	4	7,7	
			3	5	8,4	
			4	1	1,7	
			5	1	1,6	
3	2,8	Areia gran. Var. c/ conc. seixo solta a median. compacta	6	0	0,0	
			7	5	7,7	
			8	18	25,9	
4	2,36	Silte arenoso rijo	9	28	38,0	115
			10	90	121,7	
			11	81,8	104,8	
			12	85,7	104,5	350

Quadro 38 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem SP8

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	1	Areia fina silto-argilosa c/ mat. Org. e seixo				115
2	6	Areia fina siltosa com seixo muito solta a median. compacta	1	3	6,2	
			2	13	19,1	
			3	13	17,3	
			4	22	30,7	
			5	22	28,6	
3	5,33	Areia fina silto-argilosa compacta a mto compacta	6	29	39,6	
			7	52	67,3	
			8	50	61,2	
			9	46	53,6	
			10	72	84,4	
			11	72	81,0	
			12	100	108,2	270

Quadro 39 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem SP9

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	0.3	Silte argiloso c/ mat. Org.				245

Quadro 39 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem SP9

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
2	8.7	Areia fina siltosa compacta a muito compacta	1	75	154	
			2	42	60.8	
			3	49	57.9	
			4	66.7	77.2	
			5	72	74.6	
			6	52	55	
			7	55	53.8	
			8	34	31.1	
3	1	Areia grossa c/ nód. silto-argilosos e seixo muito compacta	9	180	155	455
4	2	Areia fina siltosa muito compacta	10	193	166	
			11	54	44.2	
5	1	Areia fina siltosa compacta	12	37	29	165
6	1.29	Areia de granul. Var. c/ seixo muito compacta	13	120	90.2	320
			14	129	93	

Quadro 40 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem SP10

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	0,4	Silte argiloso c/ mat. Org.				65
2	2,6	Argila siltosa leve/lodosa, consistência média	1	6	12,5	
			2	5	8,7	
3	0,55	Areia fina leve/silto-argilosa com seixo solta	3	6	9,2	
4	0,5	Silte argiloso leve/lodoso				
5	1,95	Areia fina siltosa muito solta a solta	4	6	9,4	40
			5	3	4,3	
6	1	Silte argiloso mole	6	4	6,0	
7	1	Areia fina siltosa median, compacta	7	12	16,8	200
8	4,39	Areia fina muito argilosa	8	16	21,1	
			9	24	29,9	
			10	52	64,8	
			11	75	89,2	
			12	75	85,5	

Quadro 41 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem SP11

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	0,3	Areia fina silto-argilosa c/ mat. Org.				100
2	1,7	Areia fina siltosa solta	1	8	16,6	
3	1	Argila siltosa dura	2	10	14,7	
4	5	Areia fina silto-argilosa solta a median. compacta	3	12	15,4	
			4	11	14,9	
			5	19	24,1	
			6	18	24,0	
			7	6	7,6	
5	2	Areia média a fina, leve/ siltosa c/ seixo, solta a median. compacta	8	8	9,7	70
			9	12	13,9	
6	2,26	Areia fina siltosa muito compacta	10	128,6	149,9	425
			11	120	133,9	
			12	163,6	175,5	

Quadro 42 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem SP12

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	1	Areia fina siltosa				40
2	2	Lodo argiloso muito mole a mole	1	3	6,23	
			2	2	3,18	
3	1	Cascalheira em mat. areno-argilosa median. compacta	3	14	19,9	105
4	6	Areia fina siltosa median. compacta a compacta	4	13	19,1	
			5	15	20,3	
			6	46	64,9	
			7	49	65	
			8	45	56,6	
5	2,36	Areia grossa c/ seixo e pass. silto-argilosas muito compacta	9	42	50,2	250
			10	57	68,6	
			11	66,7	76,8	
			12	85,7	94,9	

Quadro 43 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem SP13

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	1	Areia fina siltosa c/ mat. Org.				75
2	0,5	Areia fina siltosa solta	1	6	12,5	
3	0,5	Silte argiloso				
4	1	Areia fina a média median. compacta	2	23	33,8	155
5	0,55	Areia fina silto-argilosa median. compacta	3	12	14,3	85
6	1,45	Areia fina siltosa compacta	4	45	52,4	210
7	1	Silte argiloso rijo	5	48	49,8	
8	3,29	Areia fina siltosa muito compacta	6	72	75,8	345
			7	120	116,6	
			8	120	108,7	
			9	128,6	109,6	

Quadro 44 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem SP14

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	0,4	Silte arenoso c/ mat. Org.				
2	18,6	Areia fina siltosa median. a muito compacta	1	44	115,0	210
			2	41	65,6	
			3	39	49,0	
			4	26	31,4	
			5	30	32,1	
			6	39	42,3	
			7	66,7	66,6	
			8	72	67,0	
			9	78,3	68,4	
			10	81,8	71,3	
			11	72	59,7	
			12	85,7	67,9	
			13	90	68,5	
			14	72	52,7	
			15	64,3	45,4	
			16	50	34,2	
			17	32	21,2	
			18	41	26,8	
3	1	Areia fina siltosa c/ seixo muito compacta	19	120	77,4	275
4	7,29	Areia fina siltosa c/ seixo	20	50	31,9	200
			21	35	22,0	
			22	90	56,0	
			23	90	55,3	
			24	85,7	52,1	
			25	78,3	47,0	
			26	94,7	56,3	
			27	128,6	75,6	

Quadro 45 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem SP15

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	12,5	Lodo argiloso muito mole a mole	1	3	6,4	15
			2	3	5,3	
			3	1	1,6	

			4	0	0,0	
			5	0	0,0	
			6	0	0,0	
			7	0	0,0	
			8	0	0,0	
			9	0	0,0	
			10	0	0,0	
			11	0	0,0	
			12	0	0,0	
2	0,5	Areia média c/ seixo				295
3	3,29	Silte argiloso muito duro	13	30	35,9	
			14	57	65,2	
			15	90	98,7	
			16	129	135,6	

Quadro 46 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem SP16

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	0,4	Argila siltosa c/ mat. Org.				15
2	11,6	Lodo argiloso c/ conchas muito mole a mole	1	4	8,3	
			2	1	1,7	
			3	0	0,0	
			4	0	0,0	
			5	0	0,0	
			6	0	0,0	
			7	0	0,0	
			8	0	0,0	
			9	0	0,0	
			10	0	0,0	
11	0	0,0				
3	1	Areia fina leve/ lodosa	12	8	9,3	60
4	4	Areia de gran. Var. c/ seixo median. compacta	13	18	20,0	120
			14	20	21,3	
			15	23	23,6	
			16	27	26,7	
5	3,4	Areia fina siltosa compacta a muito compacta	17	46	44,0	240
			18	90	83,1	
			19	60	53,6	
			20	72	62,4	

Quadro 47 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem SP17

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	1	Silte argiloso c/ mat. Org.				
2	16	Lodo argiloso c/ conchas muito mole a mole	1	3	6,2	15
			2	0	0,0	
			3	0	0,0	
			4	0	0,0	
			5	0	0,0	
			6	0	0,0	
			7	0	0,0	
			8	0	0,0	
			9	0	0,0	
			10	0	0,0	
			11	0	0,0	
			12	0	0,0	
			13	0	0,0	
			14	0	0,0	
			15	0	0,0	
			3	2	Areia fina silto-argilosa leve/ lodosa c/ seixo muito mole a mole	
17	2	2,0				
4	2,5	Cascalheira em mat. arenosa gross. median. compacta	18	3	3,0	125
			19	12	11,6	
			20	23	21,6	
5	3,75	Silte argiloso rijo cinzento	21	38	34,7	360
			22	30	26,7	
			23	90	78,1	
			24	129	108,8	
			25	180	148,8	

Quadro 48 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem SP18

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	(N ₁) ₆₀	G _{max} (MPa)
1	0,3	Silte areno-argiloso c/ mat. Org.				55
2	1,25	Areia fina leve/siltosa solta	1	4	7,6	
3	4,45	Areia fina silto-argilosa leve/lodosa solta	2	7	10,7	
			3	4	5,4	
			4	7	9,7	
			5	4	5,1	
4	3	Lodo argiloso de consistência média	6	5	6,6	15
			7	1	1,3	
			8	1	1,2	
5	2	Areia fina leve/silto-argilosa e lodosa c/ seixo solta	9	4	4,6	30
			10	2	2,3	
6	3	Argila lodosa muito mole a mole	11	3	3,3	
			12	2	2,1	
			13	3	3,1	
7	4,5	Areia fina silto-argilosa leve/lodosa c/ seixo muito solta a median. compacta	14	6	5,9	55
			15	6	5,7	
			16	11	10,2	
			17	7	6,3	
8	2,5	Areia fina silto-argilosa c/ seixo solta	18	8	7,0	
			19	8	6,8	
9	1	Silte argiloso rijo	20	9	7,5	220
10	1,38	Grés	21	48	39,0	
			22	72	56,9	
			23	78	60,3	

Quadro 49 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem SP19

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	0,3	Silte areno-argiloso c/ mat. Org.				60
2	2,7	Areia fina silto-argilosa c/ conchas muito solta	1	4	8,3	
			2	0	0,0	
3	3	Argila siltosa leve/lodosa de consistência média	3	5	6,8	
			4	7	10,0	
			5	8	10,6	
4	1,5	Areia fina siltosa muito solta	6	3	4,2	
			7	3	3,9	
5	6,5	Lodo argiloso muito mole a mole	8	1	1,3	
			9	0	0,0	
			10	0	0,0	
			11	0	0,0	
			12	0	0,0	
			13	4	4,5	
6	4	Areia fina silto-argilosa c/ seixo e conchas solta a median. compacta	14	7	7,6	
			15	11	11,6	
			16	5	5,1	
			17	9	8,9	
7	3,37	Areia fina siltosa c/ seixo compacta a muito compacta	18	38	36,7	
			19	53	49,7	
			20	72	65,7	
			21	81,8	72,6	

Quadro 50 – Valores de $(N_1)_{60}$ e de G_{max} ao longo da sondagem SP20

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	N	$(N_1)_{60}$	G_{max} (MPa)
1	0,3	Silte areno-argiloso c/ mat. Org.				15
2	1,7	Areia fina siltosa solta	1	4	8,3	
3	11	Lodo argiloso de consist. muito mole a média para o topo	2	5	7,3	
			3	7	8,8	
			4	3	4,0	
			5	0	0,0	
			6	0	0,0	

			7	0	0,0	
			8	0	0,0	
			9	0	0,0	
			10	0	0,0	
			11	0	0,0	
			12	0	0,0	
4	0,4	Areia fina com seixo solta	13	7	7,8	55
5	2,6	Silte argiloso muito duro a rijo	14	16	17,1	125
			15	31	32,0	
6	3,26	Grés	16	48	48,0	315
			17	94,7	91,7	
			18	90	84,5	
			19	164	149,3	

4 - AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE SÍTIO

A importância das condições locais nos efeitos sísmicos está hoje em dia definitivamente estabelecida. O efeito de filtragem introduzido pelos estratos mais superficiais, e relativamente deformáveis, na propagação das ondas sísmicas desde a fonte de perturbação até ao local analisado, causa alterações significativas nas características do movimento do solo. Estas alterações repercutem-se na amplitude e no conteúdo em frequência do movimento. Dependem, entre outros aspectos, da geometria, da rigidez e da resistência das formações superficiais, do conteúdo em frequência das ondas sísmicas incidentes e da duração da perturbação sísmica. Em função das características locais, os efeitos introduzidos poderão ser no sentido de potenciar a capacidade danificadora do movimento sísmico, ou, pelo contrário, diminuir a severidade da sua acção.

A avaliação desta problemática é habitualmente designada por análise (ou efeito sísmico) de sítio, expressando-se nesta designação a especificidade que, de uma forma pelo menos conceptual, as consequências de um sismo podem assumir num dado local.

O objectivo da análise de sítio, isto é, a estimação do carácter particular que o movimento de origem sísmica assume num dado local, justifica a relevância da sua realização no estudo presente, na medida em que se prende com uma extensa área em que serão construídos, sobre um subsolo com estratificação complexa, edifícios e infra-estruturas vitais, com índole e características diversas.

4.1 - METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DO EFEITO SÍSMICO DE SÍTIO

A complexidade dos fenómenos envolvidos na propagação das perturbações sísmicas legitima que se adoptem simplificações no que respeita aos modos e às

direcções de propagação, sob pena de a exequibilidade das análises de sítio resultar bastante reduzida.

A forma mais simplificada de proceder a essa análise, mas ainda assim capaz de reter alguns aspectos fundamentais do fenómeno, consiste em admitir que a acção sísmica resulta da propagação de ondas volúmicas de corte segundo a direcção vertical.

Desta simplificação resulta um modelo unidimensional em que o movimento excitador é definido na base de uma coluna representativa da geometria e das propriedades mecânicas dos solos subjacentes ao local analisado.

A resolução da equação de movimento representativa do equilíbrio dinâmico da coluna pode ser efectuada por diversas técnicas, de entre as quais ressalta o método da análise de resposta complexa, no domínio da frequência, posta em prática no programa SHAKE 91, o qual foi utilizado no presente relatório. A análise efectuada pode ser descrita como não linear do ponto de vista mecânico, com linearização equivalente iterativa.

Dado o enorme volume de cálculo envolvido na análise de sítio em 9 perfis do local de Rio Frio e, igualmente, em 9 perfis do local da Ota, foi ainda utilizado na preparação dos dados e pós-processamento dos resultados o programa SHAKEDIT.

Os dados necessários à resolução do problema de efeito de sítio com o programa SHAKE 91 são os seguintes:

- geometria da estratificação subjacente ao local;
- propriedades físicas dos solos e do semi-espaço elástico subjacente: peso volúmico;
- propriedades mecânicas dos solos:
 - a) módulo de distorção secante máximo G_{\max} (válido para muito pequenas deformações) ou, alternativamente, a velocidade de propagação das ondas de corte;
 - b) lei de degradação do módulo de distorção secante em função da deformação de corte, $G/G_{\max}(\bar{\gamma})$;
 - c) lei de variação do coeficiente de amortecimento hysterético em função da deformação de corte $\beta(\bar{\gamma})$ e, finalmente
 - d) velocidade de propagação das ondas de corte no semi-espaço elástico subjacente ao perfil geotécnico;
- definição da acção sísmica através de histórias de movimento compatíveis com o espectro de resposta e a duração adoptados para o efeito.

De entre os resultados obtidos foram utilizados na avaliação do efeito de sítio nos locais em apreciação os seguintes:

- histórias de aceleração horizontal superficial;

- funções de transferência de aceleração horizontal na base – aceleração horizontal à superfície;
- espectros de resposta de velocidade espectral com amortecimento de 5% (cada um destes foi obtido a partir do correspondente espectro de resposta em aceleração por divisão de cada ordenada espectral de aceleração pela frequência circular de cálculo).

Cada análise dinâmica pode assim ser definida pelos seguintes elementos:

- (i) perfil geotécnico;
- (ii) acelerograma (correspondendo a um dado tipo de acção, 1 ou 2, e a um dado período de retorno, 975 ou 1949 anos).

Os resultados relativos a cada perfil são apresentados sinopticamente através de três espectros de resposta:

- (i) um primeiro, espectro médio, em que cada ordenada espectral é a média amostral de um conjunto de dez ordenadas com a mesma frequência;
- (ii) um segundo, espectro superior, em que cada ordenada espectral foi obtida somando à média das dez ordenadas espectrais o respectivo desvio padrão amostral corrigido e,
- (iii) um terceiro e último espectro, espectro inferior, em que cada ordenada espectral representa a média amostral das dez ordenadas espectrais subtraído do desvio padrão.

Com base nas informações recolhidas nos estudos geotécnicos disponibilizados pela NAER foi possível sintetizar as propriedades geotécnicas relevantes para esta análise. Cada perfil geotécnico é definido pela sequência estratigráfica adoptada e, para cada estrato, pelos valores estimados do módulo de distorção máximo (representado nas Figuras que se seguem por G), ou da velocidade de propagação das ondas de corte, V_s , e do peso volúmico (representado nas Figuras que se seguem por γ) e pelas curvas de degradação das propriedades, mais adequadas ao tipo de solo encontrado, em função da distorção, $\bar{\gamma}$ ($G/G_{\max}(\bar{\gamma})$ e $\beta(\bar{\gamma})$).

Apresentam-se seguidamente os resultados referentes a cada um dos locais para o período de retorno de 975 anos (ou uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos).

4.2 - ANÁLISE DO EFEITO DE SÍTIO NO LOCAL DE RIO FRIO

Foram considerados 9 perfis geotécnicos, referenciados pelas letras A, B, C1, C2, D1, D2, E1, E2 e E3. A descrição de cada perfil é efectuada por uma representação esquemática do modelo geotécnico adoptado. Por sua vez, os resultados referentes ao movimento superficial de origem sísmica são apresentados através dos espectros de resposta referidos em 4.1. Em todos os perfis considerou-se que o efeito dissipativo devido à dispersão das ondas sísmicas ocorria num semi-espaço subjacente ao perfil, com velocidade de propagação das ondas S igual a 780 m/s.

Os perfis A e B foram idealizados com o objectivo de estabelecer uma envolvente máxima e mínima dos valores do módulo de distorção G_{max} estimados em profundidade para cada sondagem. Os restantes perfis correspondem a perfis geotécnicos estimados com base nos resultados de sondagens concretas.

O Quadro 51 resume os valores médios das acelerações superficiais obtidas em cada conjunto de dez análises, cada uma das quais referente à combinação de um perfil geotécnico (A a E3) com um tipo de acção (Tipos 1 e 2).

Quadro 51 – Valores de pico médios de aceleração horizontal à superfície em Rio Frio (m/s^2)

Perfil	A	B	C1	C2	D1	D2	E1	E2	E3
Acção Tipo 1	1,09	1,86	2,61	2,53	2,52	2,43	2,40	2,37	2,46
Acção Tipo 2	0,89	1,39	1,31	1,20	1,31	1,26	1,35	1,25	1,23

4.2.1 - Perfil A

O perfil A resulta da consideração de um perfil homogéneo fictício, sendo o valor do respectivo módulo de distorção G_{max} tomado igual ao valor máximo dos correspondentes valores estimados nos perfis C1 a E3. O perfil simplificado encontra-se representado na Figura 16. Os espectros de resposta referentes ao perfil A encontram-se, por sua vez, representados nas Figuras 17 e 18.

