

**Henrique Manuel Carvalho Vicêncio**

Mestre em Geologia de Engenharia



## **Efeitos de Sítio nos Concelhos do Barreiro e Setúbal Face ao Risco Sísmico**

Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia  
Geológica

Orientador: Doutor Paulo do Carmo de Sá Caetano, Professor Auxiliar, da  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa  
Coorientadora: Doutora Maria Paula Pompeu de Miranda Rodrigues de Teves  
Costa, Professora Auxiliar, da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Júri:

- Presidente: Doutor Luís Manuel Trabucho de Campos, Professor Catedrático da  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
- Arguentes: Doutor Rui Carrilho Gomes, Professor Auxiliar, do Instituto Superior Técnico  
da Universidade de Lisboa  
Doutora Maria João de Brito Coelho, Investigadora Auxiliar do Laboratório  
Nacional de Engenharia Civil
- Vogais: Doutor Carlos Sousa Oliveira, Professor Catedrático Jubilado do Instituto  
Superior Técnico da Universidade de Lisboa  
Doutora Maria da Graça Azevedo de Brito, Professora Auxiliar da  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa  
Doutora Ana Paula Fernandes da Silva, Professora Auxiliar da Faculdade  
de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa  
Doutora Maria Paula Pompeu de Miranda Rodrigues de Teves Costa,  
Professora Auxiliar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa



**Setembro de 2017**



# **Efeitos de Sítio nos Concelhos do Barreiro e Setúbal Face ao Risco Sísmico**

*Copyright* em nome de Henrique Manuel Carvalho Vicêncio, da FCT/UNL e da UNL.

*A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.*



# DEDICATÓRIA

Às vítimas das catástrofes.

A toda a minha família, em especial à minha querida mulher Luísa pela sua ajuda no trabalho de campo, nas revisões dos textos, pelo apoio nas adversidades, amor e amizade. À minha filha Sara, que comigo partilhou muito da sua alegria de viver, e ao meu filho Joaquim.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as entidades que disponibilizaram informação geológica e geotécnica: Casa Pia, Águas do Sado, Amarsul, Baía do Tejo S.A., Divisão para a Pesquisa e Exploração de Petróleo, EDP, Geocontrolo, Geoteste, LNEG, Administração dos Portos de Setúbal e Sesimbra, Portucel, Refer, Simarsul, Solsado, Sopac-Sociedade Produtora de Adubos Compostos S.A., Spel - Sociedade de Parques de Estacionamento S.A. e Tecnasol.

Agradeço ao Instituto Português do Mar e da Atmosfera a disponibilização de uma estação sísmica Güralp para o registo de vibrações ambientais e ao Departamento de Engenharia Geográfica Geofísica e Energia da Faculdade de Ciências de Lisboa a disponibilização de equipamento para a realização dos ensaios ReMi.

Fica um agradecimento a todos os elementos da Comissão de Acompanhamento pelo apoio prestado (José António de Almeida, Paulo Caetano, Paula Teves-Costa, Fernando Carrilho e Carlos Costa).

Quero deixar os meus agradecimentos aos orientadores Paulo Caetano e Paula Teves-Costa que estiveram sempre disponíveis para me ouvir e esclarecer dúvidas.

Agradeço ao coordenador da Proteção Civil Municipal de Setúbal Comandante José Luís Bucho por todo o apoio prestado na execução dos ensaios em Setúbal. Agradeço ao Serviço Municipal de Proteção civil do Barreiro pelos contactos estabelecidos com a Baía Tejo S.A. Agradeço ao Comandante dos Bombeiros Voluntários do Barreiro José Figueiredo, pelos contactos estabelecidos que nos permitiram aceder a terrenos privados. Agradeço aos elementos dos Bombeiros Voluntários do Barreiro que me ajudaram na execução de ensaios ReMi.

Aos Comandantes Operacionais Distritais André Fernandes e Elísio Oliveira, agradeço a disponibilidade que me foi facultada para a realização do trabalho de campo. Agradeço à Susana Silva e ao Artur Gomes pelas cartas de conforto que me disponibilizaram e que foram importantes na fase inicial do processo de candidatura ao doutoramento.

Foram muitos os colegas que me ajudaram no trabalho de campo, sem eles não teria sido possível escrever esta tese. Agradeço à Joana Carvalho, ao Afonso Loureiro e ao Professor Josep Batlló os ensinamentos sobre a realização dos ensaios ReMi, sem eles não os teria conseguido realizar. Agradeço individualmente e por ordem alfabética aos que me ajudaram na realização dos ensaios H/V: Andrés Gago, João Brissos, Daniel André, José Guilherme, Luís Cristóvão, Luís Simões, Mário Branco, Mauro Castro. Agradeço individualmente e por ordem alfabética aos que me ajudaram na execução dos ensaios ReMi: Afonso Loureiro, Carlos Graça, Inês Bruno, Joana Carvalho, João Bonacho, João Brissos, Jorge Carrula, Luísa Rodrigues (minha mulher), Mónica Cabral, Paulo Gameiro e Pedro Rodrigues. Agradeço ao Alexandre Aleluia os contactos que nos permitiram aceder aos edifícios onde realizámos os registos de vibrações ambientais e a sua ajuda na execução desses ensaios. Agradeço aos restantes elementos do Serviço Municipal de Proteção Civil de Setúbal e da Companhia de Bombeiros Sapadores de Setúbal que me acompanharam e permitiram efetuar os registos das vibrações nos edifícios de Setúbal.

Agradeço ao André Sanches pelas aplicações desenvolvidas para os cálculos dos perfis médios de  $V_s$ . Agradeço ao Professor Carlos Sousa Oliveira pela disponibilização de dados referentes à frequência natural do edificado em Portugal e ao Daniel Vendas pela disponibilização, para consulta, de cartografia geológica do Barreiro e Setúbal.



## RESUMO

Esta investigação tem como objetivo principal estudar a ocorrência de efeitos de sítio em duas áreas localizadas nos concelhos do Barreiro e de Setúbal face à ocorrência de sismos fortes. Registaram-se vibrações ambientais e utilizaram-se duas técnicas, a de Nakamura, para se determinar as frequências naturais dos solos, e a da Refração de Microtremores (ReMi) para se estimar a velocidade das ondas S ( $V_s$ ) em profundidade e do seu valor médio nos primeiros 30 metros ( $V_{s30}$ ). Os resultados de  $V_{s30}$  permitiram classificar os solos das duas áreas estudadas de acordo com o Eurocódigo 8. Utilizou-se cartografia geológica e consultaram-se relatórios geotécnicos para se caracterizarem os terrenos estudados. Compilaram-se e analisaram-se *logs* de sondagens que foram utilizados na estimativa da espessura das formações superficiais, dos valores de ensaios SPT ( $N_{SPT}$ ) e da profundidade de  $N_{SPT60}$ . Realizou-se uma análise unidimensional linear equivalente para se identificarem as frequências naturais dos solos e as amplificações do movimento sísmico. De modo a aferir os resultados obtidos com as diferentes técnicas, compararam-se as distribuições espaciais das frequências naturais dos solos com as suas propriedades geotécnicas. As frequências naturais dos solos e respetivas amplificações permitiram, em conjunto com a distribuição espacial de  $V_{s30}$ , identificar os locais onde podem ocorrer efeitos de sítio. Na cidade de Setúbal foram calculadas as frequências naturais de vários edifícios e estabeleceram-se correlações entre o número de pisos e as frequências observadas. Nesta cidade identificou-se, ao nível das subsecções estatísticas, o número de edifícios que pode vir a sofrer fenómenos de ressonância e analisaram-se individualmente alguns deles relativamente à sua suscetibilidade a fenómenos de ressonância. Os resultados obtidos têm aplicação e devem ser incorporados no planeamento urbano, na elaboração de planos de emergência e na informação pública.

Palavras-chave: caracterização geotécnica, frequência natural dos solos, velocidade das ondas S, efeitos de sítio, planeamento urbano.



## ABSTRACT

The main objective of this research is to study the occurrence of site effects in two selected areas of Barreiro and Setúbal municipalities, due to strong soil motion produced by a large earthquake. Ambient vibrations were recorded and two techniques were used. Natural frequencies of soils were determined using Nakamura technique and S velocities ( $V_s$ ) and their average value in the first 30 meters ( $V_{s30}$ ) was calculated using Microtremors Refraction technique (ReMi).  $V_{s30}$  results allowed classifying the Barreiro and Setúbal soils according to Eurocode 8. Geological maps and geotechnical reports were consulted in order to characterize the studied areas. Borehole logs were compiled and analyzed to determine the thickness of shallow formations,  $N_{SPT}$  values and  $N_{SPT60}$  depths. An one-dimensional linear equivalent analysis was performed to estimate soil's natural frequencies and their amplifications to seismic motion. In order to assess the results obtained with the different techniques, spatial distributions of natural frequencies and geotechnical properties were compared. Natural frequencies of soils and their amplifications, together with the spatial distribution of  $V_{s30}$ , allowed identifying the sites where site effects may occur. Natural frequencies of several buildings in the city of Setúbal were calculated and correlations between the number of storeys and the frequencies of the buildings were established. The number of buildings in this city which may undergo resonance phenomena was identified at the level of statistical subsections. The susceptibility to resonance phenomena of some buildings in the city of Setúbal was analyzed individually. The obtained results can be applied and should be incorporated in urban planning, in the preparation of emergency plans and in public information.

Keywords: geotechnical characterization, soil natural frequency, S wave velocity, site effects, urban planning.



# ÍNDICE GERAL

<b>DEDICATÓRIA</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>V</b>
<b>RESUMO</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE GERAL</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>XVII</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b>	<b>XXIX</b>
<b>SÍMBOLOS E ABREVIATURAS</b>	<b>XXXI</b>
<b>CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1. - As catástrofes e os sismos	2
1.2. - Políticas de prevenção e de mitigação face ao risco sísmico	3
1.3. - Efeitos de sítio	4
1.4. - Áreas de estudo	7
1.5. - Objetivos	10
1.6. - Metodologia geral	11
1.7. - Estrutura da tese	13
<b>CAPÍTULO II - CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA</b>	<b>15</b>
2.1. - Introdução	16
2.2. - Enquadramento geológico e sismicidade regional	17
2.3. - Metodologia	23
2.3.1. - Espessura das Formações Superficiais	24
2.3.2. - Análise dos resultados SPT	25
2.3.3. - Relação entre a espessura das Formações Superficiais, $N_{SPT}$ e o relevo	27
2.4. - Resultados	29
2.4.1. - Barreiro	30

2.4.1.1. - Propriedades geotécnicas	32
2.4.1.2. - Espessura das Formações Superficiais	38
2.4.1.3. - Resultados de SPT	40
2.4.1.4. - Relação entre variáveis	42
2.4.2. - Setúbal	44
2.4.2.1. - Propriedades geotécnicas	45
2.4.2.2. - Espessura das Formações Superficiais	51
2.4.2.3. - Resultados de SPT	53
2.4.2.4. - Relação entre variáveis	56
<b>CAPÍTULO III - ENSAIOS DE VIBRAÇÕES AMBIENTAIS</b>	<b>57</b>
3.1. - Introdução	58
3.2. - Metodologia	60
3.2.1. - Cálculo das curvas H/V	61
3.2.2. - Critérios SESAME	63
3.2.3. - Distribuição de $F_0$	64
3.2.4. - Distribuição de $A_0$	64
3.2.5. - Anisotropias de H/V	65
3.2.6. - Cálculo da espessura das FS com base nas curvas H/V	66
3.2.7. - Relação entre picos de frequências e $N_{SPT}$	67
3.2.8. - Distribuição de $F_0$ e estruturas tectónicas presentes	67
3.3. - Resultados e discussão	68
3.3.1. - Curvas H/V	69
3.3.2. - Cumprimento dos critérios SESAME	70
3.3.3. - Distribuição de frequências	71
3.3.4. - Amplitudes	77
3.3.5. - Azimutes das amplitudes máximas	79
3.3.6. - Curvas H/V e a espessura sedimentar	81
3.3.7. - Análise da distribuição de picos de frequências e de $N_{SPT}$	87

3.3.8. - Distribuição de $F_0$ e a Falha de Pinhal Novo-Alcochete	88
---	----

<b>CAPÍTULO IV – DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DAS ONDAS DE CORTE COM A UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DA REFRAÇÃO DE MICROTREMORES</b>	<b>93</b>
4.1. - Introdução	94
4.2. - Metodologia	96
4.2.1. - Localização dos ensaios	96
4.2.2. - Execução dos ensaios	97
4.2.3. - Cálculo de $V_{s30}$ e dos perfis de $V_s$	98
4.2.4. - Valores médios de $V_{s30}$	100
4.2.4.1. - $V_{s30}$ e a espessura das formações superficiais	100
4.2.4.2. - $V_{s30}$ e $N_{SPT60}$	101
4.2.4.3. - $V_{s30}$ e H/V	101
4.2.5. - Perfis de $V_s$	102
4.2.5.1. - A velocidade das ondas S, o topo do Pliocénico e o relevo	103
4.2.5.2. - A velocidade das ondas S e a espessura das formações superficiais	104
4.2.5.3. - Caracterização das unidades litoestratigráficas relativamente a $V_s$	104
4.2.6. - Modelos 3D e seções 2D de $V_s$	104
4.3. - Resultados e discussão	106
4.3.1. - Resultados de $V_{s30}$	106
4.3.1.1. - $V_{s30}$ e as formações superficiais	109
4.3.1.2. - $V_{s30}$ e a rigidez dos materiais	112
4.3.1.3. - $V_{s30}$ e as curvas H/V	113
4.3.2. – Perfis verticais de $V_s$	116
4.3.2.1. - Perfis médios de $V_s$ , topo do Pliocénico e o relevo	119
4.3.2.2. - Perfis médios de $V_s$ e a espessura das formações superficiais	120
4.3.2.3. - Velocidade das ondas S e as unidades litoestratigráficas	122
4.3.3 - Variação 2D da velocidade das ondas S e de $N_{SPT}$	125

<b>CAPÍTULO V - ANÁLISE UNIDIMENSIONAL LINEAR EQUIVALENTE</b>	<b>129</b>
5.1 - Introdução	130
5.2 - Metodologia	132
5.2.1 - Propriedades geotécnicas das colunas de solo	132
5.2.2 - Acelerogramas	135
5.2.3 - Cálculo das funções de transferência	137
5.2.4 - Frequências naturais dos solos e amplificações	138
5.2.5 - Funções de transferência, propriedades geotécnicas, curvas H/V e $V_{s30}$	139
5.2.5.1 - Funções de transferência e propriedades geotécnicas	139
5.2.5.2 - Comparação dos resultados 1D com as curvas H/V	140
5.2.5.2.1 - Distribuição geográfica de $F_{0s}$ , $F_0$ e $F_1$	140
5.2.5.2.2 - Funções de transferência e curvas H/V	141
5.2.5.2.3 - Comparação de $A_{0s}$ , $A_0$ e $A_1$	142
5.2.5.3 - Funções de transferência e $V_{s30}$	143
5.2.6 - Suscetibilidade dos edifícios a efeitos de ressonância	143
5.3 - Resultados e discussão	144
5.3.1 - Funções de transferência	144
5.3.2 - Distribuição das frequências naturais dos solos e respectivas amplificações	146
5.3.3 - Comparação das funções de transferência com propriedades geotécnicas, H/V e $V_{s30}$	151
5.3.3.1 - Frequência natural dos solos e propriedades geotécnicas	151
5.3.3.2 - Análise unidimensional e curvas H/V	157
5.3.3.2.1 - Distribuição de $F_{0s}$ , $F_0$ , e $F_1$	157
5.3.3.2.2 - Funções de transferência e curvas H/V	159
5.3.3.2.3 - Comparação de $A_{0s}$ com $A_0$	167
5.3.3.3 - Análise 1D e $V_{s30}$	169
5.3.4 - Zonas com maior suscetibilidade de produzir ressonância nos edifícios	170

<b>CAPÍTULO VI - SUSCETIBILIDADE DO EDIFICADO DA CIDADE DE SETÚBAL A SOFRER EFEITOS DE RESSONÂNCIA</b>	<b>173</b>
6.1 - Introdução	174
6.2 - Metodologia	177
6.2.1 - Estudo dos possíveis efeitos de ressonância estrutura-solo ao nível das subsecções estatísticas	177
6.2.1.1 - Determinação das amplificações máximas do solo por classes de frequências	177
6.2.1.2 - Identificação da frequência natural dos edifícios	180
6.2.1.3 - Determinação da suscetibilidade dos edifícios a efeitos de ressonância ao nível das subsecções estatísticas	182
6.2.2. - Análise de edifícios individualizados	184
6.3. - Resultados e discussão	187
6.3.1. - Análise ao nível das subsecções estatísticas	187
6.3.1.1. - Amplificação do movimento do solo	187
6.3.1.2. - Frequência natural dos edifícios	190
6.3.1.3. - Determinação do número de edifícios suscetíveis de sofrer ressonância em cada subsecção estatística	194
6.3.2. - Análise dos edifícios selecionados	198
<b>CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>207</b>
7.1 - Conclusões	208
7.2 - Considerações finais e trabalhos futuros	210
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>211</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>231</b>
Anexo I - Curvas H/V e gráficos de frequência-azimute do Barreiro	233
Anexo II - Curvas H/V e gráficos de frequência-azimute de Setúbal	249
Anexo III - Resultados obtidos com as curvas H/V no Barreiro	271
Anexo IV - Resultados obtidos com as curvas H/V em Setúbal	275

Anexo V - Critérios de aceitação dos resultados de H/V segundo SESAME	<b>279</b>
Anexo VI - Classificação dos terrenos segundo o EC8	<b>281</b>
Anexo VII - Geometria dos ensaios ReMi e resultados de $V_{s30}$ no Barreiro	<b>283</b>
Anexo VIII - Geometria dos ensaios ReMi e resultados de $V_{s30}$ em Setúbal	<b>289</b>
Anexo IX - Localização e resultados dos ensaios ReMi no Barreiro	<b>297</b>
Anexo X - Localização e resultados dos ensaios ReMi em Setúbal	<b>317</b>
Anexo XI - Resultados da interpolação da espessura das FS para Setúbal	<b>341</b>
Anexo XII - Funções de transferência	<b>343</b>
Anexo XIII - Caracterização dos edifícios ensaiados e valores do seu período natural de vibração	<b>349</b>
Anexo XIV - Valores dos índices de perigo utilizados para classificar a suscetibilidade dos edifícios à ocorrência de fenómenos de ressonância solo-estrutura	<b>351</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - O ciclo da Catástrofe	3
Figura 1.2 - Fatores que influenciam os danos provocados por um sismo nas estruturas	5
Figura 1.3 - Acelerogramas do sismo do México (1985)	6
Figura 1.4 - Duas técnicas utilizadas para avaliação da resposta de sítio	7
Figura 1.5 - Concelhos da Península de Setúbal e áreas de estudo	8
Figura 1.6 - Áreas de estudo e respetivas freguesias	8
Figura 1.7 - Metodologia geral	11
Figura 2.1 - Enquadramento geográfico e tectónico da Bacia Lusitaniana	17
Figura 2.2 – Extrato da Carta Geológica da Área Metropolitana de Lisboa	18
Figura 2.3 - Localização de Portugal Continental no contexto da tectónica de placas	19
Figura 2.4 - Sismicidade instrumental registada no período 1961-2017 em Portugal continental e região adjacente	20
Figura 2.5 - Isossistas dos sismos de 1858 e 1909	21
Figura 2.6 - Falhas ativas que podem causar danos nas regiões de Barreiro e Setúbal	21
Figura 2.7 - Estruturas neotectónicas	22
Figura 2.8 - Localização epicentral do sismo de 1858	22
Figura 2.9 - Metodologia seguida para a caracterização das propriedades geotécnicas das formações presentes nas regiões do Barreiro e Setúbal	23
Figura 2.10 - (a) Localização de sondagens com a discriminação das espessuras de aterros e aluviões; (b) modelo 3D obtido por interpolação segundo o método do inverso da distância; (c) seção com as espessuras dos aterros e das aluviões	24
Figura 2.11 - Exemplo do cálculo da interpolação relativa à espessura das FS (aterros e aluviões) executado com 14 sondagens	25
Figura 2.12 - Funções de transferência obtidas para duas colunas de solo, com a mesma espessura, mas constituídas por materiais de diferente rigidez	25
Figura 2.13 - (a) Localização de 14 sondagens com ensaios SPT; (b) modelo 3D de $N_{SPT}$ ; (c) seção de $N_{SPT}$	26
Figura 2.14 - Variação de $N_{SPT}$ para duas seções horizontais (a) à cota 0 m; (b) à cota -10 m	27
Figura 2.15 - Exemplo do cálculo da interpolação relativa à profundidade de $N_{SPT60}$ executado com 14 sondagens	27
Figura 2.16 - (a) Interpolação da espessura das FS; (b) interpolação da profundidade de $N_{SPT60}$	28

Figura 2.17 - (a) Extrato da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50.000, folha 34-D Lisboa; (b) modelo digital do terreno da região do Barreiro	<b>30</b>
Figura 2.18 - Localização (a) de furos de sondagens com as cotas da superfície basal do Pliocénico na região do Barreiro; (b) do horizonte intra-Neogénico em furos de sondagens e isolinhas obtidas em campanha de prospeção sísmica	<b>30</b>
Figura 2.19 - Localização no Barreiro de: (a) 289 sondagens; (b) 117 sondagens com ensaios SPT, (c) distribuição das profundidades alcançadas pelas 117 sondagens com ensaios SPT	<b>31</b>
Figura 2.20 - Exemplo de um perfil geológico-geotécnico localizado na antiga área industrial da Quimigal	<b>31</b>
Figura 2.21 - Localização de 23 perfis e de 163 sondagens realizadas na área do antigo parque industrial da CUF	<b>32</b>
Figura 2.22 - Variação de $N_{SPT}$ com a profundidade, calculada com 99 ensaios realizados em aterros no Barreiro	<b>33</b>
Figura 2.23 - Variação de $N_{SPT}$ com a profundidade observada em 206 ensaios realizados em aluviões do Barreiro	<b>34</b>
Figura 2.24 - (a) Localização no Barreiro das sondagens 442, 443, 453 e 435; (b) <i>logs</i> das sondagens	<b>35</b>
Figura 2.25 - Variação de $N_{SPT}$ com a profundidade observada em 794 ensaios realizados no Plio-Plistocénico do Barreiro	<b>37</b>
Figura 2.26 - Modelo tridimensional das espessuras das unidades consideradas para o Barreiro (aterros, aluviões e Plio-Plistocénico)	<b>38</b>
Figura 2.27 - (a) Localização no Barreiro da seção A-A'; (b) seção A-A' com a variação da espessura das FS	<b>38</b>
Figura 2.28 - (a) Localização no Barreiro da seção B-B'; (b) seção B-B' com a variação da espessura das FS.	<b>39</b>
Figura 2.29 - Espessuras do Holocénico no Barreiro: (a) aterros; (b) aluviões	<b>39</b>
Figura 2.30 - Grelha de interpolação da espessura das FS no Holocénico do Barreiro	<b>40</b>
Figura 2.31 - Modelo 3D da distribuição de $N_{SPT}$ no Barreiro	<b>40</b>
Figura 2.32- (a) Localização no Barreiro da seção A-A', (b) variação dos valores de $N_{SPT}$ segundo A-A'	<b>41</b>
Figura 2.33 - (a) Localização no Barreiro da seção B-B'; (b) variação dos valores de $N_{SPT}$ ; (c) espessura das formações superficiais no Barreiro	<b>41</b>
Figura 2.34 - Resultado da interpolação efetuada com as cotas de $N_{SPT60}$ obtidas em 92 sondagens localizadas no Holocénico do Barreiro	<b>42</b>
Figura 2.35 - Resultados para o Barreiro das interpolações (a) da espessura das FS, (b) da profundidade de $N_{SPT60}$ ; (c) relevo	<b>43</b>
Figura 2.36 - <i>Logs</i> de duas sondagens do Pliocénico do Barreiro em que $N_{SPT60}$ se localizou a profundidades superiores a 14 m	<b>43</b>

Figura 2.37 - (a) Extratos da carta geológica de Portugal à escala 1:50.000 das folhas 38B e 39A; (b) modelo digital do relevo da região de Setúbal	<b>44</b>
Figura 2.38 - (a) Localização das sondagens utilizadas na caracterização geotécnica de Setúbal e Mitrena; (b) localização das sondagens com ensaios SPT; (c) distribuição das profundidades de 267 sondagens com ensaios SPT	<b>45</b>
Figura 2.39 - Variação de $N_{SPT}$ com a profundidade observada para aterros de Setúbal e Mitrena	<b>46</b>
Figura 2.40 - (a) Variação no Barreiro de $N_{SPT}$ com a profundidade nas unidades aluvionares do Barreiro; (b) <i>log</i> da sondagem 114; (c) <i>log</i> da sondagem 158	<b>48</b>
Figura 2.41 - (a) Variação de $N_{SPT}$ com a profundidade observada em Setúbal e Mitrena; (b) <i>log</i> da sondagem 115	<b>49</b>
Figura 2.42 - Resultados de quatro ensaios <i>cross-hole</i> obtidos no Pliocénico da Mitrena	<b>50</b>
Figura 2.43 - Modelo tridimensional da espessura das FS na região de Setúbal	<b>51</b>
Figura 2.44 - (a) Localização em Setúbal da seção B-B', (b) seção com a variação da espessura das FS	<b>51</b>
Figura 2.45 - Interpolação em Setúbal das espessuras (a) dos aterros; (b) das aluviões	<b>52</b>
Figura 2.46 - (a) Curvas de nível do substrato em Setúbal; (b) 100 locais com informação relativa ao topo do Pliocénico	<b>52</b>
Figura 2.47 - Modelação das espessuras das formações superficiais para a cidade de Setúbal (a) calculada pelo método inverso da distância a uma potência; (b) calculada pelo método Kriging	<b>53</b>
Figura 2.48 - Modelo 3D obtido por interpolação de $N_{SPT}$ para Setúbal e Mitrena	<b>53</b>
Figura 2.49 - (a) Localização em Setúbal da seção A-A'; (b) valores de $N_{SPT}$	<b>54</b>
Figura 2.50 - (a) Localização em Setúbal da seção B-B'; (b) variação de $N_{SPT}$ segundo B- B'; (c) espessuras das FS segundo B-B'	<b>54</b>
Figura 2.51 - Resultados de interpolações dos valores de $N_{SPT}$ para secções horizontais em Setúbal a diferentes cotas	<b>55</b>
Figura 2.52 - Resultados para Setúbal da interpolação dos valores de profundidade de $N_{SPT60}$	<b>55</b>
Figura 2.53 - (a) Espessura para Setúbal das FS; (b) profundidade de $N_{SPT60}$ ; (c) relevo	<b>56</b>
Figura 2.54 - Distribuição no Holocénico da cidade de Setúbal (a) da espessura das FS; (b) da superfície de $N_{SPT60}$	<b>56</b>
Figura 3.1 - Metodologia empregue na aquisição, tratamento e análise de resultados obtidos nos ensaios de vibrações ambientais	<b>60</b>
Figura 3.2 - (a) Estação Güralp CMG 6TD; (b) registo de vibração ambiental	<b>61</b>
Figura 3.3 - (a) Registo de vibração ambiental de 33 minutos; (b) curva H/V	<b>62</b>
Figura 3.4 - (a) Registo de vibração ambiental; (b) curva de H/V	<b>62</b>

Figura 3.5 - Curva H/V obtida em maciço rochoso	<b>63</b>
Figura 3.6 - Valores de $F_0$ obtidos a partir de quatro registos de vibrações ambientais	<b>64</b>
Figura 3.7 - Valores de $A_0$ obtidos a partir de quatro registos de vibrações ambientais	<b>65</b>
Figura 3.8 - Ângulos de polarização horizontal	<b>65</b>
Figura 3.9 - Exemplos de curvas H/V e respetivos gráficos de frequência-azimute	<b>66</b>
Figura 3.10 - Localização dos registos de vibrações ambientais realizados no Barreiro	<b>68</b>
Figura 3.11 - Localização dos registos de vibrações ambientais efetuados em Setúbal e Mitrena	<b>68</b>
Figura 3.12 - Distribuição das percentagens de $F_0$ e de $A_0$ por classes	<b>69</b>
Figura 3.13 - Cumprimento dos critérios SESAME	<b>70</b>
Figura 3.14 - Distribuição no Barreiro: (a) dos valores de $F_0$ obtidos por interpolação; (b) espessura das FS obtida por interpolação de dados geotécnicos; (c) profundidade da superfície de $N_{SPT60}$ obtida por interpolação de dados geotécnicos	<b>71</b>
Figura 3.15 - Tipologias das curvas H/V presentes no Barreiro	<b>72</b>
Figura 3.16 - Tipos de curvas H/V presentes no Barreiro e a relação de $F_0$ e $F_1$ com interfaces em profundidade	<b>73</b>
Figura 3.17 - Distribuição no Barreiro: (a) das frequências ( $F_0$ e $F_1$ ) no Holocénico; (b) espessuras das FS obtidas com base na interpolação de dados geotécnicos	<b>74</b>
Figura 3.18 - Distribuição de $F_0$ em Setúbal e Mitrena	<b>74</b>
Figura 3.19 - Tipologias de curvas H/V obtidas em Setúbal	<b>75</b>
Figura 3.20 - Distribuição de curvas H/V segundo um perfil entre Mitrena e Setúbal	<b>75</b>
Figura 3.21 - (a) Valores de $F_0$ na zona central da cidade de Setúbal e isolinhas de interpolação; (b) Extrato da Carta Geológica de Portugal na Escala 1:50.000 da Folha 38-B Setúbal	<b>76</b>
Figura 3.22 - Distribuição no Barreiro: (a) das amplitudes $A_0$ ; (b) áreas com valores de $F_0 < 1$ Hz	<b>77</b>
Figura 3.23 - Áreas do Holocénico no Barreiro com amplitudes ( $A_0$ e $A_1$ ) superiores ou iguais a 2 e valores de frequência ( $F_0$ e $F_1$ ) entre 6 Hz e 8 Hz, entre 2,5 Hz e 4,7 Hz, e entre 2,9 Hz e 4,6 Hz	<b>77</b>
Figura 3.24 - Distribuição de: (a) $A_0$ em Setúbal e Mitrena, (b) $A_0$ na cidade de Setúbal, (c) $F_0$ na cidade de Setúbal e edifícios mais vulneráveis	<b>78</b>
Figura 3.25 - Variação dos azimutes correspondentes às amplitudes máximas das curvas H/V no Barreiro	<b>79</b>
Figura 3.26 - Polarização das máximas amplitudes das curvas H/V	<b>79</b>
Figura 3.27 - Variação em Setúbal e Mitrena dos azimutes de $F_0$	<b>80</b>

Figura 3.28 - Azimutes das amplitudes máximas em Setúbal, respetivas curvas H/V e anisotropias das amplitudes máximas	<b>80</b>
Figura 3.29 - Distribuição das espessuras de sedimentos no Barreiro	<b>81</b>
Figura 3.30 - (a) Localização no Barreiro do substrato para profundidades superiores a 200 m; (b) profundidade do limite entre o Plio-Plistocénico e o Miocénico identificado nas sondagens Br-1, Br-2, Br-4 e isolinhas da profundidade do intra-Neogénico obtidas em campanha de prospeção sísmica	<b>82</b>
Figura 3.31 - Distribuição no Barreiro (a) da espessura das FS no Holocénico calculadas com $F_0$ e $F_1$ ; (b) espessura das FS calculadas com base em sondagens; (c) diferença entre as matrizes de interpolação calculadas com os dois métodos	<b>82</b>
Figura 3.32 - Espessuras em Setúbal de sedimentos calculadas (a) com base nos valores de $F_0$ ; (b) com base em dados de sondagens; (c) profundidades do limite entre o Pliocénico e o Miocénico identificadas em cinco sondagens	<b>83</b>
Figura 3.33 - Localização em Setúbal dos registos de vibração ambiental e respetivas curvas H/V	<b>84</b>
Figura 3.34 - Relação obtida para Setúbal entre $F_0$ e a profundidade do substrato ou espessura de sedimentos para a região de Setúbal	<b>85</b>
Figura 3.35 - Espessura de sedimentos (Holocénico + Pliocénico) em Setúbal e Mitrena	<b>86</b>
Figura 3.36- Curvas H/V no Barreiro, localização do perfil de $N_{SPT}$ , valores de $N_{SPT}$ em profundidade e ao longo do perfil, espessura das FS (aterros e aluviões)	<b>87</b>
Figura 3.37 - (a) Espessura das FS no Barreiro calculada a partir dos valores de $F_0$ e $F_1$ das curvas médias de H/V do Holocénico; (b) Profundidade de $N_{SPT60}$ calculada com base em sondagens	<b>88</b>
Figura 3.38 - Localização da Falha do Pinhal Novo-Alcochete na região de Setúbal	<b>89</b>
Figura 3.39 - (a) Modelo digital do terreno de Setúbal; (b) cotas do substrato obtidas com $F_0$ ; (c) cotas do topo do Pliocénico obtidas em sondagens; (d) valores de $N_{SPT}$ segundo o perfil B-B'; (e) localização do perfil B-B'	<b>89</b>
Figura 3.40 - (a) Profundidade do substrato em Setúbal calculada com $F_0$ ; (b) variação dos azimutes das máximas amplitudes das curvas H/V	<b>90</b>
Figura 4.1 - Metodologia utilizada na determinação da velocidade das ondas S e na comparação dos resultados obtidos com as propriedades geotécnicas dos terrenos, as curvas H/V e os modelos digitais do terreno	<b>96</b>
Figura 4.2 - Aspetos da logística associada à realização dos ensaios ReMi	<b>97</b>
Figura 4.3 - Exemplos de espectros de velocidade com picagens	<b>99</b>
Figura 4.4 - Exemplo de um <i>kink</i> presente na curva de dispersão	<b>99</b>
Figura 4.5 - (a) Resultados de $V_{s30}$ de três ensaios ReMi realizados no mesmo local; (b) valores médios de $V_{s30}$ ; (c) interpolação dos valores médios de $V_{s30}$	<b>100</b>
Figura 4.6 - Relação entre os valores médios de $V_{s30}$ e as profundidades de $N_{SPT60}$	<b>101</b>

Figura 4.7 - (a) Perfis de $V_s$ obtidos para um mesmo local; (b) perfis médios de $V_s$ calculados segundo diferentes intervalos; (c) perfis de $V_s$ e perfil médio de $V_s$ calculado segundo intervalos de 0,1 m	<b>102</b>
Figura 4.8 - (a) Perfis de $V_s$ e unidades litoestratigráficas consideradas; (b) espessuras das unidades litoestratigráficas obtidas por interpolação de <i>logs</i> de sondagens; (c) $N_{SPT}$ de uma sondagem localizada a menos de 200 m do ponto central dos ensaios ReMi	<b>103</b>
Figura 4.9 - (a) Quatro perfis médios de $V_s$ ; (b) modelo tridimensional obtido com base nos perfis médios de $V_s$	<b>104</b>
Figura 4.10 - Valores de $V_s$ obtidos para uma superfície horizontal às cotas (a) 0 m; (b) -10 m	<b>105</b>
Figura 4.11 - Locais onde se realizaram os ensaios ReMi (a) Barreiro; (b) Setúbal	<b>106</b>
Figura 4.12 - Diferença entre os valores obtidos manualmente e automaticamente com a utilização do módulo ReMiDisper	<b>107</b>
Figura 4.13 - (a) Distribuição no Barreiro dos valores médios de $V_{s30}$ obtida por interpolação segundo o método do inverso da potência das distâncias; (b) identificação das áreas pertencentes à classe de terrenos do tipo C com valores de $V_{s30}$ inferiores a 360 m/s	<b>108</b>
Figura 4.14 - Distribuição em Setúbal (a) dos valores médios de $V_{s30}$ estimados através do método do inverso da distância a uma potência; (b) áreas pertencentes à classe de terrenos do tipo C ( $V_{s30} < 360$ m/s)	<b>108</b>
Figura 4.15 - Interpolação para o Barreiro (a) dos valores médios de $V_{s30}$ ; (b) da espessura das formações superficiais obtidas com base nos <i>logs</i> das sondagens	<b>109</b>
Figura 4.16 - Interpolação para Setúbal (a) dos valores médios de $V_{s30}$ ; (b) da espessura das formações superficiais obtidas com base nos <i>logs</i> das sondagens	<b>110</b>
Figura 4.17 - Correlação no Barreiro entre valores médios de $V_{s30}$ e a espessura das FS retiradas de sondagens	<b>110</b>
Figura 4.18 - Correlação em Setúbal entre valores médios de $V_{s30}$ e a espessura das FS retiradas de sondagens	<b>111</b>
Figura 4.19 - Correlação para o Barreiro e Setúbal entre $V_{s30}$ e a espessura das FS	<b>111</b>
Figura 4.20 - Interpolação para o Barreiro (a) dos valores médios de $V_{s30}$ ; (b) profundidade de $N_{SPT60}$	<b>112</b>
Figura 4.21 - Interpolação para Setúbal e Mitrena (a) dos valores médios de $V_{s30}$ ; (b) profundidade de $N_{SPT60}$	<b>112</b>
Figura 4.22 - Correlações obtidas entre os valores médios de $V_{s30}$ e a profundidade de $N_{SPT60}$ para o Barreiro e Setúbal	<b>113</b>
Figura 4.23 - Valores obtidos por interpolação para o Barreiro de (a) valores médios de $V_{s30}$ ; (b) valores de $F_0$ ; (c) valores de $F_0$ e $F_1$ relacionados com o limite entre o Holocénico e o Pliocénico	<b>113</b>
Figura 4.24 - Interpolação para o Barreiro (a) dos valores médios de $V_{s30}$ ; (b) da espessura das FS obtidas com base em $F_0$ e $F_1$ das curvas H/V do Holocénico do Barreiro	<b>114</b>
Figura 4.25 - Correlações entre os valores das curvas H/V e valores médios de $V_{s30}$ para o Holocénico do Barreiro	<b>114</b>

Figura 4.26 - Correlação entre valores médios de $V_{s30}$ e picos de frequência de curvas H/V	115
Figura 4.27 - Distribuição das amplitudes máximas de HVSR e HVNR agrupadas por classes de terrenos segundo EC8	116
Figura 4.28 - Exemplos de Inversões da velocidade das ondas S ao longo de perfis médios	116
Figura 4.29 - Perfil de $V_s$ obtido com a técnica MASW	117
Figura 4.30 - Localização no Barreiro dos ensaios que apresentaram inversões de $V_s$	117
Figura 4.31 - Perfil de $V_s$ obtido com a técnica ReMi	118
Figura 4.32 - (a) Cotas do topo do Pliocénico no Barreiro obtidas com base nos perfis médios de $V_s$ ; (b) cotas do topo do Pliocénico calculadas com base nos <i>logs</i> das sondagens; (c) modelo digital do relevo calculado pelo método da triangulação	119
Figura 4.33 - (a) Cotas do topo do Pliocénico em Setúbal obtidas com base nos perfis médios de $V_s$ ; (b) cotas do topo do Pliocénico calculadas com base nos <i>logs</i> das sondagens; (c) modelo digital do relevo obtido pelo método da triangulação	119
Figura 4.34 - Espessura das FS no Barreiro obtidas com base (a) nos perfis de $V_s$ ; (b) nos <i>logs</i> das sondagens	120
Figura 4.35 - Espessura das formações superficiais no Barreiro elaborada com dados dos ensaios ReMi e dados geotécnicos	121
Figura 4.36 - Espessura das FS em Setúbal obtidas: (a) com os perfis médios de $V_s$ ; (b) com as sondagens; (c) com todos os dados anteriores	121
Figura 4.37 - Resultados de quatro ensaios <i>cross-hole</i> obtidos no Pliocénico da Mitrena	124
Figura 4.38 - Resultados de alguns ensaios ReMi realizados no Pliocénico da Mitrena	124
Figura 4.39 - Interpolações para o Barreiro de: (a) $N_{SPT}$ para cota +10 m; (b) $N_{SPT}$ cota 0 m; (c) $N_{SPT}$ cota -10 m; (d) $V_s$ cota +10 m; (e) $V_s$ cota 0 m; (f) $V_s$ cota -10 m	126
Figura 4.40 - Interpolações para Setúbal de: (a) $N_{SPT}$ para cota +10 m; (b) $N_{SPT}$ cota 0 m; (c) $N_{SPT}$ cota -10 m; (d) $V_s$ cota +10 m; (e) $V_s$ cota 0 m; (f) $V_s$ cota -10 m	127
Figura 4.41 - Relação entre os valores de $V_s$ e $N_{SPT}$ retirados das Figuras 4.39 e 4.40	128
Figura 5.1 - Localização dos pontos onde se calcularam as funções de transferência com o SHAKE2000	130
Figura 5.2 - Funções de transferência para duas colunas de solo com a mesma espessura mas constituídas por materiais com diferente rigidez	131
Figura 5.3 - Metodologia seguida na obtenção das funções de transferência	132
Figura 5.4 - Exemplo de um perfil médio de $V_s$ constituído por doze camadas	133
Figura 5.5 - Curvas da redução do módulo e de amortecimento	135
Figura 5.6 - Localização dos epicentros dos sismos utilizados para o cálculo das funções de transferência	135

Figura 5.7 - Acelerogramas dos sismos que serviram de <i>input</i> para os cálculos efetuados com o SHAKE2000	<b>137</b>
Figura 5.8 - Exemplo de cinco funções de transferência	<b>137</b>
Figura 5.9 - Exemplo de cinco funções de transferência obtidas com cinco sismos e para um mesmo local no Holocénico de Setúbal.	<b>138</b>
Figura 5.10 - Metodologia seguida na obtenção de grelhas de interpolação de $F_{0s}$ e $A_{0s}$	<b>139</b>
Figura 5.11 - Funções de transferência calculadas com cinco sismos e a curva H/V obtida para o mesmo local	<b>140</b>
Figura 5.12- Funções de transferência calculadas para três locais diferentes	<b>141</b>
Figura 5.13 - Funções de transferência obtidas para determinado local	<b>143</b>
Figura 5.14 - Cinco funções de transferência calculadas para um mesmo local e picos de frequências com amplificações superiores a 2	<b>145</b>
Figura 5.15 - Variação dos espectros de amplificação em função das distâncias epicentrais	<b>145</b>
Figura 5.16 - Resultados da distribuição dos valores de $F_{0s} \leq 12$ Hz para o Barreiro calculados com os sismos (a) Kobe; (b) Tottori; (c) Northridge. Resultados da distribuição dos valores de $A_{0s}$ calculados com os sismos (d) Kobe; (e) Tottori; (f) Northridge	<b>147</b>
Figura 5.17 - Resultados da distribuição dos valores de $F_{0s} \leq 12$ Hz para o Barreiro calculados com os sismos (a) Hokkaido3; (b) Hokkaido2. Resultados da distribuição dos valores de $A_{0s}$ calculados com os sismos (c) Hokkaido3; (d) Hokkaido2	<b>148</b>
Figura 5.18 - Resultados da distribuição dos valores de $F_{0s} \leq 12$ Hz para Setúbal calculados com os sismos (a) Kobe; (b) Tottori; (c) Northridge. Resultados da distribuição dos valores de $A_{0s}$ calculados com os sismos (d) Kobe; (e) Tottori; (f) Northridge	<b>149</b>
Figura 5.19 - Resultados da distribuição dos valores de $F_{0s} \leq 12$ Hz para Setúbal calculados com os sismos (a) Hokkaido3; (b) Hokkaido2. Resultados da distribuição dos valores de $A_{0s}$ calculados com os sismos (c) Hokkaido3; (d) Hokkaido2	<b>150</b>
Figura 5.20 - Funções de transferência obtidas no Holocénico e no Plio-Plistocénico de Setúbal	<b>152</b>
Figura 5.21 - Distribuição espacial para o Barreiro e com o sismo de Kobe de: (a) $F_{0s}$ (Hz); (b) $A_{0s}$ ; (c) espessura das FS	<b>153</b>
Figura 5.22 - Distribuição espacial para Setúbal e com o sismo de Kobe de: (a) $F_{0s}$ (Hz); (b) $A_{0s}$ ; (c) espessura das FS	<b>153</b>
Figura 5.23 - Relação entre os valores médios de $F_{0s}$ identificados nas funções de transferência calculadas com cinco sismos e a espessura das formações superficiais	<b>154</b>
Figura 5.24 - Distribuição no Barreiro de (a) $F_{0s}$ com o sismo de Kobe; (b) profundidade a que se encontra a superfície de $N_{SPT60}$	<b>155</b>
Figura 5.25 - Distribuição em Setúbal de (a) valores de $F_{0s} \leq 12$ Hz obtidos com o sismo de Kobe; (b) distribuição da profundidade de $N_{SPT60}$	<b>155</b>
Figura 5.26 - Correlações entre $F_{0s}$ e a profundidade de $N_{SPT60}$	<b>156</b>

Figura 5.27 - Relação entre as amplificações ( $A_{0s}$ ) e a profundidade de $N_{SPT60}$	<b>157</b>
Figura 5.28 - Interpolações obtidas para o Barreiro: (a) $F_{0s}$ obtidos com o sismo de Kobe; (b) $F_0$ ; (c) $F_{01}$	<b>159</b>
Figura 5.29 - Grelhas obtidas para o Barreiro com base na subtração de $F_{0s}-F_{01}$	<b>158</b>
Figura 5.30 - Grelhas obtidas para Setúbal com base na subtração de $F_{0s}-F_0$	<b>158</b>
Figura 5.31 - Perfis no Barreiro utilizados na comparação das funções de transferência com as curvas médias H/V	<b>159</b>
Figura 5.32 - Funções de transferência do Barreiro ao longo do perfil 1: ReMi 21, 5, 8 e 16 e curvas médias H/V 104, 112, 104, 105, 98 e 100	<b>160</b>
Figura 5.33 - (a) Espessura das FS no Barreiro ao longo do perfil 1, localização dos ensaios ReMi 21, 5, 8 e 16 e dos registos de vibrações ambientais 98, 100, 104, 105, 112; (b) variação dos valores de $F_{0s}$ (Hz), dos picos H/V (Hz) e da espessura das FS segundo o perfil 1	<b>161</b>
Figura 5.34 - Funções de transferência no Barreiro ao longo do perfil 2: ReMi 4, 10 e curvas médias H/V	<b>161</b>
Figura 5.35 - Localização em Setúbal dos ensaios do perfil 3 (ensaios ReMi 31, 20, 6, 11, 3, 4, 17 e 10) (curvas H/V 495, 402, 403, 412, 445, 442, 431 e 439)	<b>162</b>
Figura 5.36 - Perfil 3 em Setúbal: (a) funções de transferência e curvas H/V; (b) Frequências naturais dos solos ( $F_{0s}$ ), picos de H/V ( $F_0$ ), espessuras das formações superficiais (FS) e profundidade de $N_{SPT60}$	<b>163</b>
Figura 5.37 - Localização em Setúbal dos ensaios do perfil 4 (ensaios ReMi 32, 13, 1, 3, 11, 6 e 20) (curvas H/V 511, 463, 411, 412, 403 e 402)	<b>164</b>
Figura 5.38 - Perfil 4 em Setúbal: (a) funções de transferência e curvas H/V; (b) Frequências naturais dos solos ( $F_{0s}$ ), picos de H/V ( $F_0$ ), espessuras das formações superficiais (FS) e profundidade de $N_{SPT60}$	<b>165</b>
Figura 5.39 - (a) Perfil médio de $V_s$ obtido no ensaio ReMi 6 (Setúbal); (b) espessura das diferentes unidades presentes no local dos ensaios ReMi obtidas por interpolação de dados geotécnicos; (c) funções de transferência obtidas com o perfil médio de $V_s$ e com cinco sismos	<b>166</b>
Figura 5.40 - Distribuição no Barreiro de: (a) $A_{0s}$ obtidas com o sismo Kobe; (b) $A_0$ (a partir das curvas médias H/V)	<b>167</b>
Figura 5.41 - Grelhas resultantes da subtração entre $A_{0s} - A_0$ para o Barreiro	<b>168</b>
Figura 5.42 - Setúbal: (a) distribuição das amplificações máximas ( $A_{0s}$ ) com o sismo de Kobe e $F_{0s} \leq 12$ Hz; (b) distribuição das amplitudes máximas H/V ( $A_0$ )	<b>168</b>
Figura 5.43 - Grelhas resultantes da subtração entre $A_{0s} - A_0$ para Setúbal	<b>169</b>
Figura 5.44 - Valores obtidos para o Barreiro relativos à distribuição de: (a) $F_{0s}$ obtida com o sismo de Kobe; (b) $V_{s30}$	<b>170</b>
Figura 5.45 - Valores obtidos para Setúbal relativos à distribuição de: (a) $F_{0s}$ obtida com o sismo de Kobe; (b) $V_{s30}$	<b>170</b>
Figura 5.46 - Áreas onde os edifícios poderão sofrer ressonância	<b>171</b>

Figura 6.1 - (a) Número de edifícios existentes em Setúbal em cada subseção estatística; (b) concentração de edifícios em cada subseção estatística	<b>175</b>
Figura 6.2 - Percentagem de edifícios existentes em Setúbal segundo o número de pisos por subseção estatística	<b>175</b>
Figura 6.3 - 215 subseções estatísticas de Setúbal consideradas no presente estudo	<b>176</b>
Figura 6.4 - Distribuição em Setúbal do número e percentagem de edifícios em função do número de pisos	<b>176</b>
Figura 6.5 - Metodologia utilizada no cálculo dos valores das amplificações do solo a partir das funções de transferência	<b>178</b>
Figura 6.6 - Grelhas de amplificação do sismo Hokkaido3 obtidas com base nas funções de transferência para cada uma das frequências da classe 0,5-0,9 Hz	<b>178</b>
Figura 6.7 - Integração das cinco grelhas de amplificação obtidas para a classe 0,5-0,9 Hz	<b>179</b>
Figura 6.8 - Cálculo do valor final de amplificação de uma célula pelo método do valor máximo	<b>179</b>
Figura 6.9 - Determinação de valores médios de amplificação	<b>179</b>
Figura 6.10 - Modificação do período natural dos edifícios devido ao sismo de Lorca de 2011	<b>181</b>
Figura 6.11 - Correlação entre o número de pisos e o período dos edifícios localizados em solos e em rocha	<b>181</b>
Figura 6.12 - Exemplo de um local onde se realizou um registo de vibrações ambientais	<b>182</b>
Figura 6.13 - Métodos para a seleção das subseções estatísticas que apresentam amplificações	<b>183</b>
Figura 6.14 - Esquema da metodologia utilizada na estimativa do número de edifícios com 10 a 16 pisos suscetíveis à ressonância	<b>184</b>
Figura 6.15 - Exemplificação da determinação do índice de classificação do perigo à ressonância de quatro edifícios, com base na análise das funções de transferência	<b>186</b>
Figura 6.16 - Amplificações médias do movimento do solo na cidade de Setúbal em cada classe de frequência	<b>188</b>
Figura 6.17 - Amplificações máximas do movimento do solo na cidade de Setúbal em cada classe de frequência	<b>189</b>
Figura 6.18 - Localização na carta geológica dos edifícios da cidade de Setúbal onde se executaram registos de vibrações ambientais	<b>190</b>
Figura 6.19 - (a) Registo das vibrações ambientais efetuado na cobertura de um edifício de betão com 8 pisos na cidade de Setúbal; (b) Curva média $H/V_E$ ; (c) espectros médios da componente vertical; (d) da componente N-S (longitudinal); (e) da componente E-W (transversal)	<b>191</b>
Figura 6.20 – (a) Curva média $H/V_E$ obtida num edifício de alvenaria com 2 pisos na cidade de Setúbal; (b) curva média $H/V$ obtida num registo efetuado no solo; (c) espectro das amplitudes para a componente vertical; (d) para a componente N-S (longitudinal); (e) para a componente E-W (transversal)	<b>191</b>

Figura 6.21 - Relação entre o número de pisos e a frequência natural de um conjunto de 36 edifícios da cidade de Setúbal determinada a partir da análise das curvas médias de $H/V_E$	<b>192</b>
Figura 6.22 - Relação entre o número de pisos e a frequência natural obtida para a cidade de Setúbal	<b>192</b>
Figura 6.23 - Distribuição geográfica na cidade de Setúbal ao nível das subseções estatísticas do número de edifícios, com 16 a 7 pisos, suscetíveis a efeitos de ressonância	<b>195</b>
Figura 6.24 - Distribuição geográfica na cidade de Setúbal ao nível das subseções estatísticas do número de edifícios, com 6 a 4 pisos, suscetíveis a efeitos de ressonância	<b>196</b>
Figura 6.25 - Distribuição geográfica na cidade de Setúbal ao nível das subseções estatísticas do número de edifícios, com 3 a 1 pisos, suscetíveis a efeitos de ressonância	<b>197</b>
Figura 6.26 - Edifício 1 (Águas do Sado); Funções de transferência calculadas com os cinco sismos	<b>198</b>
Figura 6.27 - Edifício 3 (Cáritas Diocesana de Setúbal); Funções de transferência calculadas com os cinco sismos	<b>199</b>
Figura 6.28 - Edifício 5; Funções de transferência calculadas com os cinco sismos	<b>199</b>
Figura 6.29 - Edifício 7; Funções de transferência calculadas com os cinco sismos	<b>200</b>
Figura 6.30 - Edifício 10 (Biblioteca Municipal); Funções de transferência calculadas com os cinco sismos	<b>200</b>
Figura 6.31 - Edifício 11 (Hotel Esperança); Funções de transferência calculadas com os cinco sismos	<b>201</b>
Figura 6.32 - Edifício 13 (Sociedade Musical Capricho de Setúbal); Funções de transferência calculadas com os cinco sismos	<b>201</b>
Figura 6.33 - Edifício 14; Funções de transferência calculadas com os cinco sismos	<b>202</b>
Figura 6.34 - Edifício 19; Funções de transferência calculadas com os cinco sismos	<b>202</b>
Figura 6.35 - Edifício 20; Funções de transferência calculadas com os cinco sismos	<b>203</b>
Figura 6.36 - Edifício 24 (Escola Básica dos Pinheirinhos); Funções de transferência calculadas com os cinco sismos	<b>203</b>
Figura 6.37 - Edifício 32 (HSB edifício recente); Funções de transferência calculadas com os cinco sismos	<b>204</b>
Figura 6.38 - Edifício 33 (HSB edifício antigo); Funções de transferência calculadas com os cinco sismos	<b>204</b>
Figura 6.39 - Edifício 34 (PSP de Setúbal); Funções de transferência calculadas com os cinco sismos	<b>205</b>



# ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 - Número de habitantes e de edifícios existentes nos concelhos e freguesias que se localizam nas áreas de estudo do Barreiro e Setúbal	9
Tabela 2.1 - Valores de $N_{SPT}$ retirados do <i>log</i> de uma sondagem e introduzidos no <i>RockWorks15</i>	26
Tabela 2.2 - Lista das 19 entidades que disponibilizaram informação geotécnica das áreas do Barreiro e Setúbal	29
Tabela 2.3 - Valores estatísticos calculados com 99 ensaios SPT realizados em aterros do Barreiro	33
Tabela 2.4 - Parâmetros geotécnicos das aluviões do Barreiro	34
Tabela 2.5- Valores estatísticos relativos aos 206 ensaios SPT realizados nas aluviões do Barreiro	34
Tabela 2.6 - Valores de $N_{SPT}$ das unidades do Plio-Plistocénico do Barreiro	36
Tabela 2.7 - Parâmetros do peso volúmico do Plio-Plistocénico presentes na Baía Tejo	36
Tabela 2.8 - Valores estatísticos relativos aos 794 ensaios SPT realizados no Plio-Plistocénico do Barreiro	36
Tabela 2.9 - Valores médios e medianas de $N_{SPT}$ em função da profundidade observada em 794 ensaios realizados no Plio-Plistocénico no Barreiro	37
Tabela 2.10 - Valores de $N_{SPT}$ medidos no centro histórico de Setúbal	46
Tabela 2.11 - Valores estatísticos de $N_{SPT}$ relativos aos 237 ensaios realizados em aterros de Setúbal e Mitrena	46
Tabela 2.12 - Valores dos pesos específicos dos materiais dos complexos Argiloso e Lodoso de Setúbal	47
Tabela 2.13 - Valores estatísticos relativos aos 428 ensaios SPT realizados em aluviões de Setúbal e Mitrena	47
Tabela 2.14 - Propriedades geotécnicas do complexo arenoargiloso	48
Tabela 2.15 - Propriedades geotécnicas das litologias do complexo arenoso	49
Tabela 2.16 - Valores estatísticos relativos aos 2285 ensaios SPT realizados no Plio-Plistocénico de Setúbal e Mitrena	49
Tabela 2.17 - Valores médios e medianas de $N_{SPT}$ em função da profundidade no Plio-Plistocénico, observada em 2285 ensaios SPT realizados no Plio-Plistocénico de Setúbal e Mitrena	50
Tabela 3.1 - Percentagens de cumprimento dos critérios SESAME	70
Tabela 3.2 - Valores utilizados no cálculo da correlação entre a espessura de sedimentos e frequências para a região de Setúbal	84
Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados na aquisição de dados dos ensaios ReMi	97

Tabela 4.2 - Valores médios de $V_s$ calculados para as unidades litoestratigráficas do Barreiro	<b>122</b>
Tabela 4.3 - Valores médios de $V_s$ calculados para as unidades litoestratigráficas de Setúbal	<b>122</b>
Tabela 4.4 - Valores de $V_s$ obtidos por outros autores com a técnica ReMi	<b>123</b>
Tabela 4.5 - Valores de $V_s$ obtidos por diferentes autores com a utilização de diversas técnicas	<b>123</b>
Tabela 4.6 - Correlações entre $V_s$ e $N_{SPT}$	<b>128</b>
Tabela 5.1- Valores dos pesos específicos considerados para os diferentes complexos geotécnicos de Setúbal	<b>132</b>
Tabela 5.2 - Valores dos pesos específicos das unidades geotécnicas consideradas no estudo da resposta 1D dos solos do Barreiro e Setúbal	<b>134</b>
Tabela 5.3 - Curvas de redução do módulo e razão do amortecimento utilizadas nas diferentes unidades	<b>134</b>
Tabela 5.4 - Localização dos potenciais epicentros e lista dos sismos utilizados com as respetivas magnitudes	<b>136</b>
Tabela 5.5 - Frequência natural média, mínima e máxima do solo obtidas para o local do ensaio ReMi C e pico de frequência da curva H/V mais próxima	<b>142</b>
Tabela 5.6 - Relação entre o número de pisos dos edifícios e as frequências	<b>143</b>
Tabela 5.7 - Frequências naturais médias, mínimas e máximas do solo obtidas para cada um dos locais dos ensaios ReMi e picos de frequência das curvas H/V segundo o perfil 1	<b>160</b>
Tabela 5.8 - Frequências naturais médias, mínimas e máximas dos solos obtidas para cada um dos locais dos ensaios ReMi e picos de frequência das curvas H/V segundo o perfil 2	<b>161</b>
Tabela 6.1- Relações obtidas por vários autores entre o período de vibração dos edifícios e o número de pisos	<b>180</b>
Tabela 6.2 - Número de edifícios com 10 a 16 pisos suscetíveis a fenómenos de ressonância	<b>184</b>
Tabela 6.3 - Perigo de ressonância solo-estrutura	<b>185</b>
Tabela 6.4 - Matriz de classificação da suscetibilidade dos edifícios à ressonância com base em dois índices finais de perigo	<b>186</b>
Tabela 6.5 - Correlações obtidas para a cidade de Setúbal entre a frequência natural dos edifícios e o número de pisos	<b>193</b>
Tabela 6.6 - Relação entre o número de pisos dos edifícios e os intervalos de frequências correspondentes	<b>194</b>
Tabela 6.7 - Número total de edifícios suscetíveis de sofrerem ressonância	<b>198</b>
Tabela 6.8 - Suscetibilidade à ressonância dos edifícios analisados individualmente	<b>205</b>
Tabela 6.9 - Distribuição dos edifícios por classes de suscetibilidade	<b>206</b>

# SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$A_0$  - amplitude de  $F_0$

$A_{01}$  - amplitude de  $F_{01}$

$A_{0s}$  - amplificação de  $F_{0s}$

$A_1$  - amplitude de  $F_1$

$A_2$  - amplitude de  $F_2$

Amp - amplitude

cu - coesão não drenada

EC8 - eurocódigo 8

F - frequência (Hz)

$F_0$  - frequência do pico de amplitude máxima da curva H/V

$F_{01}$  - picos de HV associados ao limite do Holocénico / Pliocénico

$F_{0s}$  - frequência fundamental obtida com o SHAKE2000

$F_1$  - frequência do segundo pico de amplitude máxima da curva H/V

$F_2$  - pico de frequência da curva H/V com a terceira maior amplitude

$F_L$  (s) - frequência natural do edifício determinada a partir do espectro longitudinal

FS - formações superficiais (aterros e aluviões)

$F_T$  (s) - frequência natural do edifício determinada a partir do espectro transversal

g - aceleração da gravidade ( $9,8 \text{ m/s}^2$ )

$\gamma$  - peso volúmico

$\gamma_d$  - peso volúmico aparente seco

H - espessura de uma camada (m)

H/V - razão entre o espectro de Fourier das componentes horizontais e vertical

$H/V_E$  - frequência natural do edifício determinada com base na curva média H/V

HVNR – *horizontal-to-vertical spectral ratio*

HVRS - *horizontal-to-vertical ratios*

Hz - Hertz

$I_{MM}$  - intensidade de Mercalli modificada

IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera

$l_w$  - comprimento das janelas utilizado no cálculo de H/V

M.M - escala de intensidades Mercalli Modificada

m - metros

m/s - metros por segundo

MA - milhões de anos

MASW - *multichannel analysis of surface waves*

$M_L$  – magnitude local

$M_w$  - magnitude do momento

$n_c F_0$  - número de ciclos significativos utilizado no cálculo de H/V

$N_{SPT}$  - número de pancadas associadas ao ensaio SPT

$N_{SPT60}$  - quando  $N_{SPT}$  atinge o valor de 60 pancadas

$\Theta F_0$  - valor limite para a condição de estabilidade  $\sigma_A(f) < \Theta F_0$

$\rho$  - lentidão (s/m)

P - ondas sísmicas longitudinais

PS - *logging – suspension logging test*

$R^2$  - coeficiente de correlação

ReMi - *refraction microtremor*

RMS - *root mean square error* (m/s)

S - ondas sísmicas transversais

SASW - *spectral analysis of surface waves*

SCP - *seismic cone penetrometer*

SPAC - *surface-wave modified spatial autocorrelation*

SPT - *Standard Penetration Test*

T - período (s)

$V_s$  - velocidade das ondas de corte (m/s)

$V_{s30}$  - velocidade média das ondas de corte nos primeiros 30 metros (m/s)

$\epsilon F_0$  - valor limite para a condição de estabilidade  $\sigma_f < \epsilon F_0$

$\sigma_A(F)$  - desvio padrão da Amplitude

$\sigma_F$  - desvio padrão da Frequência

# **CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO**

## 1.1. As catástrofes e os sismos

As catástrofes são responsáveis pela interrupção do funcionamento de uma comunidade ou sociedade, originam uma grande quantidade de vítimas e apresentam danos materiais, económicos e ambientais, que excedem a capacidade da comunidade ou sociedade para enfrentar essa situação mediante o uso dos seus próprios recursos (UNISDR 2009). Não são situações frequentes, já que estão associadas a perigos (*hazards*) com elevados períodos de retorno, mas a sua ocorrência, como por exemplo a de um grande sismo, pode acarretar danos devastadores.

Os sismos foram o perigo natural que provocou o maior número de vítimas e os maiores danos económicos entre os anos de 1996 e 2015. Durante este período morreram 1.35 milhões de pessoas devido à ocorrência de catástrofes naturais e cerca de 53% foram vítimas de sismos (500 mil) e de tsunamis (250 mil) (UNISDR/CRED 2016). Nos últimos 100 anos ocorreram vários sismos responsáveis por mais de 200.000 mortos: Haiyuan (China), em 1920, com 273.000 mortos; Tangshan (China), em 1976, com 242.000; Oceano Índico (Indonésia), em 2004, com 228.000 mortos (sismo e tsunami) (Daniell *et al.* 2011).

Para além das vítimas mortais, outros danos podem ser quantificados: por exemplo, os sismos de Kobe (1995) e Tohoku (2011) no Japão apresentaram danos económicos de 155 mil milhões e de 223 mil milhões de dólares, respetivamente, e só os furacões Katrina, Rita e Wilma, ocorridos nos Estados Unidos em 2005, apresentaram prejuízos da mesma ordem de grandeza (219 mil milhões de dólares) (UNISDR/CRED 2016). Daniell *et al.* (2011) estudaram os danos económicos decorrentes dos sismos entre 1900 e 2011 e estimaram que a ocorrência de um evento, numa grande área metropolitana, possa produzir prejuízos médios de 328 mil milhões de dólares.

Dado o contexto geodinâmico do território e o histórico de ocorrência de eventos de grande dimensão, Portugal continental poderá sofrer os efeitos de uma catástrofe decorrente de um sismo forte. Os sismos de 1344, 1531 e de 1909, com epicentros na região do Vale Inferior do Tejo e com magnitudes estimadas de 6,0, 7,1 e 6,0 Mw (Teves-Costa *et al.* 1999), respetivamente, provocaram elevados prejuízos na região de Lisboa. O sismo de 1755, com uma distância epicentral de 200-250 km e com uma magnitude superior a 8,5 (Cabral *et al.* 2013), foi responsável por grandes danos nas regiões do Algarve e de Lisboa.

A dimensão dos danos provocados por um futuro sismo na região da grande Lisboa será função da sua génese (e.g. localização e magnitude), das características dos edifícios e das propriedades geológicas e geotécnicas dos terrenos. A influência destas propriedades na distribuição espacial dos danos tem sido observada em vários sismos (e.g. México 1985). Muitos sismos apresentaram fenómenos de amplificação para alguns intervalos de frequências devido à presença de sedimentos superficiais moles (e.g. Loma Prieta nos EUA, em 1989 e Kobe, em 1995). Estas amplificações, em conjunto com as características dos edifícios existentes (e.g. períodos de vibração natural, coeficientes de amortecimento), podem ser responsáveis por efeitos de sítio (Chávez-García & Bard 1994, Mirzaoglu & Dýkmen 2003). Mais recentemente, em maio de 2011, e no contexto Ibérico, foi possível observar a influência da geologia superficial na distribuição e grau de impactos decorrentes do sismo de Lorca, Espanha ( $M_w$  5,2) (Navarro & García-Jerez 2012).

A realização de estudos de efeito de sítio na Península de Setúbal pode disponibilizar resultados que poderão contribuir para uma melhor ocupação do solo (por exemplo evitar a sobreposição das frequências naturais dos solos e dos edifícios). Esta informação poderá ser utilizada nos instrumentos de gestão territorial numa perspetiva preventiva, mas também noutras componentes do ciclo da catástrofe.

## 1.2. Políticas de prevenção e de mitigação face ao risco sísmico

Uma catástrofe pode ter origem na ocorrência de um perigo natural (e.g. sismo, cheias, seca) ou tecnológico (e.g. explosão numa unidade industrial), que provoque avultados danos nos elementos expostos. Na Figura 1.1 está representado o chamado “ciclo da catástrofe” (UNISRD 2009, Prenger-Berninghoff *et al.* 2014) constituído por quatro fases: (i) Prevenção e Mitigação, (ii) Preparação, (iii) Resposta e (iv) Recuperação.



Figura 1.1 - O ciclo da Catástrofe (de Prenger-Berninghoff *et al.* 2014).

A Prevenção corresponde ao conceito e intenção de evitar todos os danos através de ações tomadas antes da ocorrência de uma catástrofe (UNISRD 2009). As medidas preventivas podem ser estruturais, quando envolvem por exemplo a construção de estruturas (barragens, diques, reforço de estruturas), ou não estruturais, quando se relacionam com o ordenamento do território (leis, normas, regulamentos). A Mitigação corresponde ao conjunto de atividades desenvolvidas para diminuir, ou atenuar, danos decorrentes de perigos naturais ou tecnológicos através de ações pró-ativas.

A fase de Preparação corresponde à etapa onde se procede à elaboração de planos de emergência e à realização de simulacros. Com esta fase pretendem-se adquirir instrumentos e comportamentos que permitam uma resposta otimizada para todos os tipos de emergência (e.g. colapsos de estruturas, incêndios, soterramentos) e transições metódicas e ordenadas da fase de resposta até uma recuperação sustentada (UNISRD 2009).

A Resposta refere-se à fase imediatamente a seguir à ocorrência de um perigo natural, por exemplo um sismo, em que há a intervenção dos serviços de emergência e de assistência pública. São objetivos desta fase reduzir os danos na saúde pública, zelar pela segurança e garantir as necessidades de subsistência da população afetada (Alexander 2002, UNISDR 2009).

A fase de Recuperação compreende atividades de reabilitação e de reconstrução que devem basear-se em estratégias e políticas pré-existentes, elaboradas na fase de preparação, de modo a facilitar o estabelecimento de responsabilidades institucionais claras e de modo a permitir a participação pública (UNISDR 2009).

Antes da ocorrência de uma catástrofe devem ser trabalhadas as fases de prevenção e de preparação mas, na maior parte dos casos, os decisores dão maior ênfase à fase da resposta. Esta opção poderá ter como consequência uma diminuição da eficácia e eficiência da própria resposta e atrasos no início dos processos de recuperação. O estabelecimento de medidas preventivas e de mitigação pode diminuir o número de elementos em perigo ou das suas vulnerabilidades e contribuir para uma diminuição das necessidades na fase de resposta.

Os estudos de efeito de sítio devem ser realizados durante a fase de prevenção e mitigação e os seus resultados devem ser considerados nas medidas preventivas não estruturais, nomeadamente no ordenamento do território e planeamento urbano (Japanese Geotechnical Society 1993). Em termos gerais, a construção de estruturas, nomeadamente de edifícios de habitação, em zonas constituídas por solos suscetíveis de amplificar o sinal sísmico ou de sofrer liquefação deve ser restringida ou deve seguir as metodologias construtivas necessárias para evitar o seu colapso (Vicêncio & Graça 2009). Estas políticas podem corresponder, por exemplo, a restrições ou condicionalismos na localização de estruturas com importância na fase de emergência, tais como hospitais e centros de coordenação (Vicêncio & Graça 2009, Gupta & Zafar 2016), que devem ser incorporadas nos regulamentos dos Planos Municipais de Ordenamento do Território.

Portugal apresenta um conjunto de articulados que consideram os riscos naturais e, por conseguinte, os efeitos de sítio como variáveis a ter em conta no ordenamento do território e que podem ser considerados nos vários instrumentos de gestão territorial. O Programa Nacional da Política do Ordenamento do Território (PNPOT) (Lei n.º 58/2007, de 4 de setembro) identificou a ineficiente gestão dos riscos como um dos fatores que não foram contemplados convenientemente na ocupação do território e estabeleceu como objetivo estratégico a prevenção e minimização dos riscos naturais e tecnológicos. O PNPOT refere ainda a importância de se conhecerem os riscos, avaliar os eventuais efeitos, e adotar medidas de prevenção e mitigação dos danos resultantes, nomeadamente em sede dos Planos Municipais de Ordenamento do Território. A lei que estabelece as bases gerais da política pública de solos, de ordenamento do território e de urbanismo (Lei n.º 31/2014, de 30 de maio) considera como um fim prevenir riscos coletivos e reduzir os seus efeitos nas pessoas e bens. O Regime Jurídico dos Instrumentos de Gestão Territorial (Decreto-Lei n.º 80/2015 de 14 de maio) considera ainda que os planos territoriais devem delimitar as áreas perigosas e de risco, identificar os elementos vulneráveis para cada risco e estabelecer as regras e as medidas para a prevenção e minimização de riscos.

Os resultados dos estudos de efeito de sítio são igualmente importantes para a fase de preparação, pois permitem identificar as áreas mais suscetíveis de sofrer efeitos de sítio, em função das amplificações estimadas, e de maior suscetibilidade aos fenómenos de ressonância. Esta informação contribuirá para a elaboração de um plano de emergência mais detalhado e com maior eficiência.

### **1.3. Efeitos de sítio**

Os danos provocados por um sismo dependem, essencialmente, de três fatores: (i) do mecanismo na fonte; (ii) da propagação das ondas; (iii) dos efeitos de sítio (Figura 1.2) que são função das propriedades geológicas e geotécnicas locais; (iv) resistência das estruturas (Panzera *et al.* 2013). Na Figura 1.2 apresentam-se dois acelerogramas registados durante um mesmo sismo, um registado em rocha e outro sobre formações superficiais (aterros e aluviões). O segundo apresenta maiores amplitudes e duração e, devido à interação solo-estrutura, caso as frequências naturais do solo e dos edifícios sejam semelhantes, podem verificar-se fenómenos de ressonância e a amplitude da vibração das estruturas pode aumentar significativamente (Keçeli & Cevher 2015). Esta sobreposição de frequências pode ser responsável pela concentração de danos em áreas específicas (Chávez-García & Bard 1994, Mirzaoglu & Dýkmen 2003), que podem apresentar incrementos até 2 graus nas intensidades medidas na Escala de Mercalli Modificada (MM) (Lacave *et al.* 1999). Estes efeitos foram observados nos sismos do México (1985), Loma Prieta (1989), Kobe (1995), Columbia e Turquia (1999) (Lacave *et al.* 1999, Mirzaoglu & Dýkmen 2003).

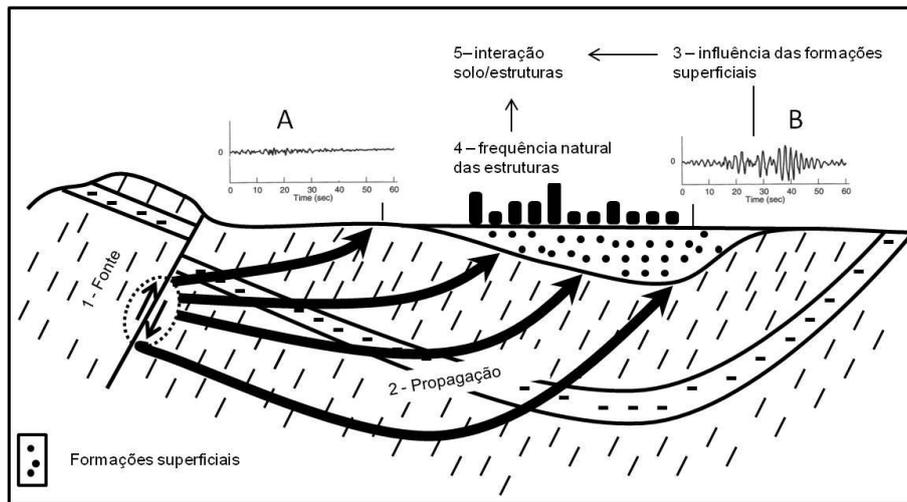


Figura 1.2 - Fatores que influenciam os danos provocados por um sismo nas estruturas. A – acelerograma registrado em rocha, B – acelerograma registrado sobre formações superficiais.

As propriedades geológicas e geotécnicas que podem induzir modificações no sinal sísmico são função: (i) da espessura e das propriedades das formações superficiais (Kramer 1996, Bakavoli *et al.* 2012); (ii) da profundidade a que se localiza o substrato e o nível freático; (iii) do contraste de impedâncias entre as formações superficiais e o substrato, que pode ter como consequência o aprisionamento das ondas sísmicas entre estas duas superfícies, originando o aumento de energia sísmica; (iv) dos efeitos da topografia local (Lacave *et al.* 1999, Zaharia *et al.* 2008, Mohamed & Fat-Helbary 2012, Gupta & Zafar 2016). A estratificação, a presença de rochas fraturadas, a alteração do maciço perto da superfície e a existência de falhas, podem também contribuir para a amplificação das ondas sísmicas (Bakavoli *et al.* 2012, Panzera *et al.* 2013).

No dia 19 de setembro de 1985 a cidade do México foi atingida por um sismo que teve o seu epicentro a 400 km da cidade e uma magnitude de 8,1 ( $M_W$ ). Apesar da distância epicentral ser elevada, o sismo provocou mais de 4000 vítimas e o colapso de 330 edifícios. Os danos infligidos por este sismo foram muito seletivos, os edifícios com 7 a 18 pisos foram os mais atingidos e a região da cidade mais devastada localizou-se num antigo lago constituído por espessas camadas de argilas moles e de siltes (Stone *et al.* 1987). Nesta área o período natural de vibração dos solos situou-se entre 1,9 e 2,8 s, valores que se aproximaram da frequência natural dos edifícios. Esta sobreposição de frequências poderá ter originado fenómenos de ressonância e contribuído para o colapso de edifícios.

Na Figura 1.3 apresentam-se as acelerações registadas por duas estações situadas na cidade do México durante o sismo de 1985 (Stone *et al.* 1987). O registo da estação UNAM realizou-se numa unidade basáltica e o da estação SCT em sedimentos pouco consolidados e, apesar da distância entre as duas estações ser de apenas quatro quilómetros, os acelerogramas apresentaram diferentes características. As acelerações registadas nas formações sedimentares exibem maiores amplitudes, menores frequências e uma maior duração.

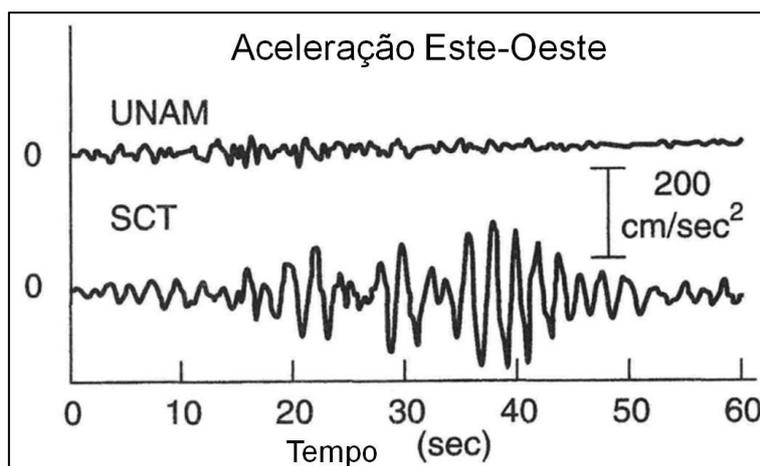


Figura 1.3 – Acelerogramas do sismo do México (1985). UNAM – estação localizada em rocha, SCT – estação localizada em sedimentos moles (modificado de Stone *et al.* 1987).

Muitas zonas urbanas com elevadas concentrações demográficas ocupam áreas constituídas por depósitos recentes e de baixa resistência, como as cidades de Los Angeles, S. Francisco, Lisboa e algumas zonas da sua Área Metropolitana. A caracterização geotécnica das formações superficiais da região de Lisboa, Vale do Tejo e Algarve e a determinação das frequências naturais dos solos e respetivas amplificações, são fundamentais para se estudarem e implementarem políticas de prevenção e de mitigação com vista à redução do risco da ocorrência de catástrofes (Navarro *et al.* 2008). Nesse sentido, em Portugal têm vindo a ser efetuados vários estudos de avaliação de efeitos de sítio na região de Lisboa, no Algarve e nos Açores (e.g. Teves-Costa *et al.* 1996, 2001a, 2007, 2014, Silvestre *et al.* 2006, Queiroz *et al.* 2007).

No estudo dos efeitos de sítio os métodos utilizados podem ser experimentais ou numéricos (Lacave *et al.* 1999).

Os métodos experimentais compreendem as seguintes técnicas: (i) cálculo da razão (S/R) entre os registos obtidos num maciço rochoso (R) e em formações superficiais (S) (*Standard Spectral Ratio*); (ii) método de Nakamura (1989), designado de um modo abreviado por razão H/V, que se baseia no cálculo da razão dos espectros Fourier das componentes horizontais (H) e da vertical (V); (iii) razão do espectro (H/V) calculada com base nas componentes horizontais e vertical de registos sísmicos.

Na técnica de Nakamura (1989) registam-se as vibrações ambientais num único ponto segundo três componentes (Norte-Sul, Este-Oeste e vertical) e na técnica *Standard Spectral Ratio* efetuam-se dois registos, um em rocha (R) e outro nas formações superficiais (S) (Figura 1.4). A diferença de execução torna a técnica H/V de Nakamura (1989) mais versátil e rápida pelo que será utilizada neste estudo.

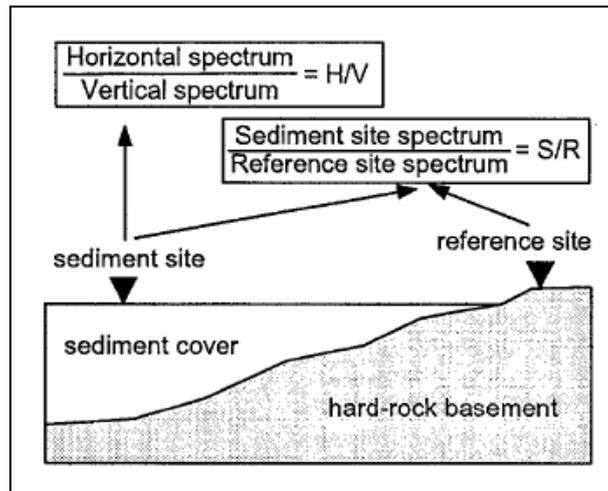


Figura 1.4 – Duas técnicas utilizadas para avaliação da resposta de sítio (de Ibs-von Seht & Wohlenberg 1999).

Para se utilizarem os métodos numéricos nos estudos de efeitos de sítio, é necessário caracterizar os terrenos relativamente a algumas propriedades geotécnicas (e.g. espessura de cada uma das unidades consideradas, velocidade das ondas S em cada uma delas, pesos volúmicos).

Estes métodos podem utilizar diferentes técnicas: (i) resposta unidimensional de uma coluna de solo, que pode ser calculada com a aplicação SHAKE2000 (Ordóñez 2003) desde que sejam conhecidas as velocidades das ondas S, as densidades, a espessura, e as curvas de amortecimento e de rigidez para cada uma das unidades existentes no local de estudo. Esta aplicação utiliza o método linear equivalente; (ii) métodos avançados, que podem utilizar vários tipos de ondas incidentes, geometrias 3D dos locais analisados e diversos comportamentos dos materiais presentes; (iii) métodos empíricos e semiempíricos que utilizam leis empíricas de atenuação e funções empíricas de Green.

#### 1.4. Áreas de estudo

Portugal Continental apresenta, no contexto da tectónica de placas, uma deformação com uma compressão máxima segundo uma direção NW-SE que resulta da convergência entre as placas Euroasiática e Africana (Nubia) com uma taxa de convergência de  $4 \pm 0,2$  mm/ano (DeMets *et al.* 2010). Esta deformação tem sido responsável pela geração dos maiores sismos interplaca e intraplaca da Europa (Custódio *et al.* 2015).

Apesar do Continente e regiões adjacentes apresentarem uma sismicidade moderada, tem-se verificado a ocorrência de grandes sismos responsáveis por elevados danos. São exemplos os sismos intraplaca de 1344, 1531, 1858 e 1909 e o grande sismo interplaca de 1755, que provocaram elevados danos na atual Área Metropolitana de Lisboa (AML). Nesta área existem locais com espessas formações superficiais (aterros e aluviões) que, na ocorrência de sismos, podem ser responsáveis por efeitos de sítio.

A Península de Setúbal apresenta uma população residente superior a 700.000 habitantes (INE 2012), que se distribui por nove concelhos (Alcochete, Almada, Barreiro, Moita, Montijo, Palmela, Seixal, Sesimbra e Setúbal) e sofreu até à atualidade intensidades máximas MM de X-IX (sismos de 1755 e de 1858). Tendo em conta a sismicidade histórica desta Península e a sua importância social e económica, no contexto da AML, justifica-se a realização de estudos para averiguar a possibilidade da ocorrência de efeitos de sítio nesta região.

Assim, foram escolhidas duas regiões da Península de Setúbal para se efetuarem estudos de efeitos de sítio: uma nos concelhos do Barreiro e Moita e outra no concelho de Setúbal (Figura 1.5). Os concelhos do Barreiro e Setúbal são os que compõem maioritariamente as duas áreas de estudo, pelo que nos próximos capítulos estas áreas serão designadas apenas pelos nomes destes dois concelhos.

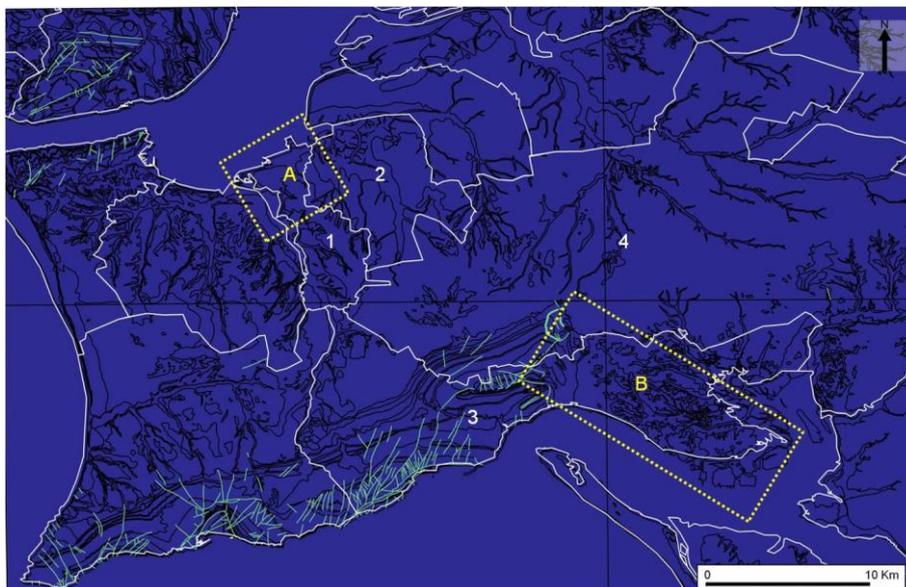


Figura 1.5 – Concelhos da Península de Setúbal e áreas de estudo. A – área de estudo pertencente aos concelhos do Barreiro e Moita, B – Área de estudo de Setúbal e Palmela. 1 – Barreiro, 2 – Moita, 3 – Setúbal, 4 – Palmela. A verde falhas geológicas.

A área de estudo do Barreiro apresenta uma dimensão aproximada de 10 km<sup>2</sup>, a de Setúbal de 34 km<sup>2</sup> e as duas áreas são constituídas por 10 freguesias (Figura 1.6). Existem freguesias periféricas, por exemplo a de Palmela, que se encontram no interior da área de estudo mas não serão consideradas na contabilização da população residente, pois são parcelas de território com baixa ocupação populacional.

De acordo com o Decreto-Lei n.º 150/2015, de 5 de agosto, existem várias indústrias de perigosidade elevada nas duas áreas de estudo, três no Barreiro e quatro em Setúbal, na Península da Mitrena (Figura 1.6). Estas indústrias poderão apresentar riscos acrescidos durante um sismo se sofrerem explosões ou fuga de materiais suscetíveis de causar impactos na saúde humana.

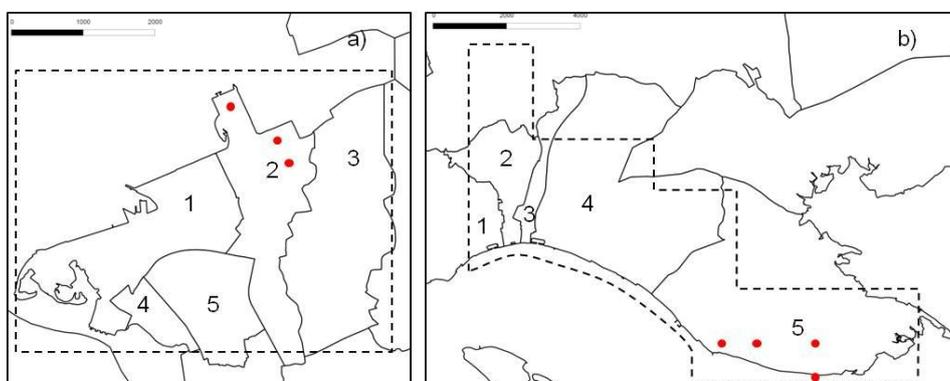


Figura 1.6 - Áreas de estudo e respetivas freguesias. (a) Barreiro: 1 – Barreiro, 2 – Lavradio, 3 – Baixa da Banheira, 4 – Verderena, 5 – Alto do Seixalinho; (b) Setúbal: 1 – Nossa Senhora da Anunciada, 2 – São Julião, 3 – Santa Maria da Graça, 4 – São Sebastião, 5 – Sado. Tracejado – delimitação das áreas de estudo; círculos vermelhos – localização aproximada de indústrias perigosas.

A população residente nas duas regiões, em 2011, era de 152.741 habitantes (INE 2012). Na área do Barreiro e parte do concelho da Moita residiam 73.242 habitantes e na área de Setúbal 93.237. O número total de edifícios existentes nas duas áreas era de 21.232, 8.772 no Barreiro e freguesia da Baixa da Banheira e 15.943 em Setúbal (Tabela 1.1). As freguesias com maior número de habitantes são as da Baixa da Banheira (Moita), Alto do Seixalinho (Barreiro) e São Sebastião (Setúbal) e, em número de edifícios, destacam-se as freguesias de São Sebastião, em Setúbal e da Baixa da Banheira, na Moita.

Tabela 1.1 - Número de habitantes e de edifícios existentes nos concelhos e freguesias que se localizam nas áreas de estudo do Barreiro e Setúbal (INE 2012).

Concelhos	Freguesias	População residente	Edifícios
Barreiro	Lavradio	14.428	1.442
	Barreiro	7.449	1.729
	Verderena	10.285	824
	Alto do Seixalinho	19.995	1.717
Moita	Baixa da Banheira	21.085	3.060
		73.242	8.772
Setúbal	São Julião	7.669	1.496
	Santa Maria da Graça	7.620	1.104
	São Sebastião	52.542	5.886
	Sado	5.783	2.045
	Nossa Senhora da Anunciada	13.738	3.483
		87.352	14.014
Total		160.594	22.786

## 1.5. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivos, realizar os seguintes estudos para as áreas definidas no Barreiro e em Setúbal:

- Identificar locais suscetíveis à ocorrência de efeitos de sítio
- Determinar as frequências naturais dos solos, respetivas amplitudes e amplificações
- Comparar os resultados obtidos com diferentes metodologias no estudo dos efeitos de sítio
- Calcular  $V_{s30}$ , perfis de  $V_s$  e classificar as formações geotécnicas relativamente aos valores de  $V_s$
- Relacionar propriedades geotécnicas (espessuras das FS,  $N_{SPT}$ ,  $N_{SPT60}$ , profundidades do topo do substrato) com  $V_{s30}$ ,  $V_s$ , frequências naturais dos solos, amplitudes e amplificações
- Identificar o número de edifícios, ao nível das subsecções estatísticas, suscetíveis a sofrerem fenómenos de ressonância (estudo realizado exclusivamente na cidade de Setúbal)
- Analisar individualmente alguns edifícios da cidade de Setúbal relativamente à sua suscetibilidade a fenómenos de ressonância (e.g. Hospital, Escola do primeiro ciclo, Quartel de Bombeiros)
- Disponibilizar informação para o planeamento urbano, com vista à redução do risco de efeitos de sítio nas áreas estudadas, nomeadamente (i) na localização de novas estruturas, (ii) na identificação de edifícios que necessitem de estudos de resistência estrutural
- Disponibilizar informação sobre as áreas mais críticas aos efeitos de sítio para (i) fins de informação pública, (ii) para a fase de preparação para resposta.

## 1.6. Metodologia geral

A metodologia geral seguida no desenvolvimento desta tese apresenta-se na Figura 1.7. O trabalho iniciou-se pela recolha, análise e georreferenciação de um vasto conjunto de informação geológica e geotécnica. Os dados geotécnicos foram obtidos em relatórios geotécnicos e foram utilizadas cartas topográficas para o cálculo de modelos digitais do terreno com base em pontos cotados.

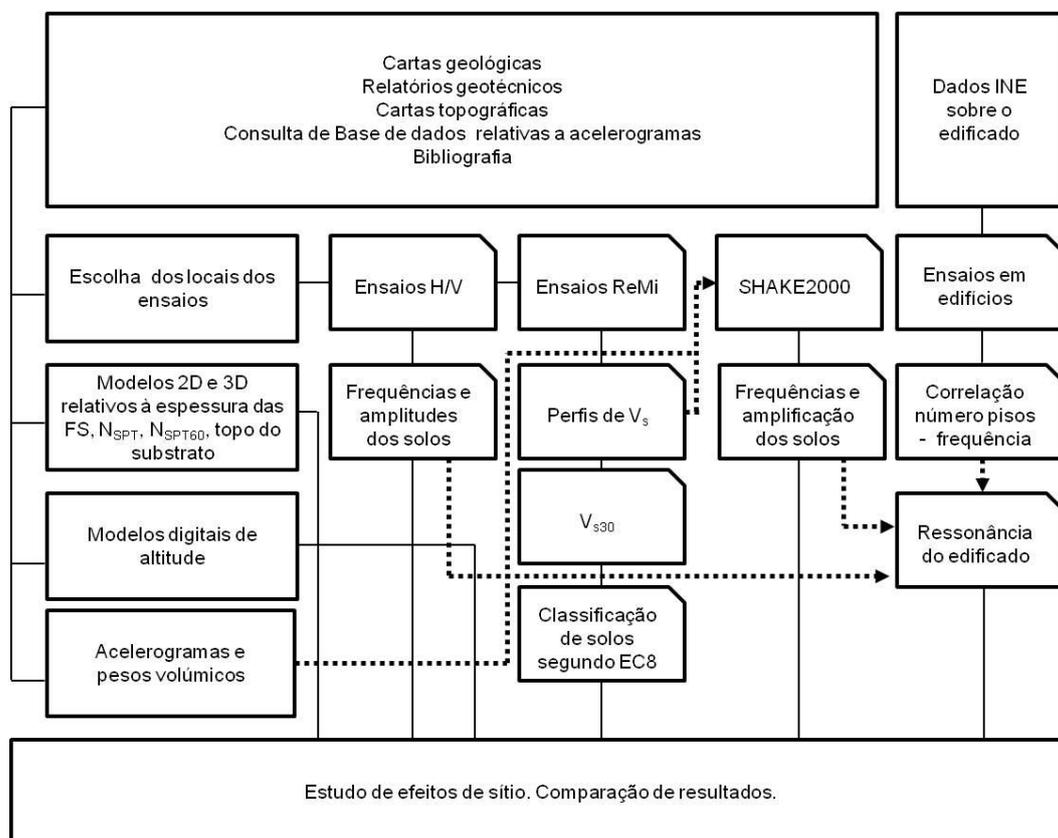


Figura 1.7 - Metodologia geral.

Com base na análise da informação geotécnica calcularam-se interpolações 2D e 3D relativas à espessura das formações superficiais (FS), aos valores de  $N_{SPT}$  e  $N_{SPT60}$  e à profundidade do substrato e estimaram-se valores médios para os pesos volumicos das formações superficiais e substratos de interesse.

Utilizaram-se métodos experimentais e numéricos no estudo dos efeitos de sítio tendo-se obtido um amplo conjunto de resultados relativos às frequências naturais dos solos, amplitudes e amplificações do movimento sísmico.

O método experimental utilizado foi a técnica de Nakamura (1989) tendo-se efetuado registos de vibrações ambientais e o cálculo das respetivas curvas H/V. O método numérico usado foi o do método linear equivalente, calculado com a aplicação SHAKE2000 (Ordóñez 2003), e compararam-se os resultados obtidos com as duas técnicas.

Realizaram-se ensaios de refração de microtremores (ReMi) (Louie 2001) com vista à determinação de  $V_{s30}$  e à classificação dos terrenos ensaiados de acordo com o Eurocódigo 8 (IPQ 2010). Estes ensaios permitiram calcular perfis da velocidade das ondas S que serviram de *input* na análise linear equivalente.

Utilizaram-se também dados dos censos (INE 2012) relativos à altura do edificado ao nível das subsecções estatísticas, para se estudar a suscetibilidade do edificado da cidade de Setúbal a sofrer efeitos de ressonância. Neste âmbito, registaram-se vibrações ambientais no topo de dezenas de edifícios com vista à determinação do período fundamental das estruturas em função do número de pisos. Foram estudados individualmente vários edifícios localizados na cidade de Setúbal relativamente à suscetibilidade à ressonância. Este estudo realizou-se exclusivamente na cidade de Setúbal devido aos seguintes fatores: (i) a medição da frequência natural dos edifícios com o recurso a vibrações ambientais registadas em edifícios, necessária para se realizar este estudo, é uma atividade demorada pelo que só podia ser executada numa área de estudo; (ii) a cidade de Setúbal foi a área onde se obteve maior informação geotécnica (e.g. espessura das FS, valores de  $V_s$ ); (iii) foi possível obter o apoio da Câmara Municipal de Setúbal no acesso aos edifícios para se calcularem as suas frequências naturais.

Os dados obtidos com as curvas H/V e com a aplicação SHAKE2000 (frequências e amplificações) foram comparados com o relevo e dados geotécnicos, de modo a verificar-se a existência de correlações entre estas variáveis.

Utilizou-se uma estação sísmica portátil Güralp de banda larga nos registos de vibrações ambientais e a aplicação *Geopsy* para se estimarem as frequências naturais dos solos e dos edifícios. Nos ensaios ReMi a aquisição dos registos de vibrações ambientais foi efetuada com um sismógrafo RAS-24 *Exploration Seismograph* de 24 canais, equipado com 24 geofones verticais de 4,5 Hz dispostos ao longo de uma linha. Para se obterem os valores da velocidade das ondas S foi necessário proceder à inversão da curva de dispersão das ondas Rayleigh. Para tal utilizou-se a aplicação comercial *SeisOpt ReMi V4.0* (Louie 2001) e utilizou-se o *Quantum GIS 1.8.0-Lisboa* para tratamento, georreferenciação e manipulação de informação.

A análise e interpolação de dados geológicos e geotécnicos foram realizadas com o recurso à aplicação *RockWorks15*. Os métodos de interpolação 2D utilizados no presente estudo foram (i) o inverso da potência das distâncias; (ii) krigagem; e (iii) triangulação (para a construção do modelo digital de altitude). O método mais utilizado no cálculo de grelhas de interpolação foi o inverso do quadrado da distância pela sua maior simplicidade. Nas interpolações 3D utilizou-se o método anisotrópico do inverso da distância disponível na aplicação do *RockWorks15*. O sistema de coordenadas utilizado na elaboração dos mapas foi o sistema de coordenadas retangulares *Datum* de Lisboa.

## 1.7. Estrutura da tese

A presente tese foi organizada em sete capítulos de acordo com os objetivos e a metodologia estabelecida para os concretizar.

Capítulo I – *Introdução*. É referido o problema, o âmbito da investigação, são apresentados os objetivos do estudo, a metodologia geral adotada e a estrutura geral do trabalho.

Capítulo II - *Caracterização geológica e geotécnica*. Caracterizaram-se as propriedades geológicas e geotécnicas das formações presentes nas áreas de estudo (espessura das formações superficiais, a profundidade do *bedrock*, o peso volúmico dos materiais geológicos, valores de  $N_{SPT}$ , velocidade das ondas S) e identificaram-se as estruturas geológicas que se podem constituir como fonte de sismos próximos ou distantes. Calcularam-se interpolações 2D e 3D das propriedades geotécnicas das formações consideradas.

Capítulo III - *Ensaio de ruído ambiente*. Calculou-se a razão entre os espectros de Fourier da composição das componentes horizontais e a vertical de 250 registos de vibrações ambientais executados nas regiões do Barreiro e de Setúbal, de acordo com o método de Nakamura (1989).

Capítulo IV - *Determinação da velocidade das ondas de corte com a utilização da técnica da Refração de Microtremores (ReMi)*. Determinou-se a variação das ondas S em profundidade em locais do Barreiro e Setúbal e caracterizaram-se as formações geotécnicas relativamente à velocidade das ondas S. Calcularam-se os valores médios da velocidade das ondas S nos primeiros 30 m de profundidade ( $V_{s30}$ ) e classificaram-se os locais estudados segundo o Eurocódigo 8.

Capítulo V - *Análise unidimensional linear equivalente*. Calcularam-se as funções de transferência de várias colunas de solo com a aplicação informática SHAKE2000.

Capítulo VI - *Suscetibilidade do edificado da cidade de Setúbal a sofrer efeitos de ressonância*. Determinou-se o número de edifícios suscetíveis de sofrer efeitos de ressonância ao nível das subsecções estatísticas (INE 2012). Realizou-se uma análise individual desta suscetibilidade para alguns dos edifícios (e.g. habitação, hospitais, escolas) da cidade de Setúbal.

Capítulo VII – *Conclusões e considerações finais*. São resumidos e relacionados os principais resultados obtidos em cada um dos capítulos anteriores. Apresentam-se as principais conclusões e são apresentadas propostas de prevenção e de mitigação do risco.



## **Capítulo II - Caracterização Geológica e Geotécnica**

## 2.1 Introdução

Os efeitos de um sismo num determinado local são o resultado da interação de vários fatores: (i) mecanismo na fonte e percurso das ondas sísmicas desde a fonte até ao sítio, (ii) características geológicas e geotécnicas das formações locais, e (iii) características das estruturas existentes.

As características geotécnicas dos terrenos têm influência no seu comportamento face a solicitações sísmicas (Kramer 1996). O movimento sísmico pode ser amplificado pela presença de formações superficiais moles, de fracas características geotécnicas, o que pode ter como consequência um aumento de danos em estruturas (Bakavoli *et al.* 2012). Estes efeitos, observados e estudados em vários sismos, designam-se por efeitos de sítio, e são responsáveis pela concentração de danos em áreas específicas (Chávez-García & Bard 1994, Mirzaoglu & Dýkmen 2003).

Identificaram-se estruturas geológicas com potencial sismogénico, que podem produzir sismos próximos ou afastados do Barreiro e de Setúbal, e que podem provocar danos nestas regiões.

As frequências naturais dos solos dependem da rigidez e da espessura dos materiais que constituem o solo (Kramer 1996, Yilmaz 2015). Segundo Parolai *et al.* (2006), para se realizarem estudos de efeito de sítio é necessário conhecer: (i) a estrutura e espessura da cobertura sedimentar, (ii) a velocidade das ondas S, (iii) o contraste de impedâncias entre os sedimentos moles e o *bedrock*, (iv) e a geometria da sua interface.

Caracterizaram-se as propriedades geológicas e geotécnicas das formações presentes no Barreiro e Setúbal que servirão de *input* em algumas análises efetuadas nos próximos capítulos, nomeadamente na análise unidimensional linear equivalente (Capítulo V). Estudaram-se a espessura das formações superficiais, a profundidade do *bedrock*, o peso volúmico e os valores de  $N_{SPT}$ . Analisaram-se *logs* de sondagens superficiais, de sondagens profundas (com profundidades superiores a 200 m), perfis de reflexão sísmica e ensaios *cross-hole*. Obteve-se o resultado de um ensaio de penetrómetro dinâmico superpesado que será apresentado no Anexo IX. Digitalizou-se e georreferenciou-se toda a informação coligida com o recurso a cartografia topográfica 1:10.000, 1:5.000 e 1:2.000 e utilizou-se a aplicação *Quantum GIS 1.8.0-Lisboa* na georreferenciação dos dados.

Estudaram-se *logs* de sondagens e analisou-se a informação geotécnica recolhida com o recurso à aplicação *RockWorks15*. Calcularam-se interpolações relativas à espessura das formações superficiais, à profundidade do substrato (Pliocénico) e à variação dos valores de  $N_{SPT}$ . Estes cálculos permitiram obter modelos 2D e 3D destas variáveis.

Compararam-se distribuições de algumas propriedades, por exemplo a espessura das formações superficiais com a profundidade de  $N_{SPT60}$ . Calcularam-se valores estatísticos de  $N_{SPT}$  (média, mediana e desvio padrão) e estudou-se a sua distribuição em profundidade para cada uma das formações consideradas.

## 2.2 Enquadramento geológico e sísmica regional

A Península de Setúbal localiza-se no setor meridional da Bacia Lusitaniana Mesozoica que se formou ao longo da abertura do Atlântico Norte entre o fim do Triásico (200 MA) e o início do Cretácico (145 MA) (Alves *et al.* 2009, Kullberg *et al.* 2013) (Figura 2.1). Este setor é limitado a Norte pelo sistema de falhas do Vale do Tejo e a sul pela falha da Arrábida (Kullberg 2000, Kullberg *et al.* 2013). A leste é limitado pela falha de Setúbal Pinhal-Novo, que corresponde ao bordo oriental da bacia, e que apresenta evidências de atividade tectónica desde o Pliocénico (5,3 MA) (Cabral *et al.* 2003, Carvalho *et al.* 2006, 2008). O bordo oeste corresponderá a uma falha normal com orientação NNE-SSW que aflora na plataforma continental (Kullberg *et al.* 2013).

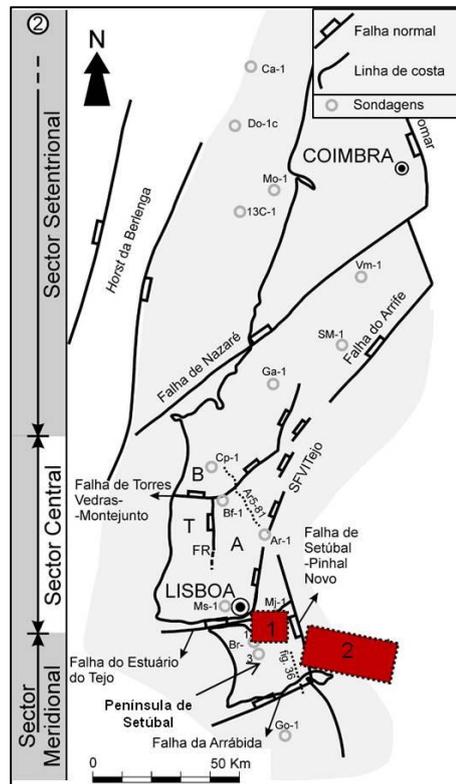


Figura 2.1 - Enquadramento geográfico e tectónico da Bacia Lusitaniana. 1 – Região do Barreiro, 2 – região de Setúbal e Mitrena, SFVTejo – sistema de falhas do Vale do Tejo (modificado de Kullberg *et al.* 2013).

De forma resumida, podem relatar-se os seguintes eventos principais da história geológica regional (Kullberg *et al.* 2006): durante o final do Cretácico (65,5 MA), após o estabelecimento de uma margem passiva na abertura do Oceano Atlântico, desenvolveram-se episódios de magmatismo alcalino (e.g. Sintra, Sines, Monchique, complexo Vulcânico de Lisboa) e de diapirismo (e.g. diapiros de Sesimbra e do Pinhal-Novo); durante o Paleogénico (65,5-23 MA) a bacia do Baixo Tejo funcionou em regime endorreico, com deposição de sedimentos provenientes dos relevos marginais (Maciço Hespérico e Bacia Lusitaniana em inversão); no início do Miocénico (23 MA) o Atlântico invadiu a bacia, tendo penetrado na Península de Setúbal e, desde então, a sedimentação ocorreu na interface oceano-continente com várias oscilações da linha de costa; já no Pliocénico verificou-se regressão generalizada, depositando-se canais cascalhentos que erodiram os depósitos marinhos miocénicos e que correspondem ao início da sedimentação fluvial; o Plistocénico (2,6-0,01 MA) está

representado por vestígios de praias ou terraços marinhos, alguns dos quais relacionados com o último interglaciário e início da glaciação de Würm ( $\approx 100.000$  anos).

A Península de Setúbal é constituída por duas unidades estruturais fundamentais, a Cadeia da Arrábida e o Sinclinal de Albufeira. Apresenta formações que vão desde o Jurássico inferior até ao Holocénico (Figura 2.2), com grande desenvolvimento do Pliocénico e do Plistocénico. Estas formações situam-se nas áreas baixas periféricas a norte e leste da Cadeia da Arrábida.

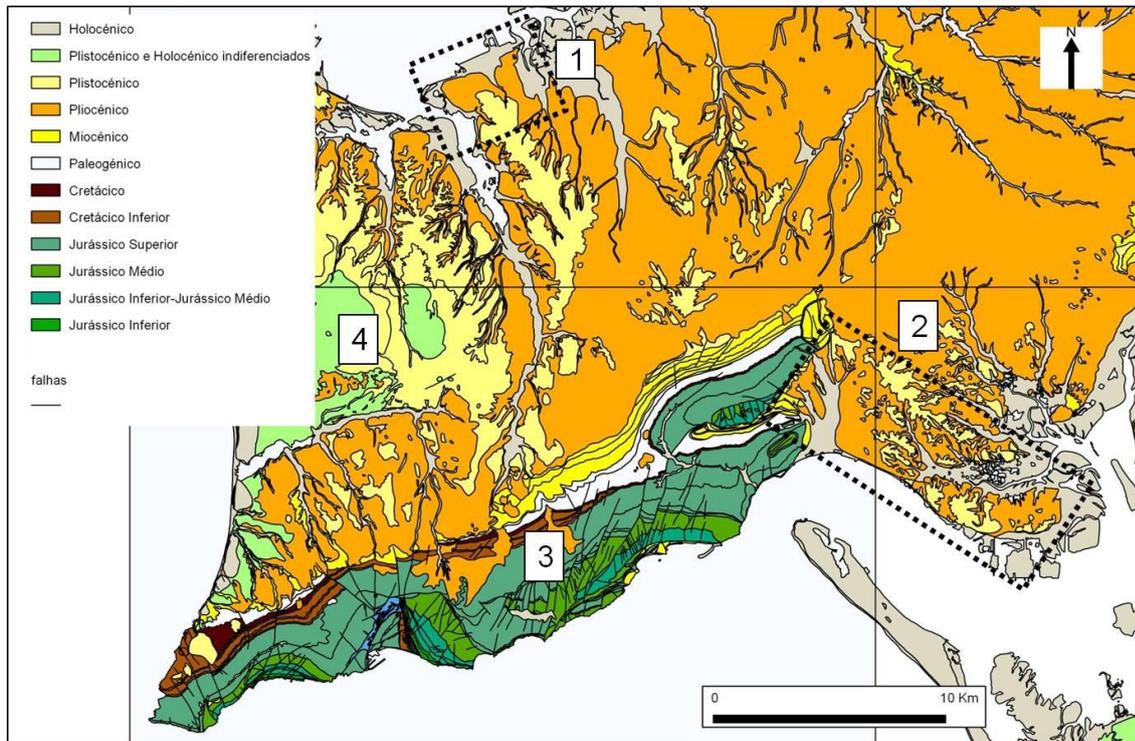


Figura 2.2 – Extrato da Carta Geológica da Área Metropolitana de Lisboa, à escala 1:50 000 (Costa *et al.* 2005a, 2005b, 2005c, 2005d). 1 – Região do Barreiro, 2 – Região de Setúbal e Mitrena, 3 - Cadeia da Arrábida, 4 – sinclinal de Albufeira.

A Arrábida é uma cadeia orogénica Alpina de pequena dimensão, constituída por empilhamentos de cavalgamentos, que se desenvolve ao longo de 35 km com uma orientação WSW-ENE (Kullberg *et al.* 2006). Esta cadeia corresponde a uma estrutura de inversão tectónica da bacia Lusitaniana devido à colisão entre as placas Euroasiática e Africana ocorrida em vários impulsos durante o Miocénico (Kullberg *et al.* 2000).

A Serra da Arrábida, com grande destaque na região, é constituída essencialmente por terrenos do Mesozoico sendo as áreas de maior relevo constituídas por afloramentos calcários do Jurássico. Este importante maciço termina numa grande escarpa meridional que deverá corresponder a um importante acidente tectónico com a mesma orientação (WSW-ENE).

As áreas do Barreiro e Setúbal (Figura 2.2) são constituídas por formações do Pliocénico, Plistocénico e Holocénico. Na área de Setúbal, junto à Serra da Arrábida, existem terrenos mais antigos do miocénico e do mesozoico.

O Holocénico das áreas de Barreiro e Setúbal é constituído por aterros e aluviões enquanto que as unidades plio-pleistocénicas correspondem à Formação de Marco Furado, do Plistocénico, constituída por argilitos e conglomerados e à Formação de Santa Marta, do Pliocénico, de cariz arenosa. Os terrenos do Miocénico, que afloram junto da Serra da Arrábida pertencem às seguintes unidades litoestratigráficas:

- Areias e margas da Quinta do Anjo; conglomerados de Guarda Mor (Tortoniano)
- Arenitos e calcoarenitos de Pinhal e Castelo de Palmela, areias da Quinta da Torre (Langhiano-Serravaliano)
- Argilitos e margas de Azeitão (Burdigaliano)
- Calcários e margas de Palhavã (Aquitano)

Os terrenos mesozoicos que confinam a leste com o Holocénico da cidade de Setúbal, já pertencentes à Cadeia da Arrábida, são essencialmente de idade jurássica e são predominantemente constituídos por conglomerados, argilas, grés e calcários.

A geodinâmica de Portugal Continental, que moldou a cadeia da Arrábida, resulta da convergência entre as placas Euroasiática e Africana (Nubia) segundo uma direção NW-SE (Figura 2.3) e com uma taxa de convergência inferior a 5 mm/ano. Esta deformação tem sido responsável pela geração dos maiores sismos interplaca e intraplaca da Europa (Custódio *et al.* 2015).

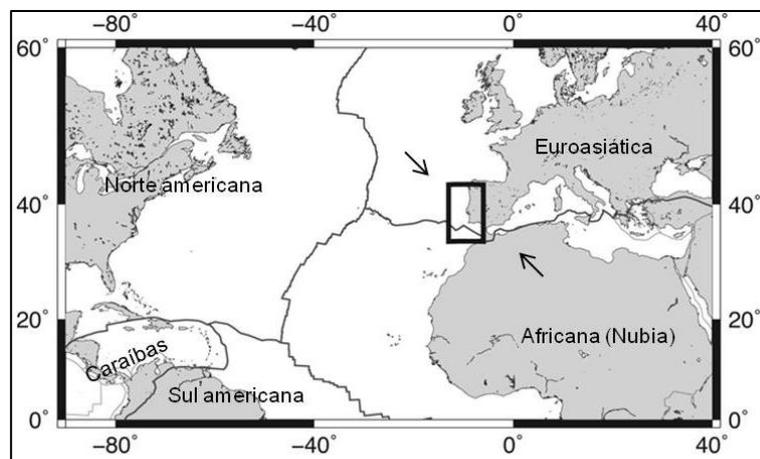


Figura 2.3 - Localização de Portugal Continental no contexto da tectónica de placas (modificado de Custódio *et al.* 2015).

Na Figura 2.4 apresenta-se a sismicidade registada no continente e áreas adjacentes pelo Instituto do Mar e da Atmosfera (IPMA) para o período de 1961 a 2017. Observa-se um aumento da sismicidade de norte para sul na direção do limite entre as placas Euroasiática e Africana. Existem áreas com sismicidade difusa e outras em que se observa uma concentração de epicentros segundo *clusters* ou lineamentos (Custódio *et al.* 2015).

A sismicidade registada nas regiões de Barreiro e Setúbal foi baixa e difusa tendo ocorrido, neste período, um único sismo em cada uma destas áreas (Figura 2.4b). O sismo registado na área de Setúbal ocorreu no dia 4 de setembro de 2001, com uma magnitude de 2,4 ( $M_L$ ), com o hipocentro localizado a uma profundidade de 3,5 km e foi sentido com um intensidade M.M. de II/III. Foi registado também um sismo já fora da área de estudo de Setúbal, a E-SE da cidade de Setúbal, com uma magnitude superior. O único sismo registado instrumentalmente na área do Barreiro apresentou uma magnitude inferior a 2 ( $M_L$ ).

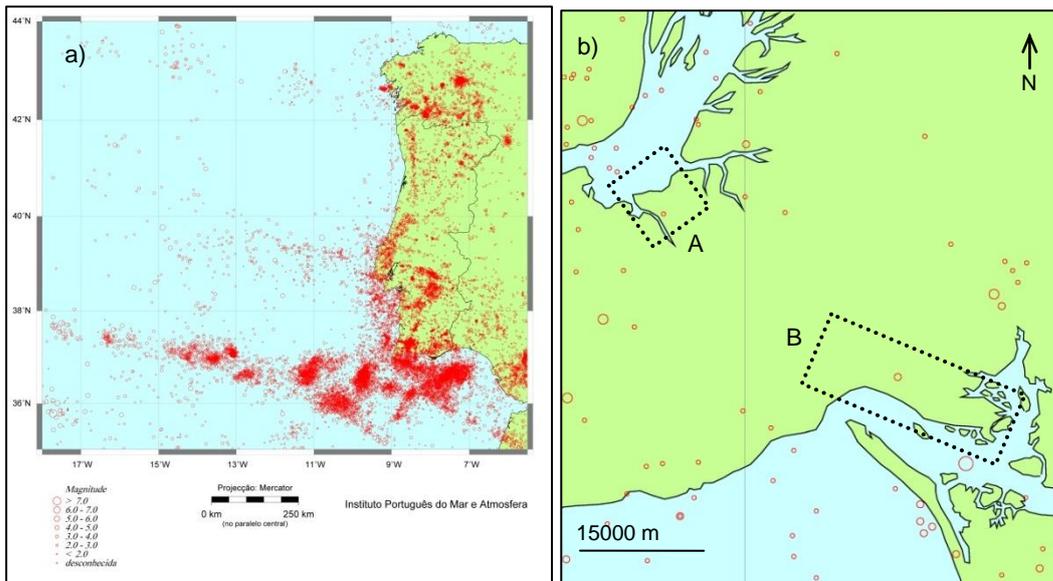


Figura 2.4 - Sismicidade instrumental registada no período 1961-2017 em (a) Portugal Continental e região adjacente; (b) Barreiro (A) e Setúbal (B). IPMA (2017).

Apesar das áreas do Barreiro e Setúbal apresentarem uma baixa sismicidade instrumental, já sofreram grandes impactos devido à ocorrência de sismos históricos cujas distâncias epicentrais variaram entre 30 km (sismo de 1858) e 200-250 km (sismo de 1755).

Os sismos de 1344, 1531 e de 1909, com epicentros na região do Vale Inferior do Tejo e com magnitudes estimadas de 6,0, 7,1 e 6,0 Mw (Teves-Costa *et al.* 1999), respetivamente, provocaram elevados prejuízos nas regiões de Barreiro e Setúbal. O sismo de 1755, com uma distância epicentral de 200-250 km e com uma magnitude superior a 8,5 (Cabral *et al.* 2013), foi responsável por grandes danos nestas duas regiões.

O sismo de 1531, com epicentro provável no Vale Inferior do Tejo, apresentou intensidades de VIII - VII (MM) no Barreiro e Setúbal (Oliveira & Sousa 1991). No dia 11 de novembro de 1858 ocorreu um sismo que provocou grande destruição em Setúbal (Moreira 1982, 1991) e que terá apresentado uma magnitude 7,1. Este sismo apresentou intensidades IX-VIII (MM) em Setúbal e VIII (MM) no Barreiro (Figura 2.5a) e o seu epicentro localizou-se provavelmente numa região submersa localizada a cerca de 30-40 km da cidade de Setúbal (Vilanova & Fonseca 2007, Stucchi *et al.* 2013). Este evento terá sido um dos 15 maiores sismos intraplaca (Johnton & Kanter 1990) e foi sentido em todo o território do continente.

O sismo de 1909 teve o seu epicentro a NE de Lisboa e terá causado uma intensidade MM de IX em Benavente (Oliveira & Sousa 1991), de VII-VI no Barreiro e VI em Setúbal (Figura 2.5b).

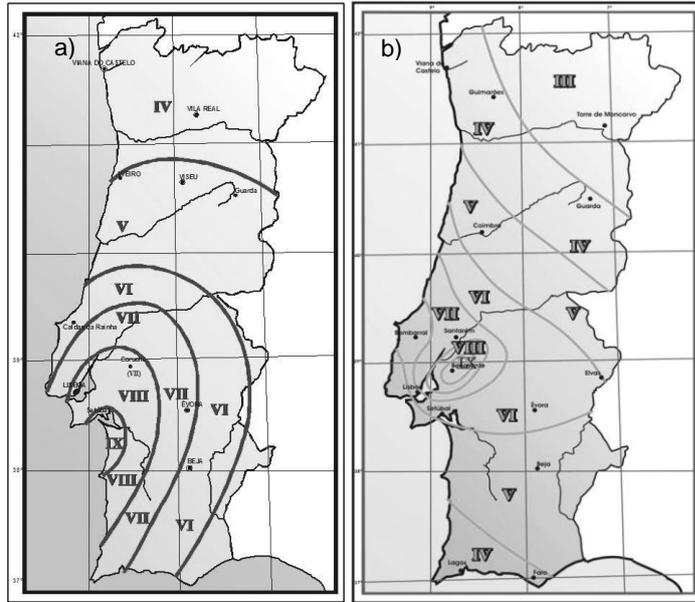


Figura 2.5 - Isoossistas dos sismos de (a) 1858; (b) 1909 (Moreira 1991).

Na região envolvente à Península de Setúbal foram identificadas diversas estruturas que terão sido responsáveis por sismos históricos e instrumentais importantes e que poderão originar eventos com grandes danos no Barreiro e Setúbal (Figura 2.6). Entre as estruturas identificadas por diversos autores (e.g. Cabral & Ribeiro 1988, Cabral *et al.* 2003), podem mencionar-se as falhas do Pinhal Novo, de Vila Franca de Xira e da Azambuja. Foram realizados estudos detalhados sobre a falha da Azambuja e fonte do sismo de 1909 (Cabral *et al.* 2004, 2013) e sobre as falhas do Porto Alto e Vila Franca de Xira-Lisboa (Carvalho *et al.* 2006).

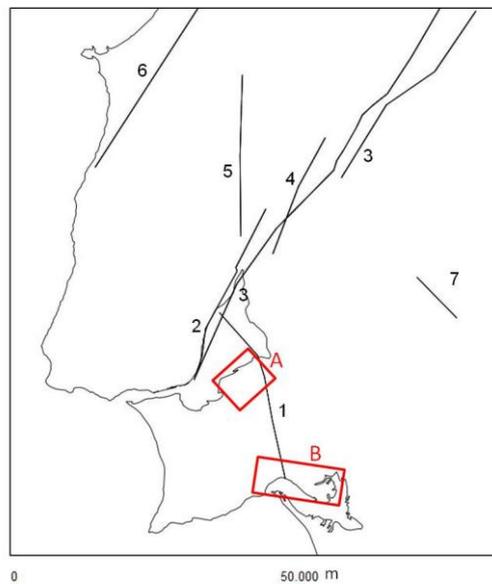


Figura 2.6 - Falhas ativas que podem causar danos nas regiões de Barreiro e Setúbal. 1 – Falha do Pinhal Novo, 2 – Falha de Vila Franca de Xira, 3 – Falha do Vale Inferior do Tejo, 4 – Falha da Azambuja, 5 – Falha da Ota, 6 – Falha da Nazaré-Caldas da Rainha – Vimeiro (segmento SW), 7 – Falha de Porto Alto. A – Barreiro, B – Setúbal e Mitrena.

O Instituto Geológico e Mineiro de Espanha publicou uma base de dados de falhas ativas da Península Ibérica e regiões adjacentes (IGME 2015) (Figura 2.7). Nesta base de dados foram consideradas as falhas que se movimentaram nos últimos 2,59 MA (García-Mayordomo *et al.* 2012).

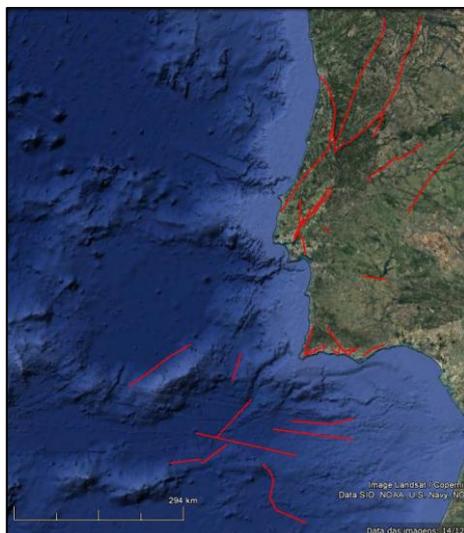


Figura 2.7 – Estruturas neotectónicas (IGME 2015).

As localizações epicentrais do sismo de 1858 atribuídas por diversos autores (e.g. Vilanova & Fonseca 2007, Stucchi *et al.* 2013) (Figura 2.8) colocam-no a uma distância de 30 a 38 km da cidade de Setúbal. Segundo Moniz (2010), este sismo localizou-se provavelmente na plataforma continental a S de Setúbal e poderá ter sido gerado num possível segmento meridional da Zona de Falha de Pinhal Novo-Alcochete. A movimentação dominante desta estrutura será transpressiva esquerda e poderá gerar sismos de magnitude entre 6 e 7 (Moniz 2010). Cabral *et al.* (2011) consideram que esta falha se estende até à cidade de Setúbal e será capaz de gerar sismos com magnitude até 7.



Figura 2.8 - Localização epicentral do sismo de 1858: 1 – epicentro de Stucchi *et al.* 2013, 2 – epicentro de Vilanova & Fonseca 2007 (de AHEAD).

## 2.3 Metodologia

A metodologia seguida para a caracterização das propriedades geológicas e geotécnicas das formações presentes no Barreiro e Setúbal compreendeu vários passos e iniciou-se pela pesquisa de entidades detentoras de informação (Figura 2.9).

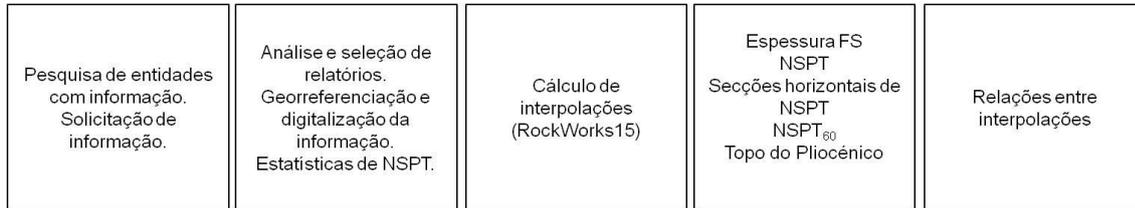


Figura 2.9 - Metodologia seguida para a caracterização das propriedades geotécnicas das formações presentes nas regiões do Barreiro e Setúbal.

A seleção da informação foi efetuada depois de uma análise de relatórios em papel ou em formato digital disponibilizados pelas entidades. Nalguns casos foi necessário realizarem-se várias deslocações às sedes das entidades para se efetuarem pesquisas, consulta, seleção e recolha da informação.

A maior parte da informação disponibilizada não se encontrava georreferenciada, as sondagens não continham coordenadas nem cotas das bocas das sondagens. Por este motivo, foi necessário georreferenciar e digitalizar a informação das coordenadas, das cotas das bocas dos furos e das profundidades alcançadas. Para tal utilizaram-se as plantas de localização das sondagens constantes dos relatórios geotécnicos, cartografia topográfica 1:10.000, 1:5.000 e 1:2.000 do Barreiro e de Setúbal e imagens provenientes da plataforma *Google Earth*.

Identificaram-se as formações presentes no Barreiro e em Setúbal com base na consulta e análise das notícias explicativas das folhas geológicas da região de estudo. As propriedades das formações foram estudadas com base nos relatórios geotécnicos analisados.

A caracterização geotécnica das formações presentes foi realizada em grande parte com o recurso ao cálculo de interpolações dos resultados obtidos em sondagens. As propriedades estudadas foram: a espessura das formações superficiais, a localização em profundidade do substrato (*bedrock*) e a variação de  $N_{SPT}$  com a profundidade. Estas propriedades foram comparadas com os resultados obtidos nos capítulos seguintes (frequências naturais dos solos, fatores de amplitude e amplificações). Para se calcularem essas interpolações foi utilizada a aplicação *RockWorks15* e, previamente à sua aplicação, foi necessário:

- Identificar e digitalizar as profundidades dos limites entre as diferentes formações (aterros, aluviões e Plio-Plistocénico) nos *logs* das sondagens utilizadas;
- Identificar e digitalizar os valores de  $N_{SPT}$  alcançados ao longo da furação das sondagens utilizadas.

As interpolações realizadas para a determinação da espessura das FS, dos valores de  $N_{SPT}$  e de  $N_{SPT60}$  foram comparadas entre si de modo a verificar relação existente entre estas propriedades. Procedeu-se igualmente à análise estatística de  $N_{SPT}$  e à identificação de outras propriedades geotécnicas (e.g. pesos volúmicos) necessárias para as análises que serão efetuadas nos próximos Capítulos.

### 2.3.1 Espessura das Formações Superficiais

Na Figura 2.10 apresentam-se exemplos referentes ao cálculo de modelos 3D e de seções referentes à espessura de duas formações superficiais constituídas por aterros e aluviões assentes num substrato constituído pelo Plio-Plistocénico.

Depois de se georreferenciarem as sondagens e identificadas as profundidades dos limites entre as formações (Figura 2.10a) calculou-se um modelo 3D de interpolação da espessura das formações, pelo método do inverso da distância (Figura 2.10b). Tendo por base o modelo 3D das espessuras das FS calculou-se a espessura dessas formações segundo uma seção 1-2 (Figura 2.10c). Este modelo tridimensional permite a execução de secções segundo várias direções, o que possibilita estudar a variação da espessura das FS em função de outras variáveis (relevo,  $N_{SPT}$ , etc.).

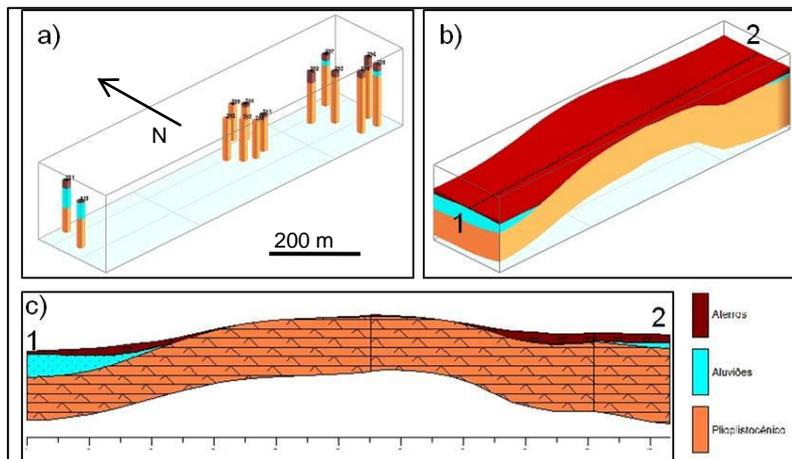


Figura 2.10 - (a) Localização de sondagens com a discriminação das espessuras de aterros e aluviões; (b) modelo 3D obtido por interpolação segundo o método do inverso da distância; (c) seção com as espessuras dos aterros e das aluviões. 1,2 – Localização/orientação da seção.

As seções executadas foram sempre escolhidas em função da localização de sondagens: os vértices que definem as seções corresponderam sempre à localização de sondagens. Por outro lado, os valores dos *logs* das sondagens não foram modificados pelas interpolações efetuadas. Este procedimento teve como objetivo aumentar a qualidade das interpolações efetuadas e foi seguido em todas as interpolações efetuadas no presente Capítulo.

Para além do cálculo das espessuras segundo uma seção no modelo 3D, realizaram-se interpolações 2D referentes à espessura das FS em planta. Com recurso às profundidades (ou cotas) dos limites entre as aluviões e o Plio-Plistocénico identificados nos logs das sondagens calcularam-se: (i) as espessuras dos aterros e aluviões individualmente e (ii) a espessura das FS (correspondente ao conjunto dos aterros e das aluviões).

Na Figura 2.11 apresenta-se um exemplo da interpolação da espessura das FS com base em 14 sondagens. Aplicou-se o método do inverso da distância e a grelha obtida pode ser comparada com interpolações de outras variáveis que serão estudadas nos Capítulos subsequentes.

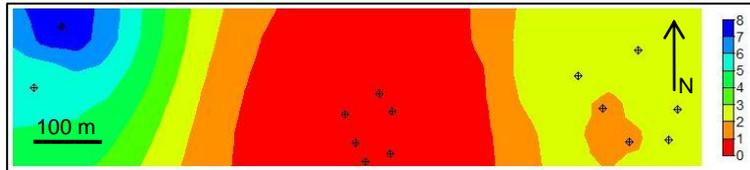


Figura 2.11 - Exemplo do cálculo da interpolação relativa à espessura das FS (aterros e aluviões) executado com 14 sondagens.

### 2.3.2 Análise dos resultados SPT

Segundo Kramer (1996) e Yilmaz (2015) o valor da frequência natural de uma coluna de solo de determinada altura depende da rigidez dos materiais que a constituem. O período natural de vibração de uma coluna de solo ( $T$ ) ou a sua frequência ( $F$ ) podem relacionar-se com a sua espessura ( $H$ ) e a velocidade média das ondas S ( $V_s$ ) segundo a relação:

$$T = 4H/V_s \text{ ou } F = V_s/4H \text{ (Kramer 1996, Yilmaz 2015)}$$

A frequência natural de uma coluna de solo, com uma espessura constante, será maior em materiais de maior rigidez pois estas apresentam maiores valores de  $V_s$  (Figura 2.12).

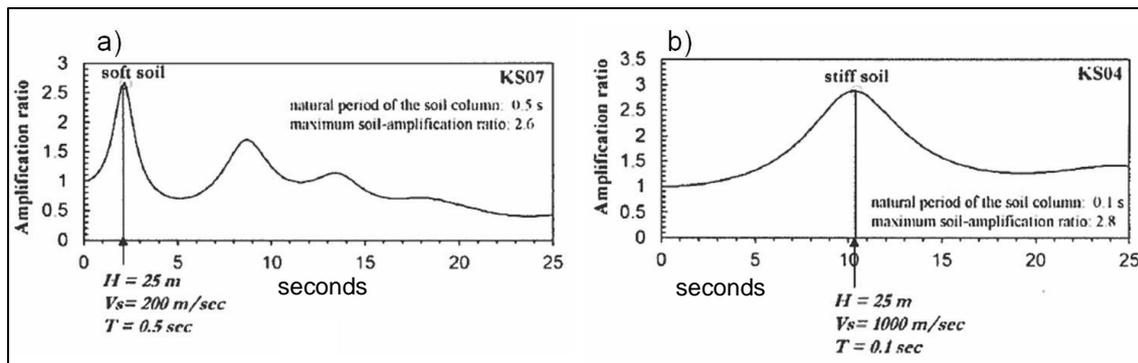


Figura 2.12 - Funções de transferência obtidas para duas colunas de solo, com a mesma espessura, mas constituídas por materiais de diferente rigidez (a) coluna de solo com  $V_s=200$  m/s; (b) coluna de solo/rocha com  $V_s=1000$  m/s para um amortecimento de 5% (de Yilmaz 2015).

A variação espacial de  $N_{SPT}$  deverá relacionar-se com a espessura das FS, com os valores de  $V_s$  em profundidade, com a velocidade média das ondas de corte nos primeiros 30 metros ( $V_{s30}$ ) e com as frequências naturais das colunas de solo. Nesse sentido, a caracterização da rigidez das formações reveste-se de importância para o estabelecimento de correlações entre as propriedades geotécnicas obtidas por diferentes métodos ( $N_{SPT}$ , ensaios de vibrações ambientais e ensaios ReMi).

Para se caracterizarem as formações relativamente à sua rigidez, selecionaram-se as sondagens com ensaios SPT e identificaram-se, para cada um dos ensaios, os valores de  $N_{SPT}$  (resistência à penetração) e a respetiva profundidade (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Valores de  $N_{SPT}$  retirados do *log* de uma sondagem e introduzidos no *RockWorks15*.

Sondagem	Tipo	Profundidade	Valor
292	SPT	0	0
292	SPT	0,5	11
292	SPT	1,5	7
292	SPT	3	60
292	SPT	4,5	60
292	SPT	6	60
292	SPT	7,5	60
292	SPT	9	60
292	SPT	10,5	60
292	SPT	12	60
292	SPT	13,5	60
292	SPT	15	60

Foram introduzidos no *RockWorks15* todos os resultados de  $N_{SPT}$  e calculou-se uma interpolação 3D de  $N_{SPT}$  segundo o método do inverso da distância.

Na Figura 2.13 apresenta-se um exemplo de um modelo 3D calculado com 14 sondagens (Figura 2.13a) onde se observa a variação de  $N_{SPT}$  em três direções (Figura 2.13b). Tal como no cálculo da espessura das FS realizou-se a interpolação de  $N_{SPT}$  ao longo de uma seção executada no modelo 3D (Figura 2.13c). Esta seção permite estudar a variação de  $N_{SPT}$  ao longo de uma direção e em função da profundidade. As seções executadas foram escolhidas em função da localização das sondagens e os valores de  $N_{SPT}$  não foram modificados pelas interpolações efetuadas de modo a assegurar uma maior qualidade nos resultados.

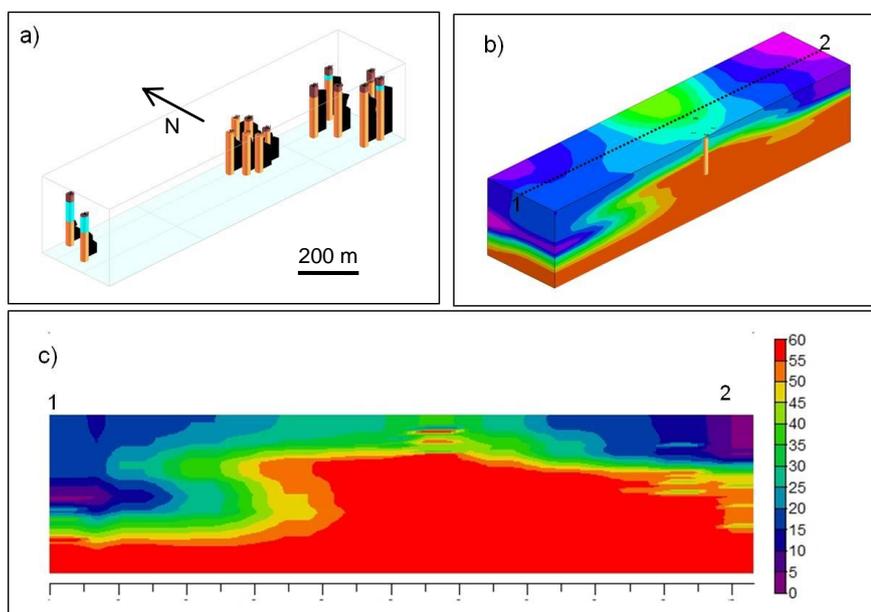


Figura 2.13 - (a) Localização de 14 sondagens com ensaios SPT; (b) modelo 3D de  $N_{SPT}$ ; (c) seção de  $N_{SPT}$  segundo 1-2.

Calculou-se com base no modelo 3D a variação de  $N_{SPT}$  em planos horizontais e a diferentes cotas de profundidade. Na Figura 2.14 apresentam-se duas interpolações, uma para um plano

horizontal à cota de 0 m (Figura 2.14a) e outro à cota de -10m (Figura 2.14b). Nos próximos Capítulos estas interpolações serão relacionadas com outras propriedades geotécnicas.

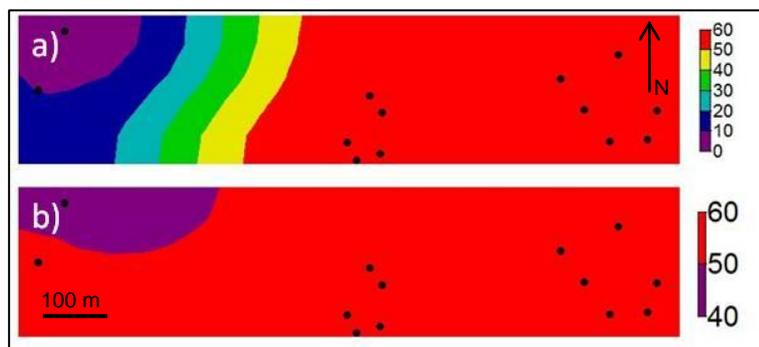


Figura 2.14 - Variação de  $N_{SPT}$  para duas seções horizontais (a) à cota 0 m; (b) à cota -10 m.

Outro dos parâmetros geotécnicos relacionado com a rigidez dos materiais, utilizado na caracterização geotécnica dos terrenos, foi a interpolação das profundidades a que se encontraram os valores de  $N_{SPT60}$ .

Identificaram-se as profundidades (ou cotas) onde se alcançaram valores de  $N_{SPT60}$ , para cada uma das sondagens, e utilizaram-se essas profundidades no cálculo da interpolação da superfície de  $N_{SPT60}$ . Nos casos em que se observou um decréscimo de  $N_{SPT}$  em profundidade, após se atingir  $N_{SPT60}$ , considerou-se a profundidade onde se atingiu novamente e se estabilizou  $N_{SPT60}$ .

Na Figura 2.15 apresenta-se a interpolação da profundidade de  $N_{SPT60}$  com base em 14 sondagens. Aplicou-se o método do inverso da distância e a grelha obtida pode ser comparada com interpolações de outras variáveis que serão estudadas nos Capítulos subsequentes.

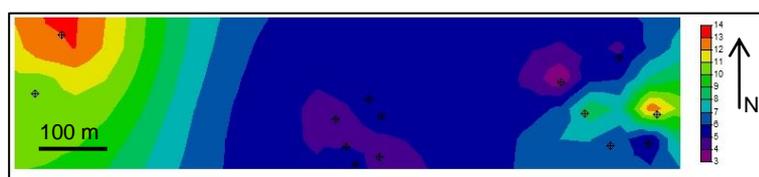


Figura 2.15 - Exemplo do cálculo da interpolação relativa à profundidade de  $N_{SPT60}$  executado com 14 sondagens.

Para além dos cálculos 3D e 2D efetuadas com os valores de  $N_{SPT}$  e  $N_{SPT60}$ , distribuíram-se os valores de  $N_{SPT}$  por cada uma das formações consideradas e por intervalos de profundidade. Pretendeu-se caracterizar as diferentes unidades quanto aos seus valores mínimos, médios e máximos de  $N_{SPT}$  e estudar a variação de  $N_{SPT}$  com o aumento de profundidade.

### 2.3.3 Relação entre a espessura das Formações Superficiais, $N_{SPT}$ e o relevo

Os locais com maiores espessuras de FS deverão apresentar profundidades de  $N_{SPT60}$  mais elevadas e, na maior parte das situações, poderão corresponder a zonas de baixas cotas

topográficas. A relação entre estas variáveis foi estudada com base na comparação das grelhas de interpolação calculadas para cada uma delas.

Na Figura 2.16 apresentam-se, para um determinado local, as interpolações obtidas com espessura das FS (Figura 2.16a) e com a profundidade de  $N_{SPT60}$  (Figura 2.16b). Observou-se, como seria de esperar, que as áreas onde a profundidade de  $N_{SPT60}$  foi mais elevada corresponderam aos locais de maior espessura de FS.

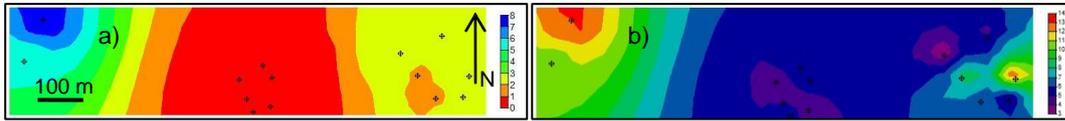


Figura 2.16 - (a) Interpolação da espessura das FS; (b) interpolação da profundidade de  $N_{SPT60}$ .

## 2.4 Resultados

Da aplicação do procedimento referido na metodologia (Figura 2.9) identificaram-se 41 entidades com atividades nas áreas da geotecnia, construção civil, consultoria, instituições públicas e donos de obra suscetíveis de possuírem informação geológica e geotécnica das áreas do Barreiro e Setúbal. Estabeleceram-se contactos com essas instituições e foi possível obter a colaboração de 19 entidades (Tabela 2.2) que facultaram a pesquisa e análise de 95 relatórios com informação geológica e geotécnica das áreas de estudo.

Os relatórios foram disponibilizados em papel e em ficheiros, mas foram raros os documentos e ficheiros com informação georreferenciada. Na maior parte dos casos os *logs* das sondagens e os relatórios não apresentaram as coordenadas e cotas dos locais onde tinham sido executadas. Foi necessário georreferenciar, segundo o sistema retangular *Datum* de Lisboa, a localização das sondagens e demais informação.

Tabela 2.2 - Lista das 19 entidades que disponibilizaram informação geotécnica das áreas do Barreiro e Setúbal.

Casa Pia	LNEG
Águas do Sado	Porto Setúbal
Amarsul	Portucel
Baía do Tejo S.A.	Refer EPE
Câmara Municipal do Barreiro	Simarsul
Câmara Municipal de Setúbal	Solsado
DGE - Divisão para a Pesquisa e Exploração de Petróleo	Sopac - Sociedade Produtora de Adubos Compostos SA
EDP	Spel - Sociedade de Parques de Estacionamento, S.A.
Geocontrole	Tecnasol
Geoteste	

Analisaram-se as cartas geológicas da região de estudo (Costa *et al.* 2005, 2005a, 2005b, 2005c) e, para além da informação retirada das sondagens, foi possível obter informação relativa a ensaios sísmicos. Um deles correspondeu a um conjunto de ensaios *cross-hole* utilizados na determinação da velocidade das ondas P e S e que foram executados na Mitrena pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEG) (2006). Obteve-se ainda informação sobre um ensaio de refração sísmica executado no Pliocénico de Setúbal (Carvalho 2013), e sobre quatro ensaios de Penetração Dinâmica Super Pesada realizados no Barreiro (Geoteste 2011f). Foi também possível obter informação relativa a sísmica de refração realizada na área da Bacia Lusitaniana (Lomholt *et al.*1995).

Tendo em conta que parte da informação relativa aos *logs* era incompleta, não se procedeu à correção dos valores de  $N_{SPT}$  considerando-se o valor de  $N_{SPT}$  como o valor do número de pancadas necessárias para uma penetração de 300 mm.

Foi possível coligir *logs* de 546 sondagens (289 do Barreiro e 257 de Setúbal) com informação das litologias e formações atravessadas e identificaram-se 386 sondagens com ensaios SPT (119 no Barreiro e 267 em Setúbal). Obteve-se ainda informação relativa a algumas sondagens profundas realizadas nas áreas do Barreiro e Mitrena (Companhia dos Petróleos de Portugal 1956, 1959, 1962, 1963a, 1963b, 1963c, 1982-1983 e Sondagens e Fundações A. Cavaco 1959, 1971a, 1971b, 1972a, 1972b, 1974a, 1974b, 1975).

## 2.4.1 Barreiro

Na área do Barreiro identificaram-se formações pertencentes ao Holocénico, Plistocénico e ao Pliocénico (Figura 2.17a). O conjunto do Plio-Plistocénico cobre a maior parte da superfície desta área e os locais de maior relevo estão associados ao Plistocénico; é nesta formação que se atingem as cotas máximas (40 m) (Figura 2.17b). Estes valores diminuem na direção da linha de costa e, já no Holocénico, apresentam valores inferiores a 7 m. Devido à intensa ocupação urbana, esta área evidencia uma rede de drenagem pouco densa e mal definida, encontrando-se algumas linhas de água artificializadas. As formações do Holocénico são constituídas por aterros com grande desenvolvimento na antiga área industrial do Barreiro e por aluviões correspondentes a areias de praia e dunas (Figura 2.17a). O Plistocénico corresponde à Formação de Marco Furado, constituído por argilitos e conglomerados, e o Pliocénico corresponde à Formação de Santa Marta de cariz essencialmente arenoso (Figura 2.17a).

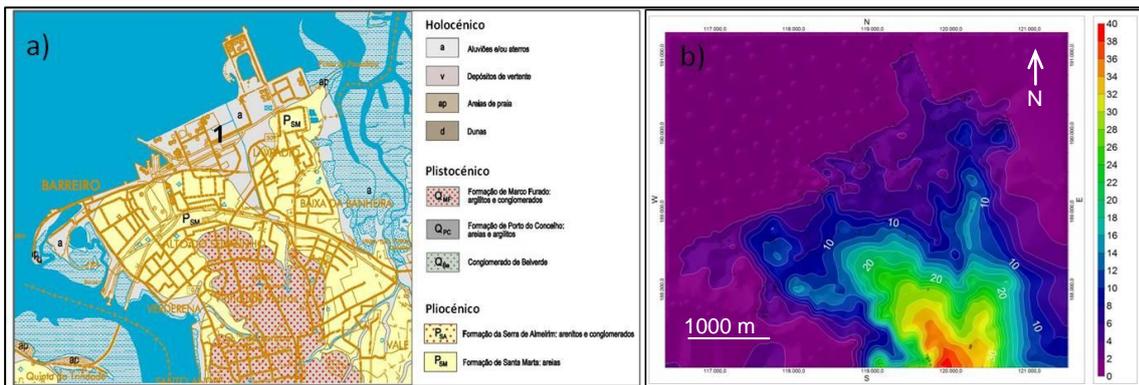


Figura 2.17 - (a) Extrato da Carta Geológica de Portugal na escala 1:50. 000, folha 34-D Lisboa (Costa *et al.* 2005a); (b) modelo digital do terreno. 1 – Localização da antiga área industrial do Barreiro.

Na Figura 2.18a apresenta-se extrato de carta publicada por Moniz (2010) onde se identificam as cotas da superfície basal do Pliocénico. Esta superfície apresenta irregularidades que poderão ser consequência da deposição dos sedimentos pliocénicos sobre um paleorrelevo de idade Miocénico superior. Se adicionarmos as cotas da superfície do terreno (Figura 2.17) às cotas da superfície basal do Pliocénico poderemos concluir que a sua espessura se deverá situar entre 150 e 250 m. Estes valores estão de acordo com os relatórios de sondagens profundas consultadas (Companhia dos Petróleos de Portugal de 1956 a 1983).

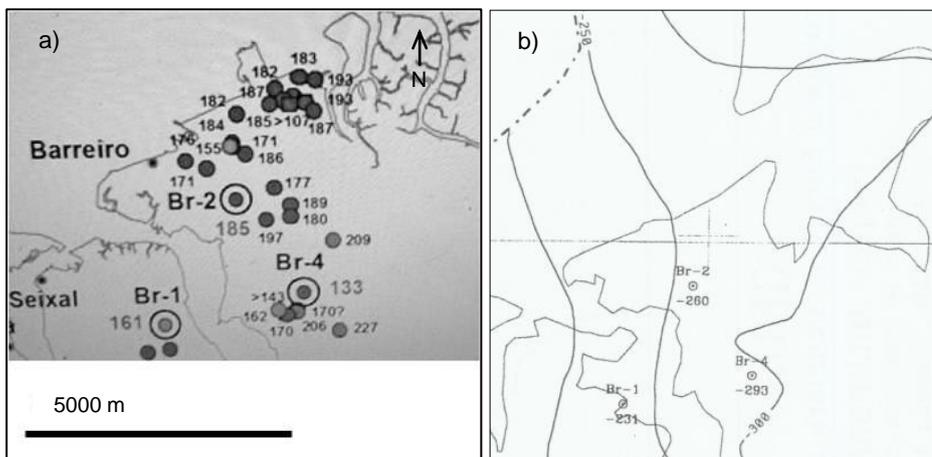


Figura 2.18 – Localização (a) de furos de sondagens com as cotas da superfície basal do Pliocénico na região do Barreiro (de Moniz 2010); (b) do horizonte sísmico intra-Neogénico em furos de sondagens (Br-1, Br-2, Br-4) e isolinhas obtidas em campanha de prospeção sísmica (de Lomholt *et al.* 1995).

Lomholt *et al.* (1995) identificaram, por sísmica de reflexão, um horizonte refletor de cariz carbonatado que designaram de intra-Neogénico. Segundo estes autores, este horizonte corresponderá ao topo do Serravaliano ou mesmo ao intra-Tortoniano do Miocénico Superior. Na Figura 2.18b apresentam-se as isolinhas e a identificação da profundidade do horizonte intra-Neogénico em furos de sondagens (Br-1, Br-2, Br-4).

Da análise efetuada a 37 relatórios geotécnicos da região do Barreiro identificaram-se 289 sondagens (Figura 2.19a), 119 das quais com ensaios SPT (Figura 2.19b). As profundidades alcançadas pelas sondagens com ensaios SPT foram maioritariamente de 15 m: 66 alcançaram profundidades até aos 15 m (Figura 2.19c). Da distribuição das 289 sondagens ressalta o facto de existirem zonas em que não foi possível obter informação geotécnica, sendo exemplo a área do Holocénico situada a leste da cidade do Barreiro.

A análise dos *logs* possibilitou a identificação de 1099 ensaios SPT que não cobriram toda a área de estudo (Figura 2.19b). Esta distribuição teve como consequência a existência de áreas sem informação relativa à rigidez dos materiais constituintes. Foi exemplo a antiga zona industrial, implantada no Holocénico, que apresentou uma área considerável sem este tipo de ensaios.

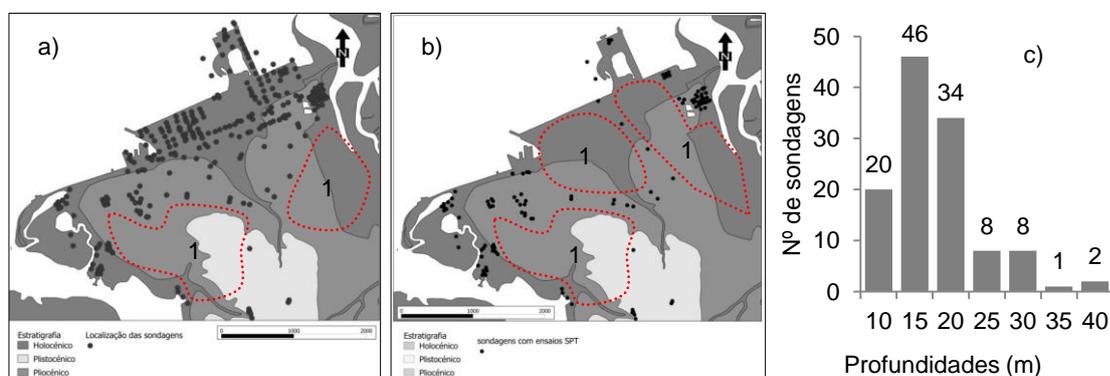


Figura 2.19 – Localização no Barreiro de: (a) 289 sondagens; (b) 119 sondagens com ensaios SPT; (c) distribuição das profundidades alcançadas pelas 119 sondagens com ensaios SPT. 1 – Locais sem informação geotécnica.

De toda a informação coligida para a região do Barreiro merece destaque, pela quantidade de informação disponível, o relatório da Geocontrole (1982) relativo à geologia e à geotecnia do Barreiro Quimigal E.P. Este relatório continha 23 perfis geotécnicos com a localização das sondagens e com a espessura das unidades atravessadas (Figura 2.20). Da análise desses perfis foi possível obter informação relativa a 163 sondagens.

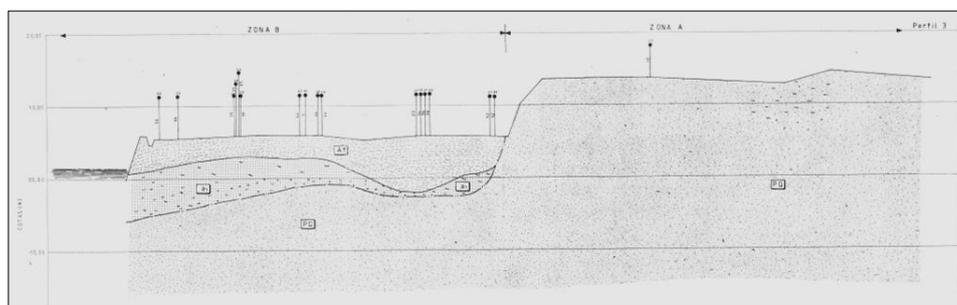


Figura 2.20 – Exemplo de um perfil geológico-geotécnico localizado na antiga área industrial da Quimigal no Barreiro, atual Baía do Tejo (de Geocontrole, 1982).

Após georreferenciação das sondagens com base na planta de localização identificaram-se as profundidades dos limites entre as formações presentes. Na Figura 2.21 apresentam-se os

perfis e a localização destas 163 sondagens (para as quais não foi possível obter informação relativa à execução de ensaios SPT).



Figura 2.21 - Localização de 23 perfis e de 163 sondagens realizadas na área do antigo parque industrial da CUF (Geocontrole 1982). Identificação dos perfis a vermelho e das sondagens a preto.

#### 2.4.1.1 Propriedades geotécnicas

Os aterros cobrem o topo das formações presentes e apresentaram um cariz arenoso a arenopedregoso. As suas espessuras apresentaram grande variabilidade, com valores inferiores a 0,5 m em muitos locais, mas espessuras de 3 a 7 m, de material arenoso, na zona aluvionar onde cobrem a topografia original da frente ribeirinha. Nas áreas conquistadas recentemente ao rio estes aterros podem atingir 10 m de espessura.

Estes depósitos apresentam grande desenvolvimento na antiga área industrial do Barreiro e são aí constituídos por materiais muito heterogéneos: solos arenosos dragados do Tejo, materiais resultantes de desmontes, fragmentos líticos, cinzas resultantes do tratamento de pirites e outros materiais antropogénicos resultantes da atividade industrial.

O relatório da Geocontrole (1982) considerou os aterros presentes na antiga área industrial do Barreiro (atual Baía do Tejo) como uma unidade muito heterogénea e com uma grande dispersão de valores de  $N_{SPT}$ . Os intervalos de valores SPT disponibilizados foram de 2 a 39 pancadas para os valores mínimos e máximos e de 7 a 18 pancadas para o intervalo de valores mais frequentes.

Na presente tese analisaram-se os *logs* de 46 sondagens realizadas em aterros e obtiveram-se 99 valores de  $N_{SPT}$  para diferentes profundidades. Verificou-se que 60% dos valores de  $N_{SPT}$  foram inferiores ou iguais a 10 pancadas e cerca 80% foram iguais ou inferiores a 20 pancadas. Na Tabela 2.3 apresentam-se os valores estatísticos calculados com os resultados dos 99 ensaios SPT.

Tabela 2.3 - Valores estatísticos calculados com 99 ensaios SPT realizados em aterros do Barreiro.

Média	12
Mediana	8
Desvio padrão	12

Na Figura 2.22 apresenta-se a distribuição dos 99 ensaios em função da profundidade e observou-se que para profundidades superiores a 5 m os valores de  $N_{SPT}$  são superiores a 12.

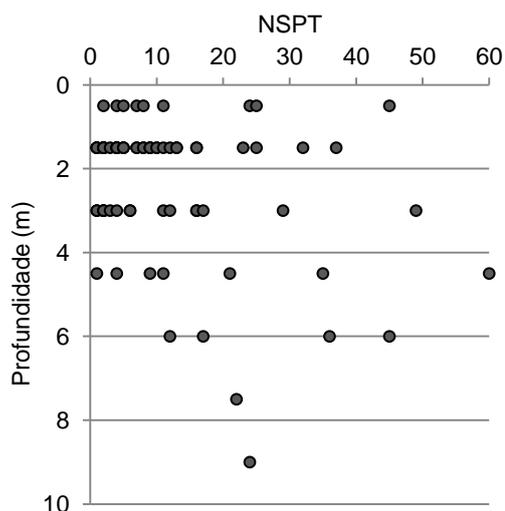


Figura 2.22 - Variação de  $N_{SPT}$  com a profundidade, calculada com 99 ensaios realizados em aterros no Barreiro.

As aluviões correspondem a material de enchimento do vale do Tejo e de algumas linhas de água afluentes, são cobertas por aterros e assentam sobre o Pliocénico. No Barreiro a sua espessura diminui para sul onde terminam sensivelmente à cota 7 no contacto com o Pliocénico. As suas espessuras podem alcançar valores superiores a 20 m perto da linha de costa e no alinhamento das principais linhas de água.

A génese hidrodinâmica muito variada destes depósitos e a irregularidade da topografia que fossilizaram conferiu-lhes uma estrutura irregular e aleatória. Apresentam composição granulométrica heterogénea e horizontes estratigráficos lenticulares descontínuos (Geocontrolo 1982, 2001a). Exibem, por conseguinte, variações laterais de fácies materializadas por geometrias irregulares que assumem frequentemente formas lenticulares.

Com base em critérios de granulometria, considera-se (Geocontrolo, 1982) a existência de duas unidades na antiga área industrial, uma arenosa e outra lodosa (mais recente). A unidade lodosa caracteriza-se por apresentar valores de  $N_{SPT}$  por vezes nulos, atestando em termos de resistência e deformabilidade, comportamento geotécnico muito deficiente (Geocontrolo 2007a, 2010).