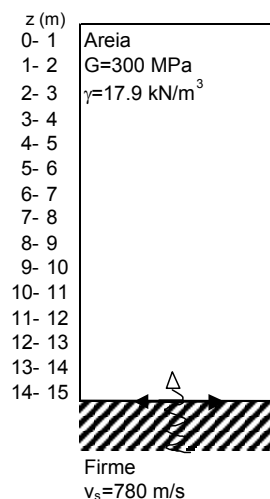


Figura 16– Lugar de Rio Frio: Perfil geotécnico simplificado A

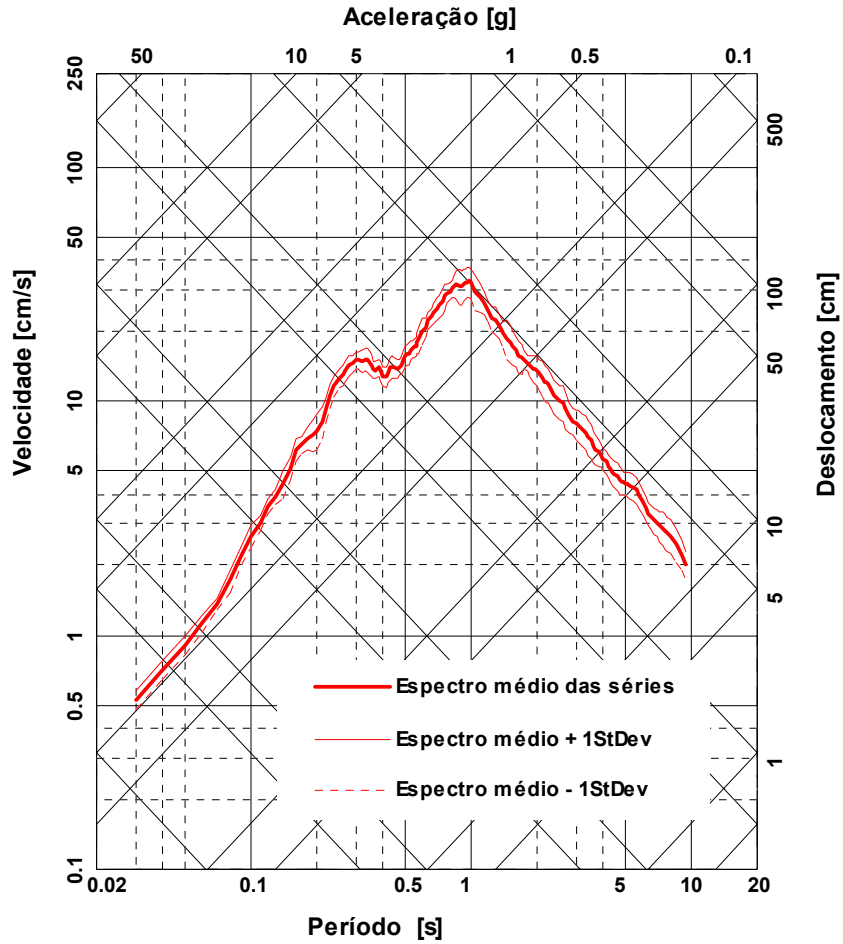


Figura 17 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 1 no perfil A de Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%

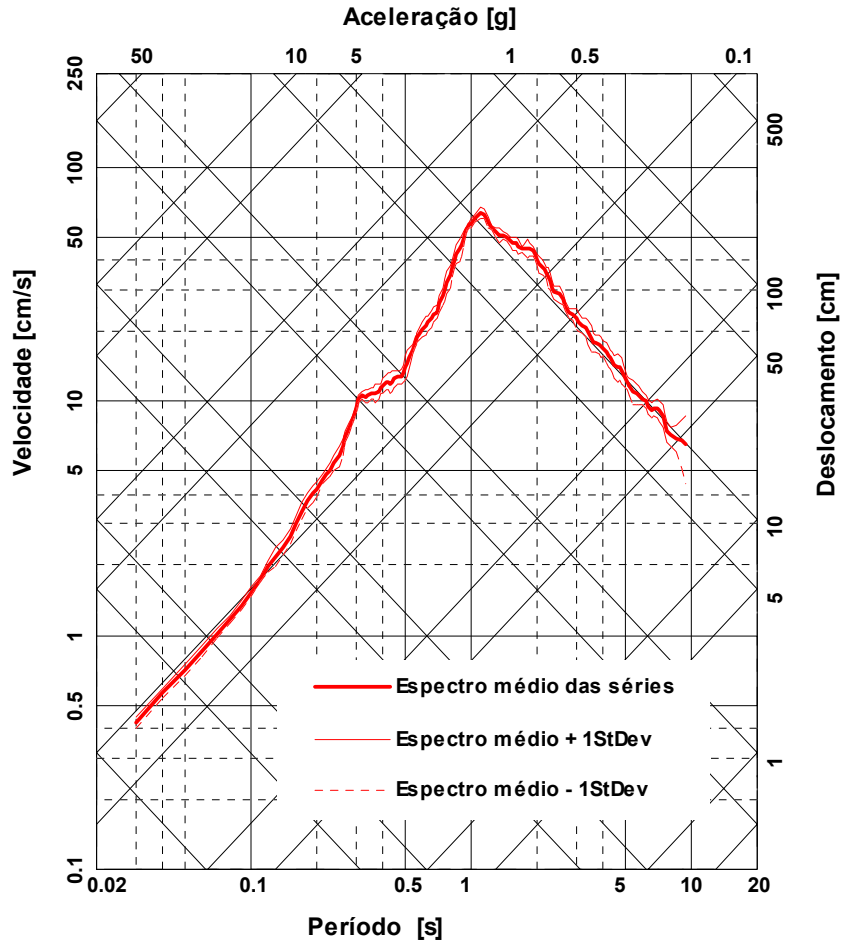


Figura 18 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 2 no perfil A de Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%

4.2.2 - Perfil B

O perfil B resulta da consideração de um perfil homogéneo fictício, sendo o valor do respectivo módulo de distorção G_{max} tomado igual ao valor mínimo dos correspondentes valores estimados nos perfis C1 a E3. O perfil simplificado encontra-se representado na Figura 19. Os espectros de resposta referentes ao perfil B encontram-se, por sua vez, representados nas Figuras 20 e 21.

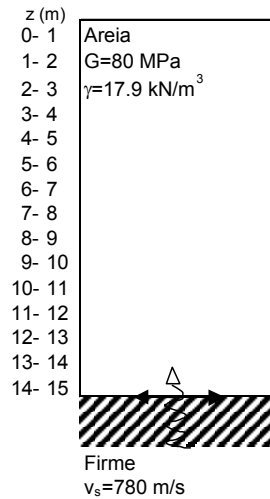


Figura 19– Lugar de Rio Frio: Perfil geotécnico simplificado B

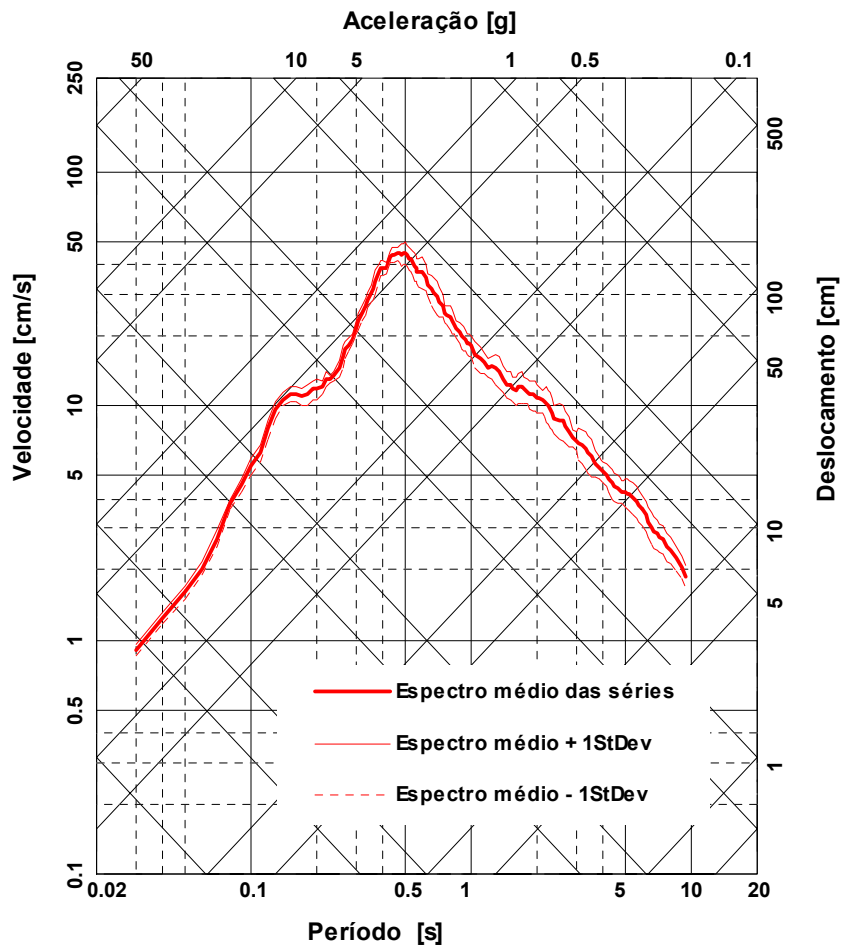


Figura 20 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 1 no perfil B de Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

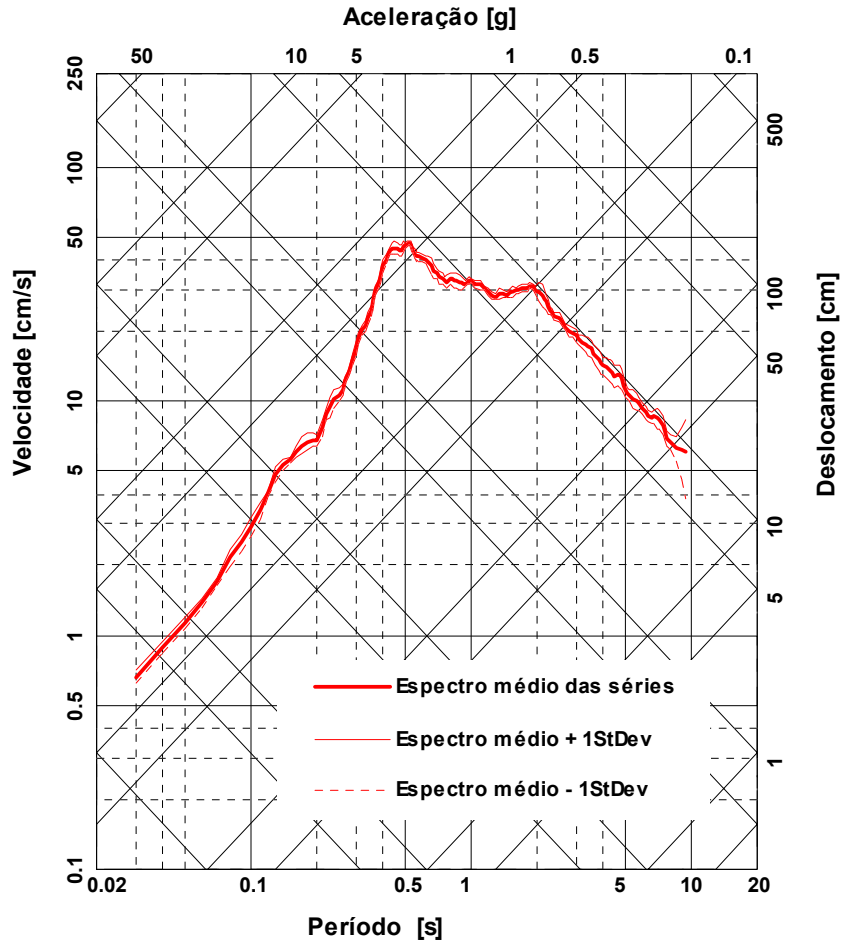


Figura 21– Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 2 no perfil B de Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

4.2.3 - Perfil C1

O perfil C1 corresponde ao local de execução da sondagem 1-2 de cuja consulta foram estimadas as características apresentadas no Quadro 14. O perfil simplificado encontra-se representado na Figura 22. Os espectros de resposta referentes ao perfil C1 encontram-se, por sua vez, representados nas Figuras 23 e 24.

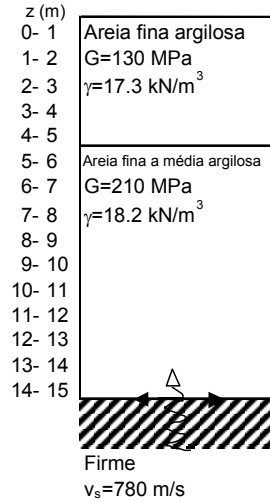


Figura 22 – Lugar de Rio Frio: Perfil geotécnico simplificado C1 (sondagem 1-2)

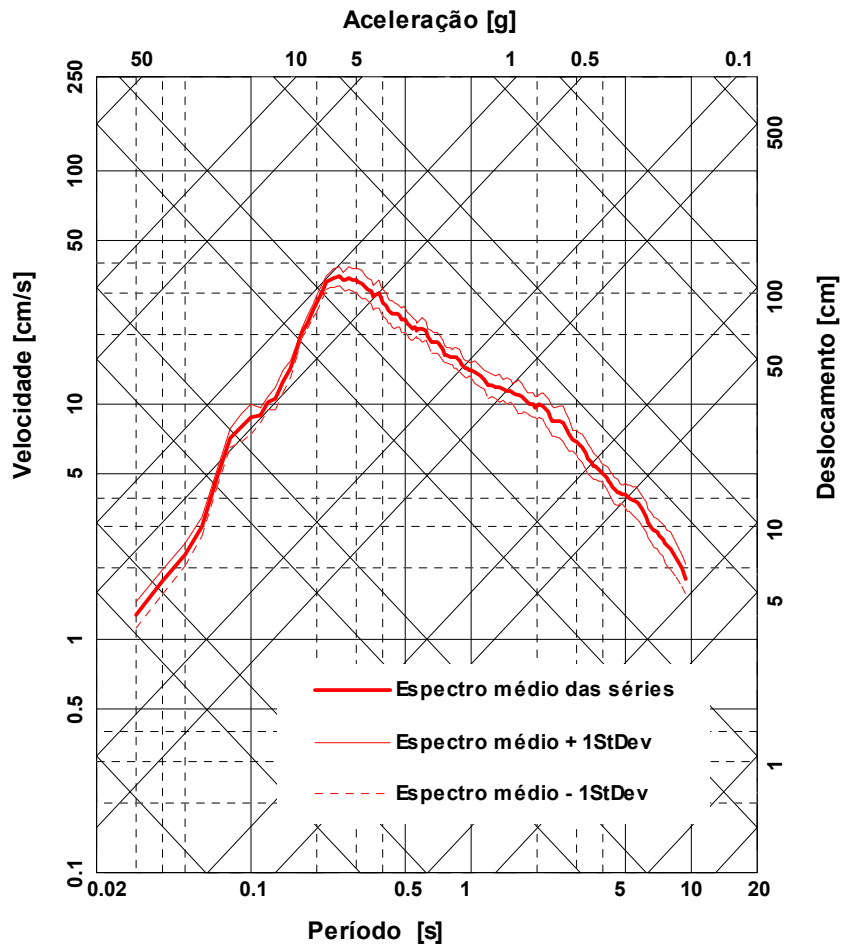


Figura 23– Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à ação tipo 1 no perfil C1 de Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

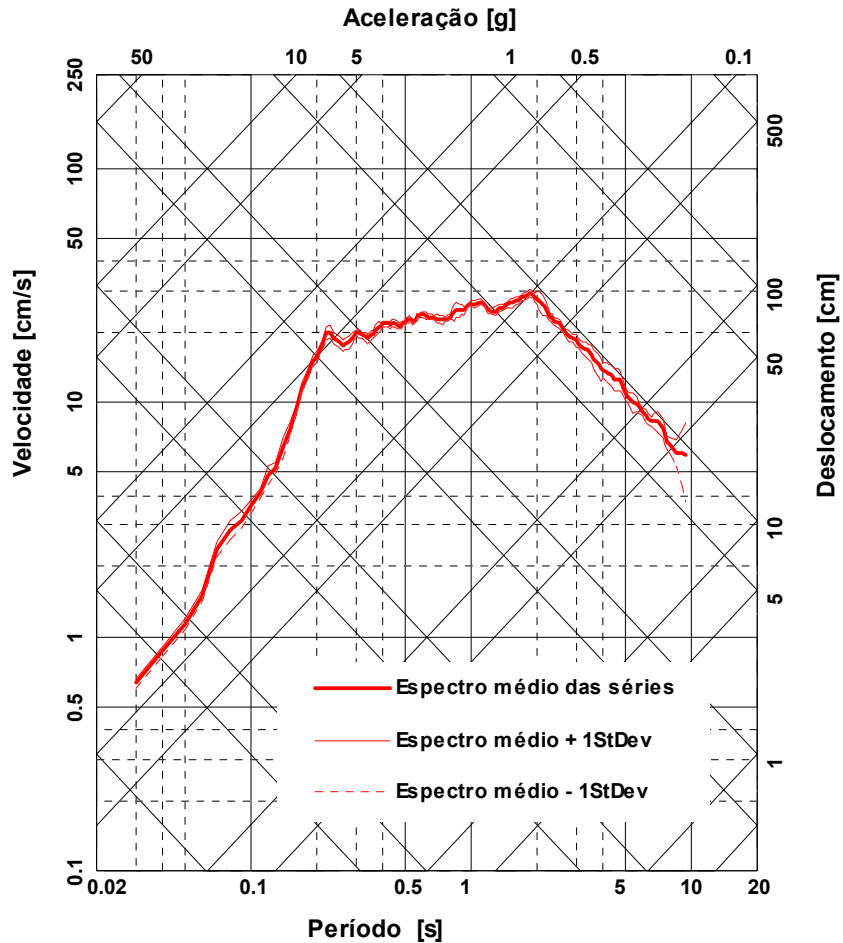


Figura 24— Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à ação tipo 2 no perfil C1 de Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

4.2.4 - Perfil C2

O perfil C2 corresponde ao local de execução da sondagem 1-3 de cuja consulta foram estimadas as características apresentadas no Quadro 15. O perfil simplificado encontra-se representado na Figura 25. Os espectros de resposta referentes ao perfil C2 encontram-se, por sua vez, representados nas Figuras 26 e 27.

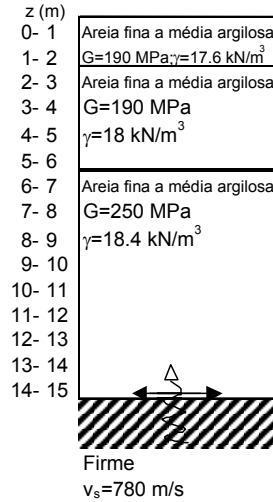


Figura 25– Lugar de Rio Frio: Perfil geotécnico simplificado C2 (sondagem 1-3)

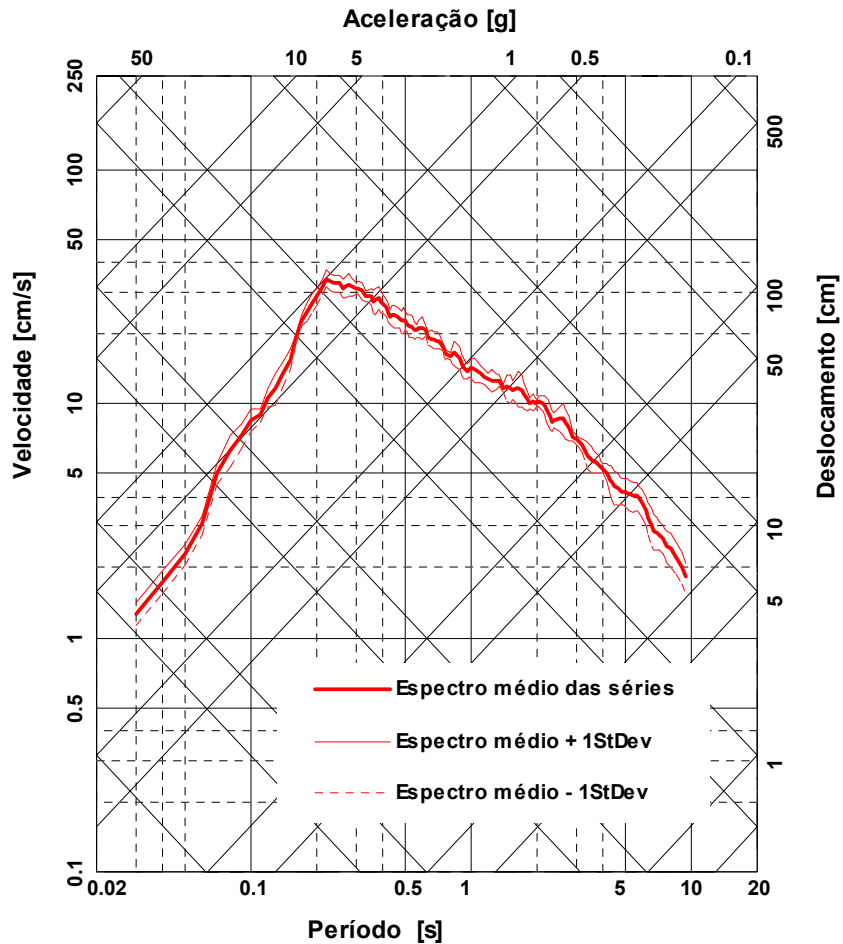


Figura 26 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 1 no perfil C2 de Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

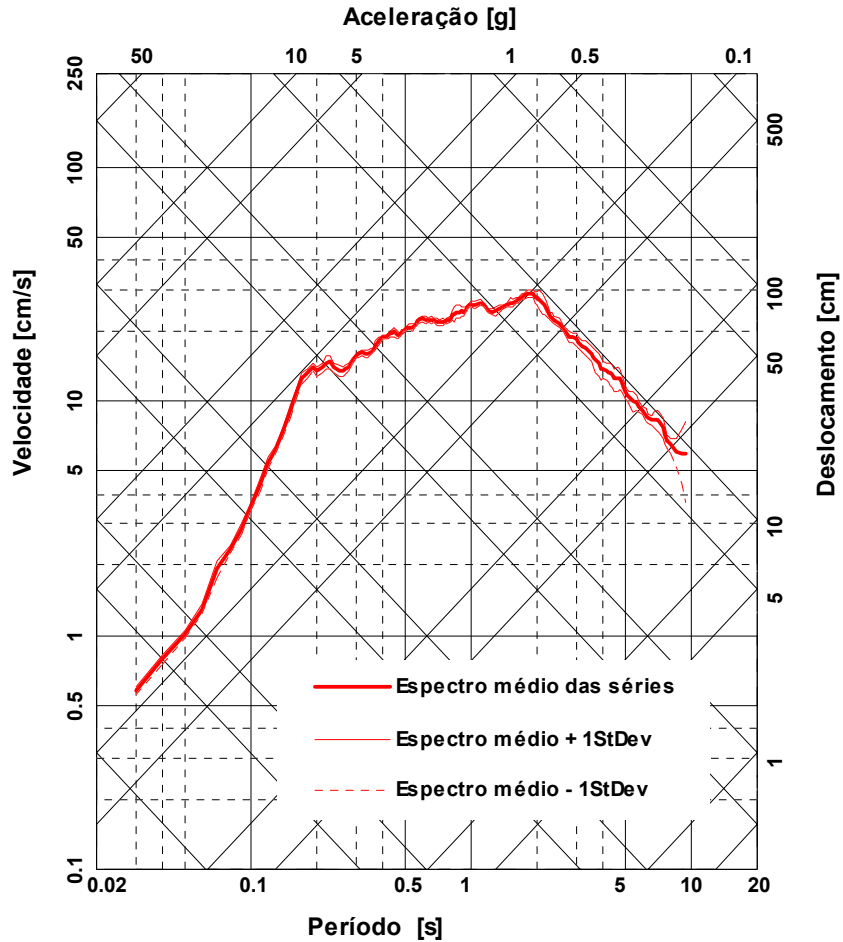


Figura 27 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 2 no perfil C2 de Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

4.2.5 - Perfil D1

O perfil D1 corresponde ao local de execução da sondagem S-7 de cuja consulta foram estimadas as características apresentadas no Quadro 12. O perfil simplificado encontra-se representado na Figura 28. Os espectros de resposta referentes ao perfil D1 encontram-se, por sua vez, representados nas Figuras 29 e 30.

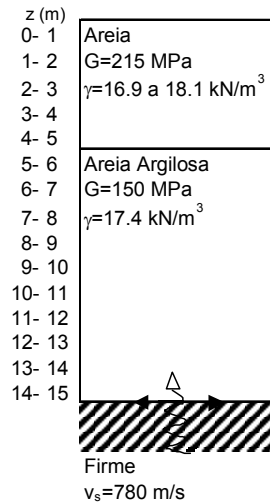


Figura 28 – Lugar de Rio Frio: Perfil geotécnico simplificado D1 (sondagem S-7)

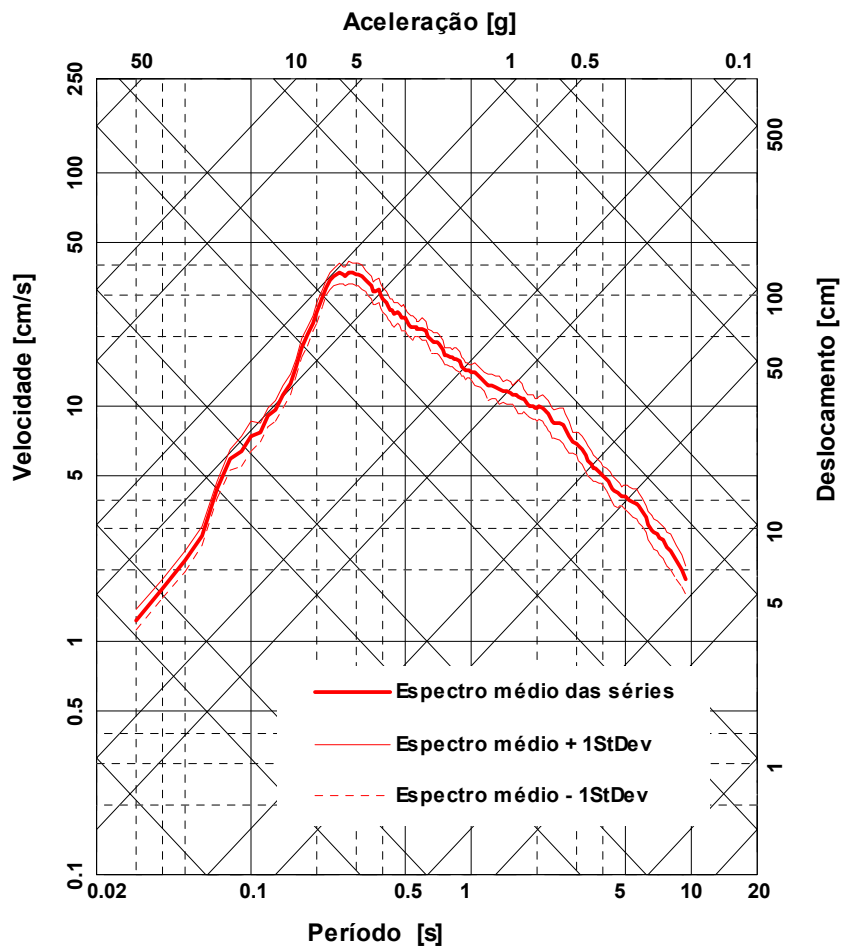


Figura 29– Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à ação tipo 1 no perfil D1 de Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

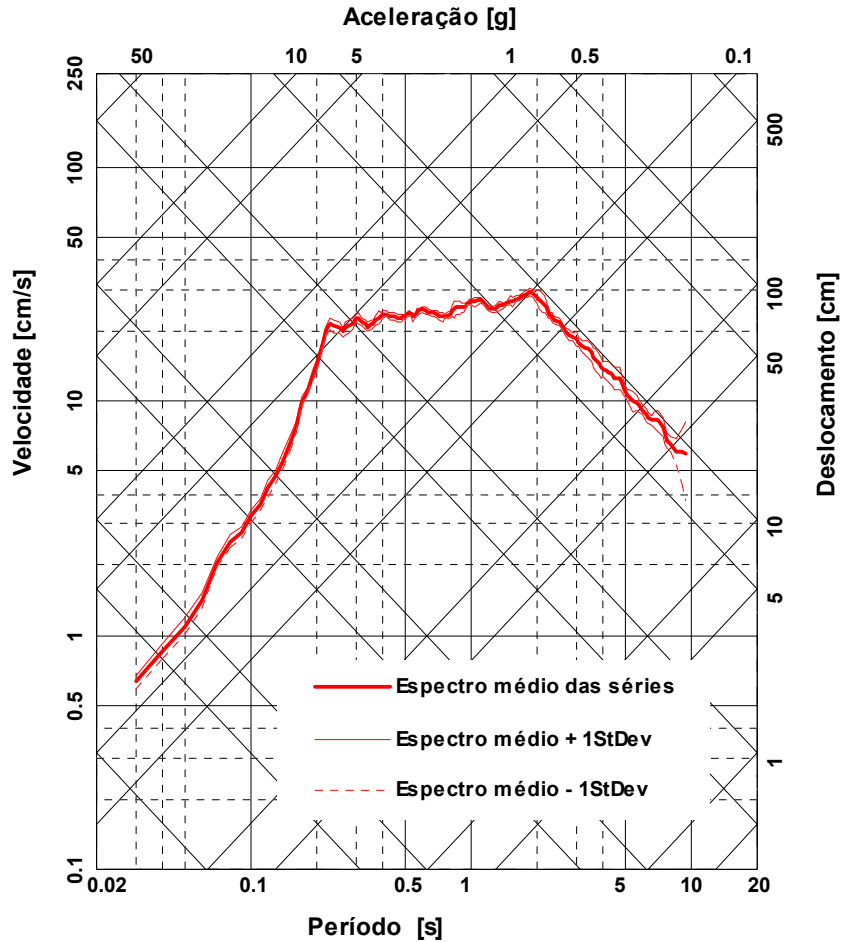


Figura 30 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 2 no perfil D1 de Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

4.2.6 - Perfil D2

O perfil D2 corresponde ao local de execução da sondagem 2-2 de cuja consulta foram estimadas as características apresentadas no Quadro 17. O perfil simplificado encontra-se representado na Figura 31. Os espectros de resposta referentes ao perfil D2 encontram-se, por sua vez, representados nas Figuras 32 e 33.

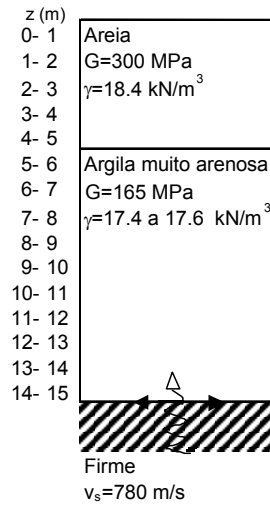


Figura 31 – Lugar de Rio Frio: Perfil geotécnico simplificado D2 (sondagem 2-2)

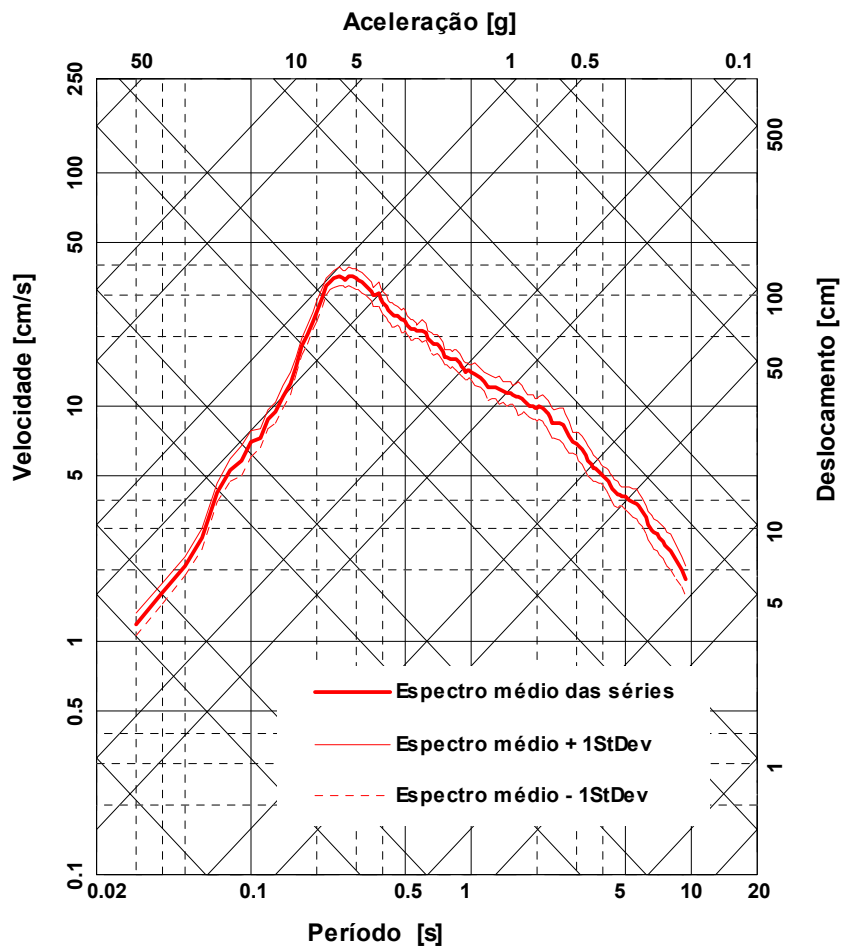


Figura 32 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à ação tipo 1 no perfil D2 de Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

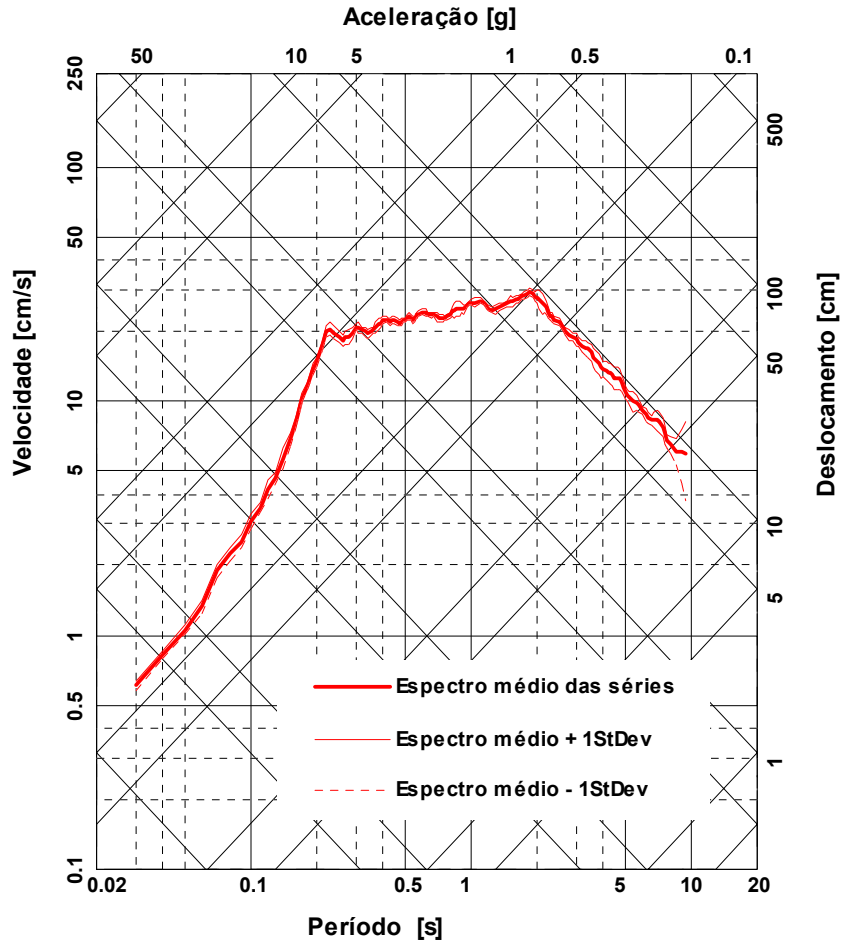


Figura 33 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 2 no perfil D2 de Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

4.2.7 - Perfil E1

O perfil E1 corresponde ao local de execução da sondagem S-6B de cuja consulta foram estimadas as características apresentadas no Quadro 11. O perfil simplificado encontra-se representado na Figura 34. Os espectros de resposta referentes ao perfil E1 encontram-se, por sua vez, representados nas Figuras 35 e 36.

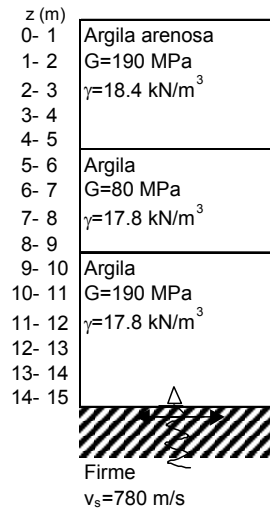


Figura 34 – Lugar de Rio Frio: Perfil geotécnico simplificado E1 (sondagem S-6B)

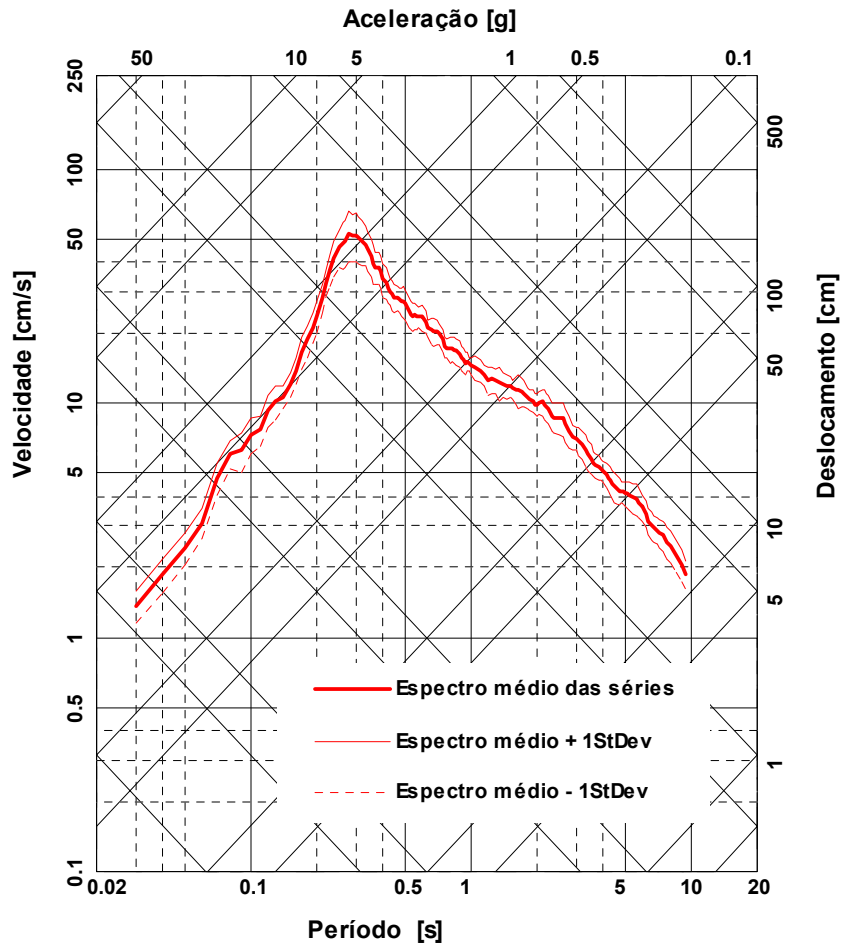


Figura 35 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 1 no perfil E1 de Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

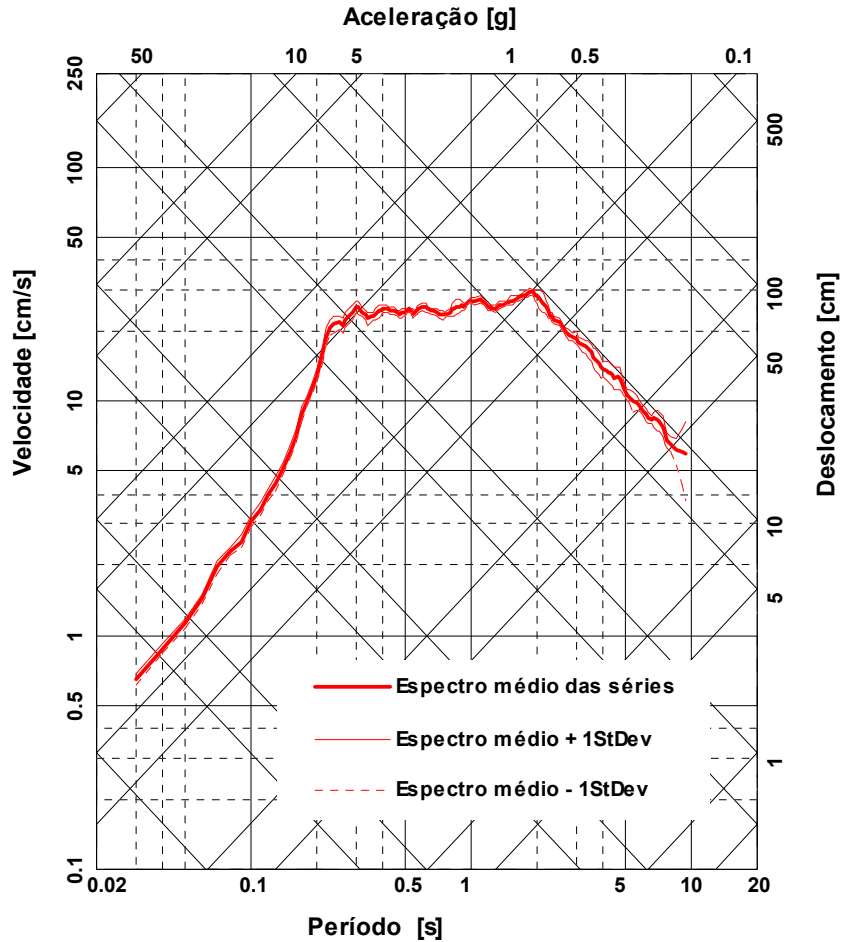


Figura 36– Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 2 no perfil E1 de Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

4.2.8 - Perfil E2

O perfil E2 corresponde ao local de execução da sondagem S-4B de cuja consulta foram estimadas as características apresentadas no Quadro 9. O perfil simplificado encontra-se representado na Figura 37. Os espectros de resposta referentes ao perfil E2 encontram-se, por sua vez, representados nas Figuras 38 e 39.