Na Tabela 2.4 apresentam-se algumas propriedades geotécnicas das aluviões determinadas pela Geocontrol (1982). Em termos médios a unidade lodosa apresenta valores máximos de  $N_{SPT}$  de 8 e a unidade arenosa até 32.

Tabela 2.4 - Parâmetros geotécnicos das aluviões do Barreiro (Geocontrol, 1982).

	SPT		Peso volúmico ( $kN/m^3$ )
	Intervalos de valores	Valores mais frequentes	
Unidade lodosa	1-8	1-3	$\gamma = 15,3-15,6$ $\gamma_d = 8,1-9,2$
Unidade arenosa	2-32	6-20	-

Para além dos dados disponibilizados pela Geocontrol (1982), analisaram-se 206 ensaios SPT de outros relatórios geotécnicos consultados. A análise dos *logs* destas sondagens não permitiu distinguir as unidades referidas por Geocontrol (1982) (frações arenosas e lodosas). Por essa razão os valores apresentados referem-se às aluviões no seu conjunto. O valor médio de  $N_{SPT}$  alcançado para esta formação foi de 17 pancadas (Tabela 2.5) e verificou-se que mais de 50% dos valores de  $N_{SPT}$  foram inferiores a 11. O valor médio de  $N_{SPT}$  obtido para as aluviões (17) foi ligeiramente superior ao calculado para os aterros (12).

Tabela 2.5- Valores estatísticos relativos aos 206 ensaios SPT realizados nas aluviões do Barreiro.

Média	17
Mediana	7
Desvio padrão	19

A distribuição dos valores de  $N_{SPT}$  em profundidade traduz-se num aumento até aos 10 m de profundidade, mas a partir desta profundidade observou-se uma diminuição das características de resistência das aluviões (Figura 2.23).

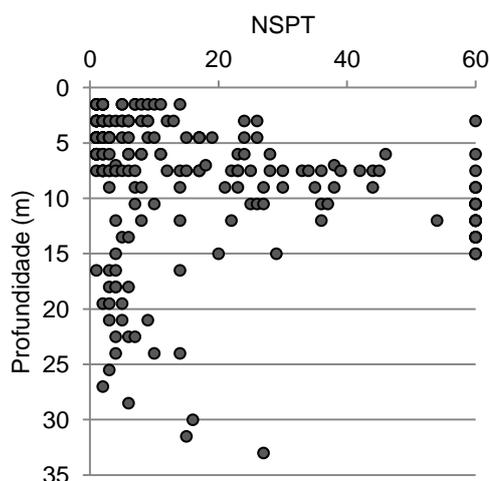


Figura 2.23 - Variação de  $N_{SPT}$  com a profundidade observada em 206 ensaios realizados em aluviões do Barreiro.

Este comportamento deve-se aos valores de  $N_{SPT}$  alcançados em quatro sondagens realizadas no Holocénico (442, 443, 453 e 435) (Figura 2.24). Três delas foram executadas na zona do terminal fluvial do Barreiro e a quarta foi efetuada nos terrenos da antiga área industrial do Barreiro. De todas as sondagens realizadas no Holocénico do Barreiro estas foram as que alcançaram as maiores profundidades e atravessaram as maiores espessuras de aluviões.

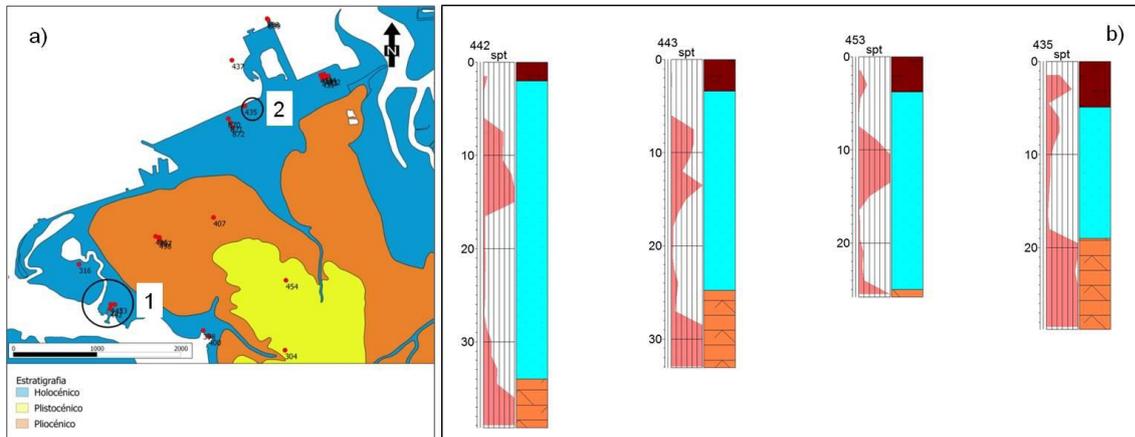


Figura 2.24 – (a) Localização no Barreiro das sondagens 442, 443, 453 e 435: 1 – sondagens 442, 443 e 453, 2 – sondagem 435; (b) logs das sondagens, a rosa valores de  $N_{SPT}$ . (Castanho – Aterros; Azul – Aluviões; Laranja – Pliocénico).

Analisando com pormenor os logs das quatro sondagens (Figura 2.24b), verificou-se que nas três primeiras se identificou uma zona, entre 10 e 15 m de profundidade, onde  $N_{SPT}$  alcançou valores de 60. No entanto para profundidades superiores estes valores diminuíram e só alcançaram valores de  $N_{SPT60}$  já no Pliocénico. Na sondagem 435 este comportamento não se verifica de modo tão pronunciado, mas os valores de  $N_{SPT}$  mais elevados ocorrem no início do Pliocénico a cerca de 20 m de profundidade.

Considerou-se como substrato as unidades subjacentes aos aterros e aluviões que, na área do Barreiro, correspondem a materiais do Plistocénico e Pliocénico. O Plistocénico corresponde a uma sequência sedimentar (Formação de Marco Furado) constituída por argilitos e conglomerados. Pode apresentar horizontes de geometria lenticular, sem grande continuidade lateral. O Pliocénico corresponde a material de composição fundamentalmente granular, coloração alaranjada a amarelada (Formação de Santa Marta) com sequências de níveis arenosos, com granulometria média a fina, matriz siltosa a argilosa residual. Pode incorporar seixos siliciosos rolados e bolsadas argiloarenosas com geometria irregular e expressão reduzida (Geocontrolo 1982, 2007a, 2007c, Costa *et al.* 2005a).

Segundo Geocontrolo (2010), os níveis superficiais destas duas formações apresentaram-se mais descomprimidos com valores de  $N_{SPT}$  entre 10 e 30 (solos granulares medianamente compactos). Sucederam-se terrenos gradualmente mais resistentes com valores de  $N_{SPT}$  na ordem de 30 a 50 pancadas (solos granulares compactos). Os níveis muito resistentes, caracterizados por valores sucessivos de  $N_{SPT}$  de 60 pancadas (solos granulares muito compactos) desenvolvem-se a partir de profundidades compreendidas entre 7,5 e 13,5 m (Geocontrolo 2007a, 2010).

Segundo Geocontrolo (1982), os valores de  $N_{SPT}$  do Plio-Plistocénico apresentaram um valor médio de 35 pancadas até aos 2-5 m de profundidade e de 60 ou mais pancadas para profundidades superiores a 5 m (Tabela 2.6). No entanto, foram obtidos valores de  $N_{SPT}$  entre 12 e 18 para bolsas de material mais fino.

Tabela 2.6 - Valores de  $N_{SPT}$  das unidades do Plio-Plistocénico do Barreiro (Geocontrolo 1982).

Profundidade (m)	Valores médios de $N_{SPT}$
2-5	35
> 5	60

Na Tabela 2.7 apresentam-se valores relativos ao peso volúmico do Plio-Plistocénico obtidas por Geocontrolo (1982) para o Barreiro.

Tabela 2.7 - Parâmetros do peso volúmico do Plio-Plistocénico presentes na Baía do Tejo do Barreiro (Geocontrolo 1982).

Pesos volúnicos $kN/m^3$
$\gamma=19,7-20,0$ ; $\gamma_d=16,6 - 17,1$

Para além da análise apresentada por Geocontrolo (1982) analisaram-se 794 ensaios SPT de 119 sondagens identificadas noutros relatórios geotécnicos. Verificou-se que cerca de 50% dos valores foram iguais ou superiores a 50 pancadas e 40% dos valores foram iguais ou superiores a 60. Este conjunto de ensaios apresentou um valor médio de 44 pancadas (Tabela 2.8), um valor superior ao obtido para os aterros (12) e aluviões (17).

Tabela 2.8 - Valores estatísticos relativos aos 794 ensaios SPT realizados no Plio-Plistocénico do Barreiro.

Média	44
Mediana	48
Desvio padrão	16

Ao contrário dos resultados obtidos para os aterros e para as aluviões, os 794 ensaios realizados nas unidades do Plio-plistocénico mostraram um aumento claro dos valores de  $N_{SPT}$  com a profundidade (Figura 2.25). No entanto, como se pode observar na Figura 2.25, alguns valores de  $N_{SPT}$  inferiores a 40 pancadas foram obtidos a profundidades superiores a 25 m. Estes resultados ocorrem nos ensaios das sondagens 442 e 443 que apresentaram as maiores espessuras de FS (superiores a 25-30 m; vide Figura 2.24). Foi nestes logs que o Pliocénico se situou a maiores profundidades e terá sido por esta razão que o valor de  $N_{SPT60}$  foi alcançado também a maiores profundidades.

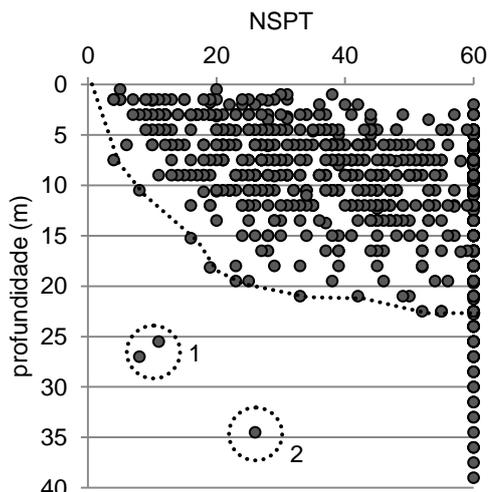


Figura 2.25 - Variação de  $N_{SPT}$  com a profundidade observada em 794 ensaios realizados no Plio-Plistocénico do Barreiro. 1 – Valores da sondagem 443, 2 – valor da sondagem 442.

Calcularam-se os valores médios de  $N_{SPT}$  para os 794 ensaios segundo intervalos de profundidade. Verificou-se que até aos 5 m o valor médio de  $N_{SPT}$  foi de 28 pancadas e a partir dos 20 m de profundidade foi de 56 (Tabela 2.9). As medianas calculadas, com o mesmo número de ensaios, apresentaram valores iguais a 60 pancadas a partir dos 10 m de profundidade.

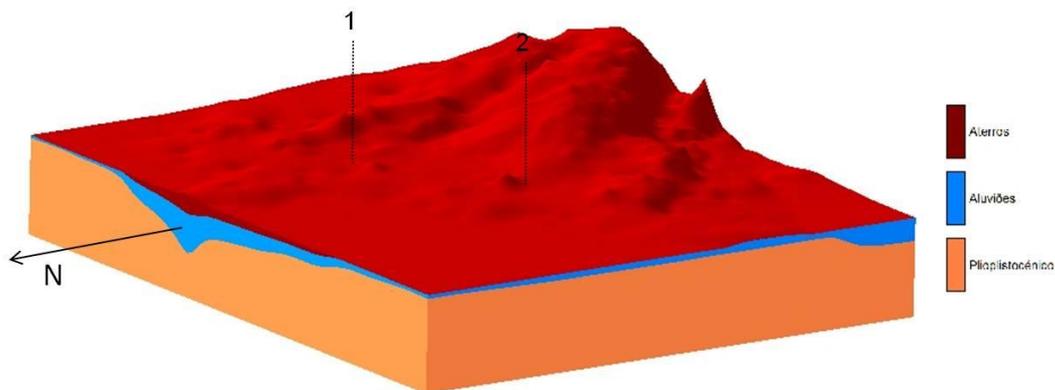
Os valores obtidos para os primeiros 5 m de profundidade (28 pancadas) foram inferiores ao valor obtido por Geocontrolo (1982) para uma profundidade entre 2 e 5 m (35 pancadas; vide Tabela 2.6). A amostra utilizada nos cálculos da Tabela 2.9 englobou um conjunto de sondagens realizadas numa área geográfica mais vasta do que o estudo efetuado por Geocontrolo (1982), que se restringiu à antiga área industrial do Barreiro. Esta poderá ser uma razão que terá contribuído para a diferença encontrada entre os resultados obtidos pelas duas análises.

Tabela 2.9 - Valores médios e medianas de  $N_{SPT}$  em função da profundidade observada em 794 ensaios realizados no Plio-Plistocénico no Barreiro (consultados em vários relatórios).

Intervalos de profundidade (m)	Valores médios de $N_{SPT}$	Valores das medianas de $N_{SPT}$
$\leq 5$	28	25
$> 5$ e $\leq 10$	42	43
$> 10$ e $\leq 20$	50	60
$> 20$ e $\leq 30$	56	60
$> 30$ e $\leq 40$	57	60

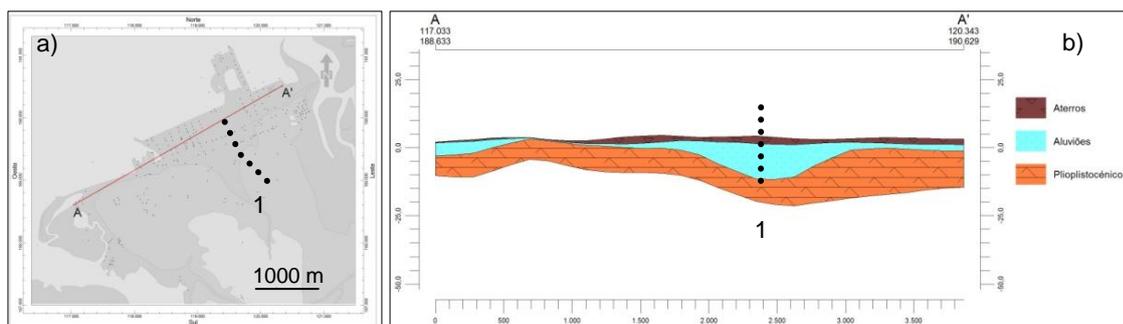
### 2.4.1.2 Espessura das Formações Superficiais

A interpolação para a estimativa da espessura das formações superficiais (aterros e aluviões) foi realizada de acordo com a metodologia definida em 2.3.1. Utilizaram-se os limites entre estas unidades e o Plio-Plistocénico identificados em 280 sondagens e restringiu-se a superfície do modelo com uma grelha de interpolação da altimetria, calculada com base em pontos cotados da cartografia à escala 1:25.000 (Instituto Geográfico do Exército 1992, 2009a, 2009b, 2009c).



Utilizou-se o modelo 3D obtido (Figura 2.26) para se calcular a variação da espessura das FS ao longo de duas secções executadas no Holocénico (secção A-A' e secção B-B'; Figuras 2.27 e 2.28). Foi ao longo destas secções que se intersetaram as áreas com maiores espessuras de FS. Os extremos destas secções coincidiram com a localização de sondagens, que apresentavam dados relativos à espessura das FS, de modo a garantir uma boa qualidade na interpolação obtida. Não se calcularam secções no Holocénico localizado na zona W do Barreiro por falta de elementos geotécnicos.

Na secção A-A' (Figura 2.27) identificou-se uma zona em que a espessura das formações superficiais atingiu valores próximos dos 20 m. Esta zona localiza-se no enfiamento de uma linha de água que se encontra atualmente encanada, mas que tem expressão na distribuição do Holocénico na carta geológica do Barreiro (Figura 2.17a) onde se observa uma variação topográfica do topo do Pliocénico que será consequência da erosão ocorrida há 18.000 anos, quando o nível do mar se encontrava 120 m abaixo do atual (Dias *et al.* 1997). Esta regressão terá sido responsável pela formação de paleorelevos sobre os quais se depositaram os terrenos do Holocénico.



A seção B-B' localizou-se a SW da anterior e as FS apresentam uma espessura total superior a 25 m na zona do atual terminal fluvial do Barreiro (Figura 2.28).

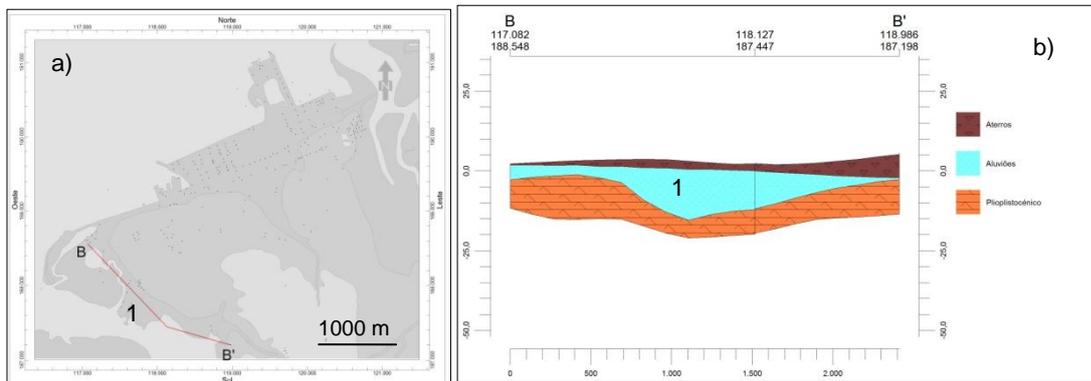


Figura 2.28 – (a) Localização no Barreiro da seção B-B'; (b) seção B-B' com a variação da espessura das FS (sobrelevação 20 vezes). 1 – Terminal fluvial do Barreiro.

Nos próximos capítulos serão estudadas outras propriedades dos terrenos que terão influência no comportamento sísmico dos terrenos (e.g. frequências naturais dos solos, variação da velocidade das ondas S). Estas serão comparadas com as propriedades geotécnicas dos terrenos, de acordo com a metodologia definida no presente Capítulo, pelo que importa obter mapas das espessuras das formações superficiais.

Os locais de maiores espessuras de aterros no Barreiro localizam-se na área de implementação da Tanquipor (superiores a 10 m) e mais a sudoeste onde se alcançaram valores de 7 m (Figura 2.29a). Os locais com maiores espessuras de aluviões localizam-se em duas áreas: uma no enfiamento de uma linha de água, onde se atingem espessuras de 20 m, e outra situada a sudoeste, no terminal fluvial do Barreiro, onde esta formação atingiu uma espessura de 32 m (Figura 2.29b).

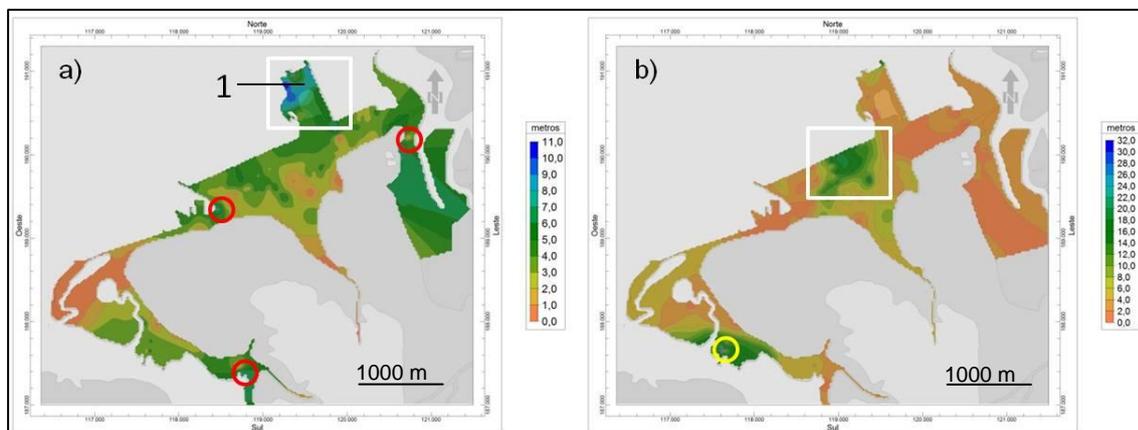


Figura 2.29 - Espessuras do Holocénico no Barreiro: (a) aterros, calculadas com 99 limites; (b) aluviões, calculadas com 221 limites. Retângulos brancos – correspondem às áreas de maiores espessuras de aterros e aluviões; círculos vermelhos – espessuras de aterros superiores a 7 m; círculo amarelo – espessuras de aluviões de 32 m. 1 – Localização da Tanquipor (indústria de perigosidade elevada).

Para se obter a espessura total das FS presentes no Holocénico do Barreiro somaram-se as grelhas de interpolação das espessuras dos aterros com a das aluviões. Na Figura 2.30 apresenta-se a grelha resultante, onde se pode observar a existência de duas áreas onde a espessura das FS é superior a 20 m. Estes locais já foram identificados nas seções A-A' e B-B' mas agora estão representados em planta. Uma das áreas localiza-se no enfiamento de uma

linha de água situada na antiga área industrial do Barreiro e a outra situa-se a sudoeste, no terminal da Transtejo, onde chega a atingir 34 m (Figura 2.30).

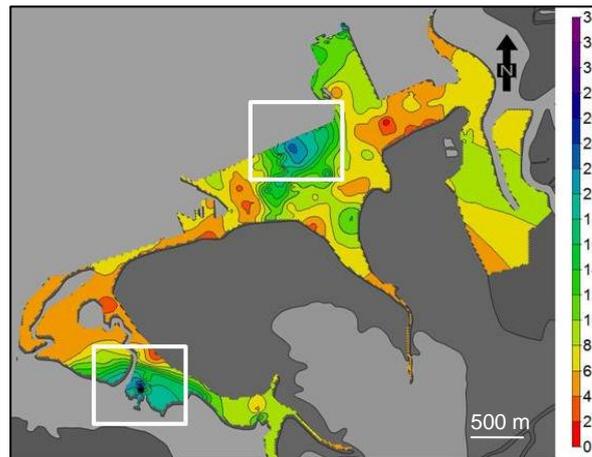


Figura 2.30 - Grelha de interpolação da espessura das FS no Holocénico do Barreiro. Assinalam-se os locais com maiores espessuras de FS (retângulos brancos).

### 2.4.1.3 Resultados de SPT

Foi calculado um modelo 3D com a interpolação dos valores de 1099 ensaios SPT realizados em 117 sondagens executadas no Barreiro, de acordo com a metodologia definida em 2.3.2 (Figura 2.31).

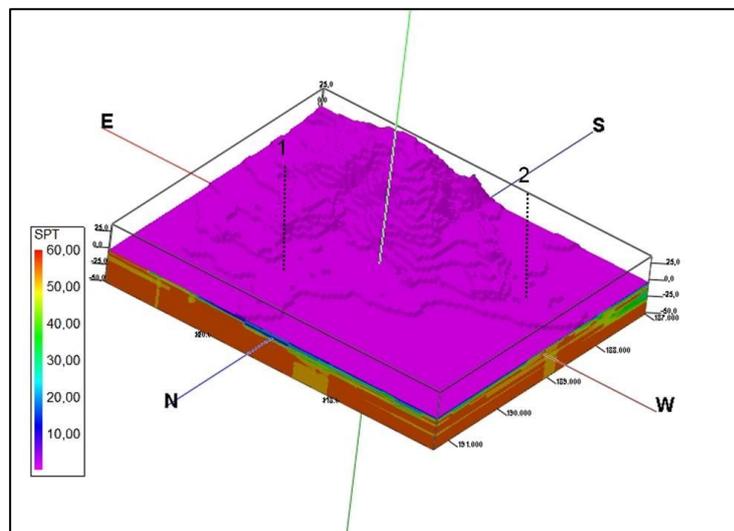


Figura 2.31 - Modelo 3D da distribuição de  $N_{SPT}$  no Barreiro (sobrelevação de 10 vezes). 1 – antigas áreas industriais, 2 – terminal fluvial do Barreiro.

Calcularam-se, a partir deste modelo, duas secções A-A' e B-B' (Figuras 2.32 e 2.33) com as interpolações dos valores de  $N_{SPT}$ . Estas secções permitiram observar a variação dos valores de  $N_{SPT}$  em função da profundidade e segundo duas direcções. Escolheram-se as secções A-A' e B-B' de modo a pôr em evidência a influência das formações geológicas (Holocénico e o Plio-Pleistocénico) na variação dos valores de  $N_{SPT}$ . Os extremos das secções coincidiram com a

localização de sondagens de modo a impor-se para esses locais os valores identificados ao longo dessas sondagens.

Em termos gerais observou-se que o Plio-Plistocénico apresentou, nos primeiros metros de profundidade, valores de  $N_{SPT}$  superiores aos do Holocénico. Identificaram-se, no entanto, zonas do Plio-pleistocénico onde se obtiveram valores de  $N_{SPT}$  inferiores a 30 para profundidades superiores a 5 m e que deverão corresponder a locais descomprimidos e/ou alterados.

Relativamente à seção A-A' (Figura 2.32), verificou-se existirem duas áreas, uma no Holocénico e outra no Pliocénico, em que a profundidade do nível de  $N_{SPT60}$  se situa a cerca de 10-15 m. Na segunda área estes valores poderão estar associados à presença de material alterado do Pliocénico nos primeiros 15 – 20 m.

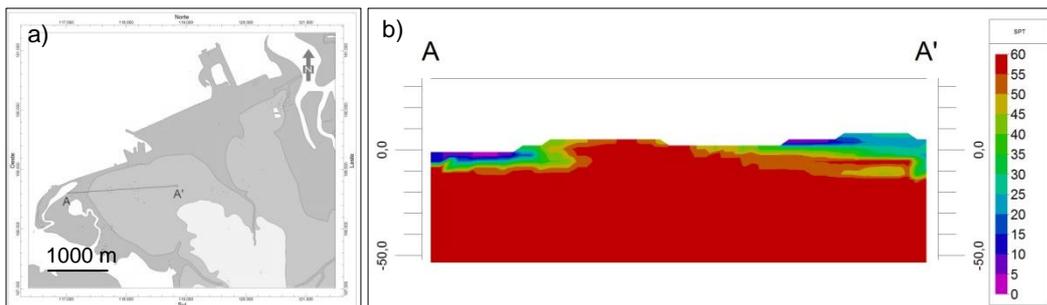


Figura 2.32- (a) Localização no Barreiro da seção A-A'; (b) variação dos valores de  $N_{SPT}$  segundo A-A' (sobrelevação 8 vezes).

A seção B-B' inicia-se no Holocénico e termina no Plio-Plistocénico e evidencia uma boa relação entre a profundidade do substrato e o nível de  $N_{SPT60}$  (Figura 2.33). No início da seção e até ao cais fluvial do Barreiro, a superfície  $N_{SPT60}$  desenvolve-se entre as cotas -10 e -15, mas neste cais há um afundamento para cotas de -30 e -35 m. Este comportamento coincide com o local de maior espessura de FS (Figura 2.33c). À medida que nos afastamos para sudeste, esta superfície aproxima-se da superfície topográfica.

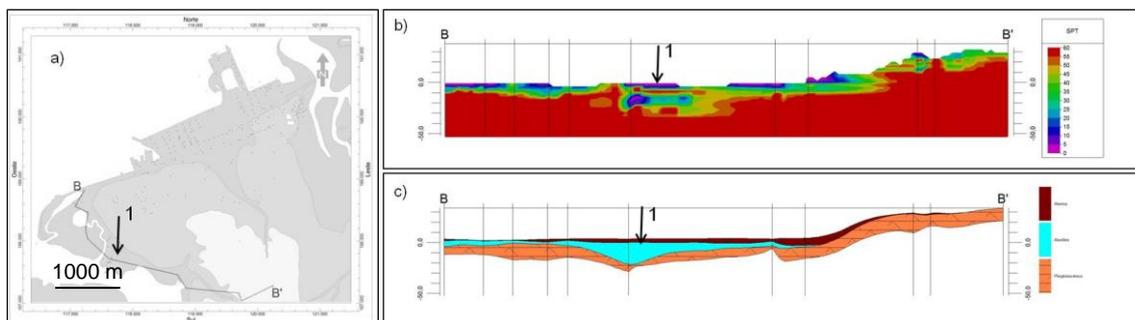


Figura 2.33 – (a) Localização no Barreiro da seção B-B'; (b) variação dos valores de  $N_{SPT}$ ; (c) da espessura das formações superficiais no Barreiro (sobrelevação 8 vezes). 1 – Localização do terminal fluvial do Barreiro.

Apesar de alguma insuficiência da cobertura geográfica dos dados de  $N_{SPT}$ , foram identificadas para cada uma das 92 sondagens as profundidades (ou cotas) em que se alcançaram valores de  $N_{SPT60}$ . Na Figura 2.34 apresenta-se o resultado da interpolação efetuada com as cotas de  $N_{SPT60}$  para o Holocénico do Barreiro.

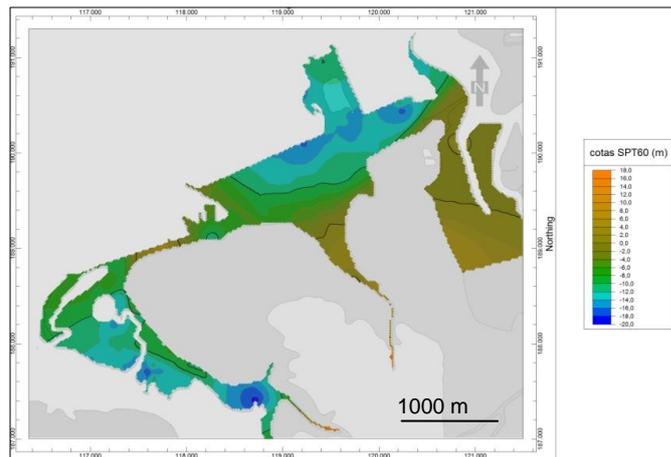


Figura 2.34 – Resultado da interpolação efetuada com as cotas de  $N_{SPT60}$  obtidas em 92 sondagens localizadas no Holocénico do Barreiro.

#### 2.4.1.4 Relação entre variáveis

No Barreiro observou-se a existência de uma boa relação entre a espessura das FS, a profundidade de  $N_{SPT60}$  e o relevo (Figura 2.35). Às áreas com maior espessura das FS corresponderam locais onde a superfície de  $N_{SPT60}$  se situou a maiores profundidades (Figuras 2.35a, b). Em duas das áreas com espessuras de FS de 20-22 m corresponderam profundidades de  $N_{SPT60}$  de 17-18 m mas, numa terceira, com uma de espessura de 12 m de FS correspondeu uma profundidade de  $N_{SPT60}$  de 22 m. Observou-se igualmente que os locais de maiores profundidades de  $N_{SPT60}$  e espessura das FS se localizaram nas zonas de menor relevo. Identificou-se uma faixa onde os valores  $N_{SPT60}$  mais profundos não se relacionaram com locais de maiores espessuras das FS (linhas ponteadas Figuras 2.35a, b): apesar da espessura das FS não aumentar verifica-se que  $N_{SPT60}$  se encontra a maiores profundidades.

Na Figura 2.36 apresentam-se os *logs* das sondagens localizados nessa área e observou-se que, embora localizadas no Pliocénico, estas apresentaram valores de  $N_{SPT}$  de 30 até profundidades entre 14 e 20 m. Trata-se de uma zona com uma pequena espessura de FS mas em que o Pliocénico se encontra descomprimido ou alterado até essas profundidades.

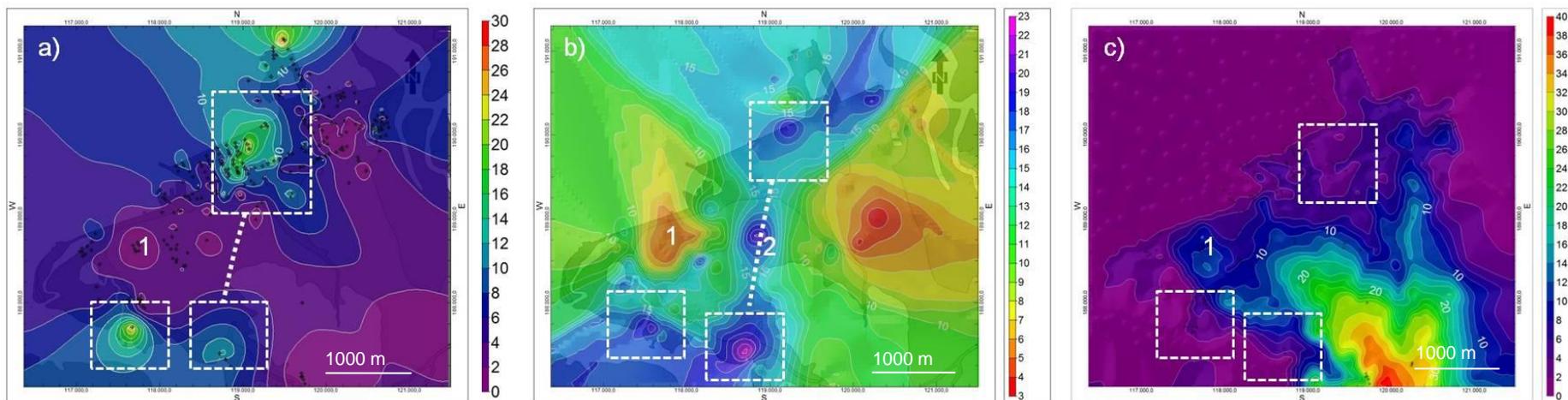


Figura 2.35 - Resultados para o Barreiro das interpolações (a) da espessura das FS; (b) da profundidade de  $N_{SPT60}$ ; (c) relevo. 1 - Locais com baixas espessuras FS, baixa profundidade de  $N_{SPT60}$  e maior relevo, 2 – local no Pliocénico em que  $N_{SPT60}$  se encontra entre os 16 e os 20 m de profundidade. Quadrados e retângulos representam áreas de maiores espessuras de FS, maiores profundidades de  $N_{SPT60}$  e de baixas cotas de relevo. Linhas ponteadas brancas – falta de relação entre a espessura das FS e  $N_{SPT60}$ .

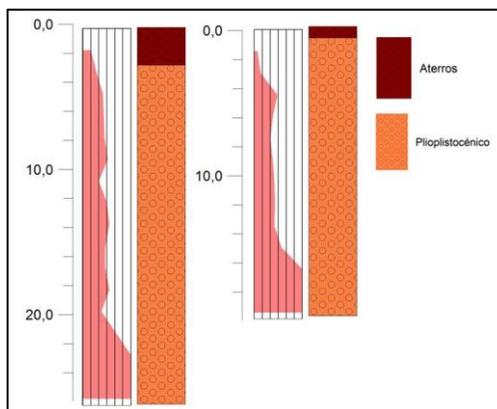


Figura 2.36 - Logs de duas sondagens do Pliocénico do Barreiro em que  $N_{SPT60}$  se localizou a profundidades superiores a 14 m (Geocontrole 2007b).

## 2.4.2 Setúbal

As formações geológicas presentes na região de Setúbal e Mitrena apresentam um vasto conjunto de unidades litoestratigráficas que se distribuem desde o Mesozoico até ao Holocénico. Os ensaios de campo realizados nesta região (Capítulos III e IV) foram executados na área delimitada da Figura 2.37a, pelo que se optou por realizar uma caracterização mais detalhada das formações aí presentes. Caracterizaram-se os terrenos pertencentes ao Holocénico (aterros e aluviões), Plistocénico e Pliocénico (Figura 2.37a). Foi nestas formações, que se realizaram os ensaios de campo, com a exceção de alguns ensaios realizados no bordo leste da área de estudo, que se localizaram em terrenos do miocénico e no Mesozoico.

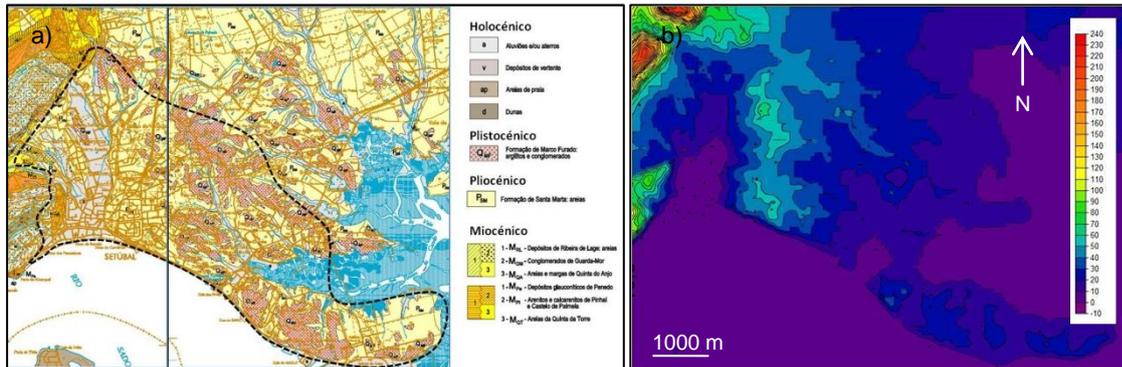


Figura 2.37 - (a) Extratos da carta geológica de Portugal das folhas 38B e 39A à escala 1:50.000 (Costa *et al.* 2005c, 2005d). Área a tracejado corresponde à área abrangida pelo presente estudo; (b) modelo digital do relevo da região de Setúbal elaborado com base em pontos cotados da cartografia à escala 1:25.000 (Instituto Geográfico do Exército 1994a, 1994b, 1994c e 2006).

O Holocénico encontra-se na cidade de Setúbal e ao longo da margem fluvial que vai de Setúbal até Mitrena. A zona da cidade corresponde a uma área de baixo-relevo limitada a Norte por formações do miocénico e a Oeste pelo Cenozoico com relevos acentuados (Figura 2.37b).

O Holocénico é constituído por aluviões e aterros que se distribuem nas zonas mais baixas de Setúbal e Mitrena. O Plistocénico corresponde, tal como na área do Barreiro, a terrenos pertencentes à Formação de Marco Furado constituída por argilitos e conglomerados. O Pliocénico está representado pela Formação de Santa Marta e apresenta um cariz essencialmente arenoso.

O Miocénico aflora a oeste e prolonga-se para leste, segundo relatórios de sondagens consultados das sondagens da Companhia Portuguesa de Petróleos de 1956 a 1983, e encontra-se na área da Mitrena a profundidades compreendidas entre 94 e 158 m. O Mesozoico, onde se realizaram alguns ensaios ReMi e ensaios H/V, corresponde ao Jurássico superior (Kimeridgiano-Titoniano) e é constituído por argilas, grés, conglomerados e calcários de Vale de Rasca.

Da análise efetuada a 46 relatórios geotécnicos foi possível coligir informação geotécnica relativa a 307 sondagens (Figura 2.38a). A localização das sondagens e demais informação foram georreferenciadas de acordo com a metodologia definida em 2.3. Foi possível identificar 267 sondagens com ensaios SPT (Figura 2.38b) e a análise dos seus *logs* permitiu obter informação sobre os resultados de 2950 ensaios. Os ensaios SPT atingiram em alguns casos profundidades superiores a 30 m (31 sondagens) mas na maior parte alcançaram-se profundidades até 20 m (121 sondagens) (Figura 2.38c). A distribuição da informação geotécnica, retirada das sondagens, não abrangeu toda a área estudada verificando-se a existência de locais sem dados geotécnicos.

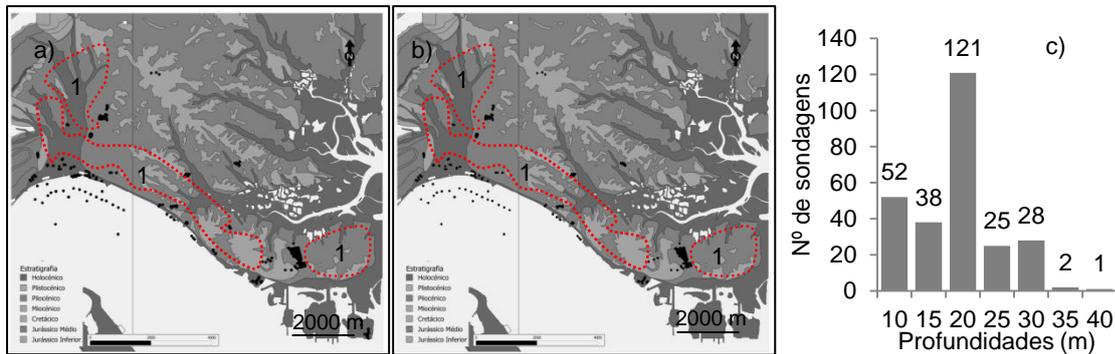


Figura 2.38 - (a) Localização das sondagens utilizadas na caracterização geotécnica de Setúbal e Mitrena; (b) localização das sondagens com ensaios SPT; (c) distribuição das profundidades de 267 sondagens com ensaios SPT. 1 – Locais sem informação geotécnica.

#### 2.4.2.1 Propriedades geotécnicas

A caracterização geotécnica desta região realizou-se com base na consulta de 46 relatórios e na análise dos *logs* de 307 sondagens. Um estudo sobre a aplicação da cartografia geotécnica no planeamento regional e urbano aplicado à região de Setúbal (Coelho, 1980), pela informação disponibilizada, revestiu-se de particular importância na presente caracterização.

Coelho (1980) considerou a existência de um conjunto de unidades geotécnicas que no seu conjunto designou por formações superficiais. Estas formações corresponderam a aterros, aluviões (fluvio-marinhas, arenoargilosas e arenosas), a uma cobertura arenosa superficial e depósitos de vertente. Por outro lado, considerou o Plistocénico e o Pliocénico numa mesma série (Plio-Plistocénico) já como substrato.

A cidade de Setúbal aumentou de superfície com o recurso à deposição de aterros sobre a planície aluvionar da Ribeira do Livramento. Existe, por esta razão, uma espessura considerável e variável de aterros sobre os terrenos aluvionares da baixa de Setúbal (Coelho 1980). Trata-se de material heterogéneo, essencialmente arenoso, de grão grosseiro a médio, com seixo disperso de natureza variada, fragmentos de tijolo, brita calcária, restos de vegetais e de conchas. Ocorrem por vezes intercalações delgadas de areia fina com componente argilosa variável e com espessuras que podem alcançar 6 m (Geoteste 2005, 2008, 2009b). Estas formações podem ainda apresentar passagens argilosas e, por vezes, blocos de calcário.

A zona do centro histórico apresentou uma cobertura quase contínua de aterros cuja espessura se situa entre 2 a 4 m (Coelho 1980). Para norte, esta cobertura é descontínua e a sua espessura é mais reduzida ou mesmo nula não ultrapassando em regra os 2 m. Esta unidade está caracterizada relativamente aos valores de  $N_{SPT}$  mais frequentes e aos seus intervalos de ocorrência (Coelho, 1980) (Tabela 2.10).

Tabela 2.10 - Valores de  $N_{SPT}$  medidos em aterros no centro histórico de Setúbal e na Avenida Luísa Todi (Coelho, 1980).

Locais	$N_{SPT}$	
	Intervalos de valores	Valores mais frequentes
Centro histórico	2 - 8	2 - 8
Av. Luísa Todi e Doca dos Pescadores	15-60	15-40

A média calculada com os 237 valores de  $N_{SPT}$  obtidos em aterros foi de 15,1 (Tabela 2.11), valor superior à média calculada para os aterros do Barreiro (12,2) (Tabela 2.3). No cálculo do valor médio efetuado para a região de Setúbal não se diferenciaram, por falta de informação nos logs consultados, os valores de  $N_{SPT}$  segundo as áreas referidas por Coelho (1980).

Tabela 2.11 - Valores estatísticos de  $N_{SPT}$  relativos aos 237 ensaios realizados em aterros de Setúbal e Mitrena (consultados em vários relatórios).

Média	15
Mediana	10
Desvio padrão	14

Na Figura 2.39 apresentam-se os valores de  $N_{SPT}$  em função da profundidade e observou-se que foram raros os ensaios, mesmo para profundidades superiores a 10 m, em que se obtiveram valores superiores a 40 pancadas.

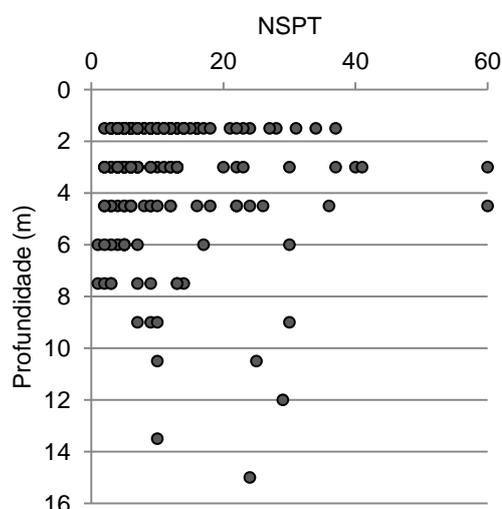


Figura 2.39 - Variação de  $N_{SPT}$  com a profundidade observada para aterros de Setúbal e Mitrena.

Coelho (1980) considerou as aluviões distribuídas por várias unidades, as aluviões fluvio-marinhas, aluviões arenoargilosas e aluviões arenosas. As aluviões fluvio-marinhas corresponderam às aluviões da Baixa de Setúbal, onde apresentaram uma largura de 1000 m, e que se prolongaram para noroeste onde os seus limites se tornam imprecisos. São constituídas por depósitos argilosos, lodosos e arenosos em estratos irregulares, com rápidas variações laterais e verticais; esta unidade é constituída por três complexos: complexo argiloso, complexo lodoso e complexo arenoso. Na Tabela 2.12 apresentam-se valores referentes aos pesos volúmicos dos materiais de dois destes complexos.

Tabela 2.12 - Valores dos pesos volúmicos dos materiais dos complexos Argiloso e Lodoso de Setúbal (Coelho 1980).

Complexos pertencentes às aluviões	Pesos volúmicos (kN/m <sup>3</sup> )
Argiloso	$\gamma = 18,7-21,4$ ; $\gamma_d = 13,7-18,3$
Lodoso	$\gamma = 15,2-18,6$ ; $\gamma_d = 8,7-14,8$

O complexo argiloso apresentou valores de  $N_{SPT}$  entre 6 e 18 acima do nível freático, que se situará a partir dos 3,5 m de profundidade. Abaixo deste nível os valores de  $N_{SPT}$  situaram-se entre 2 e 10 pancadas, aumentando depois com o aumento da profundidade. O complexo lodoso não apresentou um aumento de resistência à penetração com a profundidade e exibiu valores de  $N_{SPT}$  normalmente inferiores a 10, situando-se mais frequentemente entre 2 e 8 (Coelho 1980). No complexo arenoso e até aos 8 m de profundidade, o valor de  $N_{SPT}$  situou-se entre 10 e 30 pancadas, existindo um aumento de resistência com a profundidade.

As aluviões fluvio-arenosas-argilosas compreendem depósitos de areias argilosas e argilas arenosas presentes nas linhas de água de maior relevo (Ribeiras de Alcube e da Comenda). Têm a sua maior expressão na baixa da Ribeira da Comenda e nos restantes vales, e correspondem a pequenas extensões com espessuras reduzidas. Correspondem a solos argilosos de consistência média a moles e de solos arenosos pouco compactos (Coelho 1980).

Segundo Coelho (1980), as aluviões fluviais arenosas correspondem a areias médias a finas que se encontram na zona oriental e que preenchem vales largos e pouco profundos escavados nos complexos arenosos do Plio-pleistocénico. Apresentam geralmente espessuras reduzidas (1 a 3 m), podendo atingir 6 a 8 m na zona adjacente à baixa aluvionar de Setúbal. Coelho (1980) obteve em ensaios de sísmica de refração velocidades entre os 360 m/s e 430 m/s para as ondas P. Até aos 2 m de profundidade estas aluviões apresentam valores de  $N_{SPT}$  entre 4 e 10, e entre os 2 e os 5 m de profundidade apresentam valores entre 10 e 30 pancadas.

No presente trabalho não foi possível distribuir os resultados dos ensaios SPT pelas unidades descritas por Coelho (1980). Tal deveu-se à falta de uniformidade nas classificações atribuídas pelas diferentes entidades às litologias atravessadas pelas sondagens.

A análise estatística dos 428 ensaios SPT realizados nas aluviões apresentou um valor médio de 28 e uma mediana de 28 (Tabela 2.13). Esta média foi superior à obtida para as aluviões do Barreiro (17) o que revelará uma maior rigidez destes materiais na região de Setúbal. No entanto, o número de ensaios analisados nas duas regiões foi significativamente diferente (206 no Barreiro e 428 na região de Setúbal).

Tabela 2.13 - Valores estatísticos relativos aos 428 ensaios SPT realizados em aluviões de Setúbal e Mitrena.

Média	28
Mediana	28
Desvio padrão	16

A distribuição dos 428 valores  $N_{SPT}$  em profundidade apresentou um carácter dispersivo e revelou a existência de valores inferiores a 30 para profundidades superiores a 30 m (Figura 2.40a). Tal como no Barreiro (Figura 2.23), as sondagens que apresentaram este

comportamento caracterizaram-se por apresentar elevadas espessuras de FS e o valor de  $N_{SPT60}$  só foi alcançado em níveis já pertencentes ao Pliocénico (Figuras 2.40b, c).

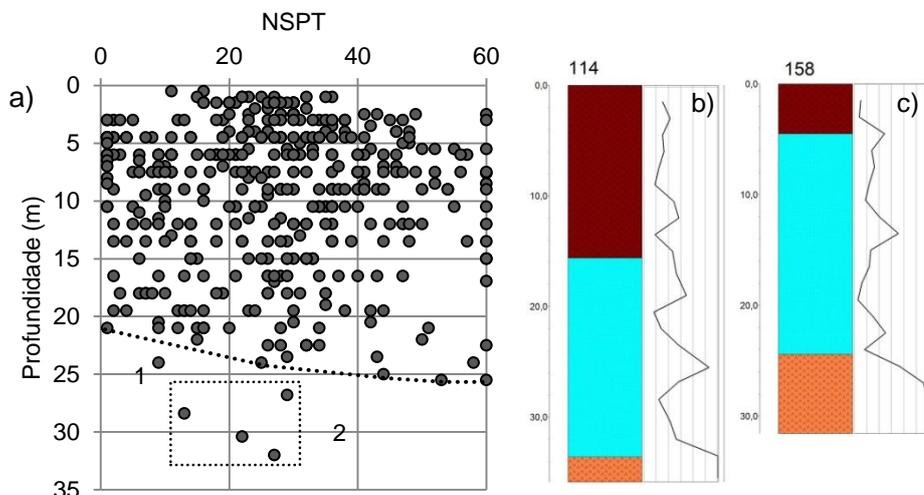


Figura 2.40 - (a) Variação de  $N_{SPT}$  em Setúbal com a profundidade nas unidades aluvionares. 1 - Sondagem 158, 2 - retângulo valores de  $N_{SPT}$  da sondagem 114; (b)  $\log$  da sondagem 114; (c)  $\log$  da sondagem 158. Castanho - aterros, azul - aluviões, laranja - Pliocénico.

A série Plio-Plistocénica é constituída por sedimentos fluvio-marinhos e continentais com estratificação lenticular e entrecruzada, constituída essencialmente por material arenoso, com leitos de calhaus rolados e lentículas argilosas (Coelho 1980). Nesta série litológica considerou-se a existência de dois complexos litológicos, sendo um arenoargiloso vermelho (parte superior da série) e outro arenoso. O complexo arenoargiloso é constituído por dois tipos litológicos: areias silto-argilosas e argilas arenosas. Na Tabela 2.14 apresentam-se valores relativos às propriedades destes dois tipos de litologias.

Tabela 2.14 - Propriedades geotécnicas do complexo arenoargiloso (Coelho 1980).

	Profundidades (m)	$N_{SPT}$	Pesos volúmicos ( $kN/m^3$ )
Areias silto-argilosas	$\leq 3$	10-30	$\gamma=21,3-22,2$ ; $\gamma_d=18,4-19,7$
	$> 3$	20-40	
Argilas arenosas	$\leq 1$	6-19	$\gamma=20,8-22,5$ ; $\gamma_d=17,1-20,4$
	2	10-35	
	$> 5$	15-50	

O complexo arenoso é constituído por areias onde ocorrem camadas lenticulares de argilas. Coelho (1980) considerou três tipos de litologias presentes neste complexo: areias, areias silto-argilosas e argilas silto-argilosas. Na Tabela 2.15 apresentam-se algumas propriedades geotécnicas destes materiais.

Tabela 2.15 - Propriedades geotécnicas das litologias do complexo arenoso (Coelho 1980).

	$N_{SPT}$	Pesos volúmicos ( $kN/m^3$ )
Areias e areias siltosas	10-50 ( $\leq 3$ m)	$\gamma=17,6-22,1$ ; $\gamma_d=16,0-20,2$
	30-60 ( $>3$ m)	$\gamma=19,8-22,1$ ; $\gamma_d=16,3-20,6$
Argilas siltosas	10 $<N < 25$	$\gamma=18,8-20,0$ ; $\gamma_d=14,4-16,0$

Analisaram-se 2285 ensaios SPT de 229 sondagens realizados no Plio-Plistocénico e verificou-se que mais de 50% dos valores de  $N_{SPT}$  se situaram entre 50 e 60. A média obtida com os valores disponíveis foi de 47,3 e mediana de 60 (Tabela 2.16). Os valores calculados para Setúbal (média 47) são semelhantes aos do Barreiro (44).

Tabela 2.16 - Valores estatísticos relativos aos 2285 ensaios SPT realizados no Plio-Plistocénico de Setúbal e Mitrena.

Média	47
Mediana	60
Desvio padrão	16,6

A variação de  $N_{SPT}$  em função da profundidade mostrou, tal como para o Barreiro, um aumento dos valores de  $N_{SPT}$  com a profundidade (Figura 2.41). Para profundidades superiores a 29 m, os valores de  $N_{SPT}$  foram iguais ou superiores a 60. Existiram, no entanto, situações em que as sondagens executadas até 24-26 m de profundidade apresentaram valores de  $N_{SPT}$  inferiores a 40 (Figura 2.41). Estes casos relacionaram-se com a presença de espessas colunas de FS e, provavelmente, com o facto de os níveis do Pliocénico estarem alterados ou descomprimidos nos primeiros metros (Figura 2.41b).

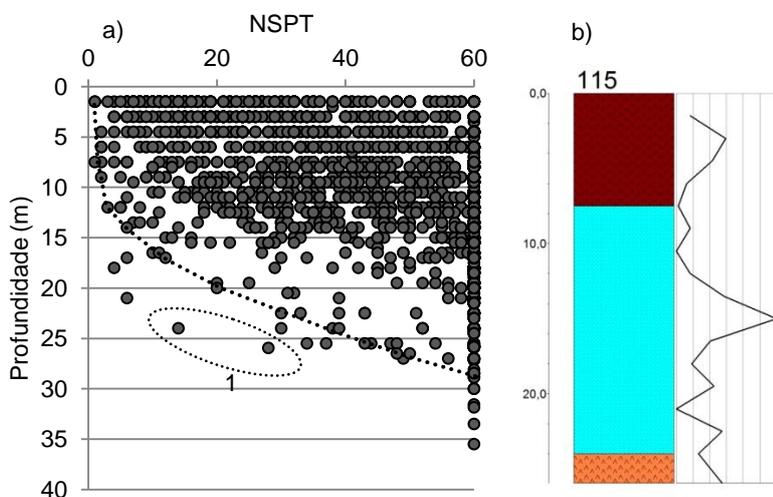


Figura 2.41 - (a) Variação de  $N_{SPT}$  com a profundidade observada em Setúbal e Mitrena; (b)  $\log$  da sondagem 115. 1 - Valores de  $N_{SPT}$  da sondagem 115.

Calcularam-se os valores médios e as medianas de  $N_{SPT}$  segundo intervalos de profundidade e verificou-se que até aos 5 m de profundidade o valor médio de  $N_{SPT}$  foi de 34 pancadas e a partir dos 30 m foi de 60 (Tabela 2.17). As medianas apresentaram, tal como para o Plio-Plistocénico do Barreiro (Tabela 2.9), valores iguais a 60 a partir dos 10 m de profundidade.

Tabela 2.17 - Valores médios e medianas de  $N_{SPT}$  em função da profundidade no Plio-Plistocénico, observada em 2285 ensaios SPT (consultados em vários relatórios).

Intervalos de profundidade (m)	Valores médios de $N_{SPT}$	Valores das medianas de $N_{SPT}$
$\leq 5$	34	34
$> 5$ e $\leq 10$	45	44
$> 10$ e $\leq 20$	48	60
$> 20$ e $\leq 30$	57	60
$> 30$ e $\leq 40$	60	60

Alguns ensaios geofísicos permitem caracterizar a velocidade das ondas de corte (ondas S) dos materiais ensaiados no Pliocénico da região de Setúbal: um perfil de refração sísmica no Pliocénico de Setúbal (Carvalho, 2013) forneceu velocidades de 218 a 349 m/s; quatro ensaios *cross-hole* no Pliocénico da Mitrena (LNEC, 2006) obtiveram velocidades das ondas de corte entre os 200 e os 500 m/s (Figura 2.42).

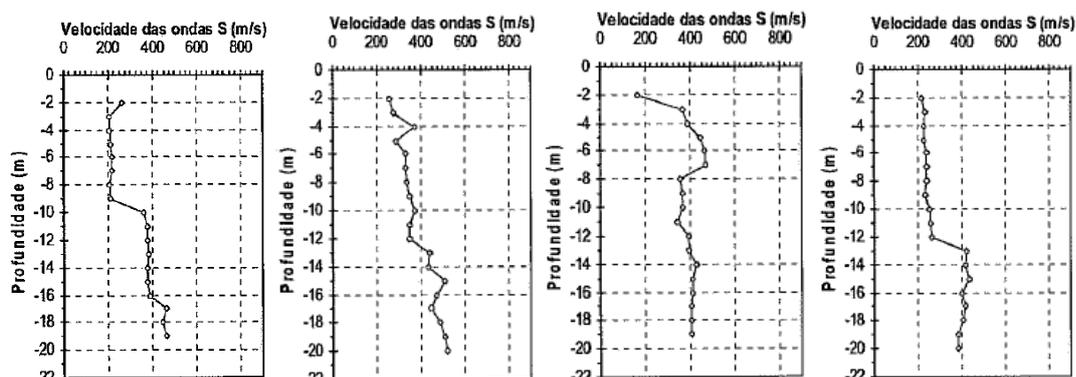


Figura 2.42 - Resultados de quatro ensaios *cross-hole* obtidos no Pliocénico da Mitrena (de LNEC, 2006).

### 2.4.2.2 Espessura das Formações Superficiais

Um modelo tridimensional das espessuras das FS para a região de Setúbal foi calculado de acordo com a metodologia definida em 2.3.1. Considerou-se a informação disponível em 267 sondagens e utilizou-se o método do inverso da potência da distância (Figura 2.43).

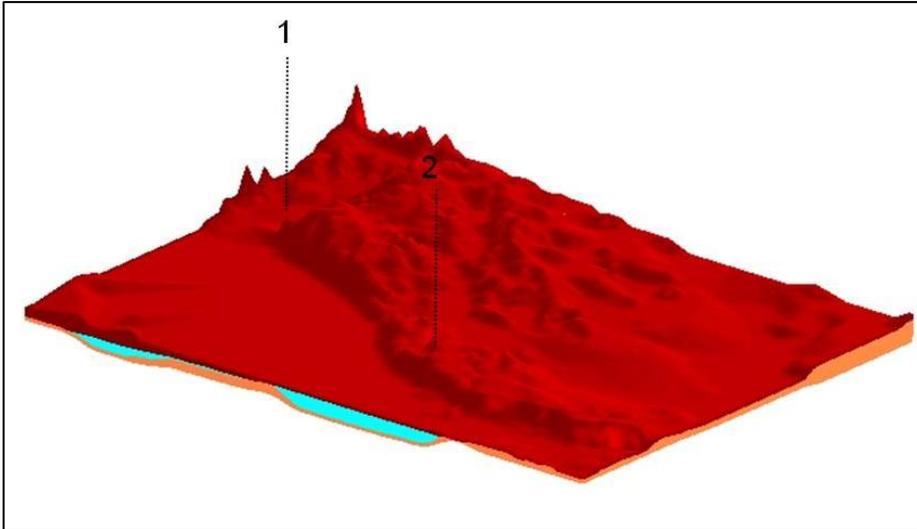


Figura 2.43 - Modelo tridimensional da espessura das FS na região de Setúbal. 1 - Localização da cidade de Setúbal, 2 - Mitrena. Castanho - aterros, azul - aluviões, laranja – Plio-Plistocénico.

Com base no modelo tridimensional calculou-se a variação das espessuras das FS ao longo de uma seção B-B' (Figura 2.44a).

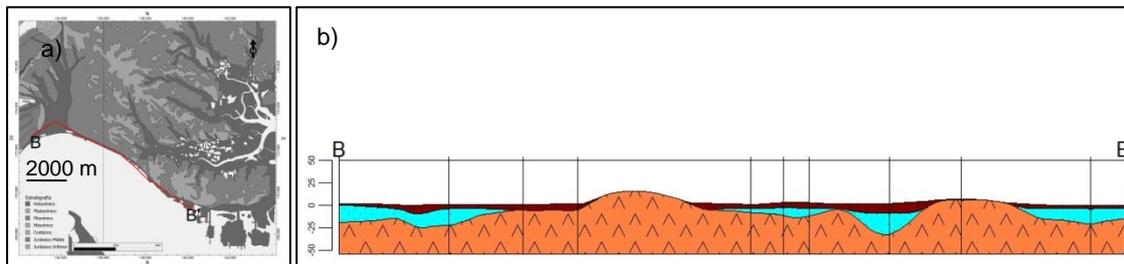


Figura 2.44 - (a) Localização em Setúbal da seção B-B'; (b) seção com a variação da espessura das FS (sobreelevação de 10 vezes).

A seção B-B' iniciou-se na zona baixa da cidade de Setúbal onde as espessuras das FS variaram entre 20 e 30 m e onde foi possível observar a variação da topografia do substrato na área da Ribeira do Livramento (Figura 2.44b). Para leste (em direção a B') há alternância de um Plio-Plistocénico aflorante e de áreas onde as espessuras das FS podem atingir espessuras superiores a 20 m.

Para além do cálculo da espessura das FS ao longo de uma seção, estimaram-se igualmente essas espessuras em planta. Interpolaram-se, pelo método do inverso da potência da distância, as profundidades do substrato identificado nos logs de 150 sondagens (Figura 2.45).

Na carta obtida, observou-se que as zonas com maiores espessuras de aterros se concentraram em duas áreas: uma na cidade de Setúbal, onde alcançaram 16 m, e outra a leste onde as espessuras máximas foram de 10 m (Figura 2.45a). Identificaram-se também duas áreas onde as espessuras das aluviões apresentaram maior expressão: uma na baixa da cidade de Setúbal, onde alcançaram 20 m, e outra a sudeste com 27 m (Figura 2.45b).

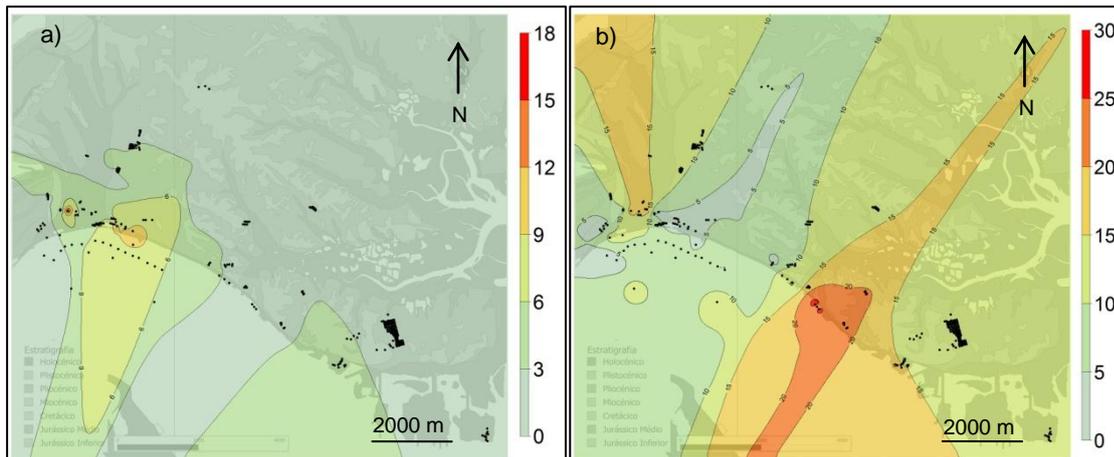


Figura 2.45 - Interpolação em Setúbal das espessuras (m) (a) dos aterros; (b) das aluviões.

Na cidade de Setúbal a espessura das FS é considerável, o que poderá potenciar o aparecimento de efeitos de sítio durante a ocorrência de sismos. Com o objetivo de se conseguir um maior rigor na estimativa da espessura das FS, foram utilizadas as curvas de nível do substrato apresentadas em Coelho (1980) para a cidade de Setúbal. Coelho (1980) calculou a distribuição das cotas do substrato (topo do Pliocénico) na área da cidade de Setúbal (Figura 2.46a) com o recurso a diversos ensaios geotécnicos (SPT, penetração estática, penetrómetros dinâmicos ligeiros e sondagens geoelectricas). Foram georreferenciados 66 pontos, que resultaram da interseção dos ensaios geotécnicos com as curvas de nível apresentadas em Coelho (1980). Para cada um desses pontos identificaram-se as cotas, ou as profundidades, do limite entre as FS e o Pliocénico. A acrescer aos 66 pontos de Coelho (1980) analisaram-se também 34 logs das sondagens constantes dos relatórios geotécnicos consultados num total de 100 pontos (Figura 2.46b).

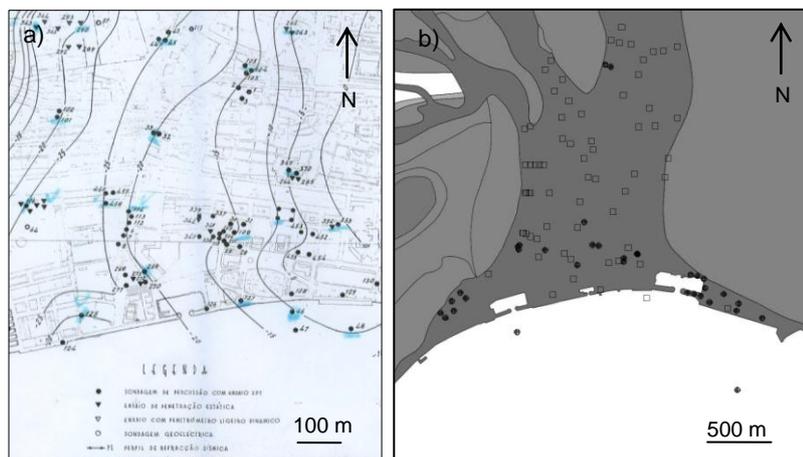


Figura 2.46 - (a) Curvas de nível do substrato em Setúbal (de Coelho, 1980); (b) 100 locais com informação relativa ao topo do Pliocénico. Pontos - sondagens, retângulos - dados retirados de Coelho (1980).

Calculou-se a interpolação da espessura das FS (aterros mais aluviões) de modo a obter-se uma variação detalhada da espessura destas formações na cidade de Setúbal. Utilizaram-se dois métodos de interpolação, o método do inverso da distância (Figura 2.47a) e o método de Kriging (Figura 2.47b) e constatou-se que os resultados obtidos foram semelhantes. Verificou-se que as maiores espessuras das FS se distribuem ao longo do percurso da Ribeira do

Livramento que atualmente se encontra enterrado (Figura 2.47). Os locais onde se identificaram as maiores espessuras de FS (30 - 35 m) situaram-se na Avenida Luísa Todi, junto da Praça Teófilo onde se localiza a Câmara Municipal de Setúbal. Para Norte e para os bordos laterais desta pequena bacia Holocénica observa-se, como seria de esperar, uma diminuição das espessuras das FS.

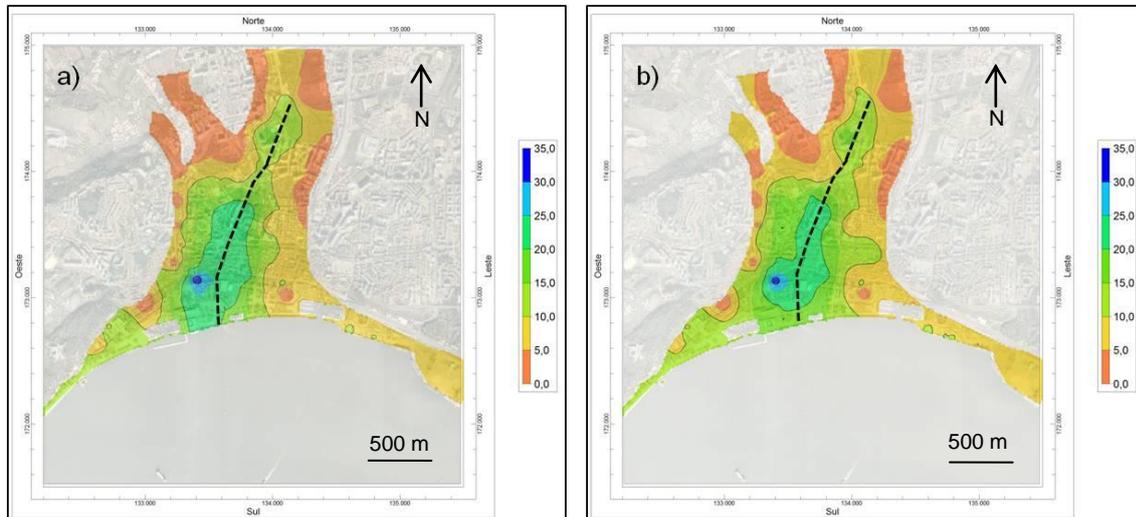


Figura 2.47 - Modelação das espessuras das formações superficiais para a cidade de Setúbal (a) calculada pelo método inverso da distância a uma potência; (b) calculada pelo método Kriging. Tracejado - percurso aproximado da Ribeira do Livramento.

### 2.4.2.3 Resultados de SPT

A análise dos logs das sondagens com ensaios SPT permitiu identificar 3173 ensaios que possibilitaram calcular um modelo 3D da variação de  $N_{SPT}$  para Setúbal e Mitrena (Figura 2.48).

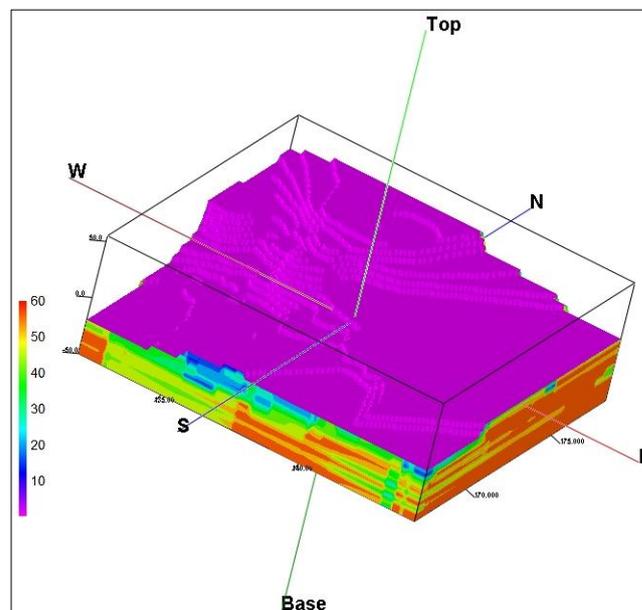


Figura 2.48 - Modelo 3D obtido por interpolação de  $N_{SPT}$  para Setúbal e Mitrena (sobrelevação 40 vezes).

Realizaram-se várias secções para se estudar a variação dos valores de  $N_{SPT}$  em profundidade e segundo diferentes direções.

Na secção A-A' (Figura 2.49) observa-se a influência da Ribeira do Livramento e das FS na variação dos valores de  $N_{SPT60}$ . Aqui, este valor foi atingido apenas em determinados locais e só para profundidades superiores a 30 m. Existe uma outra zona com diminuição pronunciada de valores de SPT, já no Pliocénico, que correspondeu a uma zona com aterros que apresentaram espessuras máximas de 5 m.

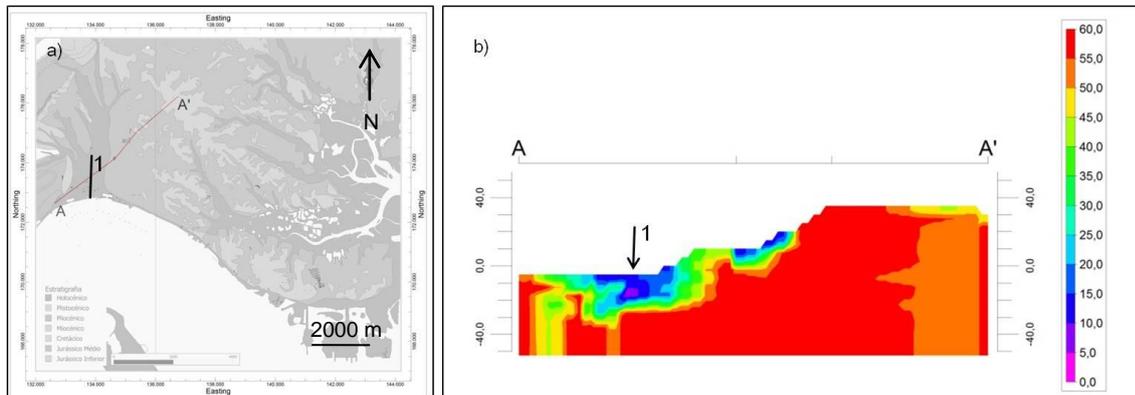


Figura 2.49 – (a) Localização em Setúbal da secção A-A'; (b) valores de  $N_{SPT}$  ao longo da secção A-A' (sobrelevação 8 vezes). 1 - Localização aproximada da Ribeira do Livramento.

A secção B-B' corresponde ao prolongamento para sudeste da secção anterior (Figura 2.50a), tendo-se verificando uma diminuição da profundidade dos valores de  $N_{SPT60}$  após o atravessamento da zona onde passa a Ribeira do Livramento (Figura 2.50b). Na área onde aflora o Pliocénico identificou-se uma zona onde não se alcançaram valores de  $N_{SPT60}$ , que parece ser uma interrupção na distribuição deste valor. Ao longo da secção, caminhando para SE, observaram-se várias irregularidades na superfície de interpolação de  $N_{SPT60}$ , e identificou-se uma área onde esta se localizou a mais de 30 m de profundidade. As zonas de menores valores de  $N_{SPT}$  coincidem com as zonas de maiores espessuras de FS (Figura 2.50c). Os valores de  $N_{SPT}$  inferiores a 20 podem atingir profundidades superiores a 25 m nas áreas de maiores espessuras das FS.

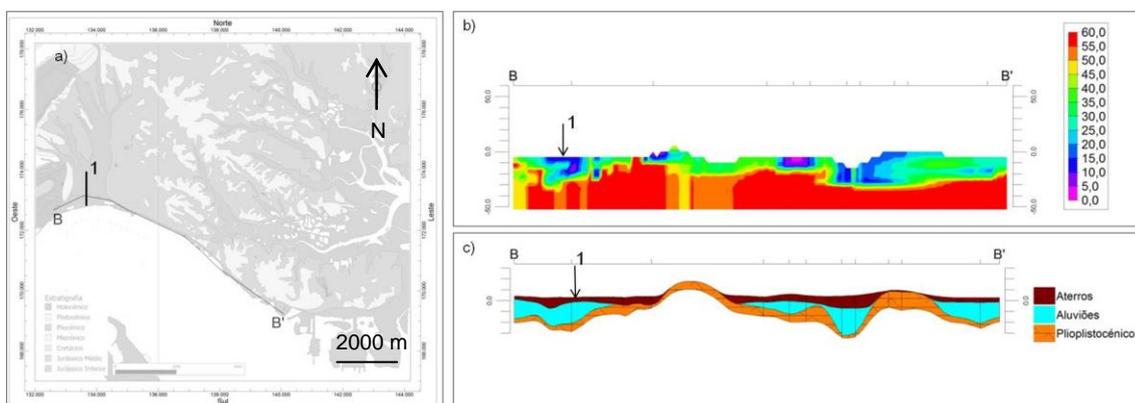


Figura 2.50 - (a) Localização em Setúbal da secção B-B'; (b) variação de  $N_{SPT}$  segundo B-B'; (c) espessuras das FS segundo B- B'. 1 - Localização aproximada da Ribeira do Livramento (escala sobrelevada 20 vezes).

Importa obter a distribuição de  $N_{SPT}$  segundo secções horizontais que serão comparadas com diversas propriedades determinadas nos capítulos subsequentes. Com base no modelo 3D realizaram-se interpolações dos valores de  $N_{SPT}$  segundo secções horizontais às cotas zero e

10 m (Figura 2.51) e observou-se um aumento dos valores de  $N_{SPT}$  com o aumento de profundidade devido ao aumento da rigidez dos materiais presentes.

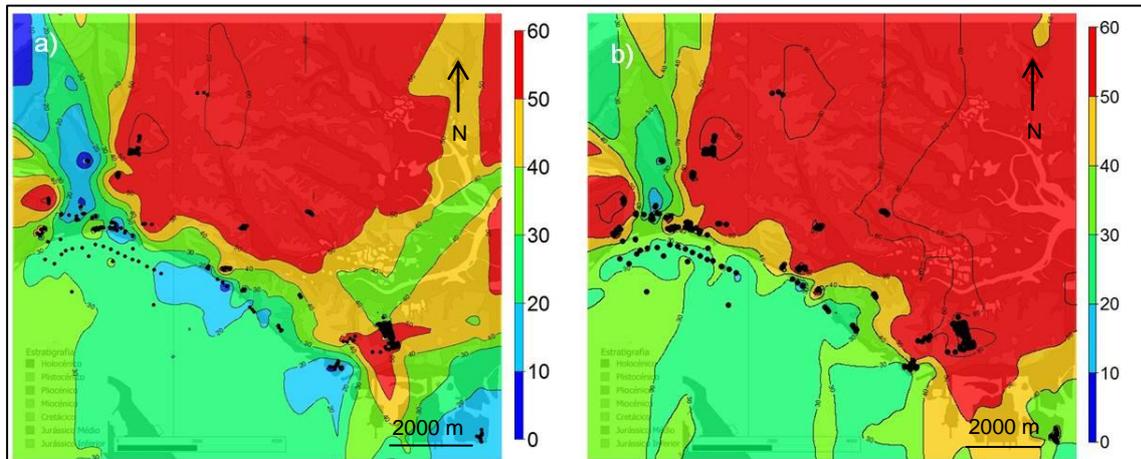


Figura 2.51 - Resultados de interpolações dos valores de  $N_{SPT}$  para secções horizontais em Setúbal a diferentes cotas: (a) cota 0 m, (b) cota 10 m. Pontos pretos- localização de sondagens.

A interpolação de  $N_{SPT60}$  obtida para a região de Setúbal de acordo com a metodologia definida em 2.3.2 apresenta-se na Figura 2.52. As áreas que apresentaram  $N_{SPT60}$  a maiores profundidades localizam-se na cidade de Setúbal e numa área do Holocénico situado a SE da cidade (Figura 2.52).

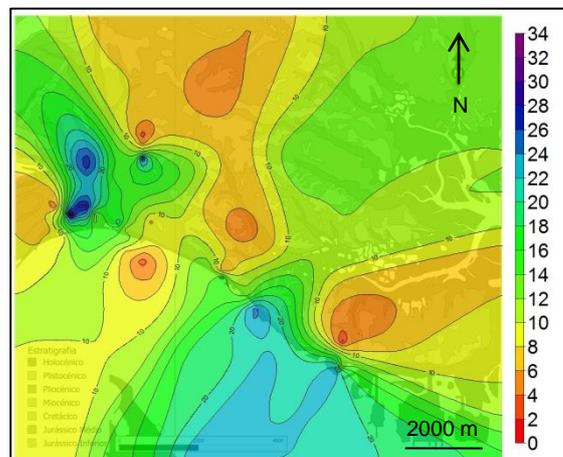


Figura 2.52 - Resultados para Setúbal da interpolação dos valores de profundidade de  $N_{SPT60}$ .

#### 2.4.2.4 Relação entre variáveis

Obteve-se uma boa relação entre a distribuição da espessura das FS e as profundidades da superfície de  $N_{SPT60}$  (Figuras 2.53a, b). Às áreas de maior espessura corresponderam os locais onde a superfície de  $N_{SPT60}$  se localizou a maiores profundidades. Verificou-se também a existência de uma boa relação entre as propriedades geotécnicas e o relevo (Figura 2.53c): às áreas de maiores espessuras de FS corresponderam maiores profundidades de  $N_{SPT60}$  e locais de baixas cotas topográficas.

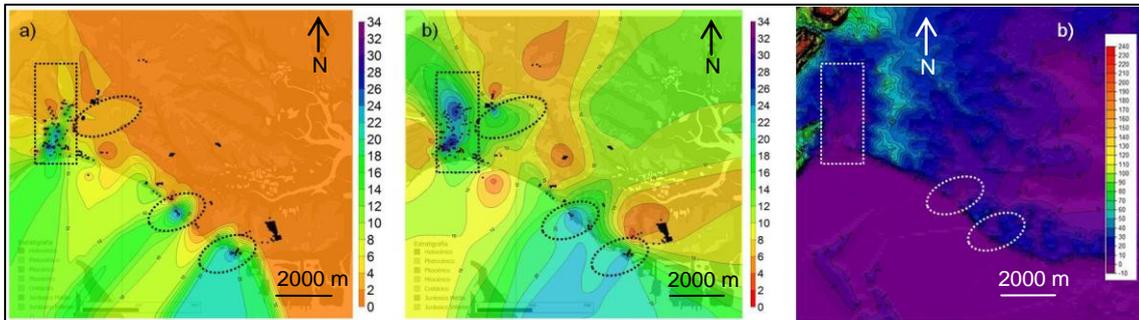


Figura 2.53 - (a) Espessura para Setúbal das FS; (b) profundidade de  $N_{SPT60}$ ; (c) relevo. Quadrados e elipses localização dos locais com maiores espessuras das FS e profundidades de  $N_{SPT60}$  e com menores cotas topográficas.

Na Figura 2.54 apresentam-se os resultados obtidos, a uma escala maior, com as interpolações das espessuras das FS e a profundidade de  $N_{SPT60}$  no Holocénico da cidade de Setúbal. Observou-se que os locais de maiores espessuras das FS corresponderam às áreas onde  $N_{SPT60}$  se localizou a maiores profundidades.

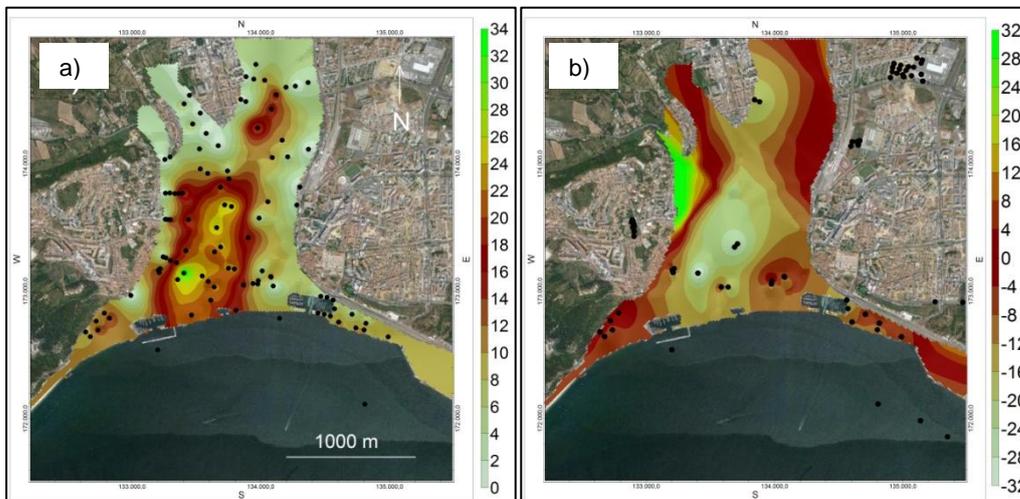


Figura 2.54 - Distribuição no Holocénico da cidade de Setúbal (a) da espessura das FS; (b) da superfície de  $N_{SPT60}$ . Círculos pretos – locais com sondagens utilizadas nos cálculos das interpolações.

## **CAPÍTULO III - ENSAIOS DE VIBRAÇÕES AMBIENTAIS**

### 3.1. Introdução

Os ensaios de vibrações ambientais são de simples execução e de baixo custo e consistem no registo de vibrações ambientais com o recurso a uma estação sísmica portátil, constituída por um sismómetro de três componentes e um digitalizador. Registam-se simultaneamente as vibrações segundo três componentes perpendiculares (Vertical, Norte-Sul e Este-Oeste) e calcula-se a razão (H/V) entre o espectro de Fourier do sinal nas componentes Horizontais e na componente Vertical.

A utilização deste método, conhecido por método Nakamura (1989), é atualmente empregue por muitos autores em estudos de efeito de sítio (e.g. Priolo *et al.* 2004, Zaharia *et al.* 2008, Hellel *et al.* 2010, Navarro & García-Jerez 2012) e na análise estrutural de bacias sedimentares (e.g., Ibs-von Seht & Wohlenberg 1999, Parolai *et al.* 2002, Hollender *et al.* 2011). Em Portugal realizaram-se vários estudos com o recurso a esta técnica em Lisboa, Faro e nos Açores (Teves-Costa *et al.* 1996, 2001a, 2001b, 2001c, 2007, 2008, 2012a, 2012b, 2014, Ramalhete *et al.* 1998, Silvestre *et al.* 2006, Queiroz *et al.* 2007, Silveira *et al.* 2009 Teves-Costa & Veludo 2013).

O método proposto por Nakamura foi questionado por alguns autores (e.g., Lacave *et al.* 1999, Yuncha & Luzón 2000). Lacave *et al.* (1999) e Yuncha & Luzón (2000) concluíram que as amplitudes dos picos de frequência, obtidos na razão H/V, não estarão relacionados com a amplificação das ondas de corte e consideraram não existir, na maior parte dos casos, uma relação entre essa amplitude e a amplificação do movimento sísmico dos solos. No entanto este método tem sido validado com o recurso à análise de sismos reais.

Lane *et al.* (2008) e Parolai *et al.* (2002) consideram que o método H/V é válido para locais caracterizados por um forte contraste de impedâncias entre o maciço rochoso e o material sobrejacente. Segundo os mesmos autores, este método pode não ser efetivo na determinação das frequências fundamentais quando as formações superficiais apresentam uma cimentação gradual e quando existem alterações do maciço em profundidade. Para alguns autores (e.g. Ohmachi *et al.* 1991, Field & Jacob 1993, Lachet & Bard 1994, Fah *et al.* 1997), a presença de um pico de frequência bem definido, em ensaios realizados em solos moles, estará relacionado com a frequência fundamental das formações superficiais. Esse pico de frequência ( $F_0$ ) e o conhecimento da espessura das formações superficiais (H) permite obter a velocidade média das ondas de corte ( $V_s$ ) segundo a relação  $V_s = F_0/4H$  (SESAME 2004).

Segundo Bonnefoy-Claudet *et al.* (2008), esta técnica permite obter uma boa estimativa da frequência fundamental para estruturas do tipo 1D. Contudo, tem-se verificado para muitos sismos destrutivos que a estrutura geológica dos terrenos é mais complexa, do tipo 2D e 3D. Nestes casos, os efeitos locais são influenciados pela estrutura geológica e pela topografia dos terrenos pelo que as estimativas obtidas pela técnica H/V podem afastar-se da realidade. Lacave *et al.* (1999), Lane *et al.* (2008) e Wang *et al.* (2012) consideram que a presença de formações geológicas com heterogeneidades laterais significativas, podem induzir variações nas amplificações e nas frequências segundo diferentes direções. A variação geométrica do relevo pode influenciar os valores obtidos neste tipo de ensaios e, segundo Priolo *et al.* (2004), verifica-se que algumas frequências fundamentais podem ser influenciadas pelas características topográficas locais.

Neste capítulo calculou-se a razão entre os espectros de Fourier da composição das componentes horizontais (H) e a vertical (V), segundo a relação H/V a que se chama, abreviadamente, curva H/V. Estas curvas foram calculadas segundo o método de Nakamura (1989, 2000, 2007, 2008) para 250 registos de vibrações ambientais realizados nas regiões do Barreiro e de Setúbal. Estes cálculos permitiram identificar os valores de  $F_0$  (frequências fundamentais) e de  $F_1$  dos solos e as respetivas amplitudes.

Relacionaram-se as frequências e as respetivas amplitudes ( $A_0$  e  $A_1$ ) com as propriedades geotécnicas e geológicas das unidades litoestratigráficas presentes e identificaram-se os azimutes

das anisotropias das amplitudes máximas. Utilizaram-se os valores de  $F_0$  e  $F_1$  no cálculo da espessura de sedimentos, que se relacionaram com os limites entre as unidades litoestratigráficas presentes. Utilizaram-se os resultados de  $F_0$  e a altura dos edifícios para se definirem áreas suscetíveis à ocorrência de fenômenos de ressonância no edificado.

### 3.2. Metodologia

A metodologia seguida no presente capítulo (Figura 3.1) teve em consideração vários requisitos na aquisição e tratamento de dados e na análise dos resultados, nomeadamente as recomendações efetuadas em SESAME (2004).

Aquisição de dados		Tratamento de dados	Análise de resultados	
Escolha dos locais, dos dias e horas dos registos	Registo de vibrações ambientais Güralp CMG 6TD	Processamento de dados Geopsy (www.geopsy.org/)	Cálculo da razão H/V Cálculo de $F_0$ , $F_1$ , $A_0$ e $A_1$ Aplicação dos critérios SESAME	Distribuição de $F_0$ e $A_0$ Anisotropias Espessura das FS Efeitos de sítio

Figura 3.1 – Metodologia empregue na aquisição, tratamento e análise de resultados obtidos nos ensaios de vibrações ambientais.

A escolha dos locais onde se efetuaram os registos de vibrações ambientais foi programada com o intuito de cobrir uniformemente as regiões do Barreiro e de Setúbal. De um modo geral evitaram-se os locais com elevado ruído antropogénico, perto de rodovias e indústrias, que podem originar frequências próximas de 1 Hz (Asten *et al.* 2004, Parolai *et al.* 2002). As vibrações ambientais de menor frequência, que podem ter origem na ação das ondas do mar, são transportadas sob a forma de ondas superficiais que podem interagir com estruturas naturais como, por exemplo, uma bacia sedimentar. As frequências elevadas correspondem normalmente a fontes próximas, e são constituídas por ondas de volume e de superfície e a interpretação dos resultados obtidos com as curvas H/V deve ser realizada em conjunto com informação geológica e geotécnica (SESAME 2004). De modo a possibilitar uma análise conjunta dos resultados obtidos com os registos de vibrações ambientais e as propriedades geotécnicas dos terrenos, foram realizados registos em locais com informação geotécnica.

De acordo com as recomendações descritas em SESAME (2004) deve evitar-se a realização de registos perto de árvores ou de edifícios e sobre parques subterrâneos ou outras estruturas existentes no subsolo. Nas áreas urbanizadas, nem sempre foi possível afastar convenientemente a estação sísmica de árvores e de edifícios existentes. Foram identificadas as redes de saneamento de modo não se realizarem registos nesses locais.

Na cidade de Setúbal encontram-se algumas estruturas sensíveis como, por exemplo, escolas e hospitais. É também aqui que o centro urbano antigo tem maior expressão e onde as áreas urbanizadas são vastas. Estas características levaram a que se realizasse um maior número de registos nos terrenos holocénicos da cidade e nos do pliocénico contíguo.

Tendo em conta as recomendações de SESAME (2004) evitou-se a realização de ensaios em dias de vento e de chuva. Lane *et al.* (2008) verificaram que os dias com ventos intensos ( $> 10$  m/s) enriquecem os registos com baixas frequências, principalmente se os ensaios forem realizados nas imediações de árvores, edifícios, linhas elétricas e outras estruturas. A escolha dos dias para se realizarem os ensaios teve em consideração as previsões meteorológicas do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). Foram evitados registos em dias com vento superior a 5 m/s e com chuva. Quando se verificou um aumento da intensidade do vento utilizou-se, tal como sugerido por alguns autores (e.g. Parolai *et al.* 2002), um vaso de proteção à estação sísmica.

Segundo Cara *et al.* (2010) e Hollender *et al.* (2011) as frequências medidas durante o dia e a noite apresentam valores diferentes. Hollender *et al.* (2011) observaram que durante o período diurno as

vibrações ambientais são influenciadas pelas atividades humanas, sendo dominadas por ondas superficiais de Rayleigh que afetam os valores de H/V. Durante a noite, na ausência ou com menor atividade humana, as vibrações são dominadas por ondas de volume e as curvas H/V corresponderão à função de transferência das ondas de corte. Hollender *et al.* (2011) consideram que só os ensaios efetuados ao longo de um intervalo de 24 horas e durante o período da noite podem evidenciar a geologia local, determinar a frequência fundamental das formações superficiais e calcular a profundidade a que se localiza o *bedrock*. Na opinião de Ibs-von Seht & Wohlenberg (1999) e de Opršal *et al.* (2004) os ensaios devem ser realizados durante a madrugada, entre a 1 e as 4 horas da manhã, para diminuir a influência do ruído humano.

Os registos efetuados no âmbito deste trabalho foram realizados entre julho de 2013 e setembro de 2014. Nas zonas afastadas dos centros urbanos, os registos efetuaram-se durante o dia, enquanto nas áreas urbanas do Barreiro e Setúbal os ensaios realizaram-se entre as 0h e as 4h, de modo a serem alcançadas boas condições de registo. Os registos foram efetuados com uma estação de banda larga Güralp CMG 6TD, com uma taxa de amostragem de 100 Hz, e tiveram uma duração média de 30 minutos (Figura 3.2).

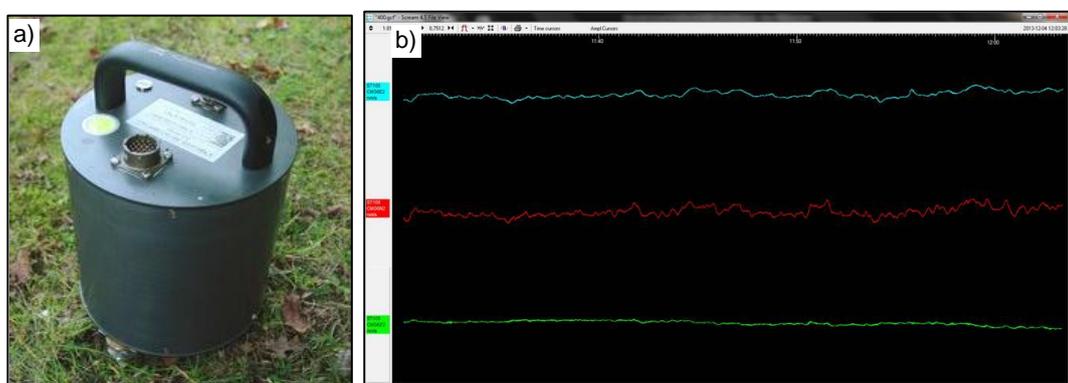


Figura 3.2 – (a) Estação Güralp CMG 6TD; (b) registo de vibrações ambientais com três componentes N (Norte-Sul), E (Este-Oeste) e V (vertical).

No tratamento e análise de dados seguiram-se igualmente as recomendações descritas em SESAME (2004). Calcularam-se as frequências de pico e respetivas amplitudes, relacionaram-se estes resultados com as propriedades geotécnicas das unidades litoestratigráficas presentes e estudaram-se as anisotropias das máximas amplitudes num plano horizontal.

### 3.2.1. Cálculo das curvas H/V

Para se obter a curva H/V e os valores de  $F_0$  e  $F_1$ , calculou-se a razão entre os espectros de Fourier da composição das componentes horizontais (H) e da vertical (V), segundo a relação a que se chama, abreviadamente, razão H/V (Mirzaoglu & Dýkmen 2003):

$$\frac{H}{V} = \frac{\sqrt{NS^2 + EW^2}}{V}$$

em que NS e EW correspondem às componentes horizontais e V à componente vertical dos registos de vibrações ambientais.

As curvas H/V foram calculadas com a aplicação *Geopsy* e identificaram-se os valores de  $F_0$  (frequências fundamentais) e de  $F_1$  e os correspondentes fatores de amplificação ( $A_0$ ,  $A_1$ ). Sempre que se revelou necessário, identificaram-se os valores de  $F_2$  e  $A_2$ . O valor de  $F_2$  corresponde à frequência do terceiro pico com maior amplitude da curva H/V.

Utilizaram-se filtros de Konno & Oamachi (1998) com uma constante de suavização de 40 e foram utilizadas janelas de 25 segundos para o cálculo da curva H/V. Na seleção das janelas, para efeitos do cálculo da curva H/V, foram rejeitadas as que apresentaram ruídos antropogênicos.

Na Figura 3.3 apresenta-se um registo de vibrações ambientais e a curva H/V calculada de acordo com os parâmetros atrás referidos. Observou-se a existência de um pico com 0,9 Hz de frequência ( $F_0$ ) e uma amplitude de 3,3 ( $A_0$ ).

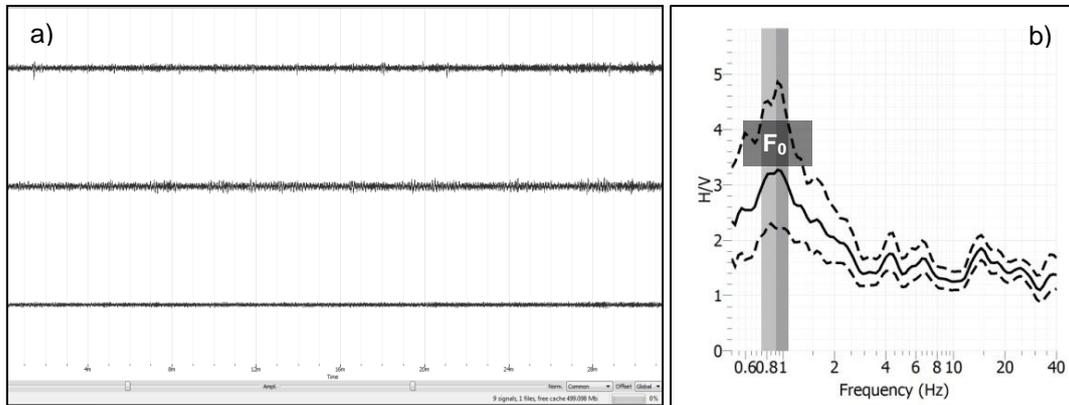


Figura 3.3 - (a) Registo de vibrações ambientais; (b) curva de H/V (linha a cheio), linhas a tracejado correspondem ao desvio padrão de H/V. Utilizaram-se filtros de Konno & Oamachi (1998), com uma constante de suavização de 40 e janelas de 25 segundos.

Na Figura 3.4 apresenta-se um segundo registo onde, ao contrário do anterior, se observam *spikes* de origem antropogénica (passagens de viaturas ou de comboios). Foi necessário excluir as janelas onde se identificaram essas irregularidades antes de se efetuar o cálculo H/V. A curva H/V apresenta, ao contrário do exemplo anterior, três picos com diferentes frequências e amplitudes. O valor de  $F_0$  é 4,6 Hz com  $A_0$  igual a 3,1. Os valores do segundo pico ( $F_1$  e  $A_1$ ) são 0,6 Hz com amplitude 3,0 e o terceiro ( $F_2$  e  $A_2$ ) tem uma frequência de 15,7 Hz e uma amplitude de 1,3.

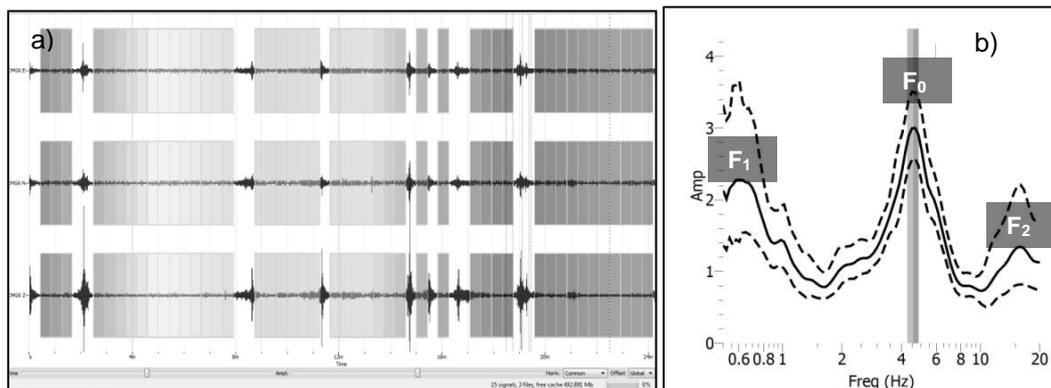


Figura 3.4 - (a) Registo de vibrações ambientais; (b) curva de H/V (linha a cheio), linhas a tracejado correspondem ao desvio padrão de H/V. Utilizaram-se filtros de Konno & Oamachi (1998), com uma constante de suavização de 40 e janelas de 25 segundos.

Nakamura (2007, 2008) calculou a razão H/V com registos de sismos ocorridos em várias localidades no Japão e verificou que os movimentos horizontais em solos brandos foram superiores aos da componente vertical ( $H/V > 1$ ). Em maciços rochosos, constatou que os movimentos destas componentes eram semelhantes ( $H/V \approx 1$ ).

Os picos de frequência da Figura 3.3 (0,9 Hz) e da Figura 3.4 (4,6 e 0,6 Hz) deverão estar relacionados com superfícies de maior contraste de impedâncias, observando-se amplitudes

superiores a 2. Serão nestas frequências, ou em frequências próximas, que se poderão desenvolver fenómenos de amplificação do movimento do solo durante a ocorrência de um sismo.

De um modo geral, as curvas H/V obtidas em maciços rochosos apresentam um padrão mais ou menos plano sem picos bem definidos (SESAME 2004). Na Figura 3.5 apresenta-se uma curva H/V obtida em terrenos rochosos do Jurássico na região de Setúbal. Apesar de existirem pequenas oscilações, pode observar-se que esta curva apresenta um padrão mais ou menos plano, sem picos bem individualizados.

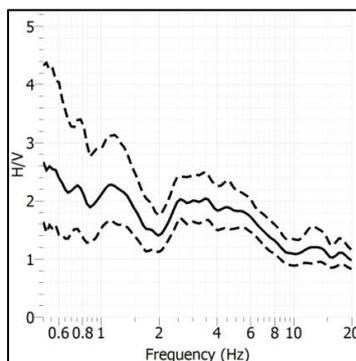


Figura 3.5 - Curva H/V (linha a cheio), linhas a tracejado correspondem ao desvio padrão de H/V.

Depois de se efetuarem os cálculos apresentam-se as curvas H/V, os valores de  $F_0$ ,  $F_1$ ,  $A_0$  e  $A_1$  e as unidades litoestratigráficas onde se executaram os registos de vibrações ambientais. Com o objetivo de se compararem os resultados obtidos no Barreiro e em Setúbal, calcularam-se as percentagens dos valores de  $F_0$  e  $A_0$  pertencentes a diferentes classes ( $F_0 \leq 1$  Hz,  $1\text{ Hz} < F_0 \leq 5\text{ Hz}$ ,  $5\text{ Hz} < F_0 \leq 10\text{ Hz}$ ,  $F_0 > 10$  Hz) e ( $A_0 \leq 2$ ,  $2 < A_0 \leq 4$ ,  $4 < A_0 \leq 6$ ,  $A_0 > 6$ ).

### 3.2.2. Critérios SESAME

De acordo com as indicações de SESAME (2004) a aceitação dos resultados obtidos com o cálculo da curva H/V deve cumprir dois critérios em simultâneo. O primeiro refere-se à fiabilidade da curva H/V (*reliability*) e o segundo à clareza dos picos de frequência obtidos (*clear peak*) (Anexo V).

A verificação destes critérios tem como objetivo assegurar a clareza e estabilidade dos valores de  $F_0$  e a fiabilidade da curva H/V. A clareza de  $F_0$  está relacionada com as características da amplitude ( $A_0$ ) obtida na razão H/V. Em muitos ensaios a identificação da frequência fundamental  $F_0$  é clara mas noutros pode ser mais difícil, ou dúbia, exigindo por isso alguns critérios de aceitação de resultados.

A primeira condição a ser verificada é a fiabilidade da curva H/V, o que implica o cumprimento dos seguintes requisitos (Anexo V):

- Para que o pico seja significativo deve verificar-se a relação  $F_0 > 10/l_w$ . No entanto, deve verificar-se em primeiro lugar se a condição  $F_0 > 20/l_w$  pode ser cumprida;
- O número total de ciclos significativos deve ser superior a 200;
- Requer-se um nível baixo de dispersão entre os resultados obtidos em todas as janelas. Valores elevados de desvio padrão traduzem, frequentemente, vibrações ambientais não estacionárias com algum tipo de perturbação, o que pode afetar, significativamente, o valor da frequência de pico da razão H/V. É recomendável que o desvio padrão seja inferior a 2 (para  $F_0 > 0,5$  Hz) ou a 3 (para  $F_0 < 0,5$  Hz), pelo menos para uma gama de valores compreendida no intervalo  $[0,5F_0, 2F_0]$ .

Considera-se que um pico de frequência é bem definido quando a curva H/V exibe um único e distinto pico. O conceito *clear peak* depende da amplitude do pico H/V e do seu valor quando comparado com valores de H/V noutras bandas de frequências. Depende igualmente do valor relativo do desvio padrão  $\sigma_A(F)$  e do desvio padrão de  $\sigma_F$  de  $F_0$ , estimado a partir de janelas individuais.

O não cumprimento dos critérios pode dever-se (i) à presença de um elevado ruído antropogénico, (ii) a baixas amplitudes dos picos de frequência ou (iii) a curvas H/V planas e sem picos definidos SESAME (2004). As baixas amplitudes ou falta de picos de frequência poderão resultar do baixo contraste de impedâncias entre os sedimentos e o *bedrock* (Bonney-Claudet *et al.* 2009).

Verificou-se o cumprimento dos critérios SESAME (2004) para todas as curvas H/V e analisou-se a distribuição geográfica da fiabilidade e clareza dos picos obtidos, de modo a estudar-se a relação entre o cumprimento dos critérios e as unidades litoestratigráficas presentes.

### 3.2.3. Distribuição de $F_0$

Depois de identificados os picos de frequência nas curvas H/V realizaram-se interpolações de modo a obterem-se as distribuições espaciais de  $F_0$ .

Na Figura 3.6 apresentam-se os valores de  $F_0$  obtidos em quatro curvas H/V. Calculou-se a interpolação desses valores pelo método do inverso da potência da distância, de modo a obter-se a sua distribuição. Identificaram-se igualmente os valores de  $F_1$  e calcularam-se as suas interpolações.