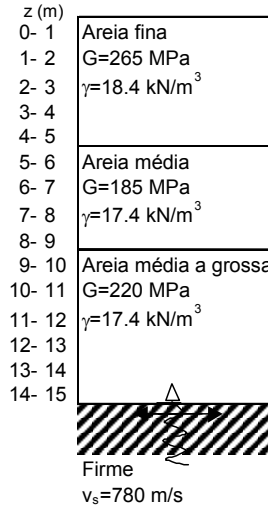


Figura 37 – Lugar de Rio Frio: Perfil geotécnico simplificado E2 (sondagem S-4B)

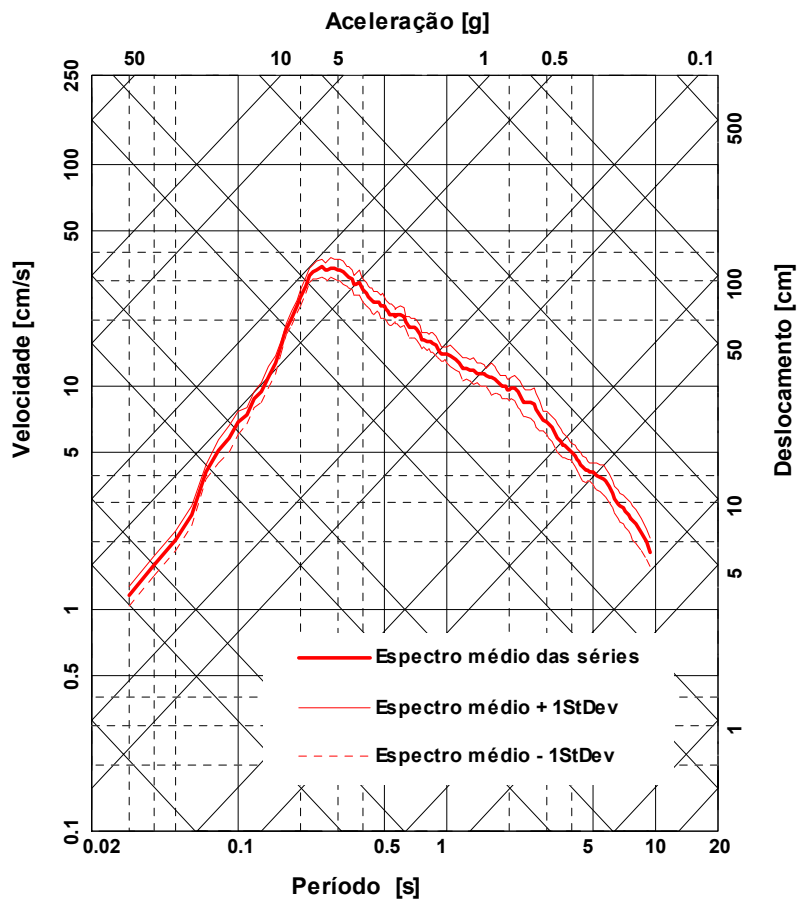


Figura 38 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à ação tipo 1 no perfil E2 de Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

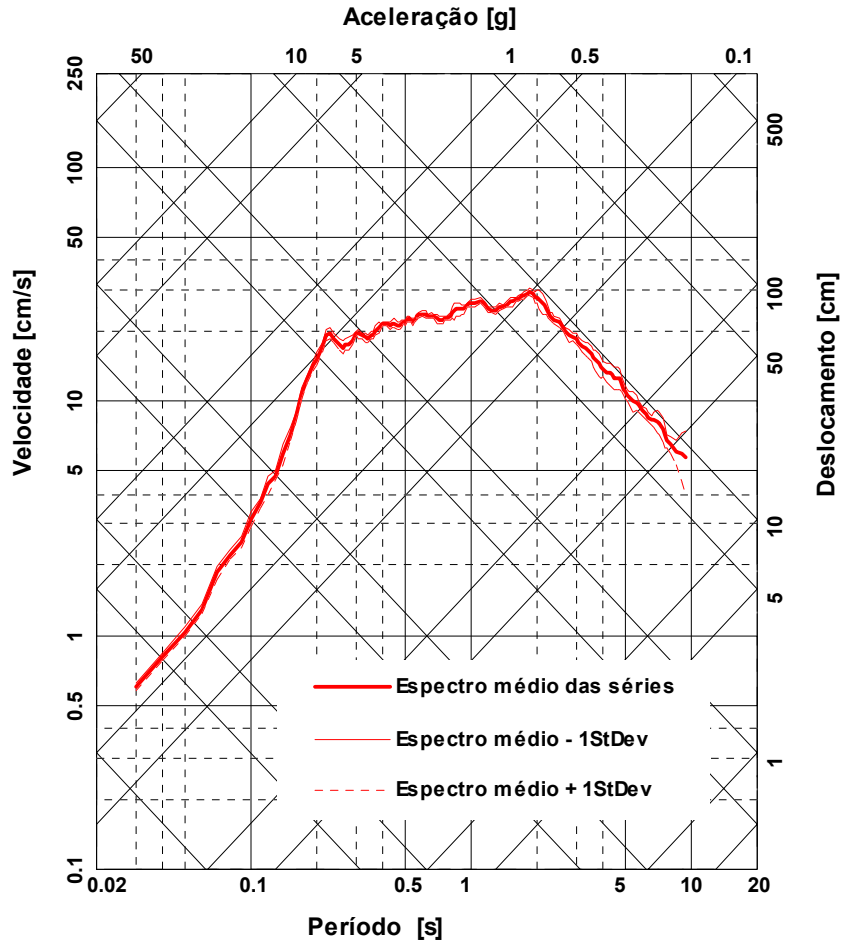


Figura 39– Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 2 no perfil E2 de Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

4.2.9 - Perfil E3

O perfil E3 corresponde ao local de execução da sondagem AC-2 de cuja consulta foram estimadas as características apresentadas no Quadro 22. O perfil simplificado encontra-se representado na Figura 40. Os espectros de resposta referentes ao perfil E3 encontram-se, por sua vez, representados nas Figuras 41 e 42.

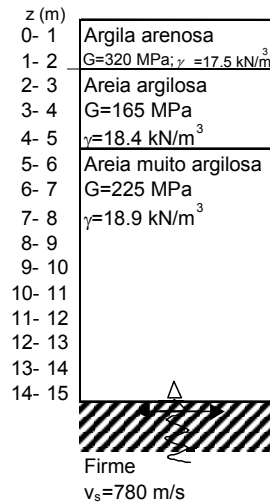


Figura 40– Lugar de Rio Frio: Perfil geotécnico simplificado E3 (sondagem AC-2)

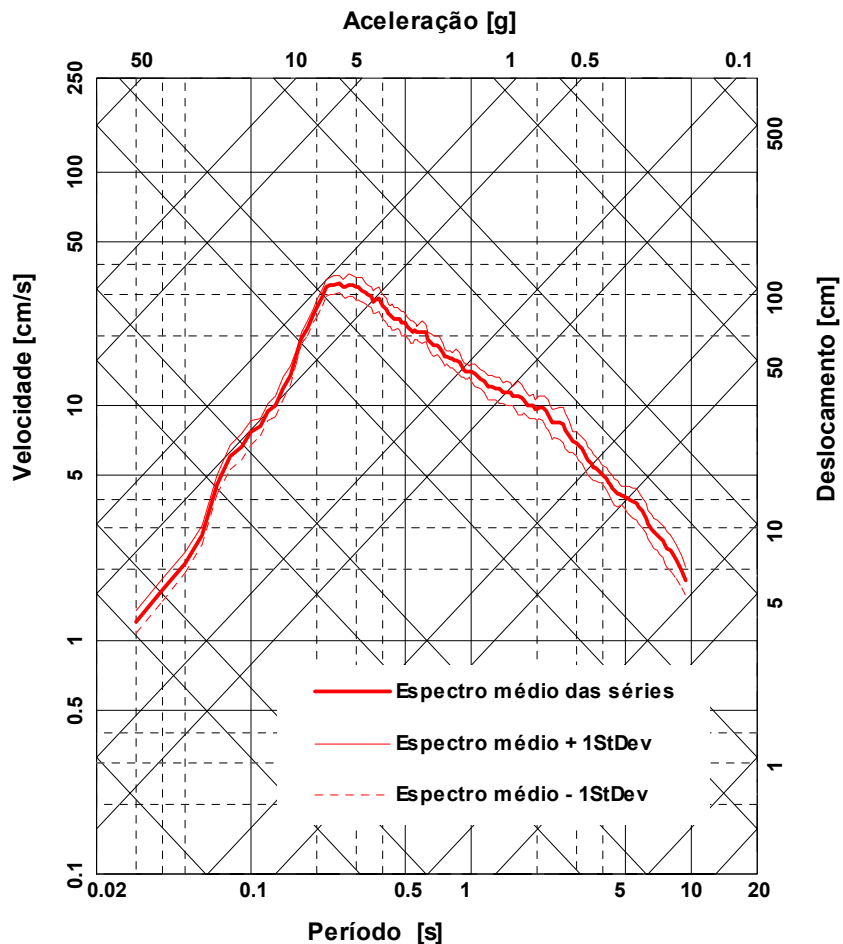


Figura 41– Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 1 no perfil E3 de Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

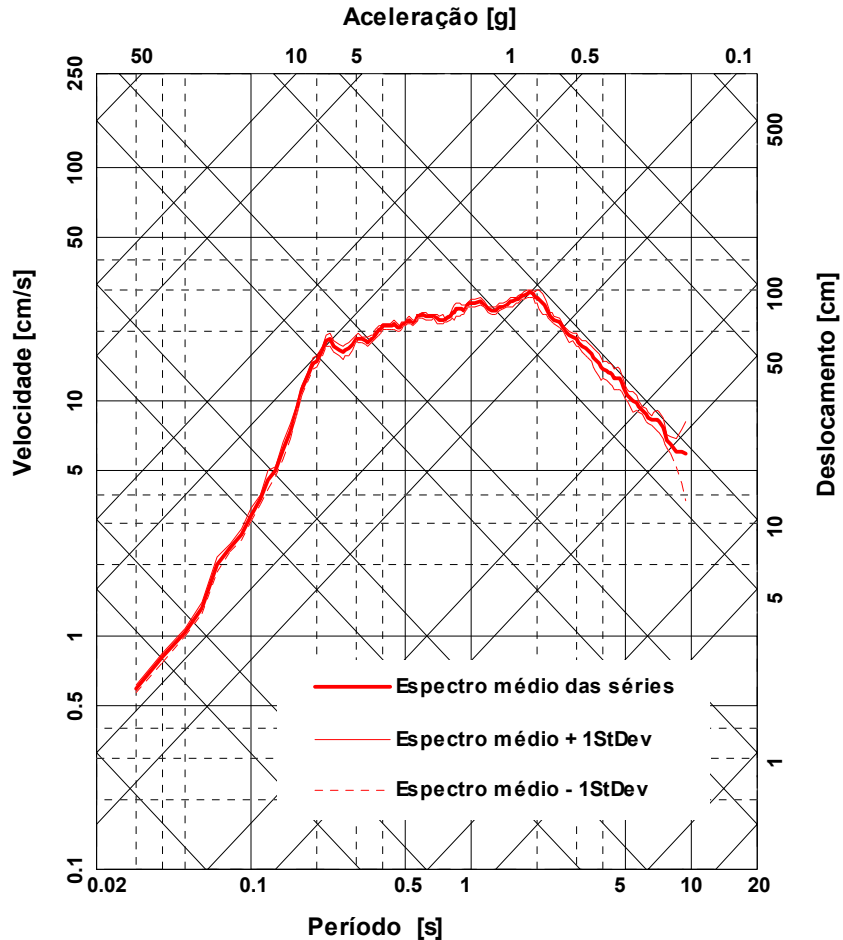


Figura 42– Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 2 no perfil E3 de Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

4.3 - ANÁLISE DO EFEITO DE SÍTIO NO LOCAL DA OTA

Foram considerados 9 perfis geotécnicos referenciados pelas letras A, B, C, D, E, F, G, H e I. A descrição de cada perfil é efectuada por uma representação esquemática do modelo geotécnico adoptado. Por sua vez, os resultados referentes ao movimento superficial de origem sísmica são apresentados através dos espectros de resposta referidos em 4.1.

Em todos os perfis considerou-se que o efeito dissipativo devido à dispersão das ondas sísmicas ocorria num semi-espaço subjacente ao perfil com velocidade de propagação das ondas S igual a 780 m/s.

Os perfis considerados correspondem a perfis geotécnicos estimados com base nos resultados de sondagens concretas.

O Quadro 52 resume os valores médios das acelerações superficiais obtidas em cada conjunto de dez análises, cada uma das quais referente à combinação de um perfil geotécnico (A a I) com um tipo de acção (Tipos 1 e 2).

Quadro 52 – Valores de pico médios de aceleração horizontal à superfície na Ota (m/s²)

Perfil	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Acção Tipo 1	4,90	4,40	3,62	4,44	5,42	4,91	4,35	4,11	4,70
Acção Tipo 2	1,75	1,56	1,42	1,56	2,29	2,03	1,87	1,72	2,21

4.3.1 - Perfil A

O perfil A corresponde ao local de execução da sondagem SP7, da qual foram retiradas as características apresentadas no Quadro 37. O perfil simplificado encontra-se representado na Figura 43. Os espectros de resposta referentes ao perfil A encontram-se, por sua vez, representados nas Figuras 44 e 45.

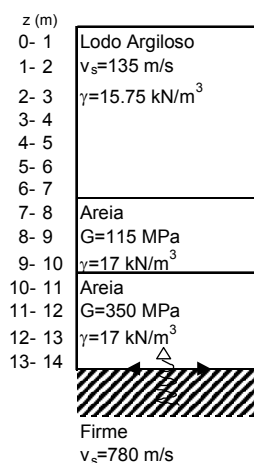


Figura 43– Lugar da Ota: Perfil geotécnico simplificado A (sondagem SP7)

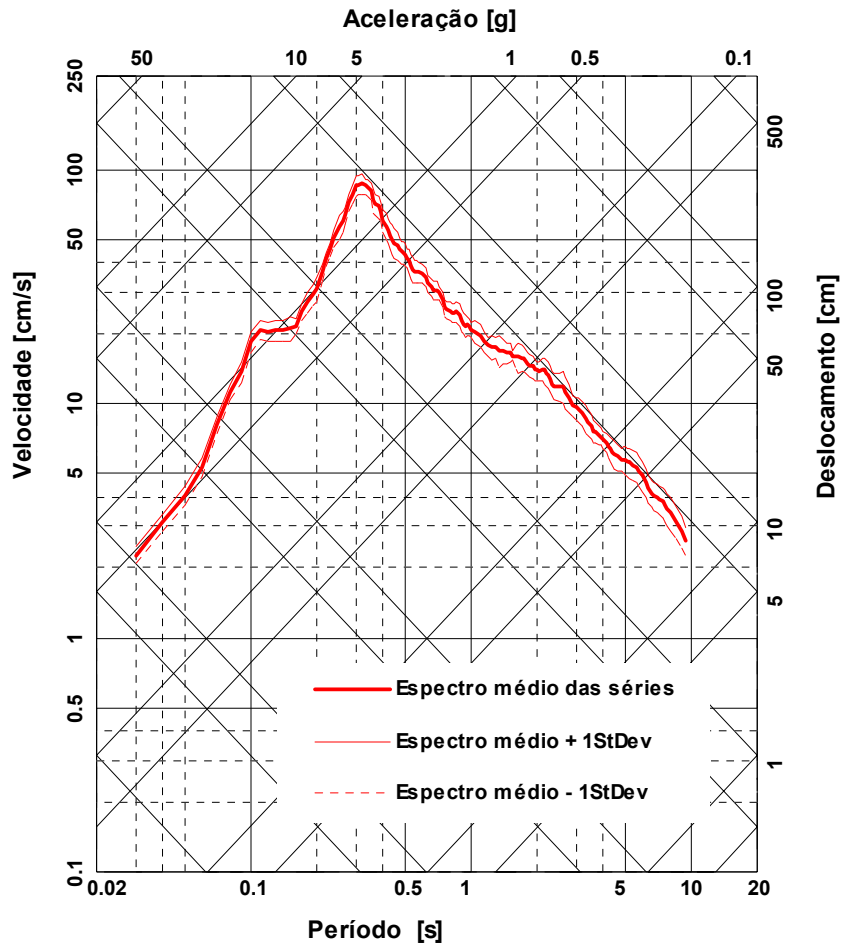


Figura 44 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 1 no perfil A da Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%

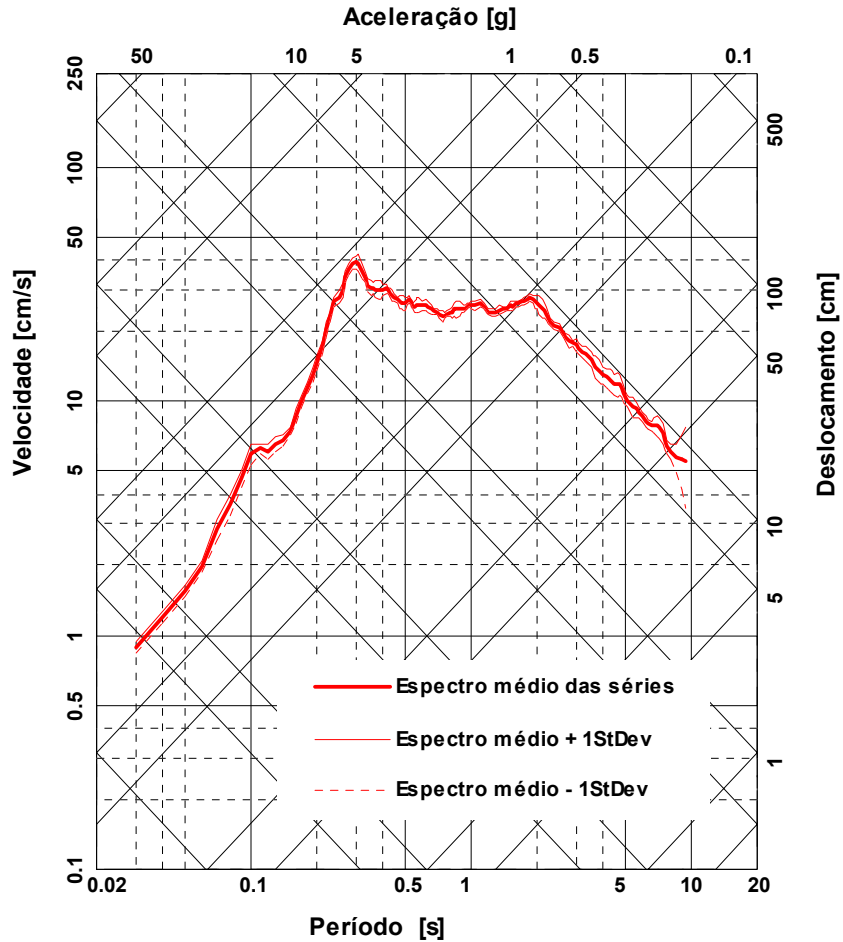


Figura 45 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à ação tipo 2 no perfil A da Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%

4.3.2 - Perfil B

O perfil B corresponde ao local de execução da sondagem SP10 de cuja consulta foram estimadas as características apresentadas no Quadro 40. O perfil simplificado encontra-se representado na Figura 46. Os espectros de resposta referentes ao perfil B encontram-se, por sua vez, representados nas Figuras 47 e 48.

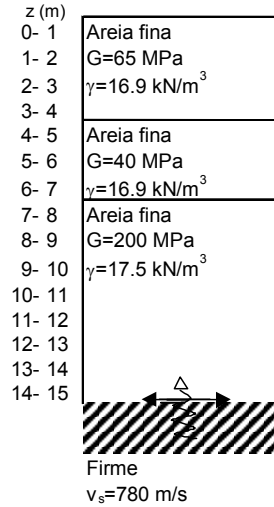


Figura 46– Lugar da Ota: Perfil geotécnico simplificado B (sondagem SP10)

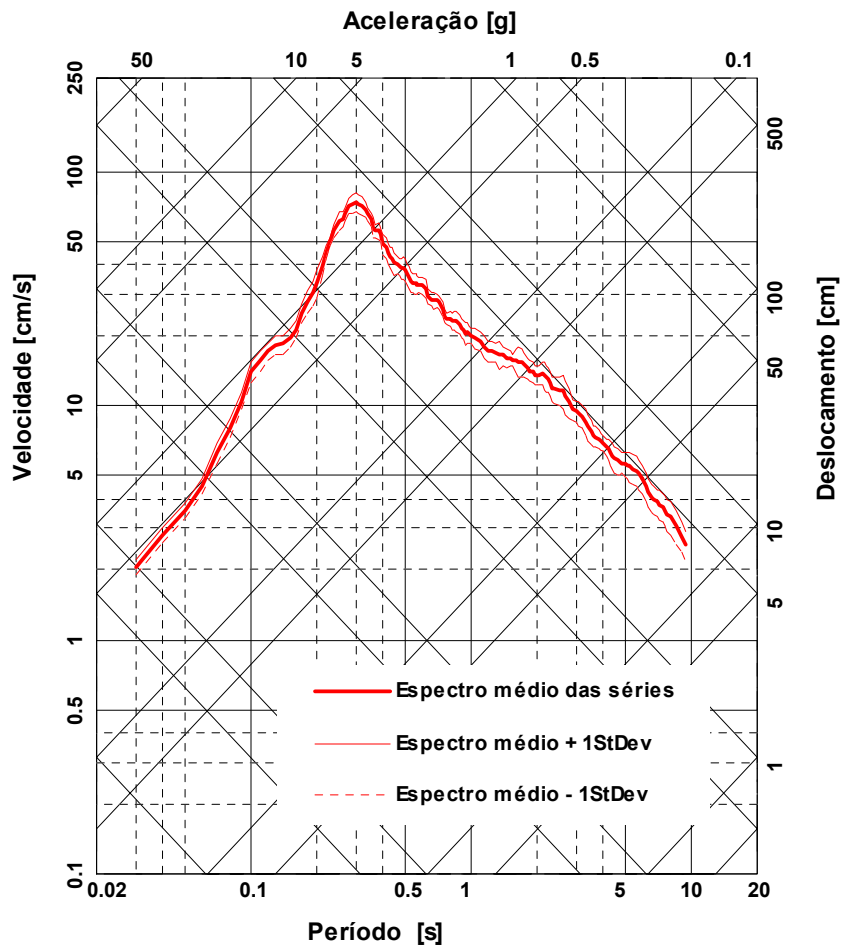


Figura 47 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 1 no perfil B da Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

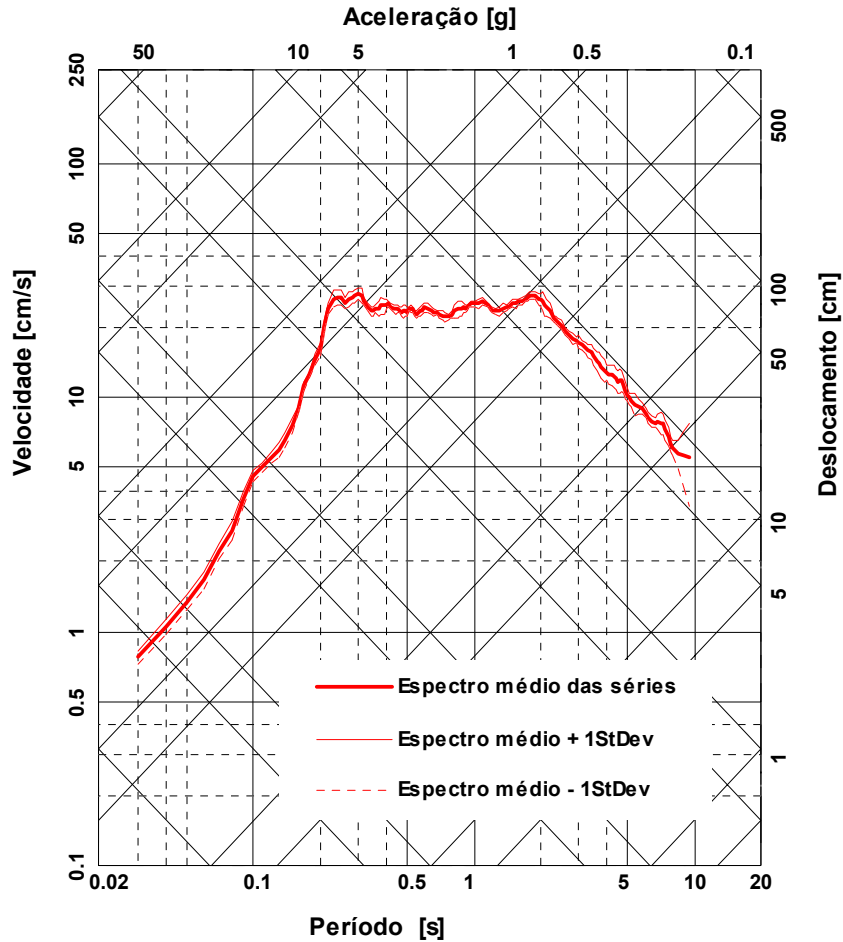


Figura 48– Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à ação tipo 2 no perfil B da Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

4.3.3 - Perfil C

O perfil C corresponde ao local de execução da sondagem SP11 de cuja consulta foram estimadas as características apresentadas no Quadro 41. O perfil simplificado encontra-se representado na Figura 49. Os espectros de resposta referentes ao perfil C encontram-se, por sua vez, representados nas Figuras 50 e 51.

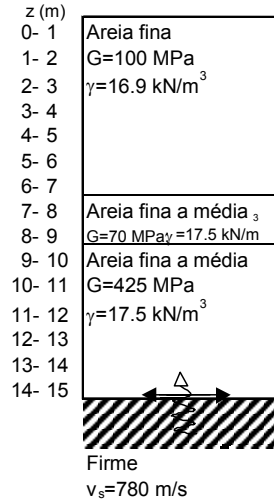


Figura 49 – Lugar da Ota: Perfil geotécnico simplificado C (sondagem SP11)

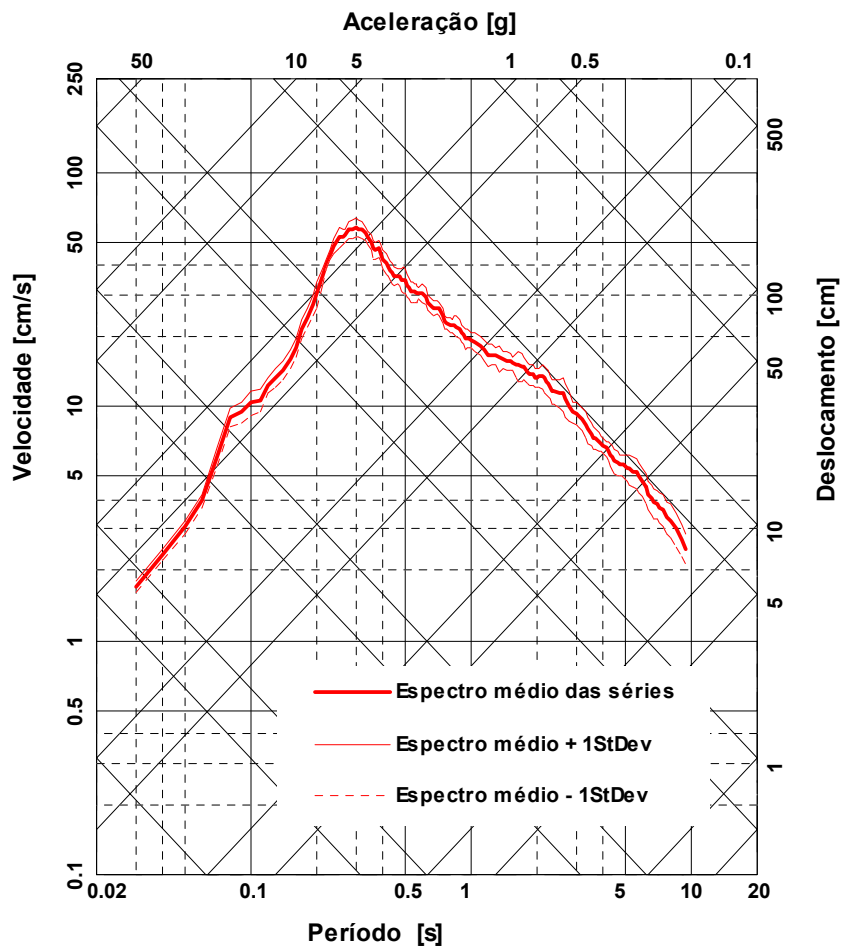


Figura 50– Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 1 no perfil C da Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

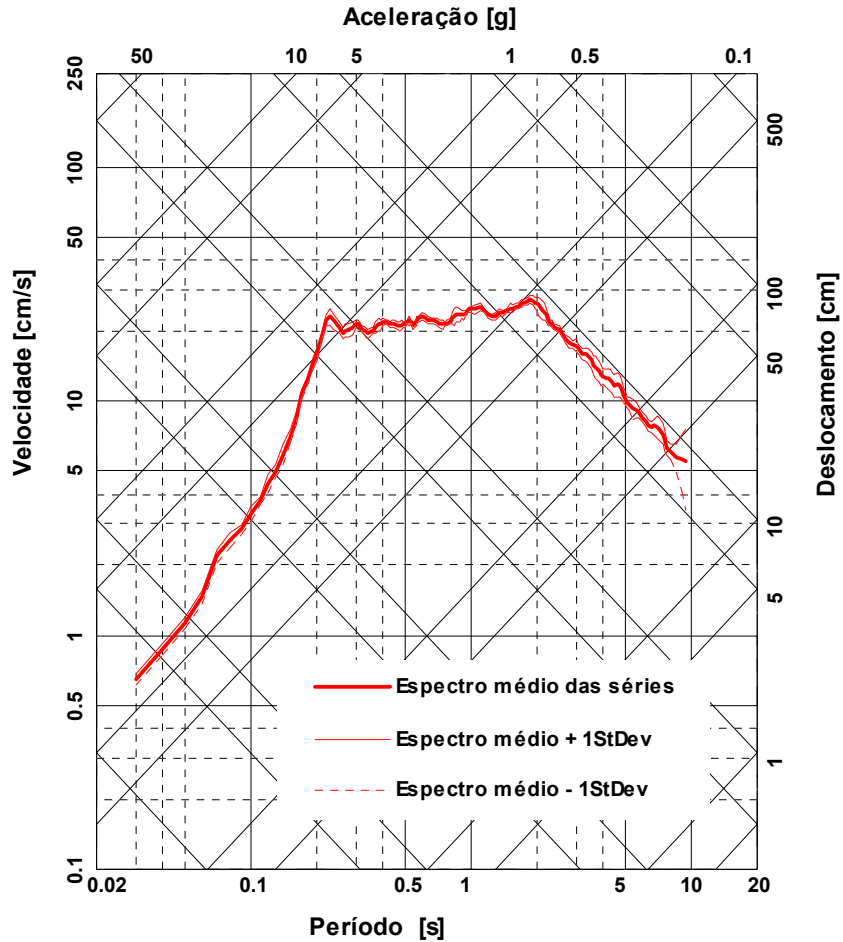


Figura 51– Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 2 no perfil C da Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

4.3.4 - Perfil D

O perfil D corresponde ao local de execução da sondagem SP12 de cuja consulta foram estimadas as características apresentadas no Quadro 42. O perfil simplificado encontra-se representado na Figura 52. Os espectros de resposta referentes ao perfil D encontram-se, por sua vez, representados nas Figuras 53 e 54.

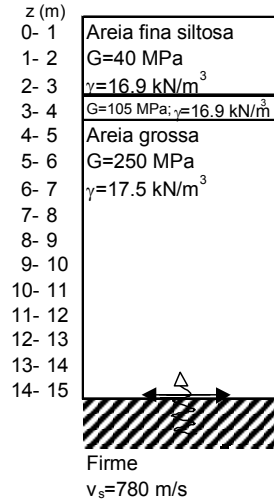


Figura 52– Lugar da Ota: Perfil geotécnico simplificado D (sondagem SP12)

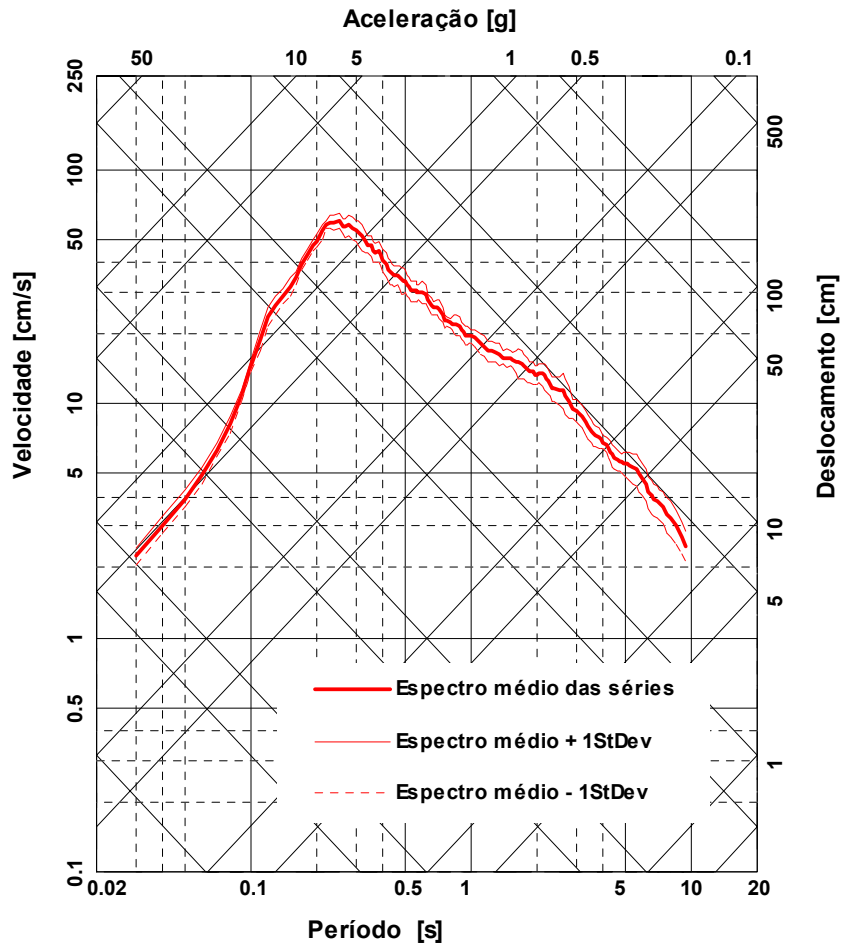


Figura 53 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 1 no perfil D da Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

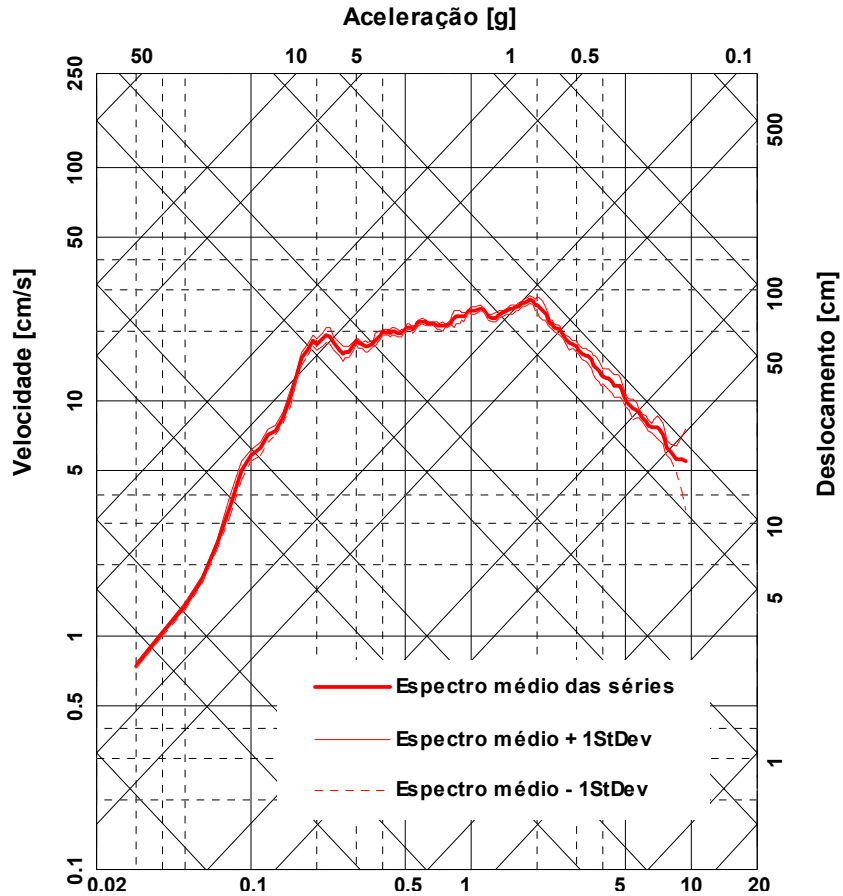


Figura 54 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 2 no perfil D da Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

4.3.5 - Perfil E

O perfil E corresponde ao local de execução da sondagem SP15 de cuja consulta foram estimadas as características apresentadas no Quadro 45. O perfil simplificado encontra-se representado na Figura 55. Os espectros de resposta referentes ao perfil E encontram-se, por sua vez, representados nas Figuras 56 e 57.

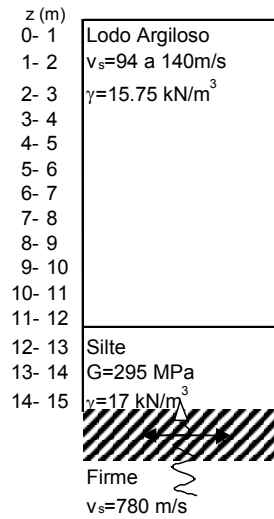


Figura 55 – Lugar da Ota: Perfil geotécnico simplificado E (sondagem SP15)

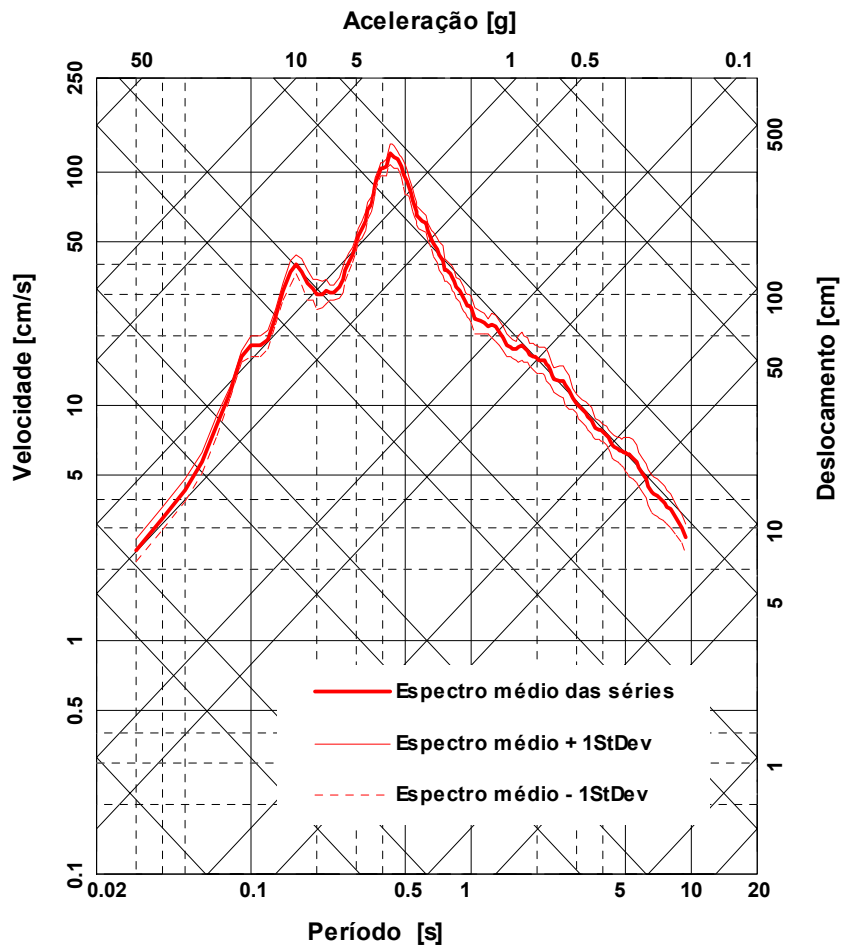


Figura 56– Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 1 no perfil E da Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

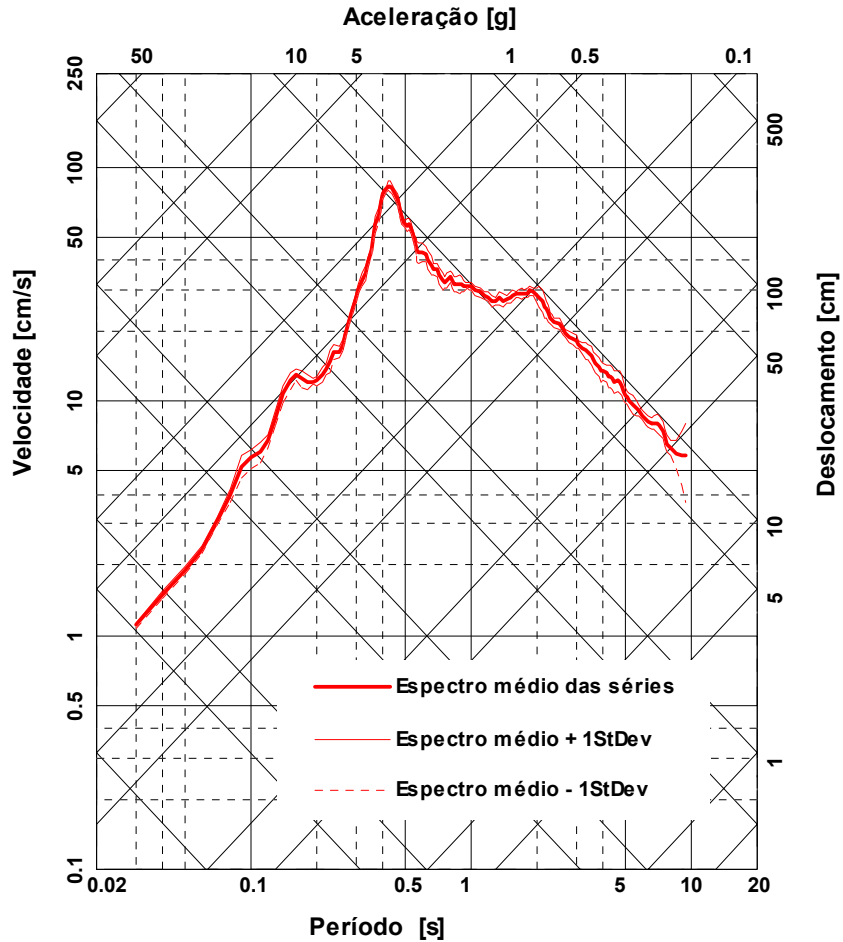


Figura 57 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à ação tipo 2 no perfil E da Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

4.3.6 - Perfil F

O perfil F corresponde ao local de execução da sondagem SP16 de cuja consulta foram estimadas as características apresentadas no Quadro 46. O perfil simplificado encontra-se representado na Figura 58. Os espectros de resposta referentes ao perfil F encontram-se, por sua vez, representados nas Figuras 59 e 60.