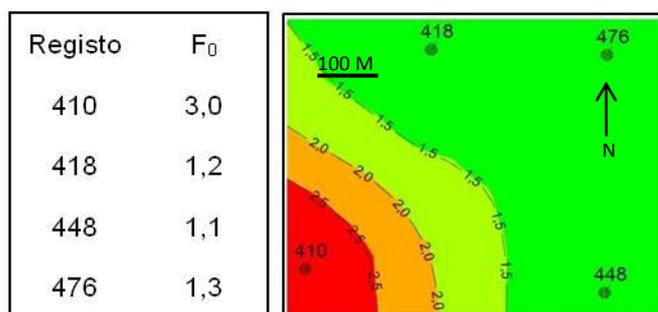


Figura 3.6 - Valores de  $F_0$  obtidos a partir de quatro registos de vibrações ambientais (410, 418, 448 e 476). Apresentam-se as interpolações desses valores pelo método do inverso da potência da distância.

Analisaram-se as formas das curvas H/V considerando-se os seguintes tipos: (i) com um pico de frequência, (ii) com mais de um pico, (iii) sem picos definidos e curvas H/V aplanadas. Relacionou-se a distribuição geográfica destas tipologias com as propriedades geotécnicas e geológicas dos terrenos (espessura das FS, superfície de  $N_{SPT60}$  e limites entre diferentes unidades litoestratigráficas).

### 3.2.4. Distribuição de $A_0$

Calcularam-se as interpolações de  $A_0$  de modo a obterem-se as suas distribuições espaciais. Na Figura 3.7 apresentam-se valores de  $A_0$  obtidos em quatro curvas H/V. Calculou-se a interpolação desses valores de modo a obter-se uma distribuição espacial de  $A_0$ .

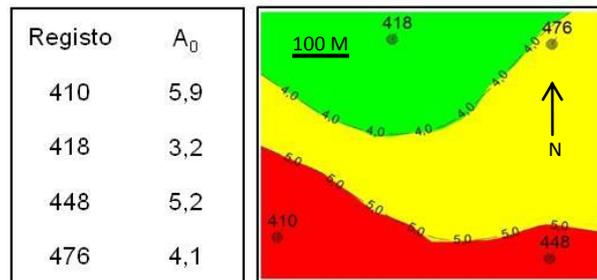


Figura 3.7 - Valores de  $A_0$  obtidos a partir de quatro registos de vibrações ambientais (410, 418, 448 e 476). Apresentam-se as interpolações desses valores pelo método do inverso da potência da distância.

A interação entre a frequência de vibração do solo, para os locais com valores de  $A_0$  superiores a 2, e a frequência natural dos edifícios pode ser responsável pelo desenvolvimento de fenómenos de ressonância e potenciar os danos nestas estruturas. O período natural de vibração de uma estrutura pode ser estimado em função da sua altura pela seguinte relação (Oliveira & Navarro 2010):

$$T = 0,045 * N$$

onde  $N$  corresponde ao número de pisos. Tendo em conta as frequências ( $F_0$  e  $F_1$ ) com amplitudes superiores a 2 e esta relação, serão identificadas áreas no Barreiro e em Setúbal onde poderão existir fenómenos de ressonância do edificado.

### 3.2.5. Anisotropias de H/V

Segundo vários autores, e considerando-se que as vibrações ambientais são isotrópicas, a variação da razão H/V no plano horizontal pode ser consequência da presença de falhas geológicas (Giulio *et al.* 2009, Pischiutta *et al.* 2011, Panzera *et al.* 2013, Villani *et al.* 2014). Os azimutes de maior amplitude tendem a posicionar-se transversalmente à direção (*strike*) do plano de falha. Na Figura 3.8 apresentam-se os azimutes das máximas amplitudes calculados para registos de vibrações ambientais obtidos nas imediações de duas falhas (Tremestieri e Pernicana, em Itália) (Rigano *et al.* 2008). Os azimutes não se dispuseram paralelamente à orientação (*strike*) da falha de Tremestieri (Figura 3.8a) mas apresentaram-se, na maior parte dos casos, segundo uma direção transversal. Na zona da falha de Pernicana (Figura 3.8b) os azimutes apresentaram ângulos menores com a direção da falha.

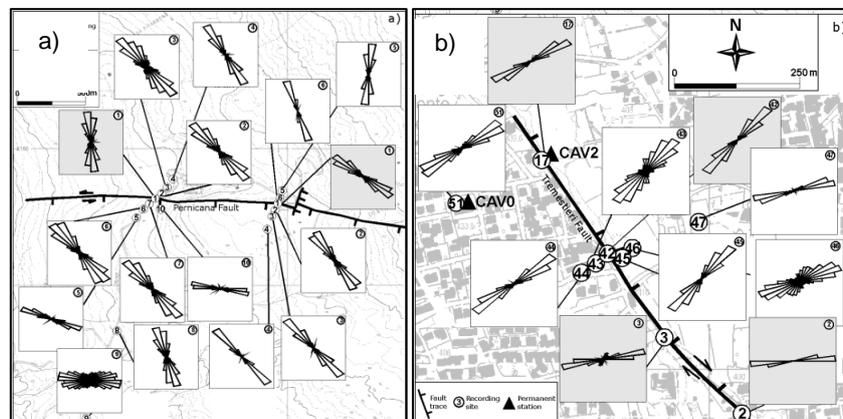


Figura 3.8 - Ângulos de polarização horizontal obtidos por Rigano *et al.* (2008) para (a) falha da Pernicana (Itália); (b) falha de Tremestieri (Itália) (de Panzera *et al.* 2013).

A topografia dos terrenos e do substrato também podem ser responsáveis pela presença de anisotropias da razão H/V (e.g. Pischiutta *et al.* 2011, Panzera *et al.* 2013). Neste caso, tem-se observado que os azimutes das máximas amplitudes se posicionam transversalmente ao eixo maior do cume de uma montanha (Panzera *et al.* 2013).

Utilizou-se a ferramenta H/V *Rotate*, da aplicação informática *Geopsy*, para se calcular a variação da razão H/V no plano horizontal em função do azimute. Os resultados são apresentados num gráfico de frequência-azimute em intervalos de 10° até 180°.

Na Figura 3.9 apresentam-se duas curvas H/V, uma com uma anisotropia bem visível no azimute 115° onde se encontra a máxima de amplitude (3) (Figura 3.9b) e a segunda sem anisotropias (Figura 3.9d).

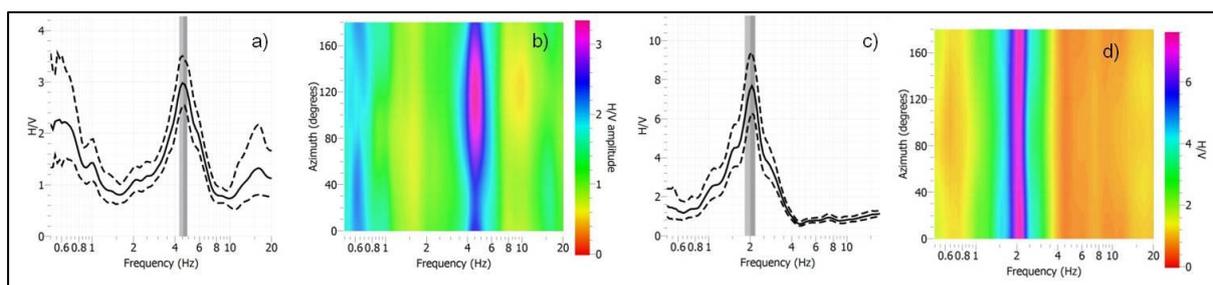


Figura 3.9 – Exemplos de curvas H/V (a,c) e respectivos gráficos de frequência-azimute (b,d).

Calculou-se a variação da razão H/V no plano horizontal das curvas H/V, cujos picos de frequência apresentaram valores de amplitude ( $A_0$ ) iguais ou superiores a 2. Selecionaram-se os gráficos de frequência-azimute que apresentaram anisotropias e apresentam-se os azimutes em função da geologia e do relevo.

### 3.2.6. Cálculo da espessura das FS com base nas curvas H/V

Diversos autores estabeleceram relações entre as espessuras (H) de sedimentos (ou a profundidade do *bedrock*), obtidas em furos de sondagem, e a frequência fundamental calculada a partir das vibrações:

$$H=96F_0^{-1,388} \text{ (Ibs-von Seht \& Wohlenberg 1999)}$$

$$H=108F_0^{-1,551} \text{ (Parolai et al. 2002)}$$

$$H=141F_0^{-1,27} \text{ (Ozalaybey et al. 2011)}$$

$$H=336,67F_0^{-1,605} \text{ (Roux et al. 2012)}$$

Utilizaram-se algumas destas relações na estimativa da profundidade do *bedrock* com base nos picos de frequência e compararam-se os resultados obtidos com dados geológicos e geotécnicos. Para tal, calculou-se a diferença entre a grelha de interpolação da espessura de sedimentos (H), calculada com as frequências, e a grelha da espessura das FS calculada com base em dados de sondagens.

### 3.2.7. Relação entre picos de frequências e $N_{SPT}$

Compararam-se os picos de frequências identificados nas curvas H/V com os valores de  $N_{SPT}$  obtidos em relatórios de sondagens (Capítulo II). Esta análise foi executada segundo um perfil de  $N_{SPT}$  onde se consideraram os picos de frequências obtidos com as curvas de H/V mais próximas.

Compararam-se também as interpolações da espessura das FS obtidas com base em picos de frequência com a superfície de  $N_{SPT60}$  calculada com base em dados geotécnicos. Os perfis de  $N_{SPT}$  e das FS foram obtidos com base nos modelos tridimensionais calculados no Capítulo II.

### 3.2.8. Distribuição de $F_0$ e estruturas tectónicas presentes

A variação da profundidade do substrato, calculada com os valores de  $F_0$  e segundo as relações referidas em 3.2.6, pode dar indicações sobre a presença de acidentes tectónicos. Hellel *et al.* (2010) identificaram um importante desnível na superfície de interpolação do substrato, calculada com  $F_0$ , e associaram-no à presença de uma falha. Ibs-von Seht & Wohlenberg (1999) relacionaram a variação da espessura de sedimentos, calculada com as frequências fundamentais, com a presença de falhas.

Para se estudar a relação entre a profundidade do substrato e a presença de acidentes tectónicos utilizaram-se critérios de análise. Observou-se o comportamento da superfície do substrato, obtida com base nas frequências fundamentais, junto de estruturas tectónicas identificadas na região do Barreiro e Setúbal (Capítulo II). A existência de desníveis no substrato pode ser indicativa da existência de uma movimentação ao longo de um plano de falha.

Aplicaram-se as relações referidas por diversos autores entre os azimutes das anisotropias da razão H/V e a direção (*strike*) de falhas (em 3.2.5).

Representaram-se os epicentros e as elipses de confiança dos sismos, da base de dados sísmicos do IPMA, que tenham ocorrido nas regiões do Barreiro e Setúbal entre 1967 e fevereiro de 2017. A localização de um ou mais epicentros, ou de elipses de confiança, junto de desníveis no substrato pode ser indicativo de que estes desnivelamentos podem estar associados à presença de uma falha ativa.

### 3.3. Resultados e discussão

Aplicaram-se os critérios de seleção definidos na metodologia e selecionaram-se 249 locais para a realização de registos de vibrações ambientais.

No Barreiro foram amostrados 136 locais, 53 em terrenos do Holocénico, 8 do Plistocénico e 75 do Pliocénico (Figura 3.10); em Setúbal e Mitrena consideraram-se 113 locais, 45 em terrenos do Holocénico, 17 do Plistocénico, 44 do Pliocénico, 4 do Miocénico e 3 do Jurássico (Figura 3.11).

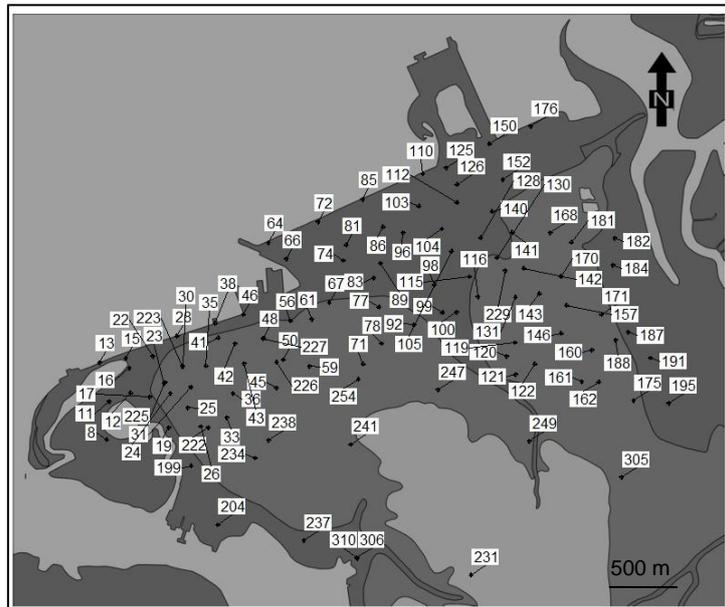


Figura 3.10 - Localização dos registos de vibrações ambientais realizados no Barreiro.

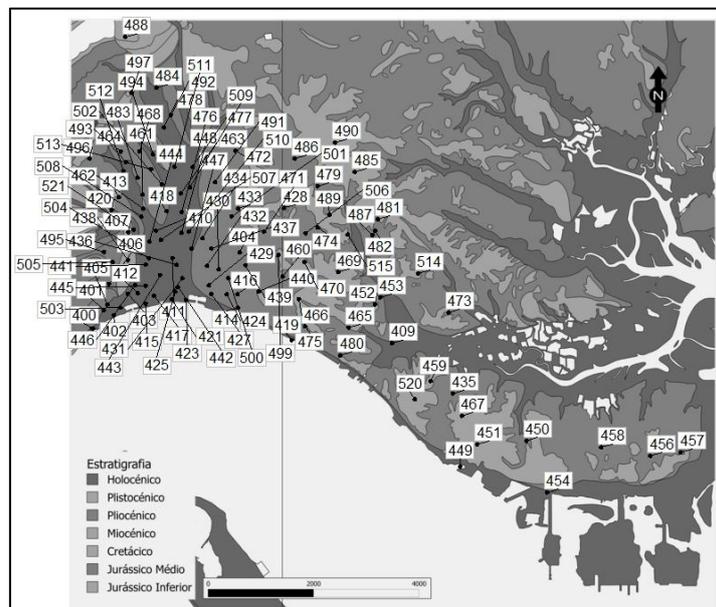


Figura 3.11 - Localização dos registos de vibrações ambientais efetuados em Setúbal e Mitrena.

### 3.3.1. Curvas H/V

Nos anexos I e II apresentam-se as curvas H/V calculadas para o Barreiro e para Setúbal, de acordo com a metodologia definida em 3.2. Identificaram-se, para cada uma das curvas, os picos de frequência e as respectivas amplitudes, bem como as situações em que as curvas não apresentaram picos bem definidos. No Barreiro a percentagem de curvas H/V que não apresentou picos bem individualizados foi de 22% e em Setúbal de 3%.

Nos anexos III e IV apresentam-se os valores de  $F_0$ ,  $F_1$ ,  $A_0$  e  $A_1$  de cada uma das curvas H/V e informação relativa às unidades litoestratigráficas onde foram executados os registos. Identificam-se, também, as curvas sem picos de frequência bem individualizados.

Os valores mínimos e máximos de  $F_0$  foram semelhantes para as duas áreas analisadas: entre 0,5 Hz e 17,2 Hz no Barreiro e 0,5 Hz e 12,8 Hz em Setúbal. Esta semelhança verificou-se, também, nos intervalos das amplitudes: 1,2 a 7,5 no Barreiro e 1,7 a 7,7 em Setúbal.

Na Figura 3.12 apresenta-se a distribuição das percentagens dos valores de  $F_0$  e de  $A_0$  segundo as classes definidas em 3.2.1. A região do Barreiro apresentou uma percentagem de valores, para a primeira classe ( $F_0 \leq 1$  Hz), mais elevada (82%) do que a de Setúbal (54%) (Figura 3.12a). Na classe de frequências  $1 < F_0 \leq 5$  Hz observou-se comportamento contrário, a região de Setúbal apresentou percentagens superiores a 40% e o Barreiro inferiores a 10%. Para frequências superiores a 5 Hz não se verificaram diferenças significativas entre as duas regiões. A análise dos valores obtidos com as amplitudes ( $A_0$ ) permitiu concluir que diferenças encontradas entre as duas regiões não foram expressivas (Figura 3.12b). No entanto, na região do Barreiro obteve-se uma maior percentagem de picos de frequência com amplitudes inferiores ou iguais a 2 e em Setúbal encontrou-se uma maior percentagem de amplitudes entre os valores  $4 < A_0 \leq 6$ .

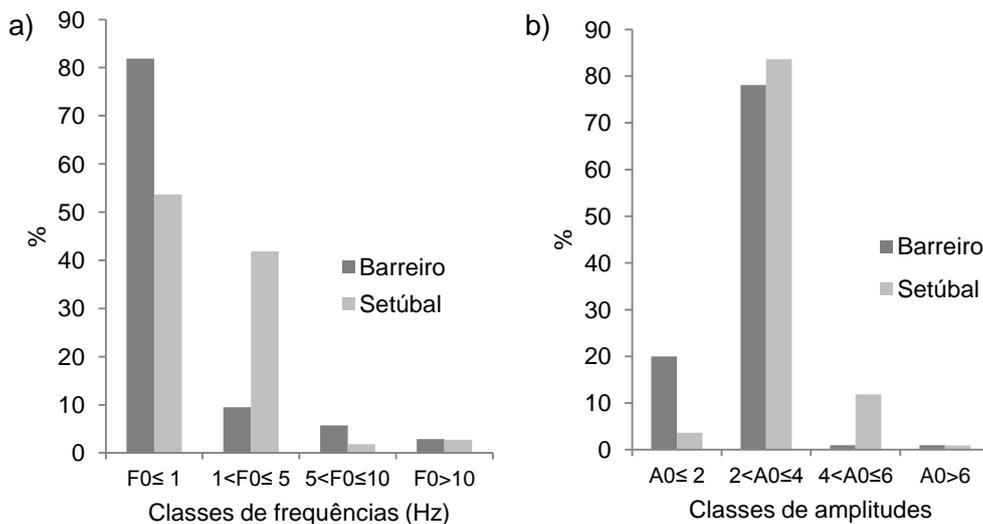


Figura 3.12 - Distribuição das percentagens de  $F_0$  e de  $A_0$  pelas classes definidas em 3.2.1 (a) distribuição das frequências; (b) distribuição das amplitudes por classes em percentagens.

As diferenças observadas na distribuição de  $F_0 \leq 1$  Hz entre o Barreiro e Setúbal poderão estar relacionadas com o posicionamento, em profundidade, de uma superfície de maior impedância. Essa superfície poderá estar relacionada com a estrutura da Bacia Lusitânica Mesozoica e posterior evolução durante o Cenozoico. Se os valores de  $F_0$  das duas regiões estiverem relacionados com uma mesma superfície, ela situar-se-á a uma maior profundidade no Barreiro.

### 3.3.2. Cumprimento dos critérios SESAME

Na Tabela 3.1 apresentam-se os resultados da aplicação dos critérios SESAME às curvas H/V. As condições de confiança (*reliability*) foram cumpridas por todas as curvas das duas regiões. Da aplicação dos restantes critérios, verificou-se que 26% das curvas obtidas no Barreiro apresentaram picos nítidos (*clear peak*), valor inferior aos 56% obtidos em Setúbal.

Tabela 3.1 - Percentagens de cumprimento dos critérios SESAME (2004). Ver Anexo V para informação relativa à simbologia utilizada nesta Tabela.

Critérios SESAME	Barreiro	Setúbal
$F_0 > 10/l_w$	100%	100%
$n_c F_0 > 200$	100%	100%
$\sigma_A(F) < 2$ ; $\sigma_A(F) < 3$	100%	100%
$\exists F \in [F_0/4, F_0] \mid A_{H/V}(F) < A_0/2$	17%	43%
$\exists F^+ \in [F_0, 4F_0] \mid A_{H/V}(F^+) < A_0/2$	87%	96%
$A_0 > 2$	83%	97%
$F_{\text{peak}}[A_{H/V}(F) \pm \sigma_A(F)] = F_0 \pm 5\%$	54%	84%
$\sigma_F < \epsilon F_0$	59%	31%
$\sigma_F < \theta F_0$	90%	100%
<b>Reliability</b>	100%	100%
<b>Clear peak</b>	26%	56%

As curvas que cumpriram integralmente os critérios SESAME situaram-se preferencialmente no Holocénico do Barreiro e Setúbal (Figura 3.13). No Holocénico do Barreiro 55% das curvas cumpriram os critérios, no Pliocénico e Plistocénico essa percentagem foi 16% e 13%, respetivamente. No Holocénico de Setúbal, 80% das curvas cumpriram integralmente os critérios e no Pliocénico e Plistocénico essas percentagens foram de 47% e 30%, respetivamente.

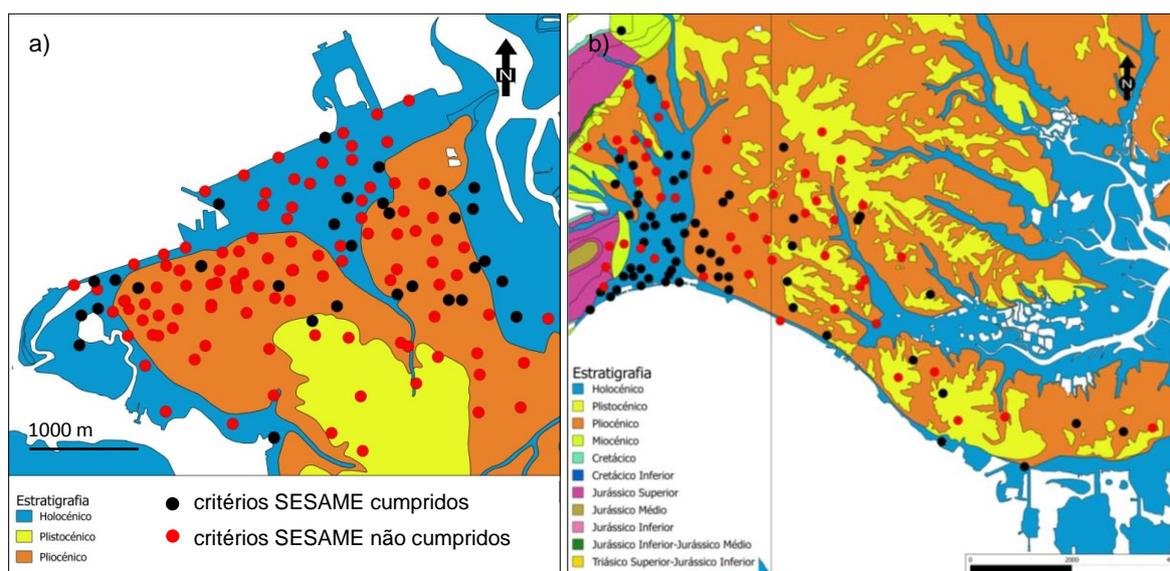


Figura 3.13 – Cumprimento dos critérios SESAME (a) no Barreiro; (b) em Setúbal. A preto assinalam-se os locais onde os critérios foram cumpridos e a vermelho os locais onde não foram integralmente cumpridos.

A maior incidência do cumprimento dos critérios SESAME no Holocénico do Barreiro e Setúbal poderá relacionar-se com a existência de maiores diferenças de impedâncias entre as formações superficiais e as do Pliocénico.

Na região de Setúbal, as percentagens das curvas H/V obtidas em terrenos do pliocénico e plistocénico que cumpriram os critérios SESAME foi significativamente superior aos valores obtidos no Barreiro. Este facto poderá ser consequência da existência de um contraste de impedâncias mais elevadas entre o Plio-Plistocénico e uma interface menos profunda em Setúbal.

A aplicação dos critérios SESAME (2004) foi estudada por vários autores como, por exemplo, Bonnefoy-Claudet *et al.* 2009, Gosar 2009, e Warnana *et al.* 2011, que obtiveram percentagens de cumprimento entre 76%, 90% e 58 %, respetivamente.

Para alguns autores (e.g. Haghshenas *et al.* 2008), o critério *clear peak* será demasiado restritivo. Nesse sentido, optou-se por se considerar, nas análises subsequentes, todos os valores de  $F_0$ ,  $F_1$ ,  $A_0$  e  $A_1$  que foram identificados nas curvas H/V.

### 3.3.3. Distribuição de frequências

Analisou-se a distribuição geográfica dos valores de  $F_0$  e  $F_1$  e relacionaram-se as topologias das curvas H/V com as propriedades geológicas e geotectónicas dos terrenos, de acordo com a metodologia definida em 3.2.3.

A interpolação dos valores de  $F_0$  no Barreiro apresentou uma extensa superfície com valores inferiores a 1 Hz (Figura 3.14a). Esta área desenvolve-se em parte no Holocénico, mas é no Plio-Plistocénico que apresenta maior expressão e onde se obtiveram valores de  $F_0$  entre os 0,5 Hz e 0,7 Hz. Identificou-se uma área localizada a leste, onde os valores de  $F_0$  apresentaram valores superiores a 1 Hz e onde se alcançaram, por vezes, frequências maiores que 10 Hz (Figura 3.14a). Algumas zonas dispersas, por exemplo a NW do terminal fluvial do Barreiro, apresentaram frequências entre os 2 Hz e 4,7 Hz.

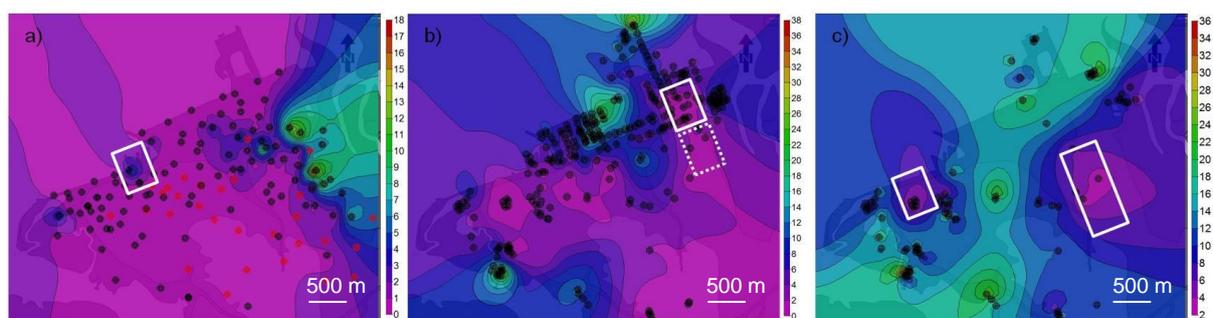


Figura 3.14 – Distribuição no Barreiro: (a) dos valores de  $F_0$  obtidos por interpolação (pontos vermelhos - localização das curvas H/V sem picos bem definidos, pontos pretos – locais com picos bem definidos); (b) espessura das FS obtida por interpolação de dados geotécnicos (pontos pretos localização de sondagens); (c) profundidade da superfície de  $N_{SPT60}$  obtida por interpolação de dados geotécnicos (pontos pretos localização de sondagens com ensaios SPT). Retângulos – locais onde os valores de  $F_0$  são mais elevados e locais com menores espessuras de FS. Retângulo a tracejado - local onde não foi possível obter informação geotécnica.

A comparação entre a distribuição de  $F_0$  e as espessuras das FS (Figura 3.14b) permitiu concluir que os locais com valores de  $F_0$  mais elevados ( $F_0 > 6$  Hz) se localizaram nas áreas de menor espessura de FS (2-4 m). Este comportamento foi observado por Hellel *et al.* (2010) em estudos de efeitos de sítio, realizados na cidade de Boumerdes (Argélia), onde estes autores relacionaram frequências de 11-20 Hz ( $F_0$ ) com locais onde a espessura das FS era reduzida (2 m). As frequências inferiores a 1

Hz poderão corresponder a uma interface profunda (entre 200 a 300 m) com um maior contraste de impedâncias.

Na comparação efetuada entre a variação da profundidade de  $N_{SPT60}$  (Figura 3.14c) com a distribuição dos valores de  $F_0$  (Figura 3.14a) concluiu-se que às menores profundidades de  $N_{SPT60}$  corresponderam maiores frequências.

Na Figura 3.14a apresenta-se a localização das curvas em que a identificação dos picos de frequência não foi clara. Concluiu-se que estas curvas se localizaram preferencialmente no Plio-Plistocénico. Esta unidade apresentará maior rigidez do que a do Holocénico, hipótese confirmada pelos valores médios de  $N_{SPT}$  calculados para aterros, aluviões e Plio-Plistocénico: 13, 18 e 44 pancadas respetivamente (Capítulo II). Segundo alguns autores (e.g. Hollender *et al.* 2011), as curvas mais ou menos aplanadas, sem picos bem definidos, são típicas de terrenos mais rijos (ou maciços rochosos). Será por esta razão que este tipo de curvas se obteve essencialmente no Plio-Plistocénico.

No Barreiro, depois de analisadas todas as curvas H/V (Anexos I e II), foi possível identificar quatro tipologias (A, B, C e D) (Figura 3.15). A análise da sua distribuição geográfica permitiu concluir que algumas delas são características das unidades do Pliocénico e do Plistocénico e outras encontram-se exclusivamente no Holocénico.

As curvas do tipo A são características do Plio-Plistocénico e exibem um pico de baixas frequências (0,5 Hz - 0,6 Hz) (Figura 3.15a). Estas baixas frequências deverão estar relacionadas com o limite entre o Pliocénico e o Miocénico que nesta área, segundo relatórios de sondagens profundas (Companhia dos Petróleos de Portugal 1956, 1959, 1962, 1963a, 1963b, 1963c, 1982-1983) e alguns autores (e.g. Moniz 2010 e Vicêncio *et al.* 2015), se situará entre 200 e 300 m de profundidade. Esta hipótese está de acordo com os resultados obtidos por vários autores que relacionaram a presença de picos de baixas frequências com espessuras consideráveis de sedimentos sobrejacentes a formações de maior rigidez (e.g. Parolai *et al.* 2002). No Plio-Plistocénico identificaram-se curvas com picos mal definidos e com um desenvolvimento quase plano nas frequências superiores a 1-2 Hz.

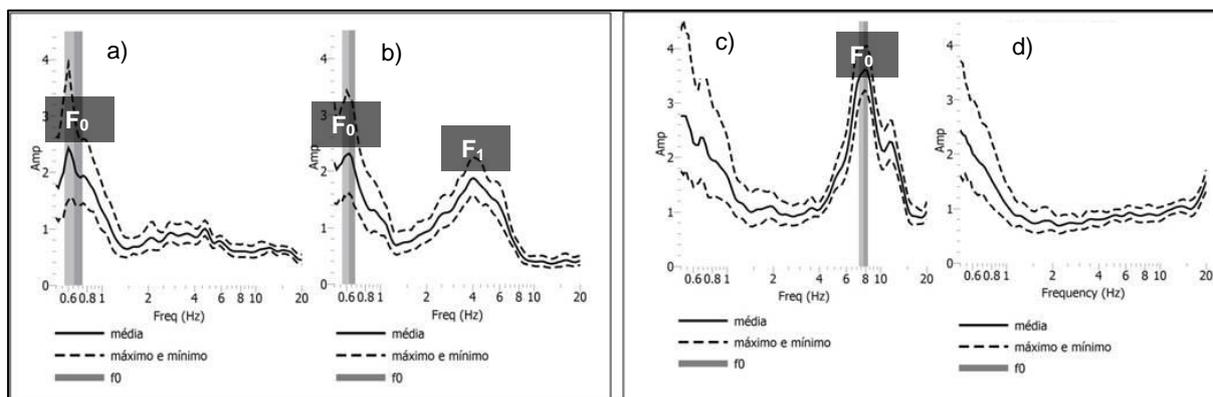


Figura 3.15 - Tipologias das curvas H/V presentes no Barreiro. (a) curva do tipo A; (b) curva do tipo B; (c) curva do tipo C; (d) curva do tipo D.

As curvas obtidas nas unidades do holocénico podem agrupar-se em dois tipos, o primeiro (tipo B) com dois picos: um ( $F_0$ ) nas baixas frequências (0,5 Hz - 0,7 Hz) e outro ( $F_1$ ) com frequências superiores, entre os 2 e 7 Hz (Figura 3.15b); o segundo (tipo C) apresenta um pico de frequências ( $F_0$ ) com valores superiores a 2 Hz podendo alcançar valores superiores a 12 Hz (Figura 3.15c). Estes picos de frequência ( $F_0$  das curvas do tipo C e  $F_1$  das curvas do tipo B) deverão estar relacionados com o limite entre as FS e o Pliocénico (Vicêncio *et al.* 2015). Tal como para o Barreiro, as frequências das curvas do tipo B e C foram identificadas e relacionadas, por diversos autores (e.g.

Priolo *et al.* 2004, Castellaro & Mulargia 2009, Mohamed & Fat-Helbary 2012), com diferenças de impedâncias entre formações superficiais e formações subjacentes.

Existem, finalmente, curvas obtidas no Pliocénico e no Plistocénico com picos mal definidos e com um desenvolvimento quase plano nas frequências superiores a 1-2 Hz. (Figura 3.15d). Este tipo de comportamento evidencia a inexistência de contrastes de impedâncias entre as formações superficiais e mais profundas, tal como referido por alguns autores (e.g. Hollender *et al.* 2011).

A associação de picos de frequência com diferentes níveis em profundidade tem sido efetuada por vários autores. Por exemplo, na região de Alicante, Espanha, García-Fernández & Jiménez (2012) identificaram três picos de frequência ( $F_0$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ ) e relacionaram-nos com três níveis localizados a diferentes profundidades e com diferentes contrastes de impedância.

Na região do Barreiro considerou-se que os valores de  $F_0$  das curvas do tipo C e os valores de  $F_1$  das curvas do tipo B (Figura 3.15) poderão estar relacionados com o limite das FS com o Pliocénico (Figura 3.16) (Vicêncio *et al.* 2015). Os valores de  $F_0$  das curvas do tipo A e B deverão ser consequência de uma interface mais profunda que poderá ser o limite entre o Pliocénico e o Miocénico.

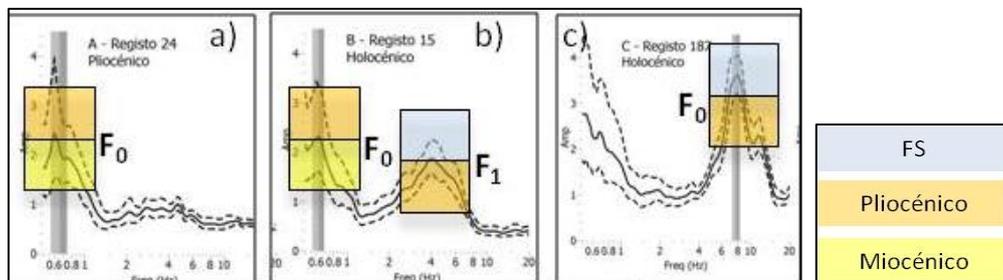


Figura 3.16- Tipos de curvas H/V presentes no Barreiro e a relação dos valores de  $F_0$  e  $F_1$  com interfaces em profundidade. (a) curva do tipo A; (b) curva do tipo B; (c) curva do tipo C. (de Vicêncio *et al.* 2015)

Selecionaram-se os valores de  $F_0$  identificados nas curvas do tipo C e os valores de  $F_1$  identificados nas curvas do tipo B, com o objetivo de se obter a distribuição geográfica das frequências associadas ao limite entre as FS e o Pliocénico. Calculou-se a interpolação desses valores e obteve-se a distribuição espacial das frequências no Holocénico que estará ligada à variação da espessura das FS (Figura 3.17a).

A zona leste do Holocénico do Barreiro apresentou frequências entre 5 e 8 Hz, superiores às restantes áreas. Na zona central as frequências situaram-se entre 2,5 e 3,5 Hz e, na zona oeste, surgiu uma área reduzida onde as frequências se situaram entre os 2 e 6 Hz. As curvas obtidas próximas do Pliocénico apresentaram frequências superiores, o que poderá evidenciar a diminuição da espessura do Holocénico perto desse limite.

As Figuras 3.17a e 3.17b permitem comparar a distribuição das frequências, associados ao limite das FS com o Pliocénico, com a distribuição da espessura das FS obtidas com base em dados geotécnicos. Obteve-se uma boa relação entre as duas distribuições, verificando-se que às áreas de menores frequência correspondem locais de maiores espessuras de FS.

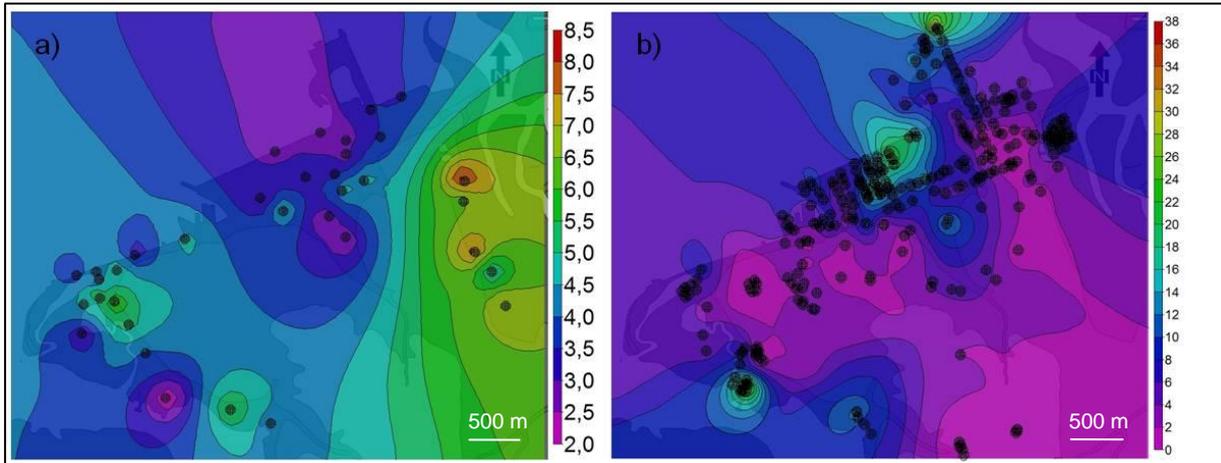


Figura 3.17 – Distribuição no Barreiro: (a) das frequências ( $F_0$  e  $F_1$ ) no Holocénico; (b) espessuras das FS obtidas com base na interpolação de dados geotécnicos.

A distribuição das frequências fundamentais ( $F_0$ ) na região de Setúbal (Figura 3.18) apresentou uma variação espacial clara. Os valores de  $F_0$  iniciaram-se na península da Mitrena com valores compreendidos entre 0,7 Hz e 0,8 Hz, verificando-se um crescimento de frequências para oeste onde os valores mais elevados se registam junto ao maciço da Serra da Arrábida.

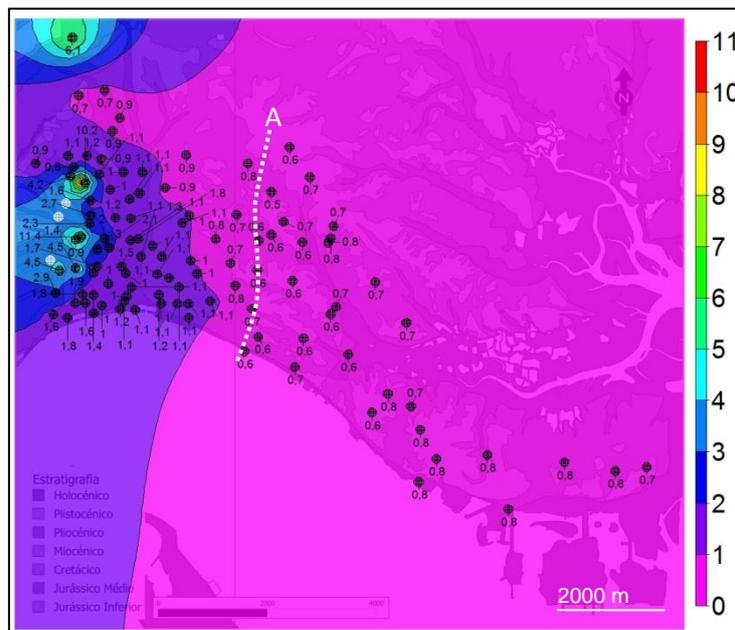


Figura 3.18 - Distribuição de  $F_0$  em Setúbal e Mitrena. A – faixa com os menores valores de  $F_0$  (entre 0,5 Hz a 0,6 Hz) segundo uma direção NNE-SSW.

Na parte final da Península da Mitrena identificou-se uma faixa, perto da zona de transição para valores de 1 Hz, com frequências inferiores às restantes (0,5 – 0,6 Hz) (Figura 3.18). Esta faixa está bem vincada segundo um alinhamento N-S a NNE-SSW e deverá corresponder a uma modificação brusca na geometria de uma interface em profundidade.

Junto ao maciço os valores de  $F_0$ , nas zonas cobertas pelo Cenozoico, atingem valores entre 1 Hz e 5 Hz, podendo alcançar valores superiores (10 Hz). As curvas H/V com padrões mais ou menos aplanados localizaram-se essencialmente nas formações do Miocénico e do Jurássico (Figura 3.18).

Tal como no Barreiro, identificaram-se em Setúbal três diferentes tipologias de curvas (Figura 3.19). O primeiro tipo (tipo A; Figura 3.19a) caracteriza-se por possuir valores de  $F_0$  inferiores a 1 Hz e obteve-se na península da Mitrena e numa área a norte da cidade de Setúbal (Figura 3.19e). O segundo tipo (tipo B) com valores de  $F_0$  superiores a 1 Hz (Figuras 3.19b e 3.19c) obteve-se em duas áreas: a primeira, com valores de  $F_0$  entre 1 Hz e 2 Hz, situou-se no Holocénico (Figura 3.19f) perto do maciço mesozoico da serra da Arrábida e também numa faixa do Plio-Plistocénico; a segunda área com valores superiores a 2 Hz localizou-se já na Serra da Arrábida ou perto do seu limite (Figura 3.19g). O terceiro tipo (tipo C) (Figura 3.19d) apresentou uma curva aplanada, sem picos de frequência e obteve-se já na Serra da Arrábida (Figura 3.19h).

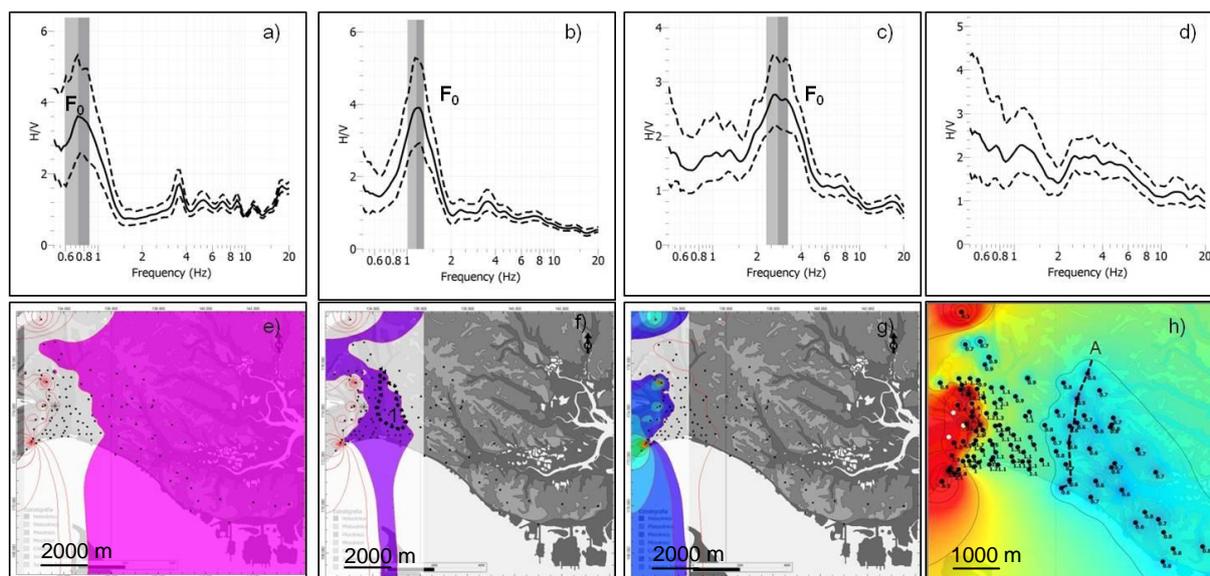


Figura 3.19 - Tipologias de curvas H/V obtidas em Setúbal: (a) curva do tipo A -  $F_0 < 1$  Hz; (b, c) curvas do tipo B; (d) curva do tipo C. Distribuição espacial das tipologias das curvas H/V: (e) tipologia A -  $F_0 < 1$  Hz; (f) tipologia B -  $F_0$  entre 1 Hz e 2 Hz; 1 - faixa do Plio-Plistocénico com frequências superiores a 1 Hz; (g) tipologia B -  $F_0 > 2$  Hz; (h) tipologia C - locais sem picos definidos (pontos brancos).

Na Figura 3.20 apresentam-se algumas curvas H/V segundo um perfil executado entre a Serra da Arrábida e a Península da Mitrena. Este perfil pretende ilustrar o comportamento geral das curvas H/V nesta região. Tal como já foi referido, observou-se a existência de um aumento dos valores de  $F_0$  de leste para oeste e, já na serra da Arrábida, observaram-se curvas do tipo C (típicas de maciços rochosos). Esta variação de frequências poderá estar associada à presença de uma interface, em profundidade, mais profunda a Leste e que poderá corresponder ao limite entre o Pliocénico e o Miocénico.

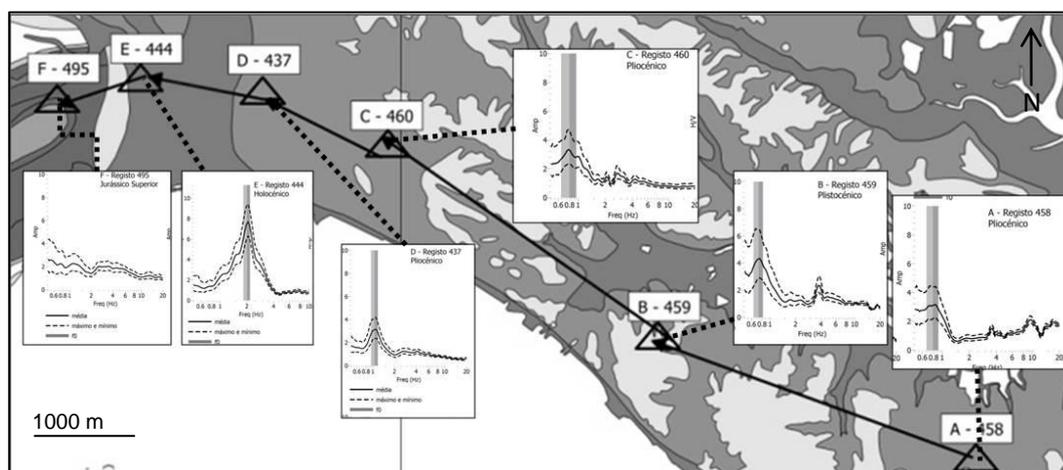


Figura 3.20 – Distribuição de curvas H/V segundo um perfil entre Mitrena e Setúbal.

Na Figura 3.21 apresenta-se a distribuição de  $F_0$  na cidade de Setúbal e no seu núcleo mais antigo. Esta área localiza-se essencialmente sobre unidades do Holocénico e apresentou frequências de 1,1 Hz, que aumentaram na direção da Serra da Arrábida. Junto ao Miocénico e ao Mesozoico obtiveram-se frequências mais elevadas e curvas de frequência aplanadas. A influência da Serra da Arrábida na frequência dos terrenos circundantes está bem patente na distribuição das isolinhas de  $F_0$ . Estas apresentaram uma orientação aproximadamente NE-SW que é coincidente com a orientação geral da serra da Arrábida (Figura 3.21).

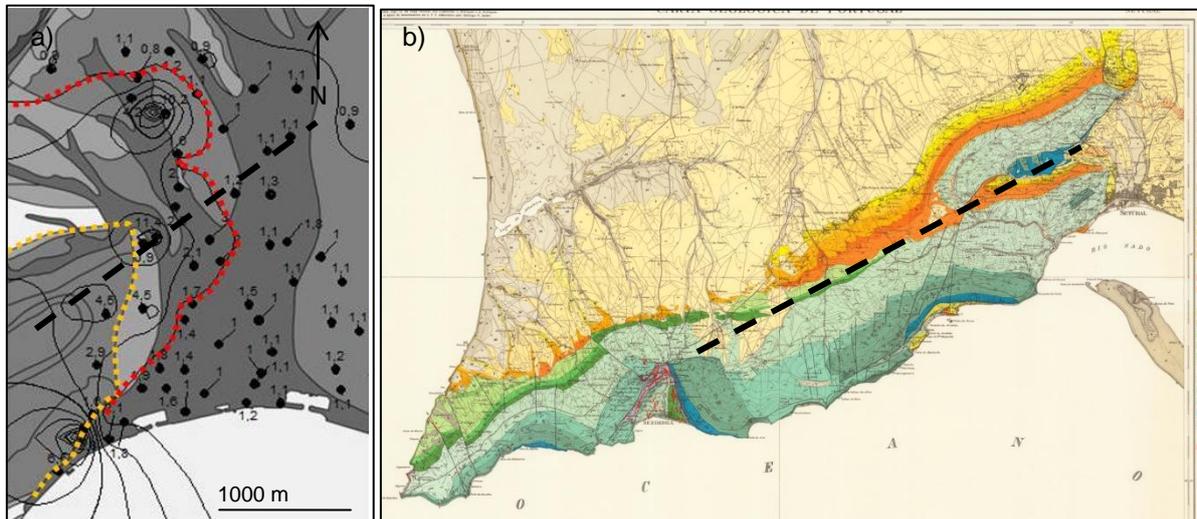


Figura 3.21 – (a) Valores de  $F_0$  (em Hz) na zona central da cidade de Setúbal e isolinhas de interpolação (linhas pretas mais carregadas); reta preta a tracejado – orientação geral das isolinhas de  $F_0$ ; ponteadado laranja – limite do Mesozoico; ponteadado vermelho – isolinha dos 2 Hz; (b) Extrato da Carta Geológica de Portugal na Escala 1:50.000 da Folha 38-B Setúbal (Manuppella *et al.* 1999). Reta preta a tracejado mostra a orientação geral da Serra da Arrábida.

### 3.3.4. Amplitudes

Na região do Barreiro a maioria dos valores de  $A_0$  situaram-se entre 2 e 3 e os valores mais elevados concentraram-se na zona leste (Figura 3.22a). Nesta área as amplitudes atingiram valores superiores a 7 e foi onde se obtiveram as frequências mais elevadas: os valores de  $F_0$  foram maiores do que 5 Hz, podendo alcançar valores superiores a 10 Hz (Figura 3.22b). Identificaram-se mais duas zonas com frequências iguais ou superiores a 2,5 Hz, uma central e uma a leste. As áreas com amplitudes inferiores a 2 representaram uma pequena percentagem da região do Barreiro.

Da análise conjunta das Figuras 3.22a e 3.22b podemos concluir que parte significativa desta região apresentou valores de  $A_0$  superiores a 2 e frequências inferiores a 1 Hz.

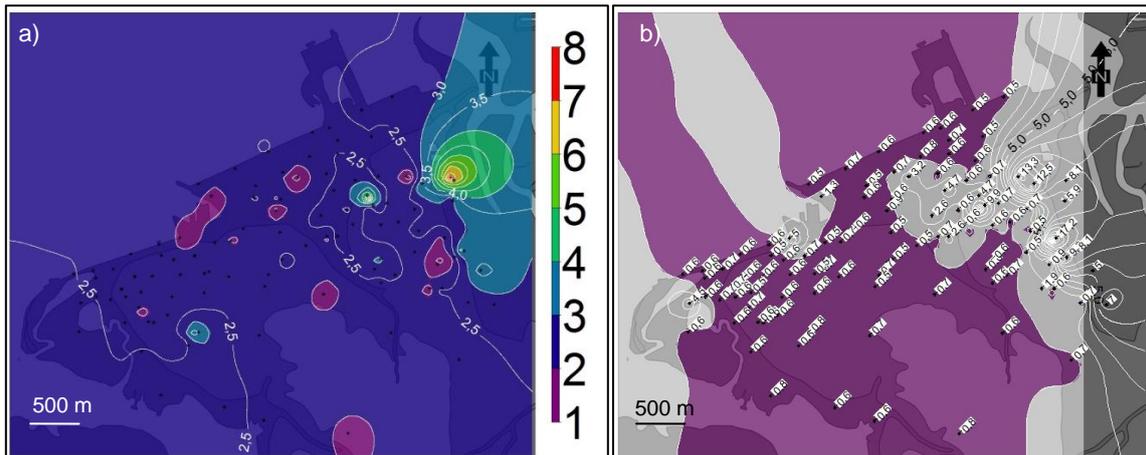


Figura 3.22 – Distribuição no Barreiro: (a) das amplitudes  $A_0$ ; (b) áreas com valores de  $F_0$  inferiores a 1 Hz (a roxo). As linhas brancas representam isolinhas.