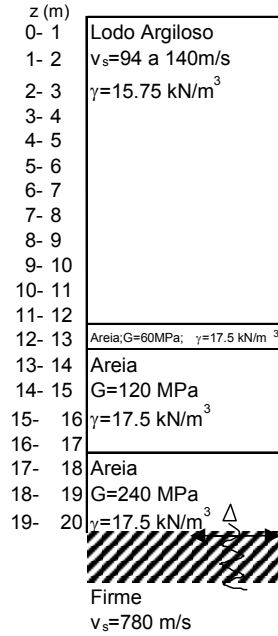


Figura 58 – Lugar da Ota: Perfil geotécnico simplificado F (sondagem SP16)

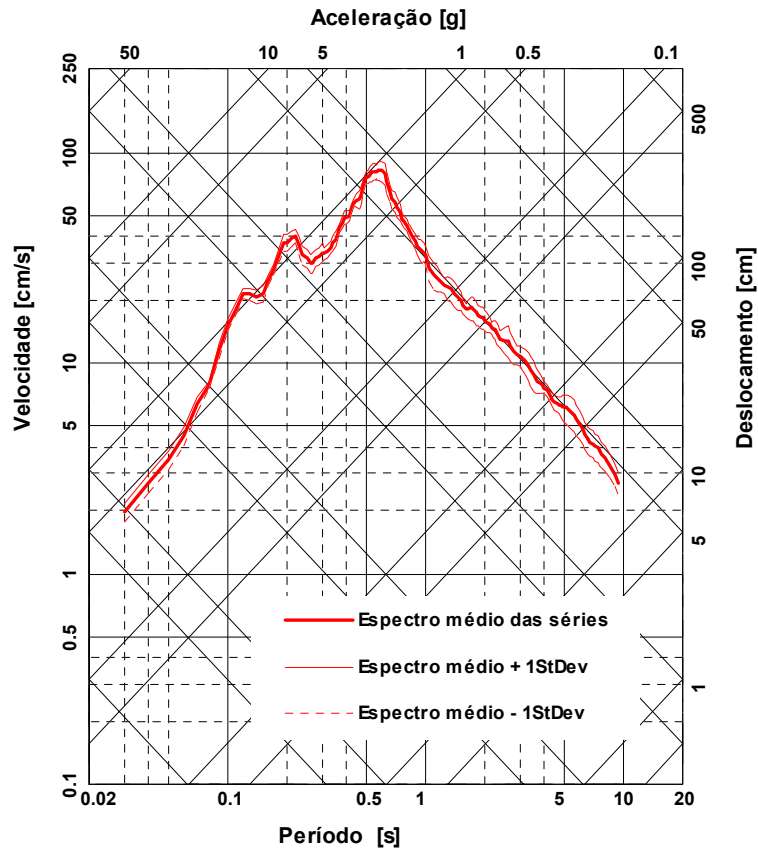


Figura 59 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 1 no perfil F da Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

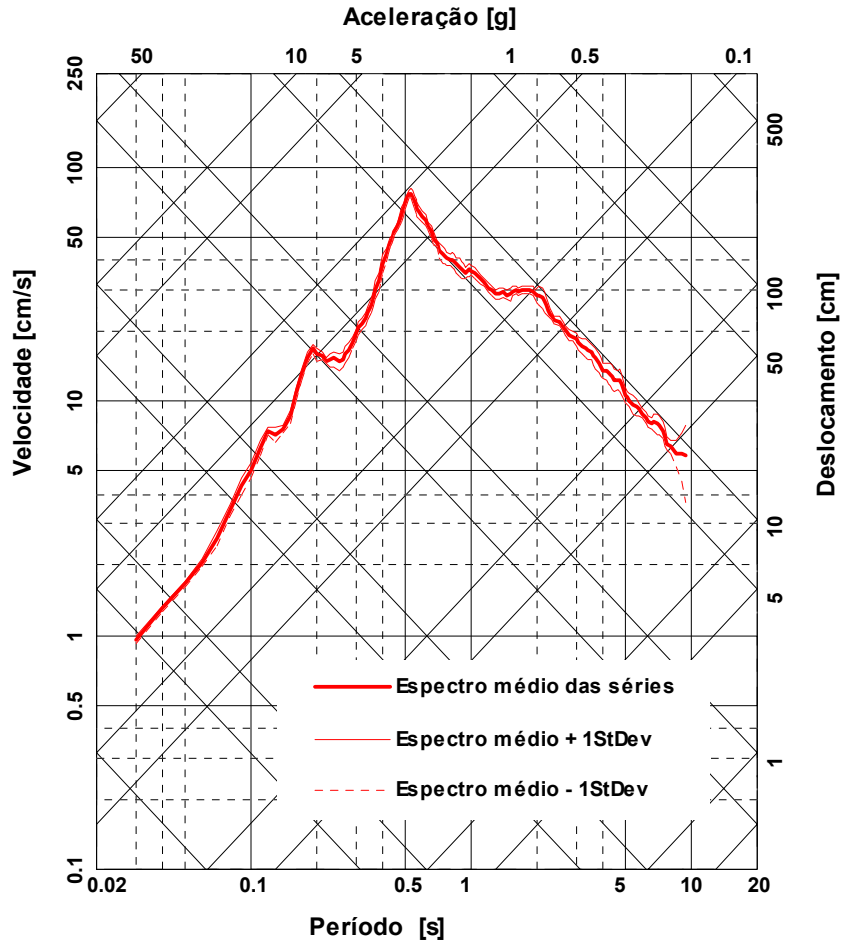


Figura 60 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à ação tipo 2 no perfil F da Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

4.3.7 - Perfil G

O perfil G corresponde ao local de execução da sondagem SP17 de cuja consulta foram estimadas as características apresentadas no Quadro 47. O perfil simplificado encontra-se representado na Figura 61. Os espectros de resposta referentes ao perfil G encontram-se, por sua vez, representados nas Figuras 62 e 63.

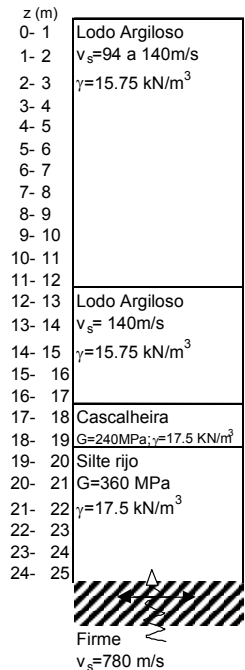


Figura 61 – Lugar da Ota: Perfil geotécnico simplificado G (sondagem SP17)

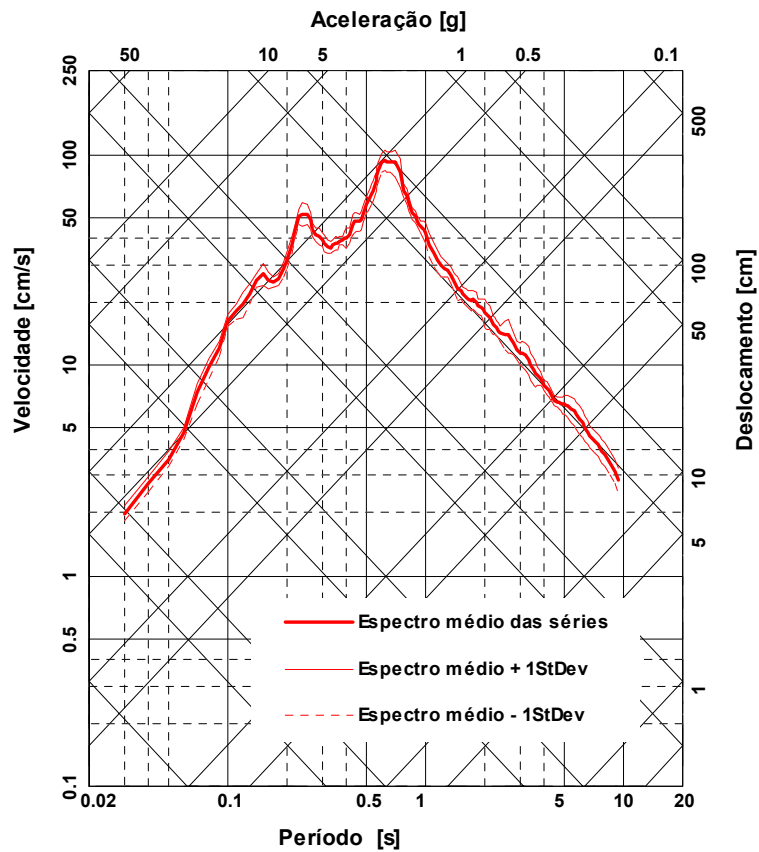


Figura 62 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 1 no perfil G da Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

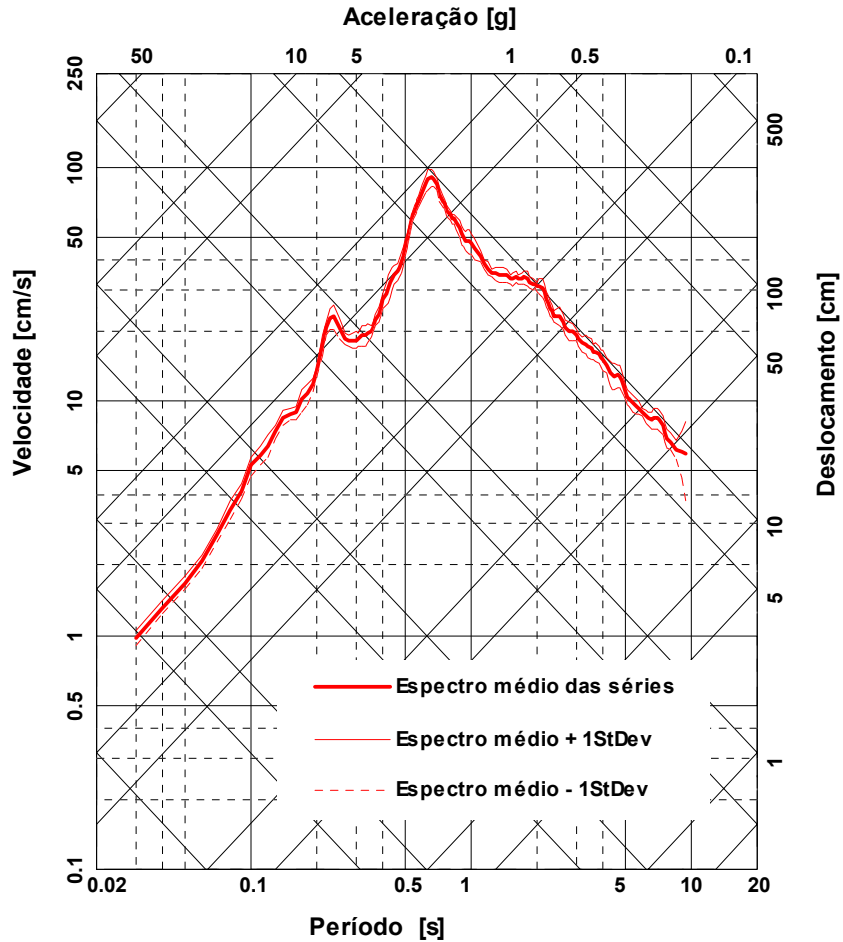


Figura 63– Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 2 no perfil G da Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

4.3.8 - Perfil H

O perfil H corresponde ao local de execução da sondagem SP19 de cuja consulta foram estimadas as características apresentadas no Quadro 49. O perfil simplificado encontra-se representado na Figura 64. Os espectros de resposta referentes ao perfil H encontram-se, por sua vez, representados nas Figuras 65 e 66.



Figura 64 – Lugar da Ota: Perfil geotécnico simplificado H (sondagem SP19)

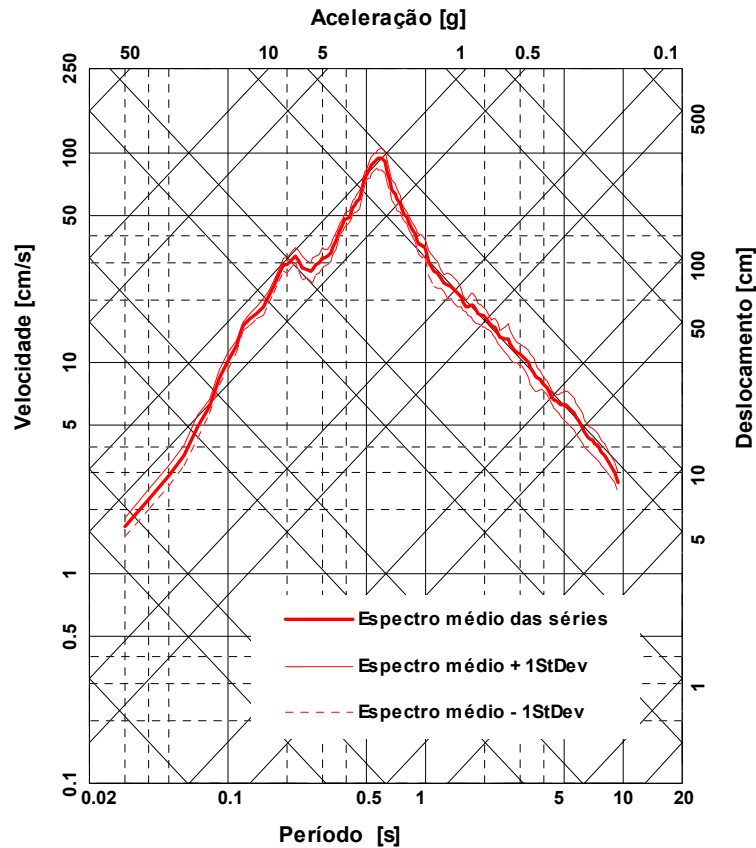


Figura 65 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 1 no perfil H da Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

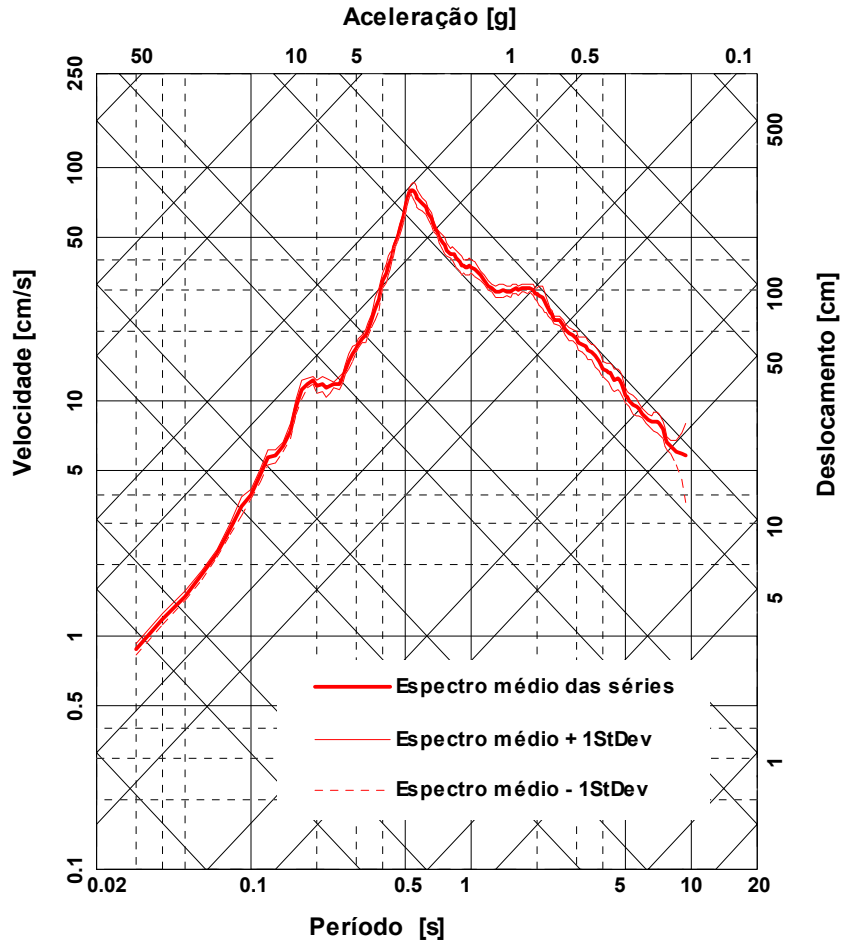


Figura 66– Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 2 no perfil H da Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

4.3.9 - Perfil I

O perfil I corresponde ao local de execução da sondagem SP20 de cuja consulta foram estimadas as características apresentadas no Quadro 50. O perfil simplificado encontra-se representado na Figura 67. Os espectros de resposta referentes ao perfil I encontram-se, por sua vez, representados nas Figuras 68 e 69.

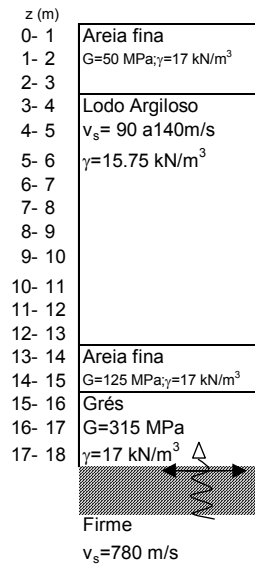


Figura 67– Lugar da Ota: Perfil geotécnico simplificado I (sondagem SP20)

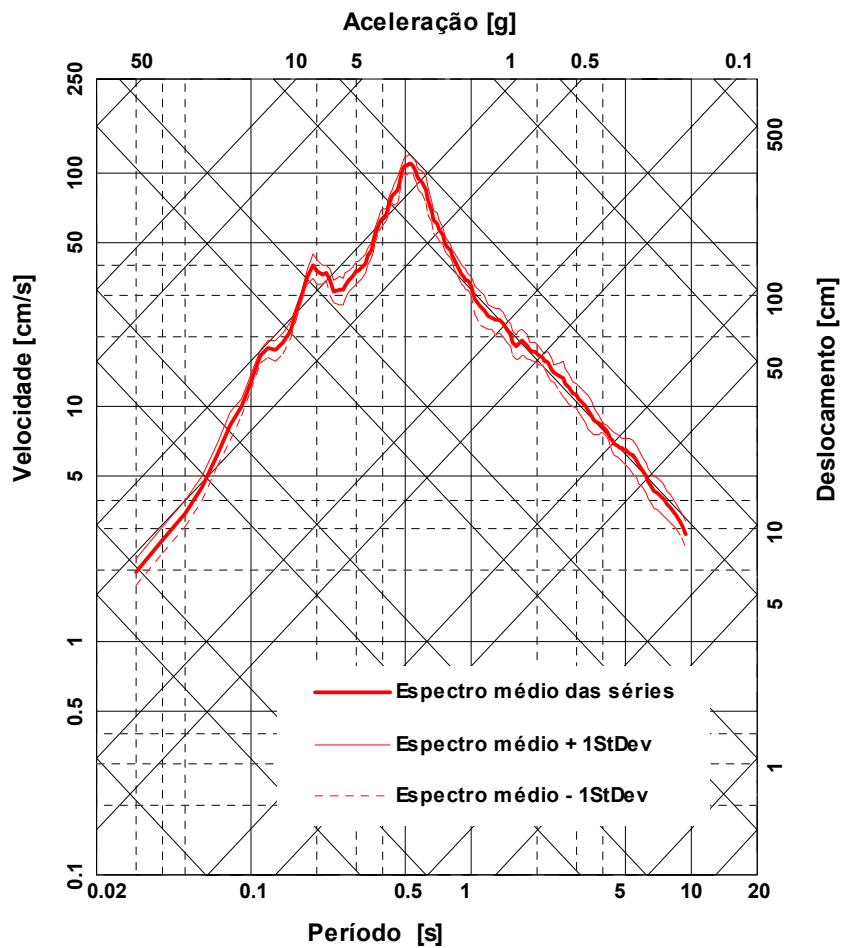


Figura 68– Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 1 no perfil I da Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

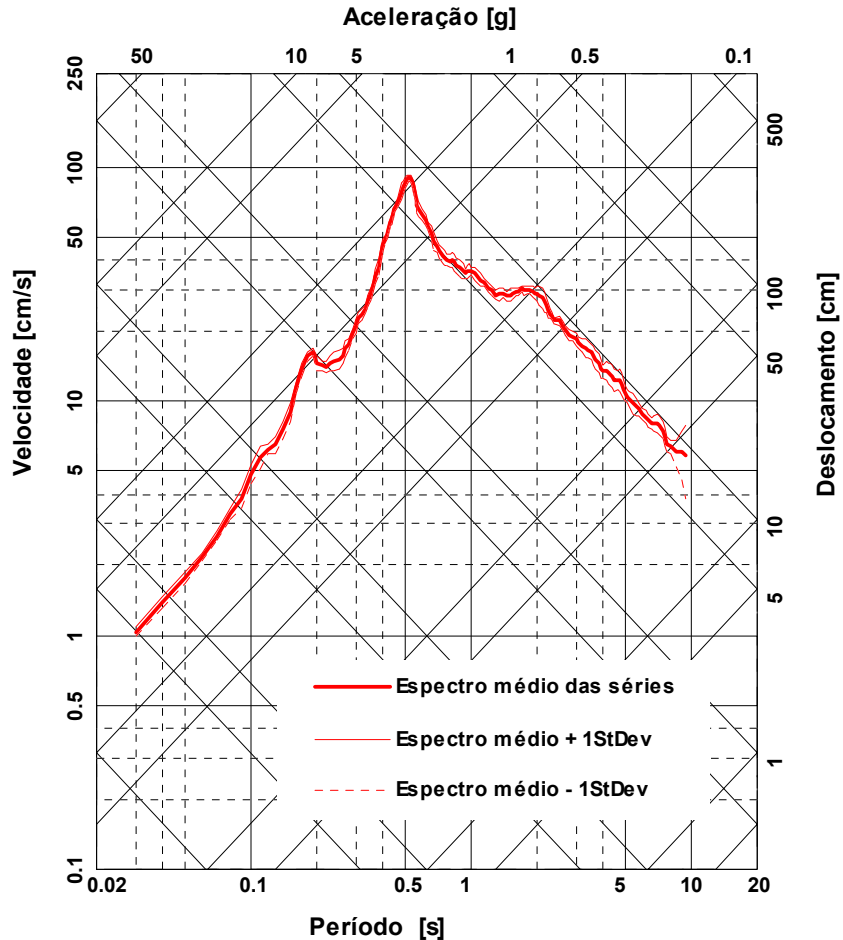


Figura 69– Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 2 no perfil I da Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

5 - AVALIAÇÃO DA PLAUSIBILIDADE DE OCORRÊNCIA DE FENÓMENOS DE LIQUEFAÇÃO

Diz-se que existe liquefacção quando ocorre anulação das tensões efectivas num solo, podendo estar associada a acções estáticas, devidas a fluxos ascendentes de água, ou a acções dinâmicas (das quais as acções sísmicas constituem o caso particular mais relevante).

Quando um solo saturado é vibrado, tende a adquirir uma estrutura mais compacta e densa, no que é impedido pela presença da água quase incompressível, gerando deste modo um aumento, mais ou menos significativo, das pressões intersticiais. Considera-se que ocorre liquefacção inicial quando, sob a acção de cargas dinâmicas, a pressão intersticial iguala a pressão de confinamento.

Após ter atingido o estágio de liquefacção inicial o comportamento do solo, sob a acção das cargas cíclicas subsequentes, pode evoluir de dois modos diferenciados:

- primeiro caracterizado pela ocorrência de grandes deformações, devido à perda de rigidez, comportando-se o solo como um líquido viscoso, designado por liquefacção total ou,
- um outro, caracterizado pelo desenvolvimento de deformações limitadas e pela estabilização dos seus estados de tensão e de deformação, devido a fenómenos de dilatância, associados sobretudo a areias densas, ou a resistências remanescentes nos solos.