Os edifícios que podem sofrer efeitos de ressonância nesta área de baixas frequências (entre 0,5 Hz a 0,8 Hz), serão os mais altos. Os edifícios mais vulneráveis a este efeito, segundo a relação de Oliveira & Navarro (2010), terão mais de 27 pisos. As chaminés das antigas áreas industriais, que terão uma altura aproximada de 40 m, poderão ser igualmente vulneráveis. Na Figura 3.23 identificaram-se três locais do Holocénico em que os valores de  $F_0$  ou  $F_1$ , presentes nas curvas do tipo C e B (Figura 3.18), apresentaram valores de  $A_0$  ou  $A_1$  iguais ou superiores a 2. A área A apresenta uma gama de frequências entre 6 Hz e 8 Hz e é aquela onde as amplitudes são mais elevadas (3 a 8). As áreas B e C apresentam frequências entre 2,5 Hz e 4,7 Hz.

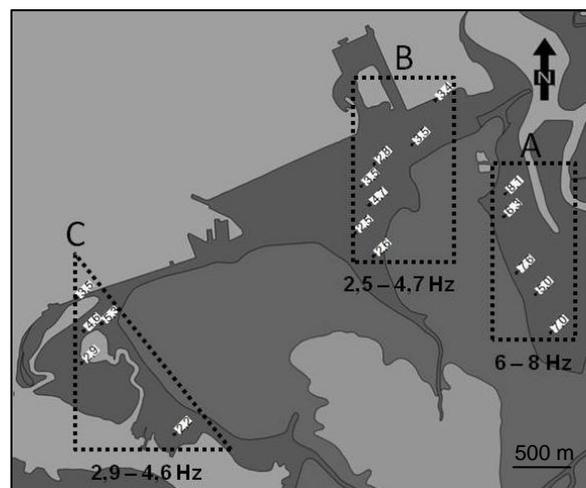


Figura 3.23 - Áreas do Holocénico no Barreiro com amplitudes ( $A_0$  e  $A_1$ ) superiores ou iguais a 2 e valores de frequência ( $F_0$  e  $F_1$ ) entre 6 Hz e 8 Hz (zona A), entre 2,5 Hz e 4,7 Hz (zona B), e entre 2,9 Hz e 4,6 Hz (zona C).

Utilizou-se a relação de Oliveira & Navarro (2010) para se identificarem as estruturas mais vulneráveis à ocorrência de efeitos de sítio no Barreiro. Estas deverão estar distribuídas por três zonas:

- Na zona A - edifícios com 3 ou 4 pisos (7,4 Hz - 5,5 Hz);
- Nas zonas B e C - edifícios com 5 a 9 pisos (4,4 Hz - 2,5 Hz).

Em Setúbal obteve-se uma boa relação entre a distribuição das amplitudes e as unidades litoestratigráficas presentes. As maiores amplitudes localizaram-se, com poucas exceções, no Holocénico (Figura 3.24a). Esta relação, com grande expressão no Holocénico da cidade (Figura 3.24b), poderá ser consequência da existência de um maior contraste de impedâncias entre duas unidades. Os fatores de amplificação variaram entre 1,7 e 7,7 e apenas 3,6 % dos valores foram inferiores a 2.

Analisaram-se, na cidade de Setúbal, as distribuições de  $A_0$  (Figura 3.24b) e de  $F_0$  (Figura 3.24c) com o objetivo de se individualizarem zonas com características de ressonância semelhantes. Utilizou-se a relação de Oliveira & Navarro (2010) para se identificarem os edifícios mais vulneráveis à ocorrência de efeitos de sítio no Barreiro. Estas deverão estar distribuídas por três zonas: (Figura 3.24c):

- Na zona A - edifícios de 12 a 22 pisos (1,85 Hz-1 Hz);
- Na zona B - edifícios de 7 a 11 pisos (3,17 Hz -2 Hz);
- Na zona C - edifícios com menos de 6 pisos (> 3,7 Hz).

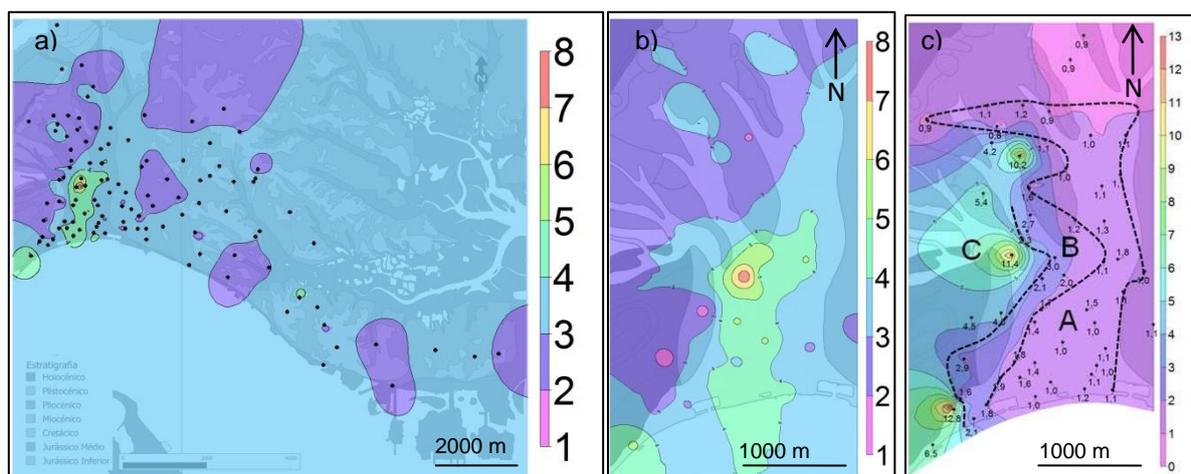


Figura 3.24 – Distribuição de: (a)  $A_0$  em Setúbal e Mitrena; (b)  $A_0$  na cidade de Setúbal; (c)  $F_0$  na cidade de Setúbal e edifícios mais vulneráveis: 12 a 22 pisos (zona A), 7 a 11 pisos (zona B), com menos de 6 pisos (zona C).

Os resultados aqui obtidos, para o Barreiro e Setúbal, deverão ser complementados com: (i) a determinação das frequências naturais do edificado; (ii) a realização de estudos de resistência estrutural dos edifícios; (iii) cálculos 1D do comportamento do solo face a solicitações sísmicas.

### 3.3.5. Azimutes das amplitudes máximas

Nos Anexos I e II apresentam-se, para além das curvas H/V, os gráficos de frequência-azimute nos locais onde foi possível reconhecer anisotropias no Barreiro e em Setúbal.

No Barreiro identificaram-se 11 curvas que apresentaram anisotropias das suas amplitudes máximas ( $A_0$ ) (Figura 3.25). Estas estão distribuídas por duas zonas adjacentes (A e B) com diferentes azimutes, mas ambas parecem ser controladas pela topografia. Na zona A os azimutes apresentam uma direção aproximada de NNW-SSE e na Zona B WSW-ENE a WNW-ESE. Os azimutes das amplitudes máximas apresentam-se na sua maioria transversalmente às curvas de nível (Figura 3.25b). Observa-se também que a maior parte dos azimutes obtidos em locais próximos do limite entre o Pliocénico e o Holocénico se orientam transversalmente a esse limite.

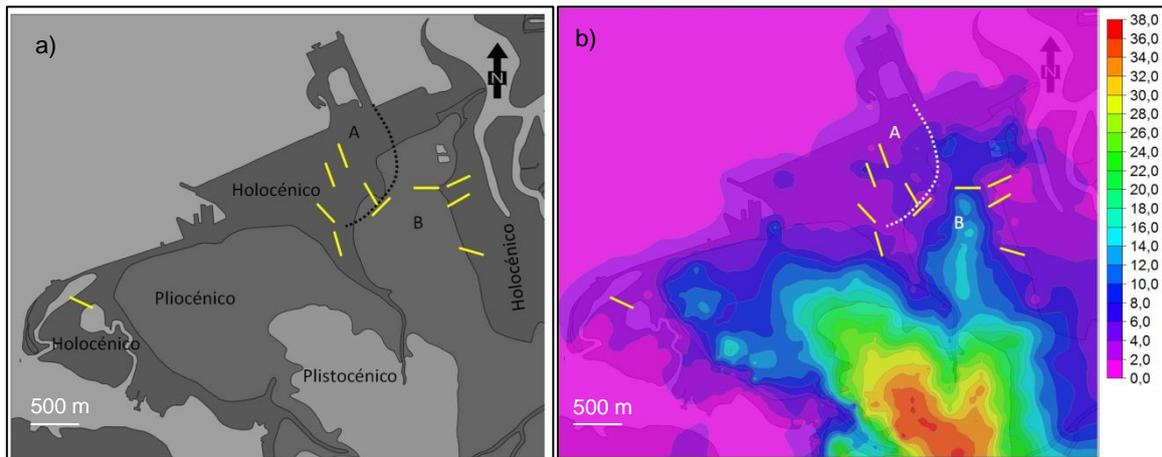


Figura 3.25 - Variação dos azimutes correspondentes às amplitudes máximas das curvas H/V no Barreiro. (a) Geologia em fundo; (b) modelo digital do terreno em fundo. A – zona A, B – zona B.

Na Figura 3.26 apresenta-se a polarização obtida por Panzera *et al.* (2013) na cidade de Catânia (Itália). Estes autores verificaram que as amplitudes máximas se posicionaram, na maior parte dos casos, transversalmente às curvas de nível, tal como se observou na região do Barreiro.

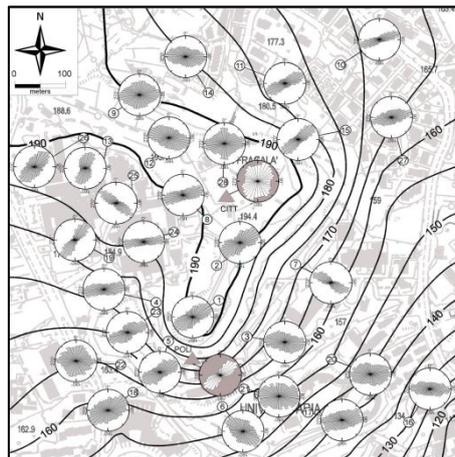


Figura 3.26 - Polarização das máximas amplitudes das curvas H/V (de Panzera *et al.* 2013).

Em Setúbal foi possível identificar 58 curvas com valores de  $A_0$  superiores a 2 e com anisotropias das suas amplitudes máximas (Figura 3.27). Para se analisar a distribuição dos azimutes das amplitudes máximas dividiu-se a região de Setúbal e Mitrena em quatro zonas (A, B, C e D). A zona A

corresponde ao Holocénico da cidade de Setúbal e observou-se uma grande variação dos azimutes. Ainda dentro desta área, mais a oeste, perto do limite da Serra da Arrábida, observou-se uma tendência para os azimutes se orientarem transversalmente às curvas de nível. Na zona B os azimutes apresentaram uma menor variação, com uma direção próxima de N-S sem nenhuma relação aparente com as curvas de nível. Na zona C os azimutes exibiram uma direção preferencial de NE-SW, perpendicular às curvas de nível e ao relevo bem definido no modelo digital do terreno (Figura 3.27b). Na zona D, com algumas exceções, os azimutes obtidos aproximam-se de N-S, direção aproximadamente perpendicular à orientação geral da Península da Mitrena. Tal como para o Barreiro a topografia pareceu ter um papel importante nos azimutes das anisotropias em Setúbal.

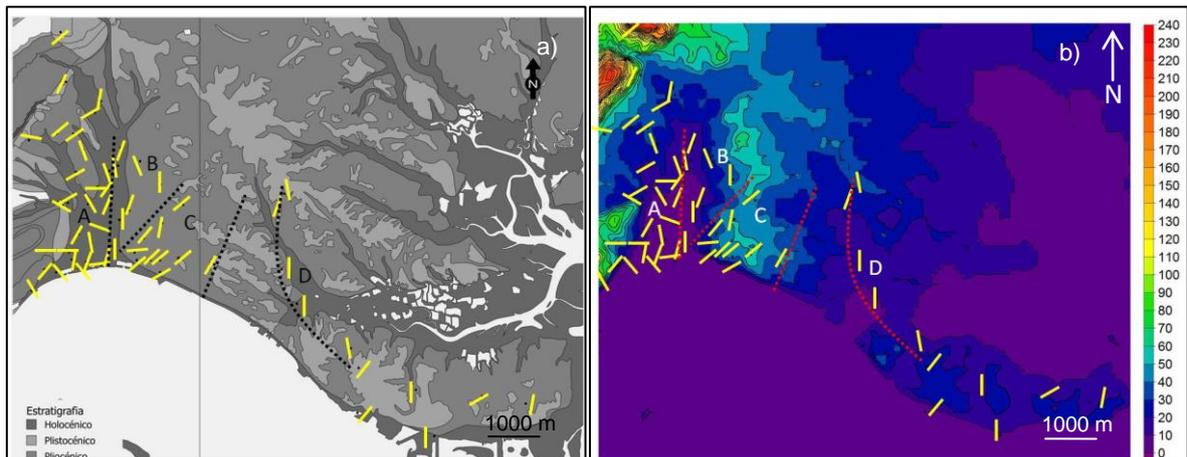


Figura 3.27 - Variação em Setúbal e Mitrena dos azimutes de  $F_0$ . (a) Geologia em fundo (consultar Figura 3.13 para mais detalhes); (b) modelo digital de altitude do terreno em fundo. A – zona A, B – zona B, C – zona C, D – zona D.

Com o objetivo de se estudar a influência da orientação de falhas (*strike*) nos azimutes das anisotropias, selecionaram três estruturas da carta geológica na escala 1:50.000, Folha 38-B Setúbal (Costa *et al.* 2005c). Na Figura 3.28 identificam-se os locais dos registos de vibrações ambientais, respetivas curvas H/V e os azimutes das amplitudes máximas.

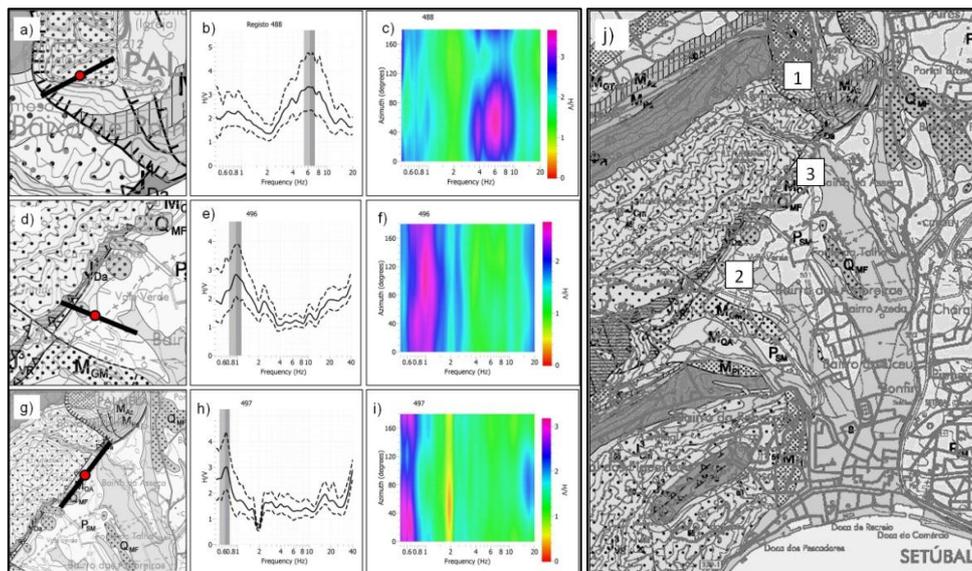


Figura 3.28 - Azimutes das amplitudes máximas em Setúbal (a, d, g), respetivas curvas H/V (b, e, h) e anisotropias das amplitudes máximas (c, f, i); (j) localização dos registos de vibrações ambientais: a – 1, d – 3, g – 2.

Nos dois primeiros casos (Figuras 3.28a e 3.28d) verificou-se que os azimutes se posicionaram transversalmente à direção das falhas, o que está de acordo com os resultados obtidos pelos autores acima referidos. O terceiro azimute apresentou-se paralelo à direção da falha cartografada (Figura 3.28g) e poderá estar relacionado com uma estrutura mais profunda.

### 3.3.6. Curvas H/V e a espessura sedimentar

As espessuras das formações superficiais (FS) existentes nas regiões do Barreiro, Setúbal e Península de Mitrena, foram determinadas de acordo com a metodologia definida em 3.2.6.

As espessuras dos sedimentos superficiais existentes na região do Barreiro, calculadas com a relação de Parolai *et al.* (2002), apresentaram valores superiores a 300 m (Figura 3.29a). Os resultados obtidos com a relação de Ibs-von Seht & Wohlenberg (1999) exibiram espessuras inferiores, não ultrapassando 250 m (Figura 3.29b). Na zona Leste, onde os valores de  $F_0$  apresentam frequências elevadas, as espessuras obtidas para as FS foram de poucos metros (inferiores a 40 m).

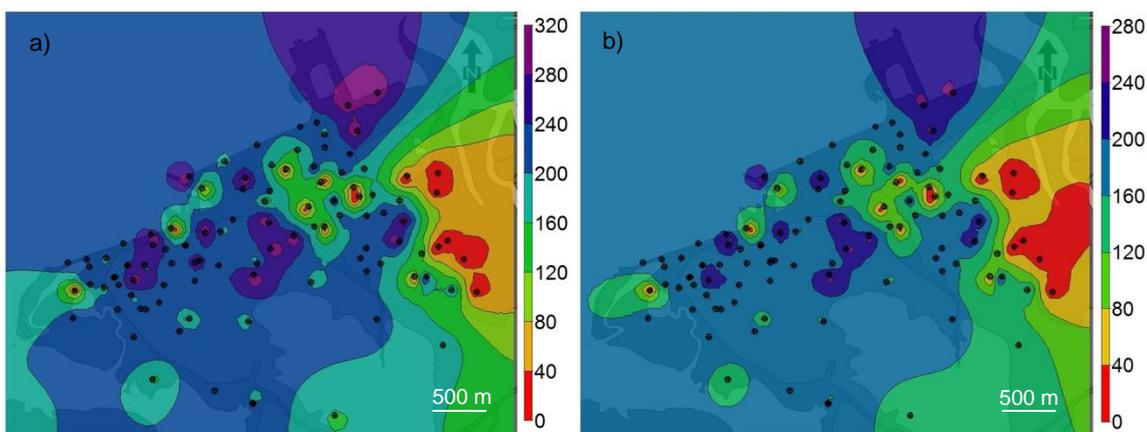


Figura 3.29 - Distribuição das espessuras de sedimentos no Barreiro utilizando as relações de (a) Parolai *et al.* (2002); (b) Ibs-von Seht & Wohlenberg (1999).

Tendo em conta as espessuras de sedimentos obtidas para a região do Barreiro, investigou-se a sua relação com dados obtidos em sondagens profundas e em campanhas de prospeção sísmica. Pretendeu-se verificar se os locais de maiores espessuras, onde o substrato se localizará a maiores profundidades, se relacionaram com algum limite entre formações geológicas. Consideraram-se os locais onde as espessuras de sedimentos, calculadas com a relação de Parolai *et al.* (2002), apresentaram valores superiores ou iguais a 200 m. Calculou-se a interpolação desses valores de modo a obter-se o comportamento de uma superfície profunda na região do Barreiro (Figura 3.30a).

O limite entre o Pliocénico e o Miocénico foi identificado aos 260 m de profundidade na sondagem Br-2 (Companhia dos Petróleos de Portugal 1959, 1963b) (Figura 3.30b). O intra-Neogénico que corresponde à passagem para calcários perto do topo do Miocénico Superior, foi identificado em campanha de prospeção sísmica (Lomholt *et al.* 1995) (Figura 3.30b). As profundidades obtidas para este nível são compatíveis com as profundidades do substrato calculado com base nas curvas H/V e com a relação de Parolai *et al.* (2002). Poderá concluir-se que os valores de  $F_0$  de baixas frequências (0,5 a 0,6 Hz) poderão estar relacionados com o limite entre o Pliocénico e o Miocénico ou com o intra-Neogénico.

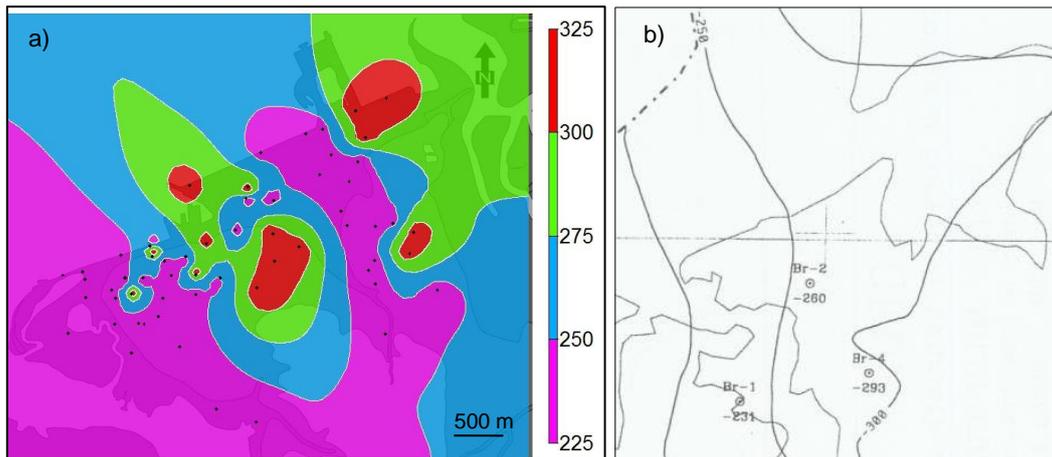


Figura 3.30 - (a) Localização no Barreiro do substrato para profundidades superiores a 200 m calculada com  $F_0$  e a relação Parolai *et al.* (2002); (b) profundidade (m) do limite entre o Plio-Plistocénico e o Miocénico identificado nas sondagens Br-1, Br-2, Br-4 (Relatórios das sondagens CPP 1956 a 1983) e isolinhas (linhas a cheio) da profundidade (m) do intra-Neogénico obtidas em campanha de prospeção sísmica (de Lomholt *et al.* 1995).

Aplicou-se também a relação de Parolai *et al.* (2002) às frequências fundamentais ( $F_0$ ) e aos valores de  $F_1$  identificadas nas curvas H/V do Holocénico do Barreiro (Figura 3.31a). Os resultados mostraram que a área de menor espessura de FS se localizou na zona leste, onde o *bedrock* se situará entre 4 m e 8 m de profundidade. Os locais de maior profundidade do *bedrock* situaram-se na zona central da antiga área industrial, área de confluência de linhas de água, onde a espessura das FS atingiu um valor máximo de 23-25 m. As profundidades aumentam na zona ribeirinha, junto ao terminal fluvial, onde a espessura das FS atingiu 30 m.

Comparou-se a distribuição das espessuras obtidas com base nas curvas H/V (Figura 3.31a) e com a relação de Parolai *et al.* (2002) com a interpolação obtida com os valores geotécnicos (Figura 3.31b). Verificou-se a existência de uma boa relação entre os valores obtidos com as duas metodologias, já que as áreas de maiores espessuras de FS são coincidentes.

Pretendeu-se identificar as áreas onde os valores calculados com as duas metodologias apresentaram maiores disparidades, de acordo com a metodologia definida em 3.2.6. Com esse objetivo, calculou-se a matriz que resultou da diferença entre as grelhas de interpolação calculada com os dois métodos (Figura 3.31c). Pode concluir-se, para a maior parte dos casos, que os locais onde se observaram maiores diferenças de espessuras de FS, corresponderam aos locais onde não se realizaram os dois ensaios em simultâneo (registos de vibrações ambientais e sondagens). Quando a distância entre os dois tipos de ensaios foi pequena, e as variações geológicas também, os resultados obtidos foram semelhantes.

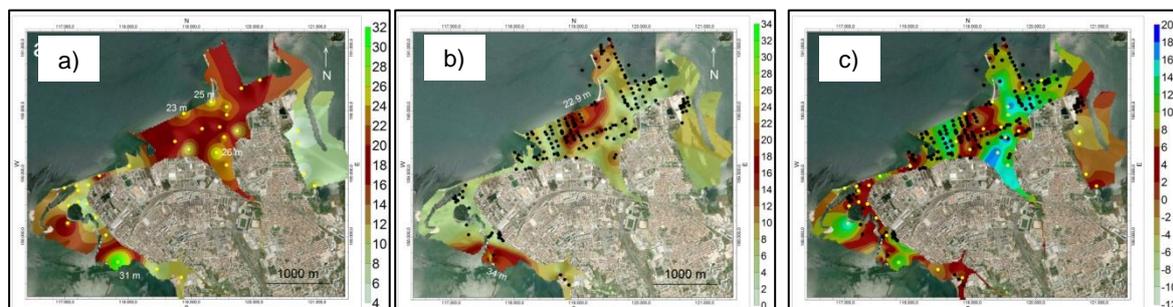


Figura 3.31 - Distribuição no Barreiro (a) da espessura das FS no Holocénico calculadas com  $F_0$  e  $F_1$  segundo Parolai *et al.* (2002); (b) espessura das FS calculadas com base em sondagens; (c) diferença entre as matrizes de interpolação calculadas com os dois métodos. Círculos: pretos – localização sondagens, amarelos – localização dos registos de vibrações ambientais.

No Holocénico de Setúbal, ao contrário do que sucedeu na região do Barreiro, a grande maioria dos valores de  $F_0$  não estarão relacionados com o limite entre as FS e o Pliocénico. Na Figura 3.32 apresentam-se as espessuras das FS da cidade de Setúbal, calculadas com base nos valores de  $F_0$  (Figura 3.32a) e com dados geotécnicos (Figura 3.32b). Os valores obtidos foram substancialmente diferentes: o limite mais profundo entre o Holocénico e o Pliocénico identificado em *logs* de sondagens foi de cerca de 30 m (Figura 3.32b); as espessuras de sedimentos determinadas com os valores de  $F_0$  e com a expressão de lbs-von Seht & Wohlenberg (1999) apontam para valores de 40 a 100 m (Figura 3.32a). Estes valores deverão corresponder às profundidades a que se deverá encontrar o limite entre o Pliocénico e o Miocénico. Os valores de  $F_0$  não estarão associados ao limite das FS com o Pliocénico devido, provavelmente, à existência de baixos valores de impedância entre as aluviões e o Pliocénico. Esta hipótese é corroborada pelos resultados obtidos por Coelho (1980) com ensaios sísmicos de reflexão realizados no Holocénico da cidade de Setúbal. Estes ensaios revelaram um contacto aluviões-substrato que nem sempre apresentou uma superfície refletora com contraste suficiente.

Na Figura 3.32a observa-se que a profundidade do limite Pliocénico-Miocénico, calculada com a relação de lbs-von Seht & Wohlenberg (1999), deverá aumentar para leste, estimativa que deverá ser confirmada com *logs* de sondagens executadas na península da Mitrena. É de referir que na cidade de Setúbal não foi possível obter sondagens que tivessem alcançado o topo do Miocénico, pelo que a confirmação direta da profundidade a que se encontra esse limite não foi possível de obter. No entanto, identificou-se esse limite nos *logs* de cinco sondagens realizadas na península da Mitrena (Figura 3.32c) (Sondagens e Fundações A. Cavaco 1971a, 1972a, 1974a, 1974b). Na maior parte das sondagens a profundidade do limite Pliocénico-Miocénico está de acordo com a hipótese de um aumento de profundidade desse limite para leste.

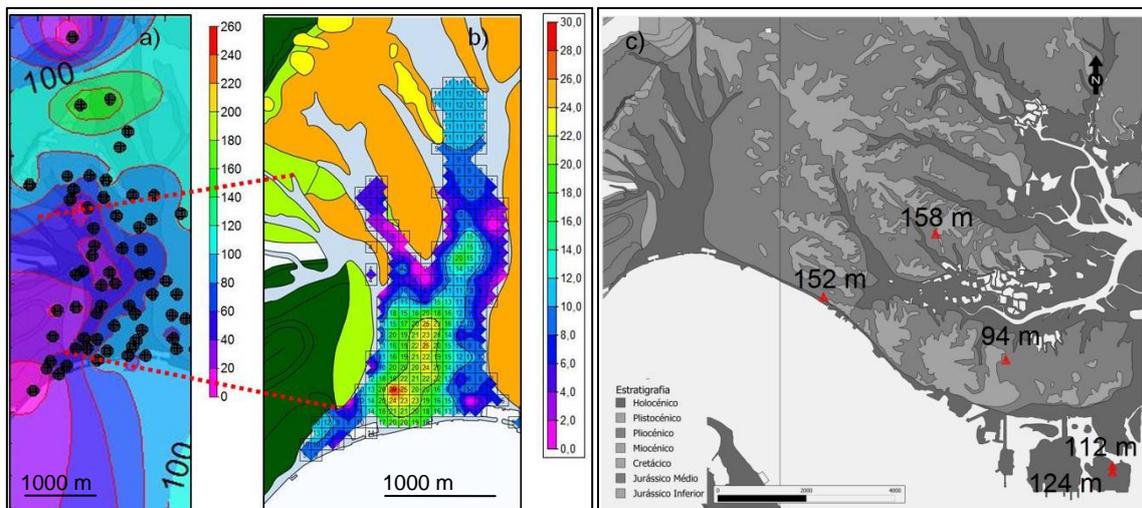


Figura 3.32 - Espessuras em Setúbal de sedimentos calculadas (a) com base nos valores de  $F_0$  e na relação lbs-von Seht & Wohlenberg (1999); (b) com base em dados de sondagens; (c) profundidades do limite entre o Pliocénico e o Miocénico identificadas em cinco sondagens (Sondagens e Fundações A. Cavaco 1971a, 1972a, 1974a, 1974b).

Junto à Serra da Arrábida foi possível relacionar alguns picos de frequência com dados geotécnicos. Seleccionaram-se duas curvas H/V (curva 401 –  $F_0 = 12,8$  Hz, curva 405 –  $F_1 = 10,6$  Hz) obtidas em locais com informação geotécnica (Figura 3.33). Segundo os *logs* das sondagens executadas neste local, o limite entre as FS e o substrato (Jurássico) situa-se entre os 4 m e 6 m de profundidade (Tecnasol FGE 2000a). Utilizaram-se as relações de lbs-von Seht & Wohlenberg (1999) e de Parolai *et al.* (2002) e os dois picos de frequência para se calcular a espessura das FS. Obtiveram-se espessuras de 2-3 m e 3-4 m, valores semelhantes aos obtidos nas duas sondagens (4-6 m).

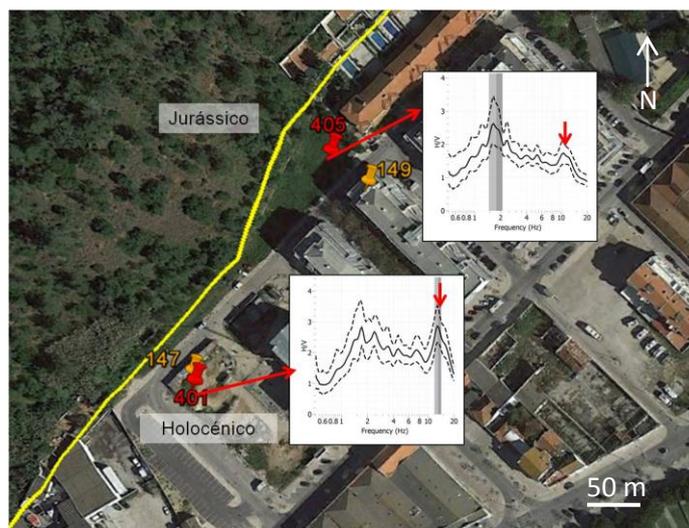


Figura 3.33 - Localização em Setúbal dos registos de vibrações ambientais e respetivas curvas H/V (registos 401 e 405). Localização de sondagens (147 – limite entre o Holocénico e o Jurássico a 4,5 m; 149 – limite entre o Holocénico e o Jurássico a 6 m).

Como se referiu em 3.2.6, existe um conjunto de autores que calcularam a relação entre  $F_0$  e espessura de sedimentos para vários locais (e.g. Ibs-von Seht & Wohlenberg 1999, Parolai *et al.* 2002, Ozalaybey *et al.* 2011, Roux *et al.* 2012). Pretendeu-se obter uma relação semelhante para a área de Setúbal de modo a verificar a aplicabilidade da relação Ibs-von Seht & Wohlenberg (1999) nesta região. Para tal, considerou-se o limite do Pliocénico com o Miocénico, identificado nas sondagens 506, 507, 508, 509, 510 executadas na península da Mitrena (Figura 3.32c). Considerou-se, também, o limite entre o Holocénico e o Jurássico identificado nas sondagens 147 e 149, junto à serra da Arrábida (Figura 3.33). Estes foram os locais onde se obteve informação relativa à profundidade do substrato e de  $F_0$ . Consideraram-se os valores de  $F_0$  e um valor de  $F_1$  (associado ao limite entre o Holocénico e o substrato) das curvas H/V mais próximas dos locais onde se realizaram as sondagens (Tabela 3.2). Quando se identificaram curvas H/V localizadas à mesma distância de uma sondagem, considerou-se o valor médio dos valores de  $F_0$ .

Tabela 3.2 - Valores utilizados no cálculo da correlação entre a espessura de sedimentos e frequências para a região de Setúbal.

Sondagens		Curvas H/V		Distância (m) entre sondagens e os locais onde se realizaram os registos de vibrações ambientais
Identificação	Profundidade do substrato (m)	Identificação	Freq. (Hz)	
147	4,6	401	( $F_0$ ) 12,8	5
149	6	405	( $F_1$ ) 10,6	23
507	152	480	( $F_0$ ) 0,7	130
506	94	450, 458	( $F_0$ ) 0,8	524, 995
510	158	473, 514	( $F_0$ ) 0,7	732, 937
508	124	454	( $F_0$ ) 0,8	2700
509	112	454	( $F_0$ ) 0,8	2700

A relação obtida ( $H=91,283F_0^{-1,166}$ ) (Figura 3.34) assemelha-se às relações de Ibs-von Seht & Wohlenberg (1999) ( $H=96F_0^{-1,388}$ ) e de Parolai *et al.* (2002) ( $H=108F_0^{-1,551}$ ) e difere das obtidas por Roux *et al.* (2012) ( $H=336,67F_0^{-1,605}$ ) e Ozalaybey *et al.* (2011) ( $H=141F_0^{-1,27}$ ) que apresentam para os mesmos valores de  $F_0$  maiores profundidades do substrato.

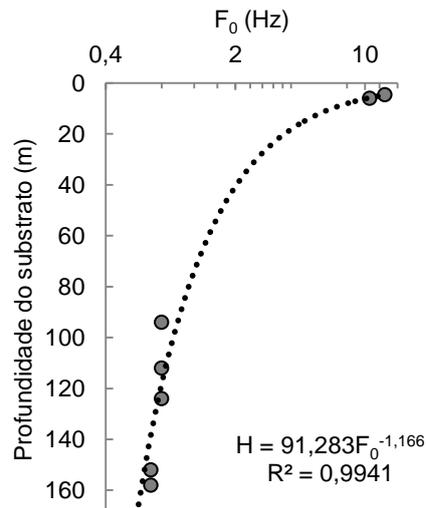


Figura 3.34 – Relação obtida para Setúbal entre  $F_0$  e a profundidade do substrato ou espessura de sedimentos (H) para a região de Setúbal.

Pelo facto de se ter utilizado um número reduzido de sondagens (sete) no cálculo da relação entre  $F_0$  e H para a região de Setúbal e Mitrena, será necessário confirmar a relação obtida com o recurso a mais sondagens e a valores médios de  $V_s$  em função da profundidade.

Na Figura 3.35 apresentam-se as espessuras de sedimentos calculadas com a relação obtida na presente tese (Figura 3.35a), com a relação de Ibs-von Seht & Wohlenberg (1999) (Figura 3.35b) e com a de Parolai *et al.* (2002) (Figura 3.35c). Verifica-se que as duas primeiras relações são as que melhor se adequam aos dados geotécnicos disponíveis para Setúbal. Em termos médios, as diferenças obtidas entre as profundidades do limite Pliocénico-Miocénico calculadas com os valores de  $F_0$  e com as sondagens em Setúbal, foram de 14 m (relação calculada na presente tese), 17 m (Ibs-von Seht & Wohlenberg 1999) e de 38 m (Parolai *et al.* 2002).

As duas primeiras relações permitiram identificar uma área na península da Mitrena com espessuras de sedimentos (Holocénico + Pliocénico) de 120 a 140 m (Figura 3.35). Mais para NW, as espessuras aumentaram até valores de 260 m e, mais para oeste, diminuíram rapidamente para valores inferiores a 100 m.

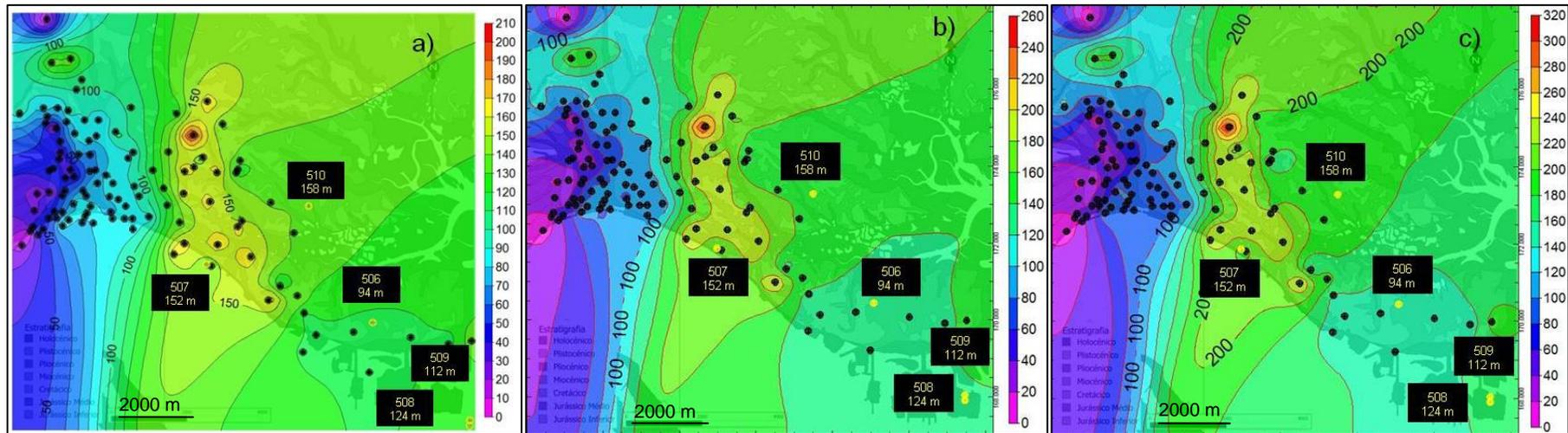


Figura 3.35 – Espessura de sedimentos (Holocénico + Pliocénico) em Setúbal e Mitrena segundo as relações: (a) calculada com a relação obtida na presente tese  $H=91,283F_0^{-1,166}$ ; (b) lbs-von Seht & Wohlenberg (1999)  $H=96F_0^{-1,388}$ ; (c) Parolai *et al.* (2002)  $H=108F_0^{-1,551}$ . Círculos a amarelo localização das sondagens 507, 510, 506, 509, 508 (Sondagens e Fundações A. Cavaco 1971a, 1972a, 1974a, 1974b). Caixas pretas: identificação das sondagens e informação relativa à profundidade do limite Pliocénico - Miocénico.

### 3.3.7. Análise da distribuição de picos de frequências e de $N_{SPT}$

Pretendeu-se estudar a relação entre os picos de frequências ( $F_1$  e  $F_0$ ) das curvas H/V do tipo B e C do Barreiro (Figura 3.16) e os valores de  $N_{SPT}$  e a espessura das FS retirados dos logs de sondagens. Escolheu-se um perfil (Figura 3.36f) que permitiu selecionar locais que possuíssem, em simultâneo, dados geotécnicos e curvas H/V. Quando tal não foi possível, escolheram-se as curvas obtidas nos locais mais próximos das sondagens. Calcularam-se os valores de  $N_{SPT}$  e da espessura das FS ao longo desse perfil (Figuras 3.36g, h) de acordo com a metodologia definida no Capítulo II.

Nas Figuras 3.36a, b, c, d, e apresentam-se os picos de frequência ( $F_0$  e  $F_1$ ) que se deverão relacionar com o limite entre as FS e o Pliocénico. Observou-se uma boa relação entre os picos de frequência os valores de  $N_{SPT}$  (Figura 3.36g) e a espessura das FS (Figura 3.36h).

As frequências entre 4 Hz e 4,5 Hz (Figura 3.36a, b) corresponderam a profundidades de  $N_{SPT60}$  iguais ou inferiores a 10 m (Figura 3.36g). Esta relação foi também verificada com a espessura das FS: frequências entre 4 Hz e 4,5 Hz corresponderam a espessuras de FS máximas de 10 m (Figura 3.36h). Nos locais onde os valores de  $N_{SPT60}$  se localizaram a profundidades entre 20 m e 25 m observou-se um menor valor de frequência (2,2 Hz). Esta conclusão foi idêntica para as espessuras das FS: para espessuras de 20-25 m observou-se um pico de frequência de 2,2 Hz. Com a diminuição da profundidade de  $N_{SPT60}$  e da espessura das FS observou-se, na direção da extremidade este do perfil, um aumento de frequências (4,3 Hz). Já no Pliocénico a curva H/V apresenta um valor de  $F_0$  de 0,8 Hz, que se relacionará com uma interface mais profunda (provavelmente o limite entre o Pliocénico e o Miocénico).

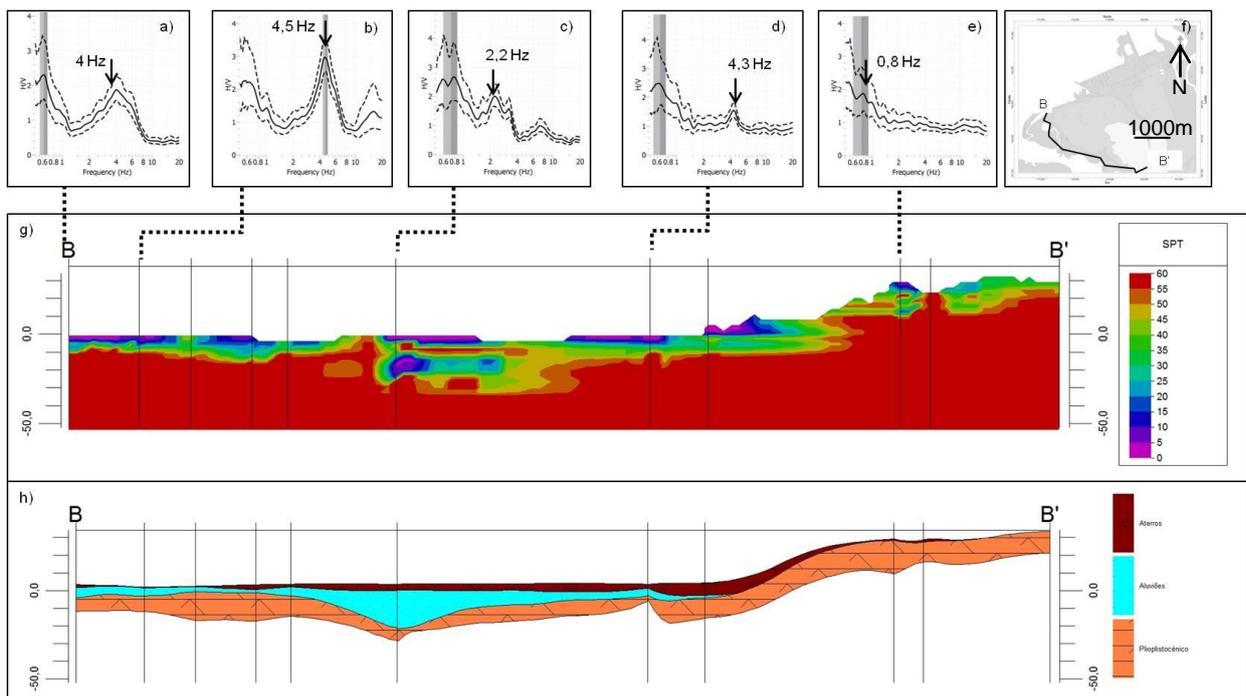


Figura 3.36- Curvas H/V no Barreiro (a) 15; (b) 11; (c) 204; (d) 310; (e) 231; (f) localização do perfil de  $N_{SPT}$ ; (g) valores de  $N_{SPT}$  em profundidade e ao longo do perfil; (h) espessura das FS (aterros e aluviões).

Na Figura 3.37a apresenta-se a interpolação dos valores das espessuras das FS obtidos com base nos picos de frequência das curvas H/V para o Barreiro. Utilizaram-se os valores de  $F_1$  e  $F_0$  das curvas H/V do tipo B e C (Figura 3.16) e a relação de Parolai *et al.* (2002). Na Figura 3.37b está representada a interpolação calculada com os valores das profundidades de  $N_{SPT60}$  retiradas de logs de sondagens (Figura 3.37b).

Apesar do número de sondagens com ensaios SPT ser reduzido, observou-se a existência de uma boa relação entre as espessuras das FS e os valores de  $N_{SPT60}$ . As áreas em que o valor de  $N_{SPT60}$  se encontra a maiores profundidades, corresponderam aos locais em que os valores de  $F_0$  e  $F_1$  originaram maiores espessuras de FS segundo a expressão de Parolai *et al.* (2002). Terrenos com maior rigidez, com valores de  $N_{SPT60}$  obtidos a menores profundidades, originaram valores de  $F_0$  e  $F_1$  mais elevados.

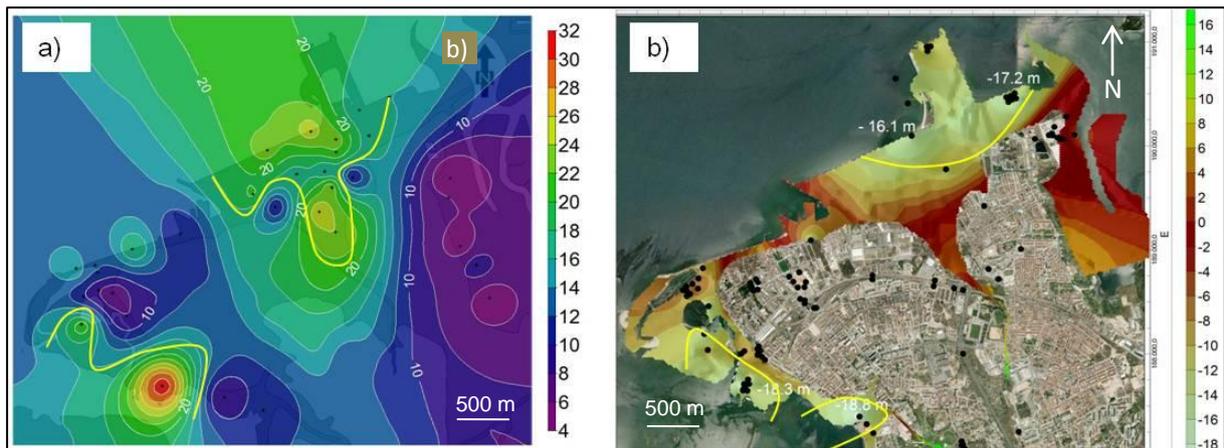


Figura 3.37 – (a) Espessura das FS no Barreiro calculada com a relação de Parolai *et al.* (2002) a partir dos valores de  $F_0$  e  $F_1$  das curvas médias de H/V do Holocénico; (b) Cota de  $N_{SPT60}$  calculada com base em sondagens.

### 3.3.8. Distribuição de $F_0$ e a Falha de Pinhal Novo-Alcochete

Para se estudar a relação entre  $F_0$  e a existência de acidentes tectónicos seguiu-se a metodologia delineada em 3.2.8. Na região do Barreiro não se identificaram estruturas tectónicas que se pudessem relacionar com a localização do substrato em profundidade (Figura 3.30a em 3.3.6). Na região de Setúbal identificou-se a Falha do Pinhal Novo-Alcochete (FPNA) (Capítulo II), considerada ativa por vários autores (e.g. Cabral *et al.* 2011a, IGME 2015).

A FPNA localiza-se na região do Vale Inferior do Tejo, no setor oriental da Península de Setúbal. Corresponde a uma das principais estruturas tectónicas da região de Lisboa (Ribeiro *et al.* 1996, Cabral *et al.* 2003) e foi identificada através de perfis de reflexão sísmica e dados de sondagens (Capítulo II). Esta estrutura estará limitada a sul pela Falha da Arrábida, a qual consiste num acidente tectónico provável de orientação próxima de E-W, situado a sul da Península de Setúbal (Ribeiro *et al.* 1996, Kullberg *et al.* 2006).

Segundo Moniz (2010) a disposição das isossistas do sismo histórico de 1858 parecem sugerir que a Zona da Falha do Pinhal Novo-Alcochete (ZFPNA) se poderá prolongar mais para sul (Capítulo II). Cabral *et al.* (2011a) e IGME (2015) consideram que a Falha do Pinhal Novo-Alcochete se desenvolve até Setúbal (Figura 3.38a) e será capaz de gerar sismos com magnitudes até 7. Esta localização está de acordo com a cartografia da ZFPNA apresentada por Moniz (2010) e com a sua sugestão de que a ZFPNA se prolongará para sul (Figura 3.38b).

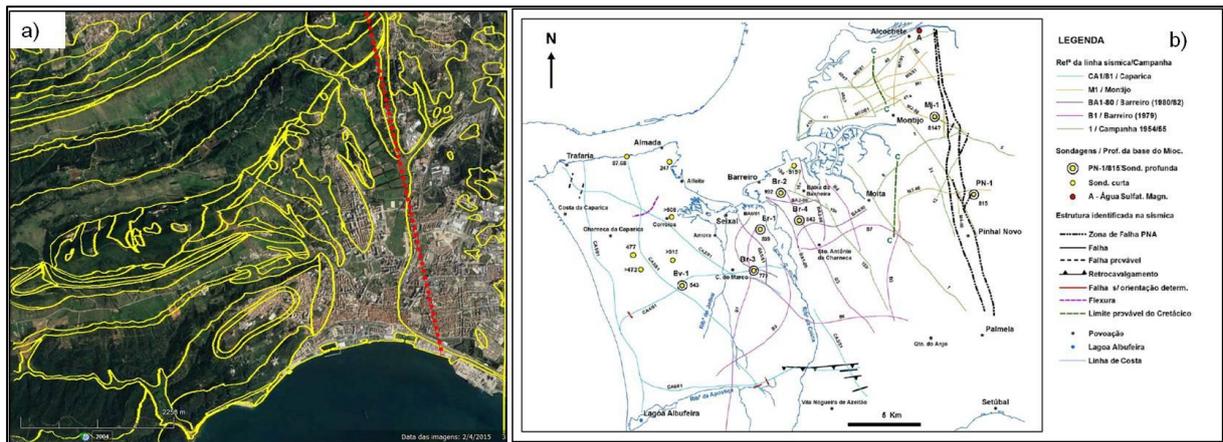


Figura 3.38 - (a) Localização da Falha do Pinhal Novo-Alcochete na região de Setúbal segundo Cabral *et al.* 2011a e IGME 2015; (b) Localização da ZFPNA (de Moniz 2010).

Moniz (2010) analisou diversos perfis de reflexão sísmica, executados nesta área, e considerou que a ZFPNA terá afetado os sedimentos pliocénicos da Formação de Santa Marta. Desta análise concluiu que a superfície basal destes sedimentos, que terá sido afetada pela ZFPNA, demonstra uma descida relativa do bloco oriental.

Na Figura 3.39 apresentam-se modelos tridimensionais de terreno (Figura 3.39a) e das cotas do substrato (topo do Miocénico) (Figura 3.39b). As cotas do substrato foram calculadas com os valores de  $F_0$  utilizando a relação de Parolai *et al.* (2002). Apresenta-se, também, a variação da cota da profundidade do topo do Pliocénico obtida por interpolação de dados geotécnicos (Figura 3.39c). Na Figura 3.39d observa-se a variação de  $N_{SPT}$  segundo o perfil B-B' da Figura 3.39e.

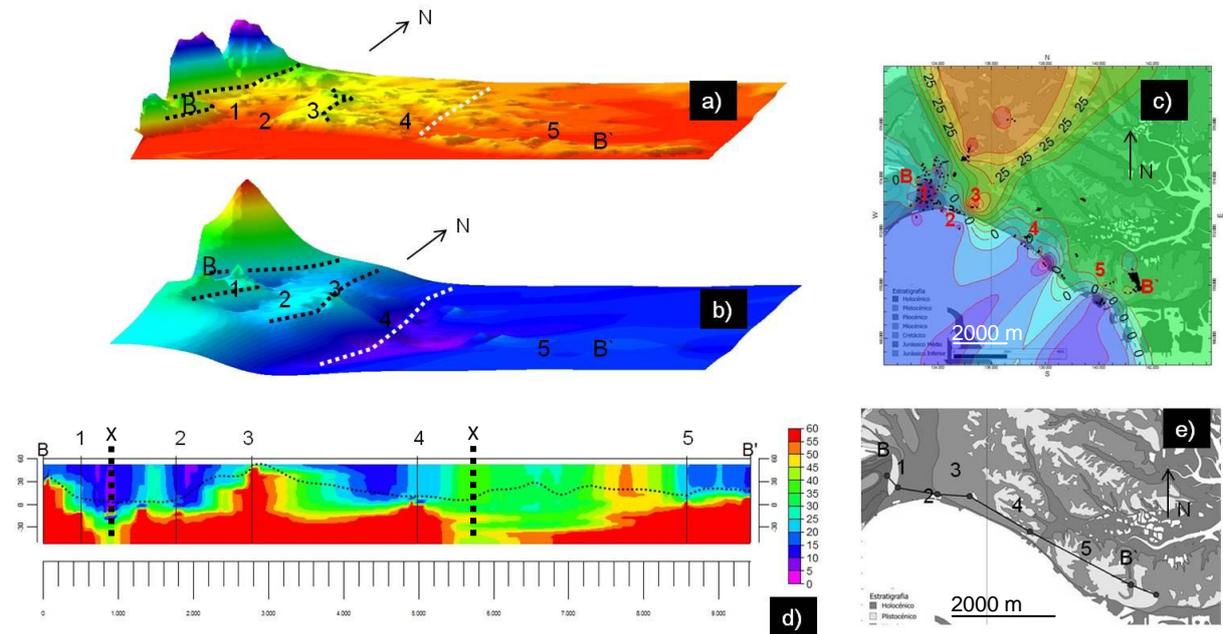


Figura 3.39 - (a) Modelo digital do terreno de Setúbal (sobrelevação 8); (b) cotas do substrato obtidas com  $F_0$  e a relação de Parolai *et al.* (2002) (sobrelevação 8); (c) cotas do topo do Pliocénico obtidas em sondagens; (d) valores de  $N_{SPT}$  segundo o perfil B-B' ; pontado - perfil topográfico (sobrelevação 8), retas a tracejado com X - locais onde não se obtiveram valores de  $N_{SPT60}$  até 30 m de profundidade; (e) localização do perfil B-B'. Os números de 1 a 5 correspondem a locais de referência.