No contexto deste relatório, a liquefacção total constitui o único objectivo do estudo, devido aos efeitos que produz, de que se salientam a perda de capacidade resistente das fundações, a impulsão, a flutuação e a instabilização de vertentes.

A perda de capacidade resistente das fundações é acompanhada de assentamentos diferenciais capazes de induzir o derrubamento ou o afundamento das estruturas.

A impulsão tem efeitos graves principalmente em pavimentos, em estruturas leves ou infraestruturas enterradas, com peso próprio insuficiente para compensar a força exercida pela água.

A flutuação (cf. *lateral spreading*) ocorre quando a camada superficial não consegue acompanhar as deformações excessivas de uma camada subjacente liquefeita. Produz-se então fissuração e fragmentação da primeira camada com a formação de blocos que se deslocam lateralmente. Ocorre geralmente em topografias muito suaves.

A instabilização de vertentes é devida a perda de resistência ao corte do solo constituinte dos taludes e ao acréscimo da componente sísmica às acções ocorrentes, com a formação de superfícies de deslizamento.

Seguidamente faz-se uma breve descrição da metodologia utilizada na avaliação da susceptibilidade à liquefacção e apresentam-se os resultados da sua aplicação às localizações de Rio Frio e da Ota.

5.1 - METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFACÇÃO

A ocorrência de liquefacção depende de vários factores, entre os quais se salientam a intensidade e a duração da acção sísmica, a compacidade relativa do solo, a distribuição granulométrica das suas partículas, o grau de saturação e o grau de cimentação dos seus elementos.

Em geral, os solos mais susceptíveis à liquefacção são as areias finas ou médias ou, ainda, os siltes, no estado solto ou pouco compacto, limpos ou com uma pequena percentagem de partículas finas, saturados e sem qualquer elemento ligante.

A ocorrência de depósitos naturais com baixa compacidade está directamente relacionada com a idade geológica e com o processo de formação, sendo por isso justificável, em primeira aproximação, a adopção de critérios de susceptibilidade à liquefacção baseados em classificações geomorfológicas. Na avaliação da respectiva susceptibilidade optou-se no presente relatório pelo recurso à classificação de Youd e Perkins (1978), que considera de susceptibilidade muito baixa todas as formações pré-Plistocénicas.

Os processos sedimentares em ambientes fluviais, deltaicos ou eólicos, favorecem o arrumo de solos granulares num estado relativamente solto. Serão, por esse motivo, as formações modernas e Quaternárias nesses ambientes as que motivam as preocupações fundamentais. Nestas formações a susceptibilidade à liquefacção está ainda dependente da conjugação de factores de natureza geotécnica e sísmica, os quais são somente apreciáveis após a análise mais pormenorizada das condições locais.

No sentido de aclarar as condições geotécnicas, os métodos de ensaio *in situ* constituem a abordagem mais eficiente, uma vez que foram estabelecidas correlações empíricas entre a ocorrência de liquefacção, a severidade sísmica e os resultados desses ensaios. Destacam-se pela relevância para o presente caso os ensaios SPT e os de refração sísmica.

Neste estudo foi seguido o método de Seed e Idriss (1971), no qual a avaliação da susceptibilidade à liquefacção consiste na comparação de duas variáveis: o quociente de tensões cíclicas, designado por CSR, que expressa a intensidade do sismo considerado, e o quociente de resistência à liquefacção, designado por CRR, que caracteriza a capacidade do solo para resistir à liquefacção.

Para o cálculo de CSR os mesmos autores propuseram a seguinte expressão simplificada:

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v0}} = 0,65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} r_d \quad (24)$$

onde a_{max} é a aceleração sísmica horizontal máxima na superfície do terreno, g é a aceleração da gravidade, σ_v e σ'_v representam as tensões total e efectiva verticais geostáticas e r_d é um coeficiente de redução de tensões com a profundidade, z , dado pela expressão de Blake (válida para profundidades até 15 m, (Youd e Idriss, 1997)):

$$r_d = \frac{1 - 0,4113z^{0,5} + 0,04052z + 0,001753z^{1,5}}{1 - 0,4177z^{0,5} + 0,05729z - 0,006205z^{1,5} + 0,001210z^2} \quad (25)$$

Para sismos de magnitude igual a 7,5, o mesmo autor, com base em ensaios SPT e em curvas empíricas estabelecidas por diversos investigadores, propôs a seguinte equação para CRR em solos com uma percentagem de finos inferior a 5%:

$$CRR_{7,5} = \frac{0,048 - 0,004721(N_1)_{60} + 6,136 \times 10^{-4} [(N_1)_{60}]^2 - 1,673 \times 10^{-5} [(N_1)_{60}]^3}{1 - 0,1248(N_1)_{60} + 9,578 \times 10^{-3} [(N_1)_{60}]^2 - 3,285 \times 10^{-4} [(N_1)_{60}]^3 + 3,714 \times 10^{-6} [(N_1)_{60}]^4} \quad (26)$$

válida para valores dos ensaios SPT corrigidos inferiores a 30. Quando o número de pancadas excede o valor de referência de 30, as observações permitem concluir que não há ocorrência de fenómenos de liquefacção.

Para solos com finos, Idriss e Seed propõem o cálculo de uma resistência à penetração equivalente à que seria registada em areias limpas, aqui designada por $(N_1)_{60cs}$, estimada com base em:

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (27)$$

em que α e β são coeficientes determinados a partir de:

$$\alpha = \begin{cases} 0, & FC \leq 5\% \\ e^{1,76 - \frac{190}{FC^2}}, & 5\% < FC < 35\% \\ 5, & FC \geq 35\% \end{cases} \quad (28)$$

$$\beta = \begin{cases} 1, & FC \leq 5\% \\ 0,99 + \frac{FC^{1,5}}{1000}, & 5\% < FC < 35\% \\ 1,2, & FC \geq 35\% \end{cases} \quad (29)$$

onde FC é a percentagem de finos do solo.

Para magnitudes sísmicas diferentes de 7,5 o quociente de resistência à liquefacção, CRR_M , é corrigido através da introdução do factor de escala da magnitude, MSF, de acordo com:

$$CRR_M = CRR_{7,5} MSF \quad (30)$$

sendo MSF, segundo Idriss (Youd e Idriss, 1997), dado por:

$$MSF = \frac{10^{2,24}}{M^{2,56}} \quad (31)$$

A presente metodologia é seguidamente aplicada à localização de Rio Frio.

5.2 – SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFAÇÃO EM RIO FRIO

Serão objecto da presente análise as formações Quaternárias e Recentes ocorrentes na zona de implantação do Novo Aeroporto em Rio Frio. As formações Quaternárias apresentam fraca espessura, no geral inferior a 10 m. As acumulações aluvionares recentes, constituídas predominantemente por areias e alguns lodos, colmatam as linhas de água actuais, devendo atingir no máximo espessuras da ordem dos 5 m.

A análise das sondagens efectuadas permite verificar que, de uma forma sistemática, os valores do número de pancadas no ensaio SPT, $(N_1)_{60}$, das formações, não recentes, arenosas saturadas e com reduzida percentagem de finos são de valor elevado.

Por aplicação do critério apresentado por Seed e Idriss (1971) conclui-se que os solos interessados por estas sondagens apresentam baixa susceptibilidade à liquefacção, confirmando, deste modo, as conclusões sugeridas pela classificação de Youd e Perkins (1978), acima referida, e justificando-se que neste estudo não se proceda à análise mais detalhada da susceptibilidade à liquefacção nestes solos.

As sondagens que, de acordo com a planta “Área de Rio Frio – Geologia” e com a implantação das sondagens, se localizam em formações aluvionares recentes ou na sua proximidade são as referenciadas como 2-1, 3-2 e S-3.

Destas, somente a sondagem S-3 se encontra numa das áreas possíveis para a implantação do Aeroporto. A consideração das restantes sondagens visa a recolha de informação adicional extensível a zonas aluvionares interessadas pela possível construção do Aeroporto e nas quais não foi efectuada este tipo de prospecção geotécnica.

Na aplicação da metodologia acima referida (Seed e Idriss, 1971) torna-se necessário estimar a magnitude do sismo e a aceleração máxima superficial como parâmetros representativos da acção sísmica. Foi seleccionada a magnitude máxima considerada no estudo da casualidade sísmica de valor igual a 8,5 e a aceleração horizontal de pico de 0,5 g (valor conservativo que excede largamente as acelerações obtidas no estudo de avaliação dos efeitos de sítio), para as sondagens que não foram objecto de análise de efeitos de sítio (sondagens 2-1 e 3-2), e de 0,20 g, para a sondagem S-3, identificada com o perfil B considerado no capítulo 4.2.

5.2.1 - Sondagem 2-1

Nesta sondagem a furação foi levada até aos 7 m de profundidade tendo atravessado solos areno-argilosos e detectado o nível freático a 1 m de profundidade. Os valores obtidos de $(N_1)_{60}$, *CRR* e *CSR* transcrevem-se no Quadro 53. A sua análise permite verificar que não há possibilidade de ocorrência de liquefacção, já que os

resultados dos ensaios excedem as 30 pancadas ou localizam-se em solos não susceptíveis a este fenómeno (solos argilosos).

Quadro 53 – Valores de $CRR_{8,5}$ e de CSR ao longo da sondagem 2-1

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	$(N_1)_{60cs}$	$CRR_{8,5}$	CSR
1	0,2	Terra vegetal				
2	0,5	Areia fina c/ seixos				
3	0,95	Areia grossa c/seixos	1	52,3	-	0,323
			1,5	44,2	-	0,397
4	0,25	Areia fina argilosa				
5	0,8	Argila				
6	2,2	Argila	3	29,6	-	0,515
			4,5	43,4	-	0,568
7	1,4	Argila arenosa	5,5	31,3	-	0,586
			6	59,8	-	0,592
8	0,7	Argila arenosa	7	42,1	-	0,600

5.2.2 - Sondagem 3-2

A sondagem foi conduzida até à profundidade de 7 m tendo sido penetrados solos areno-argilosos. À profundidade de 4,8 m foi detectada água com altura piezométrica de cerca de 1 m. Foi seguida a metodologia referida a propósito da sondagem anterior, encontrando-se os resultados resumidos no Quadro 54. De igual modo se verifica que a susceptibilidade à liquefacção é nula.

5.2.3 - Sondagem S-3

A sondagem foi conduzida até à profundidade de 15,3 m tendo sido penetrados solos areno-argilosos. À profundidade de 12,6 m foi detectada, sob uma camada essencialmente argilosa, água com artesianismo repuxante, com cota piezométrica superior em cerca de 1,4 m à cota da superfície. Dado que as camadas arenosas sobrejacentes à água artesianas se encontram não saturadas não há susceptibilidade à liquefacção nas condições hidrogeológicas reportadas na sondagem.

Uma vez que no estudo hidrogeológico do local se apontam para a zona de implantação do aeroporto cotas piezométricas com valores entre 18,5 e 22 m, e admitida a representatividade pretendida para estas sondagens, torna-se conveniente acautelar uma alteração do cenário hidrogeológico correspondente à ocorrência hipotética do nível freático próximo da superfície. Foi, por isso e nesta condição,

seguida a metodologia já referida. Os valores decorrentes desta análise constam do Quadro 55. A sua análise permite concluir a não ocorrência de liquefacção, pois os valores de CRR excedem a qualquer profundidade os valores de CSR.

Quadro 54 – Valores de CRR_{8,5} e de CSR ao longo da sondagem 3-2

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	(N ₁) _{60cs}	CRR _{8,5}	CSR
1	0,3	Terra vegetal				
2	0,8	Areia fina argilosa				
3	0,9	Argila muito arenosa	1,5	50,8	-	0,321
4	1	Argila compacta				
5	1,8	Areia muito argilosa	3	46,3	-	0,318
			4,5	55,8	-	0,314
6	0,8	Argila mto arenosa				
7	1,4	Areia fina muito argilosa	6	60,8	-	0,388
			7	60,1	-	0,409

Quadro 55 – Valores de CRR_{8,5} e de CSR ao longo da sondagem S-3

Camada	Espessura (m)	Descrição	Prof. (m)	(N ₁) _{60cs}	CRR _{8,5}	CSR
1	0,3	Terra vegetal				
2	1	Areia média a grossa				
3	0,3	Areia fina a média	1,5	18,6	0,145	0,132
4	2,3	Areia muito fina argilosa	2	61,2	-	0,131
			3	28,6	0,444	0,130
5	0,9	Areia fina a grossa c/ seixos argilosa	4,5	22,8	0,259	0,129
6	5,95	Argila	6	27,0	-	0,127
			7,5	32,8	-	0,126
			9	35,1	-	0,124
			10,5	29,7	-	0,119
7	1,85	Argila	12	26,8	-	0,114
8	0,4	Areia fina				
9	2	Areia fina argilosa				

Salienta-se, por último, que a expectável construção de aterros até a cotas variando entre 25 e 30 m, introduzirá, por um lado, um acréscimo de tensão vertical geostática e, por outro, um estrato não liquefazível subjacente, provocando uma diminuição significativa dos efeitos estimados da liquefacção.

5.3 – SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFAÇÃO NA OTA

As formações Recentes da Ota apresentam sempre uma fracção fina relativamente expressiva, pelo que não apresentam susceptibilidade à ocorrência de fenómenos de liquefacção.

6 - MEDIDAS COMPLEMENTARES

O presente estudo baseou-se nos dados disponíveis até ao momento, não tendo sido possível ter em linha de conta, nomeadamente, a geometria das escavações e dos aterros a serem efectuados em cada uma das localizações. Consequentemente os resultados apresentados caracterizam as condições actuais e não têm em conta as alterações introduzidas pela construção de qualquer tipo de estrutura (geotécnica, hidráulica, viária ou de edifícios). Dão, no entanto, indicações sobre o futuro comportamento e amplificações induzidas pelos solos presentes e servirão nesta fase para pré-dimensionamento das obras envolvidas.

Considera-se essencial para os trabalhos futuros a realização de campanhas de prospecção geotécnica adequadas para a correcta caracterização dos solos envolvidos em termos de comportamento estático e dinâmico, de modo a ser possível a determinação de parâmetros consistentes de resistência, de deformabilidade, de permeabilidade e de compactação. Os ensaios, de campo e de laboratório, a realizar deverão ser adaptados ao tipo de solo detectado e à grandeza que se pretenda medir.

Salienta-se, ainda, a necessidade de considerar para além das consequências da liquefacção outros efeitos relevantes produzidos pela acção sísmica nos solos encontrados. O mais importante prende-se com a estimativa de assentamentos de origem sísmica ocorridos na ausência de liquefacção, os quais podem assumir valores absolutos ou diferenciais significativos. No entanto, os ensaios realizados não permitem estimar as características necessárias a esta avaliação.

Medidas de melhoramento dos solos, como a densificação dos solos em estado solto ou a consolidação de solos moles, só poderão ser estudadas após determinação mais precisa das propriedades dos materiais a serem envolvidos no suporte e na construção do aeroporto.

7 - CONCLUSÃO

No presente relatório foi elaborado um estudo sobre a adequabilidade do ponto de vista sísmico dos locais de Rio Frio e da Ota para a implantação do Novo Aeroporto de Lisboa.

Os resultados apresentados versaram a definição probabilística da casualidade sísmica, a análise de sítio e a plausibilidade da ocorrência de liquefacção em ambos os locais, nas condições actuais e com base na catalogação de informação geotécnica relevante disponível.

7.1 - CASUALIDADE SÍSMICA

Na elaboração de um projecto de infra-estruturas vitais constitui decisão fundamental a selecção do nível de risco a assumir, sob várias ópticas, durante a sua existência. Tal decisão caberá ao dono de Obra, desejavelmente sob sugestão justificada do projectista.

Assim, e dado o carácter preliminar do presente estudo, foram tomados dois níveis de probabilidade de excedência para o valor de pico das acelerações em afloramento rochoso, julgadas suficientemente representativas para possibilitar o enquadramento de tal decisão no futuro.

A combinação das sismicidades intraplaca (acção tipo 1) e interplaca (acção tipo 2), com os períodos de retorno de 975 anos e 1949 anos, gerou quatro cenários do ponto de vista do movimento em afloramento rochoso que se passam a analisar.

Os valores de pico de aceleração horizontal e vertical associados à sismicidade interplacas resultaram idênticos em ambos os locais, com ligeiro excesso por parte do local de Rio Frio (ver Figuras 2 e 3).

Tal semelhança não ocorre, naturalmente, com os valores correspondentes à sismicidade intraplaca, sendo que o local da Ota surge como o mais penalizado. Para o período de retorno de 975 anos tem-se uma diferença de $0,5 \text{ m/s}^2$ na direcção horizontal ($2,3 \text{ m/s}^2$ e $1,8 \text{ m/s}^2$, respectivamente, para a Ota e para Rio Frio) e de $0,3 \text{ m/s}^2$ na direcção vertical ($1,2 \text{ m/s}^2$ e $0,9 \text{ m/s}^2$). Estas diferenças crescem ligeiramente no caso do período de retorno de 1949 anos, sendo de $0,6 \text{ m/s}^2$ na direcção horizontal ($2,8 \text{ m/s}^2$ e $2,2 \text{ m/s}^2$) e de $0,4 \text{ m/s}^2$ na direcção vertical ($1,5 \text{ m/s}^2$ e $1,1 \text{ m/s}^2$).

A semelhança encontrada entre os valores de pico de aceleração da acção tipo 2 nos locais de Rio Frio e Ota reflecte a quase concordância entre os correspondentes espectros de resposta uniformes (ver Figuras 4 a 7).

A riqueza espectral do movimento horizontal para este tipo de acção é mais pronunciada entre os períodos $0,35 \text{ s}$ e $0,6 \text{ s}$. Por sua vez, o movimento vertical apresenta uma dispersão espectral significativa, com valores máximos quase constantes entre os períodos $0,2 \text{ s}$ e 1 s .

Por sua vez, a comparação da forma espectral da acção tipo 1 entre ambos os locais, quer para cada um dos períodos de retorno quer para cada uma das direcções, leva à conclusão da quase coincidência do período de ordenada espectral máxima (embora com uma ligeira translacção no sentido dos períodos crescentes no local da Ota): para a acção horizontal $0,2 \text{ s}$ e $0,35 \text{ s}$, respectivamente, para as acções tipo 1 e

tipo 2, e para a acção vertical 0,15 s e 0,3 s a 0,4 s, respectivamente, para as acções tipo 1 e tipo 2. Salienta-se ainda que os espectros de resposta uniformes no local da Ota apresentam ordenadas sistematicamente superiores às do local de Rio Frio, para os períodos de retorno e as componentes do movimento considerados.

A proporção entre as áreas envolvidas pelos espectros homólogos em ambos os locais é aproximadamente igual à dos valores de pico, o que reflecte a quase perfeita homotetia existente entre cada par daqueles espectros homólogos.

7.2 - MOVIMENTO SÍSMICO À SUPERFÍCIE TENDO EM CONTA OS EFEITOS DE SÍTIO

Como foi referido na introdução do Capítulo 4 o movimento à superfície reflecte a filtragem do movimento sísmico exercida pelas formações superficiais mais deformáveis. A natureza unidimensional do modelo utilizado torna inviável a obtenção de movimentos verticais com significado, pelo que as conclusões se resumem à componente horizontal do movimento, para o período de retorno de 975 anos.

7.2.1 - Rio Frio

Os resultados obtidos na localização de Rio Frio encontram-se resumidos, em termos de acelerações de pico, no Quadro 51 e, em termos de espectros de resposta para a acção sísmica tipo 1, na Figura 70 e, para a acção sísmica tipo 2, na Figura 71.

Com base nos dados geológicos existentes na região estimou-se, conservativamente, que as formações com velocidades de propagação das ondas S superiores a 780 m/s se encontravam a cerca de 15 m de profundidade, pelo que todos os perfis geotécnicos considerados na avaliação dos efeitos de sítio foram prolongados até à referida profundidade.

Foram modelados no local de Rio Frio dois perfis fictícios homogéneos (A e B) com propriedades envolventes máxima e mínima dos perfis reais. Os resultados obtidos destacam-se dos restantes, apresentando períodos próprios mais elevados e, em geral, respostas em termos de acelerações de valor mais reduzido.

Nos restantes perfis estratificados (C1, C2, D1, D2, E1, E2 e E3) as acelerações de pico apresentaram pequena variação relativa. Para a acção tipo 1 a aceleração de pico situou-se entre 2,37 m/s² e 2,61 m/s² e para acção tipo 2 entre 1,20 e 1,35 m/s².

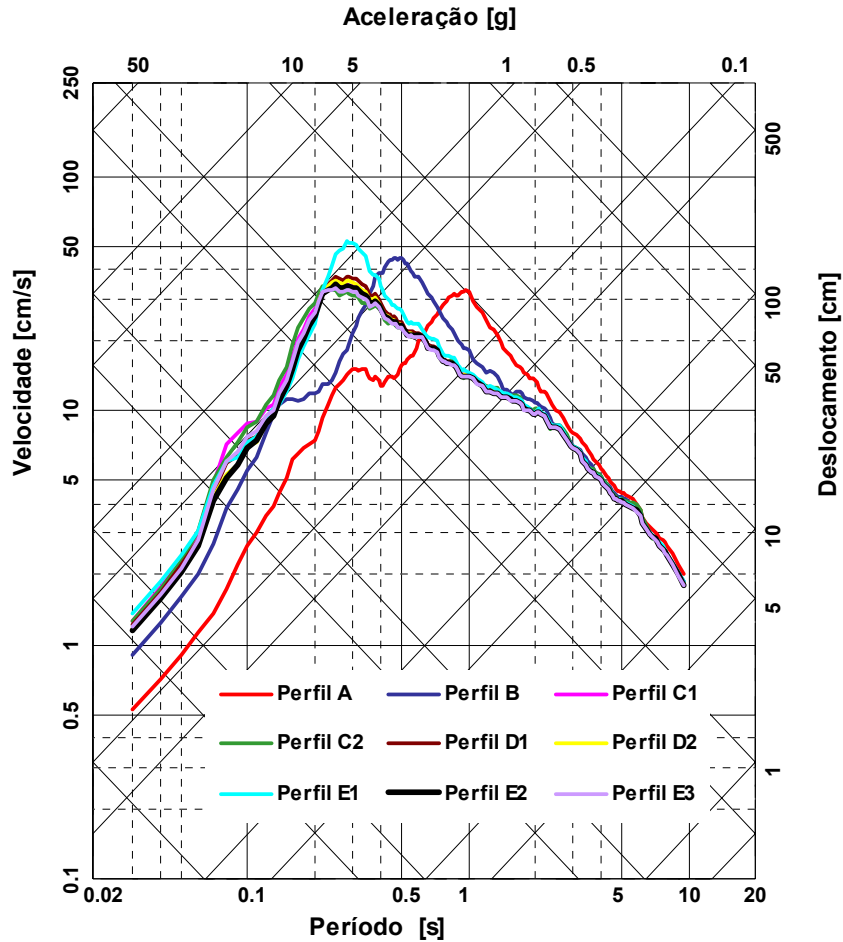


Figura 70 - Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 1 nos perfis considerados em Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

Os espectros de respostas mostram reduzida sensibilidade à variação das propriedades encontradas nas sondagens, apresentando nos perfis não homogéneos pequena dispersão relativamente a um espectro representativo médio (ver Figuras 70 e 71).

Nos espectros de resposta relativos à acção tipo 1 as zonas de aceleração e de deslocamento constantes são bastante extensas. O máximo da velocidade espectral ocorre para valores de período próprio vizinhos de 0,2 s a 0,3 s e situa-se tipicamente entre 30 cm/s e 50 cm/s (ou seja, ordenadas espectrais em aceleração próximas de 1g).

Os espectros de resposta relativos à acção tipo 2 são mais suaves apresentando um patamar extenso de velocidade aproximadamente constante entre os períodos próprios 0, s e 2 s. O máximo de velocidade espectral ocorre entre períodos de 0,19 s e 0,3 s.

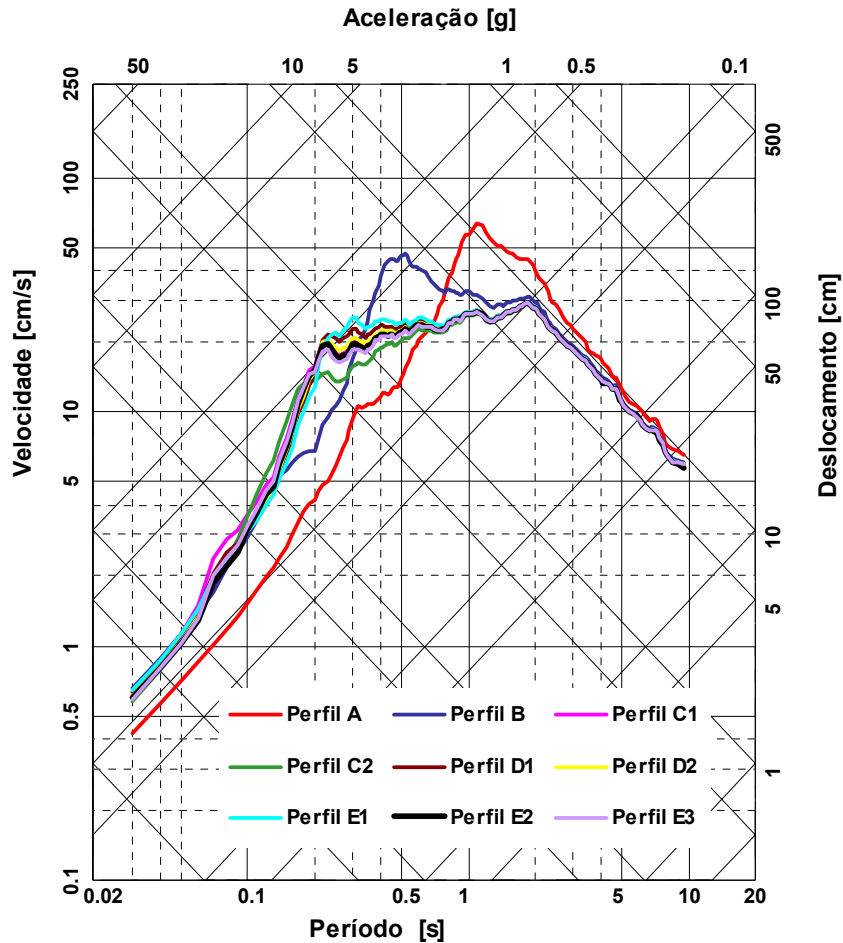


Figura 71 - Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 2 nos perfis considerados em Rio Frio para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

7.2.2 - Ota

Por sua vez, o movimento superficial na Ota, resumido no Quadro 52 e nas Figuras 72 e 73, apresenta uma maior variabilidade entre perfis, resultante da mais significativa dispersão das suas características mecânicas e da sua geometria, nomeadamente, a respectiva profundidade até ao “firme”.

As acelerações superficiais de pico devidas à acção tipo 1 situam-se entre $3,62 \text{ m/s}^2$ e $5,42 \text{ m/s}^2$, com maior frequência dos valores situados entre $4,35 \text{ m/s}^2$ e $4,91 \text{ m/s}^2$. Para a acção tipo 2 têm-se valores entre $1,42 \text{ m/s}^2$ e $2,29 \text{ m/s}^2$.

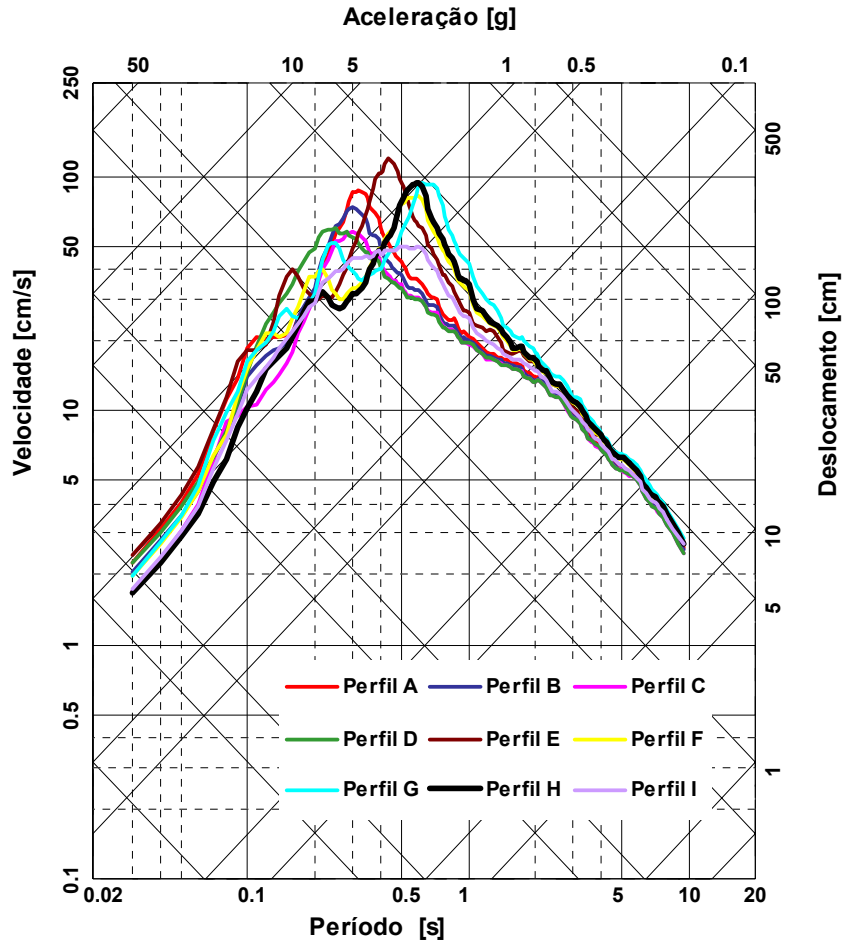


Figura 72 – Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à ação tipo 1 nos perfis considerados na Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

Os espectros de resposta relativos à ação tipo 1 praticamente não apresentam patamar de velocidade constante. A ordenada espectral máxima de velocidade varia entre 50 cm/s e 100 cm/s em períodos próprios situados entre 0,25 s e 0,6 s. A ordenada espectral máxima de aceleração varia entre 1 g e 2 g.

Os espectros de resposta associados à ação tipo 2 dos perfis A, B, C e D apresentam um patamar de velocidade aproximadamente constante, ainda que com ordenadas decrescendo suavemente com o período próprio. Nos espectros referentes aos restantes perfis o patamar de velocidade constante é praticamente inexistente. Nos primeiros espectros referidos a ordenada espectral máxima de velocidade ocorre para períodos próprios situados entre 0,2 s e 0,3 s e apresenta valores entre 20 cm/s e 40 cm/s, enquanto que nos restantes espectros se tem como períodos próprios de ocorrência do máximo valores entre 0,4 e 0,6 s e ordenadas entre 50 cm/s e 100 cm/s.

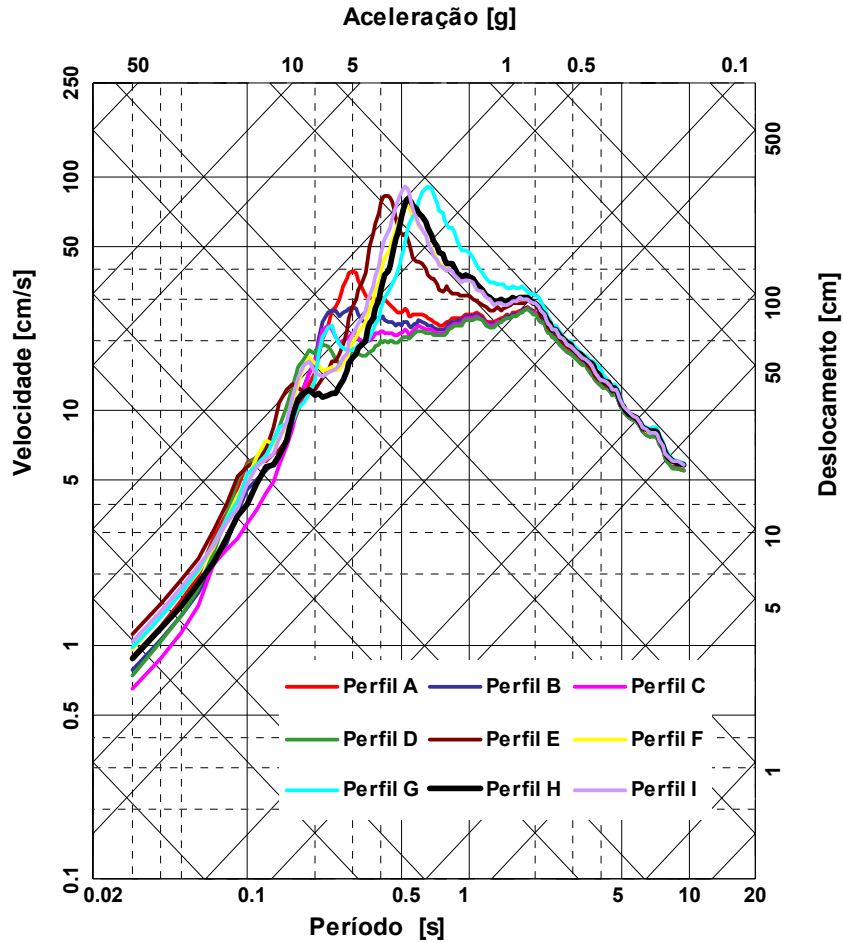


Figura 73 - Espectros de resposta da componente horizontal da aceleração superficial devida à acção tipo 2 nos perfis considerados na Ota para uma probabilidade de excedência de 5% em 50 anos e um amortecimento de 5%.

Regista-se que a dicotomia referida na forma espectral entre os grupos dos perfis A a E e F a I coincide com a dicotomia introduzida pela geometria dos perfis: isto é, o primeiro grupo é composto por perfis com 15 m de profundidade até ao firme, enquanto que no segundo grupo as profundidades variam entre 18 m e 25 m.

No sentido de esclarecer a influência das propriedades geotécnicas assumidas nos cálculos, torna-se importante, em alguns dos perfis da Ota, programar campanhas de caracterização geotécnica que permitam esclarecer entre outros aspectos, o valor assumido pela velocidade de ondas de corte nos lodos superficiais e a profundidade efectiva ao firme.

7.3 – SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFAÇÃO

Para a acção sísmica considerada, verifica-se que as formações recentes de Rio Frio e da Ota não apresentam susceptibilidade à ocorrência de fenómenos de liquefacção, uma vez que, na primeira localização, a resistência à liquefacção dos solos encontrados é superior à sollicitação cíclica e, na segunda localização, os solos são constituídos por uma fracção fina, relativamente expressiva, impeditiva da manifestação do fenómeno.

Lisboa e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Setembro de 1999.

VISTOS

O Chefe
do Departamento de Geotecnia

Laura Caldeira
Investigadora Auxiliar

António Gomes Coelho

O Chefe
do Centro de Estudos e Equipamentos
de Engenharia Sísmica

João Paulo Bilé Serra
Investigador Auxiliar

Eduardo Cansado de Carvalho

Alfredo Campos Costa
Investigador Principal

Maria Luísa Sousa
Assistente de Investigação

AUTORIA

REFERÊNCIAS

ANA, Aeroportos e Navegação Aérea, DIA – Direcção de Infraestruturas Aeronáuticas; 1994a.

Estudos de Localização – NAL. Geologia e Hidrologia. Ota. Relatório. Proc. 4.5.61.174.3166 (ref^a 118).

ANA, Aeroportos e Navegação Aérea, DIA – Direcção de Infraestruturas Aeronáuticas; 1994b.

Estudos de Localização – NAL. Geologia e Hidrologia. Rio Frio. Relatório. Proc. 4.5.61.174.3166 (ref^a 120).

ANA, Aeroportos e Navegação Aérea, DIA – Direcção de Infraestruturas Aeronáuticas; 1994c.

Estudos de Localização – NAL. Relatório Preliminar Global. Estudos de Engenharia. Relatório. Proc. 4.5.61.174.3166 (ref^a 19).

ANA, Aeroportos e Navegação Aérea, DIA – Direcção de Infraestruturas Aeronáuticas; 1990a.

NAL – Ota. Estudo Geológico e Hidrogeológico. Relatório Preliminar. Relatório. Proc. 4.1.14.192.0008 (ref^a 50).

ANA, Aeroportos e Navegação Aérea, DIA – Direcção de Infraestruturas Aeronáuticas; 1990b.

NAL – Ota. Estudo Geológico e Hidrogeológico. Relatório Preliminar. Anexo 2. Relatório. Proc. 4.1.14.192.0008 (ref^a 50).

ANA, Aeroportos e Navegação Aérea, DIA – Direcção de Infraestruturas Aeronáuticas; 1990c.

NAL – Ota. Estudo Geológico e Hidrogeológico. Relatório. Relatório. Proc. 4.1.14.192.0008 (ref^a 50).

Araya, R.; Der Kiureghian, A.; 1988.

Seismic Hazard Analysis Improved Models, Uncertainties and Sensitivities. Report No. UCB/EERC 90/11, University of California, Berkeley.

Ambraseys, N. N. e Simpson, K. A. ; 1996.

Prediction of Vertical Response Spectra in Europe, Earthquake Engineering and Structural Dynamics 45: 401-412, John Wiley & Sons, Ltd.

Ambraseys, N. N.; Simpson, K. A. e Bommer, J. J.; 1996.

Prediction of Horizontal Response Spectra in Europe, Earthquake Engineering and Structural Dynamics 45: 371-400, John Wiley & Sons, Ltd.

- Cabral, J.; 1993.
Neotectónica de Portugal Continental. Tese de doutoramento em Geologia, Universidade de Lisboa.
- Campos Costa, A.; 1994.
A Acção dos Sismos e o Comportamento das Estruturas, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Campos Costa, A.; 1997.
European Seismic Hazard Scenarios. An Approach to the Definition of Input Motions for Testing and Reliability Assessment of Civil Engineering Structures. Estudo desenvolvido ao abrigo do Programa Europeu “Human Capital and Mobility”. Relatório Joint Research Center, JRC, Ispra, Itália.
- Campos Costa, A. e Pinto, A.V.; 1997.
Definition of European Seismic Hazard Scenarios for Reliability Assessment of Civil Engineering Structures. JRC special publication, Ispra, Italy.
- Cornell, C. A.; 1968.
Engineering Seismic Risk Analysis. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 58, n.º. 5 pp. 1503-1606.
- Fialho Rodrigues, L. ; 1979.
Métodos de Prospeção Sísmica em Geologia de Engenharia. A Importância da Onda de Corte. Tese de Especialista, LNEC, Portugal.
- GKN KELLER SRL, Hidrologia Subterrânea e Geotecnia; 1990.
Relatório Final da Empreitada OTA – NAL. Sondagens Geológicas e Hidrogeológicas (ref^o 50).
- Gutenberg, B.; Richter, C. F.; 1944.
Frequency of Earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 34, no. 4, pp. 185 - 188.
- Idriss, I. M.; 1991.
Earthquake Ground Motions at Soft Soil Sites. Proceedings of 2nd Workshop on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics.
- Imai, T.; Yoshimura, Y.; 1970.
Elastic Wave Velocity and Soil Properties in Soft Soil. Tsuchi-to-Kiso, Vol 18, N.º. 1, pp. 17 - 22.
- Imai, T.; 1977.
P and S Wave Velocities of the Grond in Japan. Proceedings of the Ninth ICSMFE, Vol.2, pp. 257 - 260.

- Instituto de Ciências da Terra e do Espaço; 1999a.
Estudo Preliminar de Impacte Ambiental. Localização: Ota.
- Instituto de Ciências da Terra e do Espaço; 1999b.
Estudo Preliminar de Impacte Ambiental. Localização: Rio Frio.
- McGuire, R. K.; 1976.
EQRISK, Evaluation of Earthquake Risk to Site. Open File Report 76-67. United States Department of the Interior Geological Survey. USA.
- Ohba, S.; Toriumi, I.; 1970.
Dynamic Response Characteristics of Osaka Plain. Proceedings of Annual Meeting A. I. J...
- Ohta, Y.; Goto, N.; 1978.
Empirical Shear Wave Velocity Equations in Terms of Characteristics Soil Indexes. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 6, pp. 167 -187.
- Oliveira, R., Moura Esteves, J. e Fialho Rodrigues, L.; 1973.
Prospecção Sísmica no Local do Novo Aeroporto de Lisboa, em Rio Frio. LNEC, Proc. 54/0/4476.
- RSA; 1983.
Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes. Decreto-lei nº 235/83, Imprensa Nacional - Casa da Moeda, Lisboa.
- Seed, H. B.; Idriss, I. M.; 1971.
Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 97 (SM9), pp. 1249-1273.
- SIMKE; 1976.
A Program for Artificial Motion Generation, User's Manual and documentation, Distributed by NISEE/Computer Applications, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology (MIT), USA.
- Sondagens e Fundações A. Cavaco, Lda; 1972.
Reconhecimento Geológico dos Solos na Área do Novo Aeroporto de Lisboa próximo de Rio Frio. Relatório Final.
- Sousa, M. L. ; 1996.
Modelos Probabilistas para a Avaliação da Casualidade Sísmica em Portugal Continental. Tese de Mestrado em Investigação Operacional e Engenharia de Sistemas. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa.
- Sousa, M. L. e Oliveira, C. S.; 1997.

Hazard Mapping Based on Macroseismic Data Considering the Influence of Geological Condition. Natural Hazards 14: 207-225, Kluwer Academic Publishers.

Sousa, M. L., Oliveira, C. S. e Martins, A. M., 1992.

Compilação de Catálogos Sísmicos da Região Ibérica. Relatório 36/92, NDA, LNEC, 250 pp., Proc. 036/11/9295, Lisboa.

Sousa, M. L., Oliveira, R. C. e Oliveira, C. S., 1997.

Análise Probabilística da Casualidade Sísmica em Portugal Continental, artigo apresentado no 7º Congresso da APDIO (Associação Portuguesa para o Desenvolvimento da Investigação Operacional), Aveiro, 1996 e publicado na revista Investigação Operacional, 1997, vol. 17, pp. 3-21, Lisboa.

Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering (TC4), 1999.

Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards (Revised Version), The Japanese Geotechnical Society, Tokyo, Japan.

Youd, T. L.; Idriss, I. M., 1997.

Proceedings of a Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Salt Lake City, USA.

Youd, T. L.; Perkins, D. H., 198.

Mapping Liquefaction Induced Ground Failure Potential. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 104, GT4, pp. 267-278.