Na Figura 3.39b observou-se um aumento da profundidade do topo do Miocénico a partir da zona 3, segundo uma orientação aproximada N-S. Nesta zona 3, à superfície, identificou-se uma zona de

relevo localizada no Pliocénico (Figura 3.39a), que estará relacionada com os locais onde se alcançam os valores mais elevados das cotas do topo do Pliocénico (Figura 3.39c). Observou-se, também, no perfil de  $N_{SPT}$ , valores de  $N_{SPT60}$  perto da superfície (local 3 na Figura 3.39d), coincidentes com o relevo do Pliocénico (local 3 na Figura 3.39a).

A Leste da zona 4 obtiveram-se, com base nas frequências fundamentais, as maiores profundidades para o topo do Miocénico (superiores a 200 m, vide Figura 3.35c) (Figura 3.39b). Nesta zona não se obtiveram valores de  $N_{SPT60}$  a não ser a profundidades superiores a 30 m (Figura 3.39d). Este comportamento sugere a presença de uma área, localizada no Plio-Plistocénico, de menor rigidez dos materiais, coincidente com uma faixa onde o topo do Miocénico se localiza a maiores profundidades (Figura 3.39b). Esta coincidência pode ser devida à existência de uma estrutura que terá afetado as formações do Miocénico e do Plio-Plistocénico.

As zonas 3 e 4 (Figura 3.39) sugerem a existência de uma estrutura, que poderá ser a Falha de Pinhal Novo-Alcochete, que terá afetado pelo menos o topo do Miocénico e que separou dois blocos, com a descida relativa do bloco oriental. Esta possibilidade está de acordo com a interpretação apresentada por Moniz (2010), baseada na interpretação de perfis sísmicos e de sondagens, para a ZFPNA. Nesse sentido, a faixa mais profunda do substrato poderá corresponder ao segmento Sul da Falha do Pinhal Novo-Alcochete identificada por Cabral *et al.* (2011a) e IGME (2015).

Nas Figuras 3.40a e 3.40b apresentam-se as localizações da FPNA propostas pelo IGME (2015) e pelo presente estudo. Na Figura 3.40b estão presentes os azimutes das máximas amplitudes distribuídos por quatro zonas. Na área C os azimutes das máximas amplitudes foram, na maior parte dos casos, transversais à proposta de localização da FPNA do IGME (2015), mas na área B não. No entanto, o comportamento foi semelhante aos resultados obtidos para as regiões de Tremestieri e Pernicana, em Itália (Rigano *et al.* 2008). Não foi possível identificar anisotropias na razão H/V, em função do azimute, nos registos de vibrações ambientais realizados na área mais profunda do substrato.

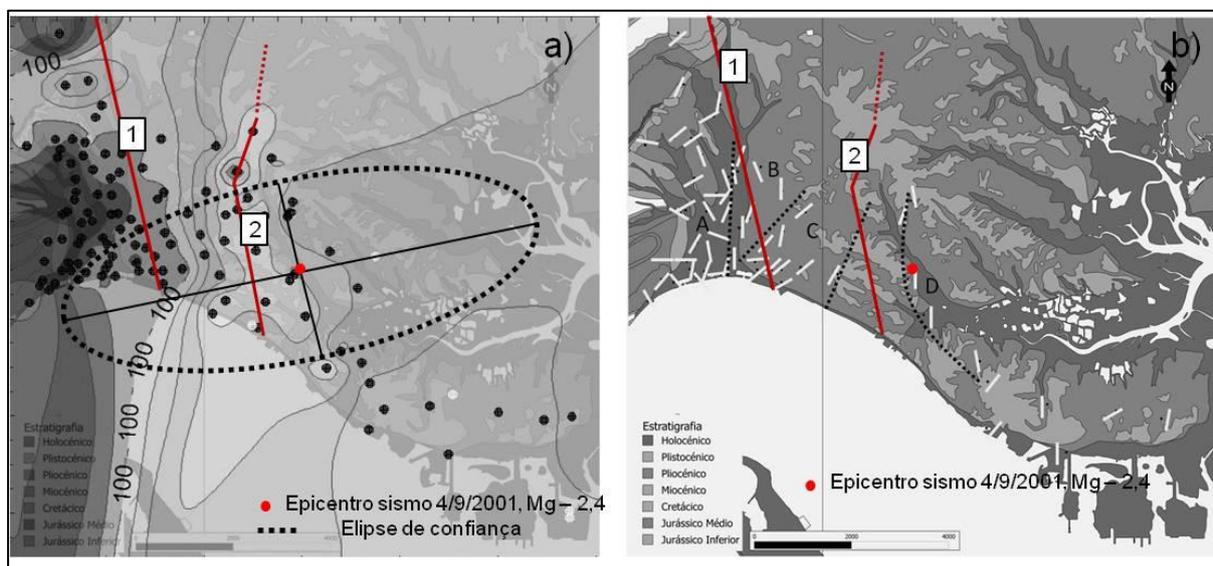


Figura 3.40 - (a) Profundidade do substrato em Setúbal calculada com  $F_0$  e pela equação de Parolai *et al.* (2002). 1 - localização FPNA segundo IGME (2015), 2 – proposta de localização da FPNA no presente estudo; (b) variação dos azimutes (traços brancos) das máximas amplitudes das curvas H/V. A, B, C, D zonas com comportamentos de azimutes diferentes. Pontos pretos – locais dos registos de vibrações ambientais. Ponto vermelho - epicentro do sismo de 4-9-2001 (IPMA 2017).

Segundo a base de dados sísmicos do IPMA, entre 1 de janeiro de 1967 e fevereiro de 2017 foi registado apenas um sismo na região de Setúbal (Figura 3.40). Este evento ocorreu no dia 4 de setembro de 2001, com uma magnitude de 2,4, com o hipocentro localizado a uma profundidade de

3,5 km e um intensidade MM de II/III. A elipse de confiança apresentou o seu eixo maior com um raio de 5,1 km e o menor com um raio de 2,1 km (Figura 3.40a) e o erro associado ao cálculo da sua profundidade poderá ter sido de 7,7 km. A localização do epicentro e da elipse de confiança deste sismo (Figura 3.40a) permite considerar que este poderá ter tido origem na FPNA, especialmente se for considerada a localização proposta neste estudo.



# **CAPÍTULO IV – DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DAS ONDAS DE CORTE COM A UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DA REFRAÇÃO DE MICROTREMORES**

## 4.1. Introdução

As características do movimento sísmico podem ser localmente alteradas devido à existência de formações superficiais brandas que podem amplificar o movimento sísmico e aumentar os danos em estruturas (Bakavoli *et al.* 2012). Estes efeitos têm sido observados em vários sismos (Chávez-Garcia & Bard 1994, Mirzaoglu & Dýkmen 2003) e são responsáveis pela distribuição dos danos em determinadas áreas.

O conhecimento da velocidade das ondas S ( $V_s$ ) permite estudar a resposta dos terrenos à ação sísmica e tem sido utilizado no estudo da perigosidade sísmica em áreas urbanas (Borcherdt 1970, Boore 2004, Stephenson *et al.* 2015). A velocidade média das ondas S nos primeiros 30 m de profundidade ( $V_{s30}$ ) é um parâmetro utilizado nos regulamentos de construção para classificar os terrenos e nos projetos da especialidade.

Neste Capítulo pretende-se determinar a variação das ondas S em profundidade, ou seja, obter perfis de  $V_s$  nas áreas de estudo do Barreiro e Setúbal. Pretendem-se caracterizar as unidades litoestratigráficas relativamente à velocidade das ondas S, calcular os valores médios da velocidade das ondas S nos primeiros 30 m de profundidade ( $V_{s30}$ ) e classificar os locais estudados segundo o Eurocódigo 8 (EC8) (IPQ 2010). Este parâmetro tem vindo a ser utilizado em estudos de engenharia sísmica (Kramer 1996, Boore *et al.* 1997), embora para alguns investigadores seja insuficiente para estudar o comportamento dos solos quando utilizado individualmente (Frankel *et al.* 2002, Mucciarelli & Gallipoli 2006, Castellaro *et al.* 2008, Volti *et al.* 2016).

Pretendeu-se, também, relacionar a velocidade das ondas S com alguns resultados obtidos nos capítulos anteriores. Para tal comparou-se a distribuição geográfica de  $V_{s30}$  com as propriedades geotécnicas dos terrenos e utilizaram-se os perfis de  $V_s$  na elaboração de modelos tridimensionais. Com base nestes modelos comparou-se a variação de  $V_s$  com a variação de  $N_{SPT}$  segundo secções horizontais a diversas cotas topográficas.

Existem vários métodos sísmicos que permitem estimar os valores de  $V_s$  em função da profundidade, podendo dividir-se em invasivos e não invasivos. Os métodos invasivos realizam-se em furos de sondagem e são exemplos os métodos *cross-hole*, *down-hole*, *up-hole* e *PS-logging*. São métodos pontuais que permitem obter dados relativos à velocidade das ondas S com elevado rigor mas são dispendiosos, demorados e difíceis de executar em áreas já urbanizadas. Estes condicionismos tornam a sua utilização em investigações de efeitos locais em grandes áreas de difícil aplicabilidade. Os métodos não invasivos são realizados à superfície e podem utilizar uma fonte ativa ou passiva. O *Spectral Analysis of Surface Waves* (SASW; Nazarian *et al.* 1983) e o *Multichannel Analysis of Surface-Waves* (MASW; Park *et al.* 1999) utilizam fontes ativas, e o *Spatial Auto Correlation Method* (SPAC; Wathelet *et al.* 2005) e o *Refraction Microtremor* (ReMi; Louie 2001) utilizam uma fonte passiva composta por vibrações ambientais. Estes métodos são utilizados no cálculo da curva de dispersão das ondas Rayleigh que é muito sensível à variação de  $V_s$  com a profundidade. O perfil da velocidade das ondas S é obtido por inversão da curva de dispersão das ondas Rayleigh (Wathelet *et al.* 2004). Estes métodos indiretos devem ser calibrados, sempre que possível, com dados obtidos com ensaios *cross-hole*, *down-hole* ou com dados de sísmica de refração.

Para além dos métodos sísmicos acima referidos, existem outros que se baseiam na relação da velocidade das ondas S com a geologia e com as propriedades topográficas dos terrenos e que permitem estimar  $V_s$  e  $V_{s30}$  (Yong *et al.* 2012, Silva *et al.* 2014).

Tendo em conta que a área investigada na presente tese é vasta e que os dados de  $V_s$  obtidos junto de várias entidades foram escassos, escolheu-se a utilização da técnica da refração de microtremores (ReMi; Louie 2001) para se obterem valores de  $V_s$ . Esta técnica consiste na aquisição de vibrações ambientais ao longo de uma linha de geofones, separados entre si por uma distância conhecida e regular, e permite investigar *in situ* um volume considerável do terreno de forma não

invasiva e não destrutiva (Stephenson *et al.* 2005). Cada geofone regista vibrações ambientais: (i) geradas por tráfego rodoviário, ferroviário e ruído industrial (ensaios passivos); (ii) gerado por uma fonte sísmica (martelo) sendo neste caso idêntico aos ensaios MASW (ensaios ativos) (Park *et al.* 1999). As linhas sísmicas podem ser colocadas nas bermas das estradas, em zonas de construção ou ao longo de autoestradas sem ser necessário parar os trabalhos ou o fluxo de trânsito. Estes ensaios testam um volume de terrenos muito maior do que os estudos efetuados por furos de sondagem. Esta técnica pode ser empregue, para além do estudo da resposta sísmica local, em estudos de liquefação, no controlo de compactação do solo, na estimativa da resistência de materiais, na identificação de depósitos ou estruturas enterrados. O equipamento utilizado no registo destes ensaios ReMi foi cedido pelo Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

A análise dos dados com a técnica ReMi pressupõe que a propagação das ondas superficiais é isotrópica e omnidirecional (Strobbia & Cassiani 2011). Em locais onde a energia das ondas superficiais não se propaga de um modo omnidirecional ao longo da linha de geofones, os resultados podem sobrestimar os verdadeiros valores de  $V_s$  (Zywicki 2007, Rosenblad & Li 2009, Strobbia & Cassiani 2011). Para alguns investigadores a distribuição não isotrópica do azimute da fonte das vibrações ambientais será a maior limitação na confiança dos resultados obtidos pela técnica ReMi (Rosenblad & Li 2009).

Rosenblad & Li (2009) compararam resultados obtidos com ReMi e MASW e concluíram que a maior parte dos locais mostram uma boa relação entre os valores obtidos na determinação de  $V_{s30}$ . Outros autores compararam os valores obtidos para  $V_s$  com o ReMi com furos de sondagens e respetivos *logs* (e.g., Stephenson *et al.* 2005) tendo também observado uma boa relação entre estes métodos.

Alguns autores observaram que a diferença de valores de  $V_{s30}$  obtidos com ensaios de refração e reflexão sísmica e os obtidos com ensaios ReMi não excedia 2% nos locais em que a interface entre as FS e o *bedrock* se situou a menos de 30 m de profundidade (e.g., Odum *et al.* 2010). Santisteban *et al.* (2011) compararam, para uma mesma zona de aterro, resultados alcançados com *PS-logging* e SASW com os obtidos com ensaios ReMi, e concluíram que a utilização da técnica ReMi permite alcançar resultados rigorosos nos perfis de  $V_s$ .

## 4.2. Metodologia

A metodologia seguida neste estudo passou pela utilização de dois tipos de execução de ensaios ReMi: (i) um passivo, em que se registam as vibrações ambientais ao longo de uma linha de geofones e (ii) um ativo, em que o ruído é gerado pelo impacto de um martelo numa placa de ferro colocada a uma determinada distância (*offset*) do primeiro geofone. Nos ensaios passivos utiliza-se um maior espaçamento entre os geofones, registando-se vibrações ambientais de baixas frequências (quando comparadas com o conteúdo de ensaios ativos), permitindo, por essa razão, obter informação a maiores profundidades (Odum *et al.* 2013). Por este facto, deu-se preferência à execução de ensaios passivos de modo a alcançar-se sempre que possível o limite entre as FS e o substrato (*bedrock*).

Para determinação da velocidade das ondas de corte com a técnica do ReMi a metodologia seguida compreendeu os seguintes passos: (i) escolha dos locais para a realização dos ensaios; (ii) definição dos parâmetros utilizados nos ensaios; (iii) tratamento dos registos e obtenção de valores de  $V_{s30}$  e de perfis de  $V_s$  (Figura 4.1). Os resultados obtidos foram comparados com as propriedades geotécnicas dos terrenos, com os picos de frequência ( $F_0$  e  $F_1$  e respetivas amplitudes,  $A_0$  e  $A_1$ ) das curvas H/V e com modelos digitais do terreno.

Escolha dos locais	Ensaio	Resultados			Comparação resultados	
Identificação de vias com elevado tráfego  Unidades litoestratigráficas existentes e espessura FS  Localização sondagens, ensaios vibração ambiental, estruturas sensíveis	Seistronix Ras-24  Ensaio passivo [distância entre geofones de 1,5 a 5 m]  Ensaio ativo [distância entre geofones 1,5 a 2,5 m; distância entre o 1º geofone e o local de impacto 6 m]	SeisOpt ReMi V4.0  ReMiVspect  ReMiDisper	$V_{s30}$  Perfis de $V_s$	Cálculo dos valores médios de $V_{s30}$ para cada um dos locais ensaiados  Cálculo dos perfis médios de $V_s$ para cada um dos locais ensaiados	Interpolação dos valores médios de $V_{s30}$  Elaboração de modelos 3D com os perfis médios de $V_s$	Comparação das interpolações de $V_{s30}$ com  (i) Propriedades geotécnicas (ii) Curvas H/V ( $F_0$ , $F_1$ , $A_0$ , $A_1$ ) (iii) Modelo digital do terreno

Figura 4.1 – Metodologia utilizada na determinação da velocidade das ondas S e na comparação dos resultados obtidos com as propriedades geotécnicas dos terrenos, as curvas H/V e os modelos digitais do terreno.

### 4.2.1. Localização dos ensaios

A seleção dos locais para a realização dos ensaios ReMi resultou da conjugação dos seguintes critérios: (i) identificação das vias com elevado tráfego, de modo a assegurar vibrações ambientais com energia suficiente para uma boa execução dos registos e com as condições necessárias de segurança para a colocação dos geofones e do restante equipamento; (ii) distribuição das unidades litoestratigráficas; (iii) localização de sondagens com informação geotécnica (Capítulo II); (iv) variação da espessura das FS obtida com base na interpolação dos dados de logs de sondagens (Capítulo II); (v) locais onde se realizaram ensaios H/V (Capítulo III); (vi) localização de estruturas sensíveis, com importância na gestão da emergência e com elevadas ocupações populacionais (e.g. hospitais, quartéis de bombeiros e escolas).

A utilização de suportes próprios para a colocação de geofones facilitou a execução dos ensaios passivos junto das bermas das vias urbanas com maior tráfego. Com a sua utilização não foi necessário executar furos para a colocação dos geofones, o que possibilitou a realização de vários ensaios num intervalo de tempo curto. Os ensaios passivos foram realizados em troços de vias viárias e rodoviárias com elevado tráfego implantados em terrenos holocénicos, pliocénicos e pliocénicos. Na cidade de Setúbal realizaram-se também ensaios em unidades do Mesozoico (Jurássico) com o objetivo de se obterem valores de  $V_{s30}$  e  $V_s$  em maciço rochoso. Na área da Baía

Tejo do Barreiro, em unidades do Holocénico, devido à ausência de vias, foi necessário recorrer-se à execução de ensaios ativos, o que limitou a profundidade de alcance da informação relativa a  $V_s$ .

Selecionaram-se ainda alguns locais em função da necessidade de se caracterizarem os terrenos subjacentes a algumas estruturas sensíveis como, por exemplo, o hospital e uma escola do primeiro ciclo em Setúbal.

Com a finalidade de se estudar a influência da espessura das FS nos resultados de  $V_{s30}$  e nos perfis de  $V_s$  escolheram-se locais com diferentes profundidades do topo do Pliocénico para a realização dos ensaios. Realizaram-se ensaios ReMi próximos de sondagens e dos locais onde se obtiveram curvas H/V de modo a estudar a relação entre  $V_{s30}$ ,  $N_{SPT}$ ,  $F_0$ ,  $F_1$ ,  $A_0$  e  $A_1$ .

#### 4.2.2. Execução dos ensaios

Na aquisição dos registos de vibrações ambientais utilizou-se uma estação digital RAS-24 *Exploration Seismograph* de 24 canais, equipada com geofones verticais de 4,5 Hz dispostos ao longo de uma linha (Figura 4.2). Nos ensaios passivos, os geofones foram colocados paralelamente às vias de modo a diminuir o ângulo entre a sua direção e o azimute da fonte e, por conseguinte, evitar a sobrestimação de  $V_s$ . Os registos passivos realizaram-se nos períodos em que se observou maior quantidade de tráfego ao longo das vias, de modo a obter-se a maior quantidade de energia possível nos registos. Nos ensaios ativos utilizou-se um martelo para se gerarem ondas sísmicas artificiais, com uma distância de 6 m entre o local do impacto e o primeiro geofone (*offset*).



Figura 4.2 – Aspectos da logística associada à realização dos ensaios ReMi. (a) 1 - Estação digital RAS-24 *Exploration Seismograph* de 24 canais; 2 – PC utilizado nos ensaios sísmicos; (b) execução de ensaios ativos na Baía do Tejo Barreiro; (c) execução de ensaios passivos em Setúbal.

Antes de se efetuarem os registos definiram-se alguns parâmetros na aplicação Seistronix RAS 24 em função do tipo de ensaios a serem executados. A distância entre os geofones, a taxa de amostragem, a duração do registo, e a distância a que são geradas as ondas sísmicas nos ensaios ativos (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados na aquisição de dados dos ensaios ReMi.

Ensaio	Distância entre geofones (m)	Taxa de amostragem (1ms)	Duração (s)	Pretrigger (ms)	Offset (m)
Ativos	1,5 – 2,5	1	2	3,25	6
Passivos	1,5 - 5	2	15 - 32	-	-

Com os ensaios realizados, caracterizaram-se as unidades litoestratigráficas e diversas FS relativamente à velocidade das ondas S. Nesse sentido, privilegiou-se a realização de ensaios no maior número de locais diferentes de acordo com os parâmetros da Tabela 4.1. Nos ensaios passivos a distância entre os geofones dependeu das características das vias utilizadas: nas vias mais compridas e com tráfego intenso utilizaram-se as distâncias maiores entre os geofones (5 m).

#### 4.2.3. Cálculo de $V_{s30}$ e dos perfis de $V_s$

Para se obterem os valores da velocidade das ondas S foi necessário proceder à inversão da curva de dispersão das ondas Rayleigh. Para tal utilizou-se a aplicação comercial *SeisOpt ReMi V4.0* (Louie 2001) que contém dois módulos. Utilizou-se o primeiro módulo (*ReMiVspect*) para se obter a curva de dispersão, com base nos registos efetuados, e o segundo (*ReMiDisper*) para inverter essa curva de modo a obter-se os valores de  $V_s$  em função da profundidade. Este módulo permite uma inversão automática da curva de dispersão recorrendo a um algoritmo de otimização do cálculo (Pullammanappallil & Louie 1994).

Numa primeira fase, durante a execução de ensaios no campo, utilizou-se o método automático de modo a obterem-se valores de  $V_{s30}$  preliminares e compará-los com a distribuição das unidades litoestratigráficas. Esta comparação, que serviu para se aferir a qualidade dos resultados em função das unidades presentes, mostrou que os menores valores de  $V_{s30}$  se situaram nas unidades do Holocénico e nos locais de maior espessura das FS.

Numa segunda fase, depois de terminado todo o trabalho de campo, foram novamente invertidas todas as curvas de dispersão com o módulo manual do *ReMiDisper* e recalculados os valores de  $V_{s30}$  e os perfis de  $V_s$ . Este processo manual foi realizado por iteração tendo em conta a espessura das FS (aterros, aluviões) e considerando no modelo inicial um reduzido número de camadas (3-4).

Os registos obtidos para cada um dos locais foram processados com o *ReMiVspect* de forma a obter-se uma curva de dispersão das ondas superficiais. Para cada um deles foi calculada a razão espectral da dispersão da velocidade de fase da onda superficial realizada com base em F-p e nas transformadas de Fourier ao longo de todos os setores. A imagem resultou no domínio frequência-lentidão ou seja no espectro de velocidade.

Procedeu-se à verificação da qualidade de todos os espectros obtidos antes de se proceder ao cálculo das curvas de dispersão. Os espectros de má qualidade, os que não apresentavam uma separação nítida entre as zonas de maior e menor energia, não foram considerados para as fases de cálculo de  $V_{s30}$  e de perfis de  $V_s$ .

De seguida e de acordo com as indicações do manual do *SeisOpt ReMi V4.0* (Louie 2001), esta curva foi "picada" manualmente, ponto a ponto. Na Figura 4.3 apresentam-se dois exemplos de espectros obtidos para um ensaio passivo e para um ativo, nos quais se picaram os locais de transição entre as altas e baixas energias (ensaio passivo) e o local de maior energia (ensaio ativo).

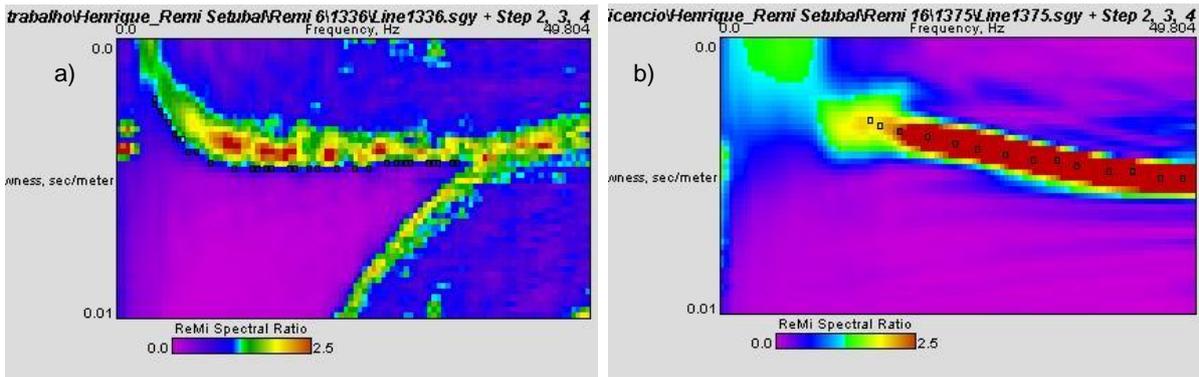


Figura 4.3 – Exemplos de espectros de velocidade com picagens, (a) ensaio passivo; (b) ensaio ativo.

As curvas de dispersão podem apresentar torções ou dobras (*kinks*) que podem ser indicativos de inversões de velocidade em profundidade (Figura 4.4). Sempre que as curvas de dispersão obtidas apresentavam estas formas foi permitida a existência de inversões de velocidade no processo de inversão da curva de dispersão.

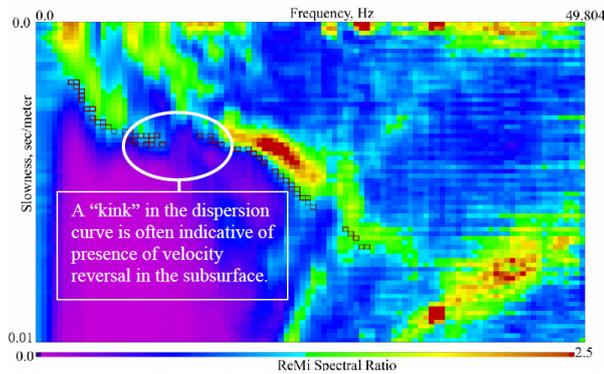


Figura 4.4 - Exemplo de um *kink* presente na curva de dispersão (de Manual SeisOpt ReMi 2006).

Os cálculos efetuados com a aplicação *SeisOpt ReMi V4.0* (Louie 2001) permitiram obter para cada um dos locais ensaiados diferentes perfis de  $V_s$  e diversos valores de  $V_{s30}$ . Este parâmetro é um indicador do valor médio da velocidade das ondas S nos primeiros 30 m de profundidade e é utilizado no Eurocódigo 8 (EC8; IPQ 2010) para classificar os terrenos. O seu cálculo é realizado através da seguinte relação:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{H_i}{V_i}}$$

onde  $H_i$  e  $V_i$  correspondem, respetivamente, à espessura e velocidade das ondas transversais de cada camada considerada. O somatório é realizado até se atingir os 30 m de profundidade.

#### 4.2.4. Valores médios de $V_{s30}$

Em cada local realizaram-se vários ensaios ReMi e obtiveram-se diferentes valores de  $V_{s30}$  tendo-se considerado a média aritmética desses valores como o valor representativo de  $V_{s30}$ . Os valores médios de cada local foram utilizados no cálculo da interpolação de  $V_{s30}$  para o Barreiro e Setúbal.

Na Figura 4.5 apresentam-se exemplos de resultados de  $V_{s30}$  alcançados para um mesmo local e o respetivo valor médio (306 m/s). Calculou-se a interpolação de  $V_{s30}$  com os seus valores médios, de modo a analisar a sua distribuição geográfica. Esta distribuição foi comparada com a disposição geográfica das unidades litoestratigráficas e com as estimativas da espessura das FS e da profundidade de  $N_{SPT60}$ .

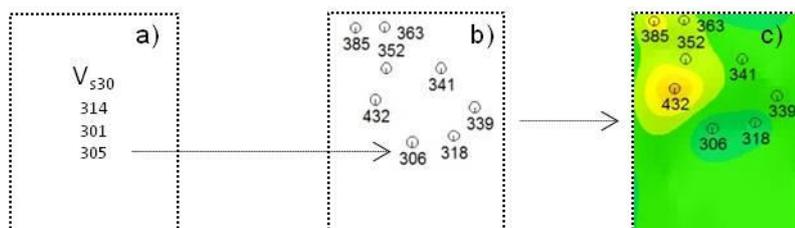


Figura 4.5 - (a) Resultados de  $V_{s30}$  (m/s) de três ensaios ReMi realizados no mesmo local; (b) valores médios de  $V_{s30}$  (m/s); (c) interpolação dos valores médios de  $V_{s30}$  (m/s).

O EC8 (IPQ 2010) classifica os terrenos em função dos valores de  $V_{s30}$  (Anexo VI) pelo que os resultados obtidos permitem classificar os terrenos do Barreiro e Setúbal de acordo com este regulamento.

##### 4.2.4.1. $V_{s30}$ e a espessura das formações superficiais

O valor de  $V_{s30}$  relaciona-se com o tipo de material que constitui a área em que se realizaram os ensaios ReMi. Locais constituídos por maciços rochosos inalterados apresentarão valores elevados de  $V_{s30}$  e áreas com FS espessas deverão exibir valores inferiores de  $V_{s30}$ .

O estudo da relação entre  $V_{s30}$  e a espessura das FS fez-se segundo dois métodos. No primeiro, compararam-se os valores médios estimados de  $V_{s30}$  com as espessuras estimadas das FS; no segundo método estabeleceram-se cinco correlações numéricas segundo os seguintes critérios:

1. Utilizaram-se exclusivamente os resultados dos ensaios ReMi que possuíssem pelo menos uma sondagem localizada a uma distância máxima de 300 m do seu ponto central. Quando se identificaram duas ou mais sondagens situadas a esta distância considerou-se um valor médio para a espessura das FS;
2. Utilizaram-se os ensaios ReMi que preencheram o critério anterior e para os restantes ensaios ReMi (com sondagens a mais de 300 m do seu ponto central) consideraram-se as espessuras das FS obtidas por interpolação desta variável para os seus pontos centrais;
3. Utilizaram-se todos os ensaios ReMi e os valores da espessura das FS obtidas na interpolação desta variável para os seus pontos centrais;
4. Utilizaram-se os ensaios ReMi que possuíssem pelo menos uma sondagem localizada a uma distância máxima de 100 m para as duas áreas de estudo em conjunto (Barreiro e Setúbal);
5. As quatro correlações anteriores calcularam-se para o Barreiro e Setúbal separadamente. Aqui utilizaram-se os ensaios do Barreiro e de Setúbal que cumpriram o critério 1.

#### 4.2.4.2. $V_{s30}$ e $N_{SPT60}$

Os valores de  $V_{s30}$  relacionam-se com a rigidez dos materiais presentes no local onde se realizaram os ensaios ReMi, pelo que será de esperar a existência duma relação entre as distribuições geográficas de  $V_{s30}$  e  $N_{SPT}$ . O número de sondagens disponíveis para as áreas estudadas com ensaios SPT ao longo de 30 m é muito reduzida, pelo que o estabelecimento de uma relação entre  $V_{s30}$  e  $N_{SPT}$  se tornou difícil de concretizar.

Para se estudar a relação entre os valores de  $V_{s30}$  e  $N_{SPT}$ , optou-se por correlacionar os valores de  $V_{s30}$  com a profundidade a que se alcançou o valor de  $N_{SPT60}$ . Na Figura 4.6 apresentam-se duas colunas de solo/rocha: uma em que o valor de  $N_{SPT60}$  foi alcançado a uma profundidade H1 e outra em que essa profundidade foi superior (H2). É provável que o valor de  $V_{s30}$  seja superior na primeira situação, já que a rigidez dos materiais da primeira coluna deverá ser superior à da segunda.

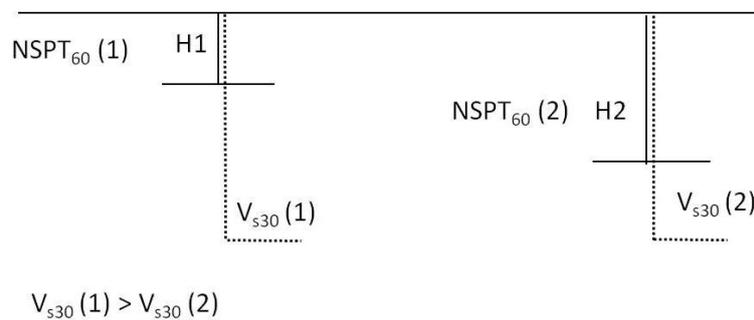


Figura 4.6 - Relação entre os valores médios de  $V_{s30}$  e as profundidades de  $N_{SPT60}$ . H1 e H2 profundidades de  $N_{SPT60}$  (m).

Para se calcular a correlação entre  $V_{s30}$  e  $N_{SPT60}$  utilizaram-se os valores médios de  $V_{s30}$  e as sondagens com ensaios SPT localizadas até 300 m dos pontos centrais dos ensaios ReMi. Estabeleceram-se várias correlações entre as profundidades em que se alcançaram valores de  $N_{SPT60}$  e os valores de  $V_{s30}$ , para cada uma das áreas estudadas e para os dados das duas áreas em conjunto (Barreiro e Setúbal).

#### 4.2.4.3. $V_{s30}$ e H/V

Pretendeu-se comparar a distribuição geográfica de  $V_{s30}$  com a distribuição da espessura das FS obtida a partir dos picos de frequência das curvas H/V ( $F_0$  e  $F_1$ ) de acordo com a relação de Parolai *et al.* (2002) ( $H=108F_0^{-1.551}$ ) (Capítulo III). Para tal analisaram-se as interpolações obtidas com os valores de  $V_{s30}$  e as calculadas para a espessura das FS.

Os valores de  $V_{s30}$  poderão relacionar-se com a profundidade a que se encontra o limite entre as FS e o substrato. Tal como foi referido no Capítulo III, os valores de  $F_0$  ou  $F_1$  das curvas H/V obtidas no Holocénico do Barreiro podem relacionar-se com esse limite (Vicêncio *et al.* 2015). Nesse sentido será de esperar a existência de uma correlação entre estas variáveis. Quando se calcularam duas curvas H/V com picos de frequência ( $F_0$  ou  $F_1$ ) situadas à mesma distância dum ponto central de um ensaio ReMi, considerou-se o valor médio das duas frequências para efeitos do cálculo da correlação de  $V_{s30}$  com  $F_0$  ou  $F_1$ . Apresenta-se igualmente a relação entre as amplitudes dos picos de frequência das curvas H/V e os valores médios de  $V_{s30}$ .

#### 4.2.5. Perfis de $V_s$

Como já foi referido realizaram-se vários ensaios ReMi em cada zona estudada e obtiveram-se vários perfis de  $V_s$  para cada local (Figura 4.7a). Com o objetivo de se obter um perfil de  $V_s$  representativo de cada um desses locais calculou-se um perfil médio. Para tal, consideraram-se todos os perfis de  $V_s$ , calcularam-se médias aritméticas segundo intervalos constantes e simularam-se diferentes intervalos empregues no cálculo dos valores médios  $V_{s30}$  (Figura 4.7b). Com o objetivo de se englobarem no perfil médio todas as variações de velocidade, optou-se por calcular os valores médios segundo intervalos de 0,1 m. Na Figura 4.7c apresenta-se um perfil médio de  $V_s$  obtido com base no cálculo das médias aritméticas segundo intervalos de 0,1 m de todos os perfis obtidos para esse local.

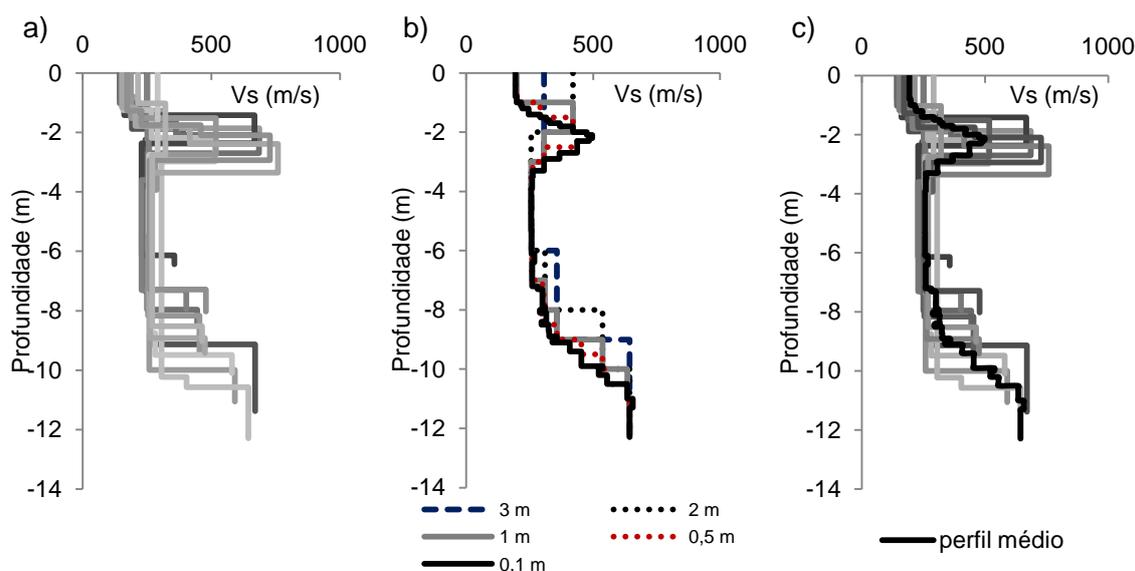


Figura 4.7 - (a) Perfis de  $V_s$  obtidos para um mesmo local; (b) perfis médios de  $V_s$  calculados segundo diferentes intervalos (0,1 m; 0,5 m; 1 m; 2 m e 3 m); (c) perfis de  $V_s$  e perfil médio de  $V_s$  calculado segundo intervalos de 0,1 m.

Tal como para  $V_{s30}$ , foi objetivo estudar a relação entre os perfis de  $V_s$  e as propriedades dos terrenos onde se realizaram os ensaios ReMi. Para tal consideraram-se os seguintes critérios de análise e propriedades geotécnicas:

- Utilização direta dos *logs* das sondagens. Consideraram-se a espessura das FS e os valores dos perfis de  $N_{SPT}$  retirados dos *logs* de sondagens localizadas a menos de 200 m do ponto central dos ensaios ReMi. Os locais de execução das sondagens e dos ensaios ReMi, cujos resultados se compararam, pertenciam à mesma unidade litoestratigráfica. Utilizaram-se os resultados obtidos num ensaio de penetração dinâmica superpesada na comparação dos perfis de  $V_s$  com a rigidez dos materiais;
- Utilização de interpolações de dados dos *logs* de sondagens. Consideraram-se as espessuras das FS e discriminaram-se as espessuras dos aterros e das aluviões. A utilização destas interpolações teve como objetivo permitir a comparação de resultados em locais onde a ausência de sondagens e outros ensaios não permitiram comparações individualizadas entre os ensaios ReMi e as sondagens. Nos cálculos das interpolações utilizaram-se os métodos de Kriging (também designando por Krigagem) e do inverso da potência das distâncias. Nas unidades do Holocénico da cidade de Setúbal consideraram-se duas interpolações para a espessura das FS, uma realizada com as sondagens de toda a área de Setúbal e Mitrena e outra em que se englobaram dados disponibilizados por Coelho (1980). Para os ensaios ReMi realizados em locais para os quais não foi possível obter

informação geotécnica num raio de várias centenas de metros (300 m), não se analisou a relação entre  $V_s$  e as propriedades geotécnicas.

Na análise dos perfis médios estabeleceu-se, sempre que possível, uma correspondência entre os valores de  $V_s$  e as unidades litoestratigráficas correspondentes. Foram consideradas as seguintes unidades: aterros, aterros de elevada rigidez (tipo 2), aluviões, Plistocénico, Pliocénico, Miocénico e Jurássico. Para as secções dos perfis em que não foi possível proceder à distinção entre aterros e aluviões utilizou-se a designação de formações superficiais (FS).

Na Figura 4.8 apresenta-se um exemplo com vários perfis de  $V_s$  obtidos para um mesmo local, com o perfil médio calculado e as unidades litoestratigráficas consideradas: aterros, aterros do tipo 2, aluviões e Pliocénico (Figura 4.8a). Apresentam-se também as espessuras das unidades litoestratigráficas obtidas por interpolação de dados recolhidos dos *logs* das sondagens (Figura 4.8b). Disponibiliza-se igualmente um perfil de  $N_{SPT}$  retirado de um *log* de uma sondagem localizada a menos de 200 m do ponto central dos ensaios ReMi (Figura 4.8c).

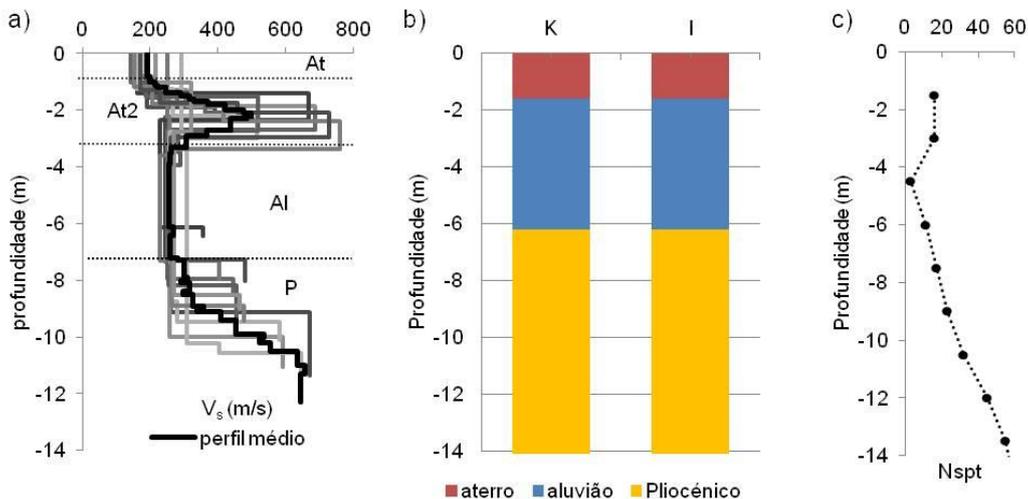


Figura 4.8 - (a) Perfis de  $V_s$  e unidades litoestratigráficas consideradas: At – aterros; At2 – aterros do tipo 2; Al – aluviões; P – Pliocénico; (b) espessuras das unidades litoestratigráficas obtidas por interpolação de *logs* de sondagens (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias); (c)  $N_{SPT}$  de uma sondagem localizada a menos de 200 m do ponto central dos ensaios ReMi.

#### 4.2.5.1. A velocidade das ondas S, o topo do Pliocénico e o relevo

Identificou-se, sempre que presente, o limite entre as FS e o Pliocénico nos perfis médios de  $V_s$ . Com base nestas profundidades elaborou-se uma interpolação relativa à distribuição do topo do Pliocénico. Esta distribuição foi comparada com a interpolação da profundidade do topo do Pliocénico obtida com base nos *logs* das sondagens analisadas. Comparam-se estas duas interpolações com o modelo digital do terreno.

#### 4.2.5.2. A velocidade das ondas S e a espessura das formações superficiais

Pretendeu-se estudar a relação da espessura das FS determinada com base nos perfis de  $V_s$  e calculada com base nos *logs* das sondagens. Identificou-se, sempre que possível, em cada perfil médio de  $V_s$  o limite entre as FS e o substrato. Com base nesses valores procedeu-se ao cálculo da interpolação desses valores com vista à obtenção da variação da espessura das FS.

A interpolação dos valores obtidos nos ensaios ReMi conjuntamente com os das sondagens poderá permitir uma estimativa, com maior rigor, das espessuras das formações superficiais. Nesse sentido, foram elaboradas cartas relativas à espessura das FS com os dados recolhidos nos perfis de  $V_s$  e nos *logs* das sondagens.

#### 4.2.5.3. Caracterização das unidades litoestratigráficas relativamente a $V_s$

Analisaram-se todos os perfis médios de  $V_s$  e identificaram-se as unidades litoestratigráficas presentes em cada um deles. Para esta identificação foram considerados os seguintes fatores: dados geotécnicos (sondagens, estimativa da espessura das FS) e a variação da velocidade das ondas S nos perfis analisados.

Em cada perfil de  $V_s$  e para cada troço pertencente à mesma unidade litoestratigráfica, identificaram-se as velocidades mínimas e máximas das ondas S. Consideraram-se todos os troços pertencentes à mesma unidade litoestratigráfica e calcularam-se os valores médios, mínimo e máximo de  $V_s$ . Calcularam-se igualmente os valores médios dos valores mínimos e máximos e a média de todos os valores obtidos. Estes valores foram comparados com os valores obtidos por outros investigadores em Portugal continental.

#### 4.2.6. Modelos 3D e seções 2D de $V_s$

Pretendeu-se comparar a variação dos valores de  $V_s$  com os valores de  $N_{SPT}$  ao longo de secções horizontais para as cotas de +10 m, 0 m e -10 m (cotas alcançadas pela maior parte das sondagens com ensaios SPT). Foi necessário construir um modelo tridimensional da variação de  $V_s$  e posteriormente calcularam-se os valores de  $V_s$  em planos horizontais segundo cotas topográficas. Para tal identificaram-se as cotas topográficas de todos os pontos centrais dos ensaios ReMi. Com base nos perfis médios de  $V_s$  e utilizando-se o método do inverso da potência das distâncias calculou-se um modelo da distribuição tridimensional desta variável (Figura 4.9).

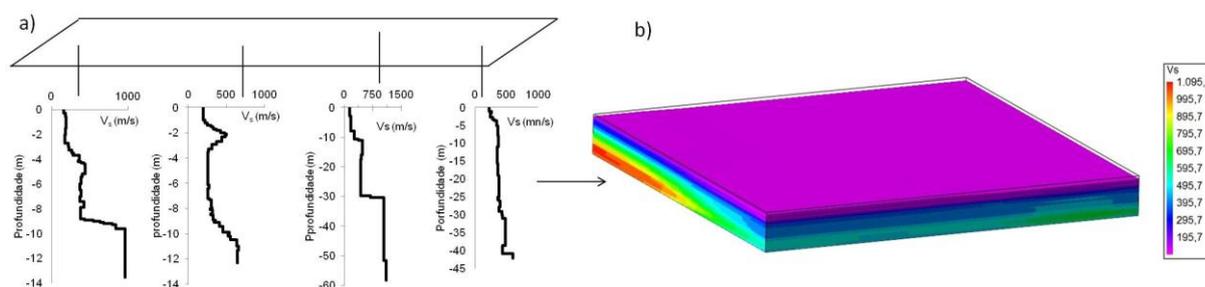


Figura 4.9 - (a) Quatro perfis médios de  $V_s$ ; (b) modelo tridimensional obtido com base nos perfis médios de  $V_s$ .

Na Figura 4.10 apresentam-se exemplos de seções executadas num modelo tridimensional de  $V_s$ , calculado com os quatro perfis médios, para cotas 0 e -10 m.

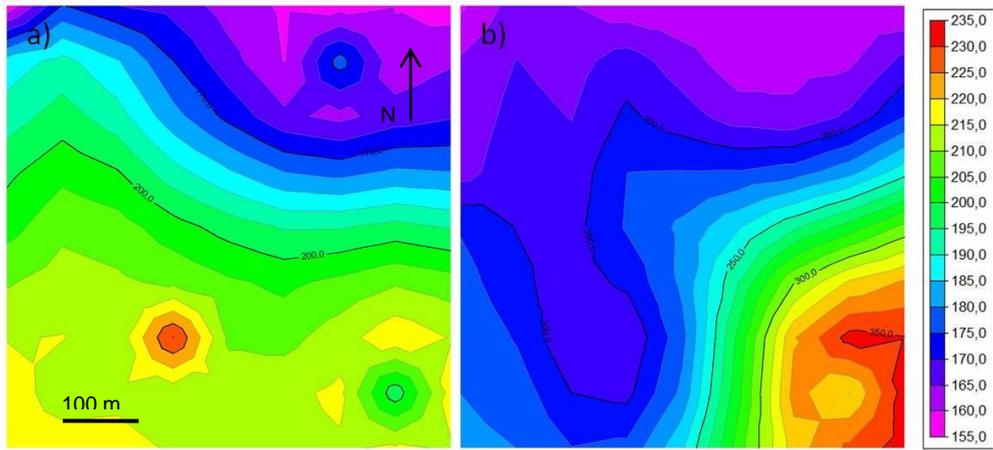


Figura 4.10 - Valores de  $V_s$  obtidos para uma superfície horizontal às cotas (a) 0 m; (b) -10 m.

Compararam-se as grelhas de interpolação de  $V_s$  obtidas para planos horizontais para as cotas de +10, 0 e -10 m com grelhas de interpolação de  $N_{SPT}$  calculadas segundo o mesmo método.

### 4.3. Resultados e discussão

Em função dos critérios estabelecidos em 4.2.1 selecionaram-se 81 locais, 38 no Barreiro e 43 em Setúbal (Figura 4.11) e, para cada um deles, realizaram-se diversos ensaios: 752 ensaios no total, 343 no Barreiro e 409 em Setúbal. Após a observação das curvas de dispersão selecionaram-se 214 registos do Barreiro com a qualidade necessária para o cálculo dos perfis de  $V_s$  e de  $V_{s30}$ . Obtiveram-se resultados para 34 locais divididos pelo Holocénico, Plistocénico e Pliocénico. Dos 409 ensaios realizados em Setúbal selecionaram-se 266 ensaios de 43 locais distribuídos pelo Holocénico, Plistocénico, Pliocénico e Jurássico.

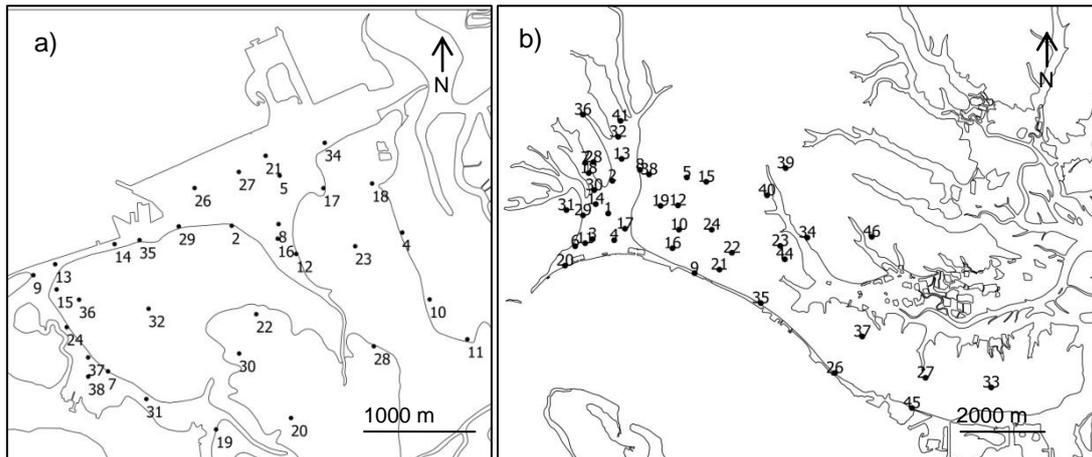


Figura 4.11 – Locais onde se realizaram os ensaios ReMi (a) Barreiro; (b) Setúbal.

#### 4.3.1. Resultados de $V_{s30}$

Disponibilizam-se os resultados de  $V_{s30}$  obtidos de acordo com a metodologia definida em 4.2.3.

A inversão das curvas de dispersão pode realizar-se automaticamente ou manualmente. Durante o trabalho de campo utilizou-se o módulo automático e, numa fase final, o manual. No módulo automático não foram introduzidos constrangimentos relativos ao limite entre as FS e o substrato nem foram permitidas inversões de velocidade. Os perfis de  $V_s$  obtidos automaticamente foram comparados com informação geotécnica disponível (espessura das unidades litoestratigráficas) de modo a verificar a sua congruência com os *logs* de sondagens. Na Figura 4.12 apresentam-se as diferenças obtidas entre os resultados de  $V_{s30}$  calculados automaticamente e manualmente. Verificou-se que as diferenças obtidas são na generalidade inferiores a 50 m/s. No entanto, em alguns casos, observou-se que os valores de  $V_{s30}$  diferiram significativamente, tendo-se obtido valores de  $V_{s30}$  superiores com o módulo manual. Esta diferença poderá estar relacionada com o facto de não se ter permitido inversões de velocidades nos cálculos em modo automático. No modo manual, depois de identificadas as estruturas que são indicativas destas inversões, permitiu-se a inversão de velocidades. Nestes casos os perfis de  $V_s$  mostram a existência de camadas de velocidade elevadas das ondas S que deverão corresponder a estruturas antropogénicas (e.g. condutas, níveis piritosos e de escórias nas áreas industriais). Estas camadas terão sido responsáveis pelos aumentos de  $V_{s30}$  obtidos nestes cálculos efetuados manualmente.

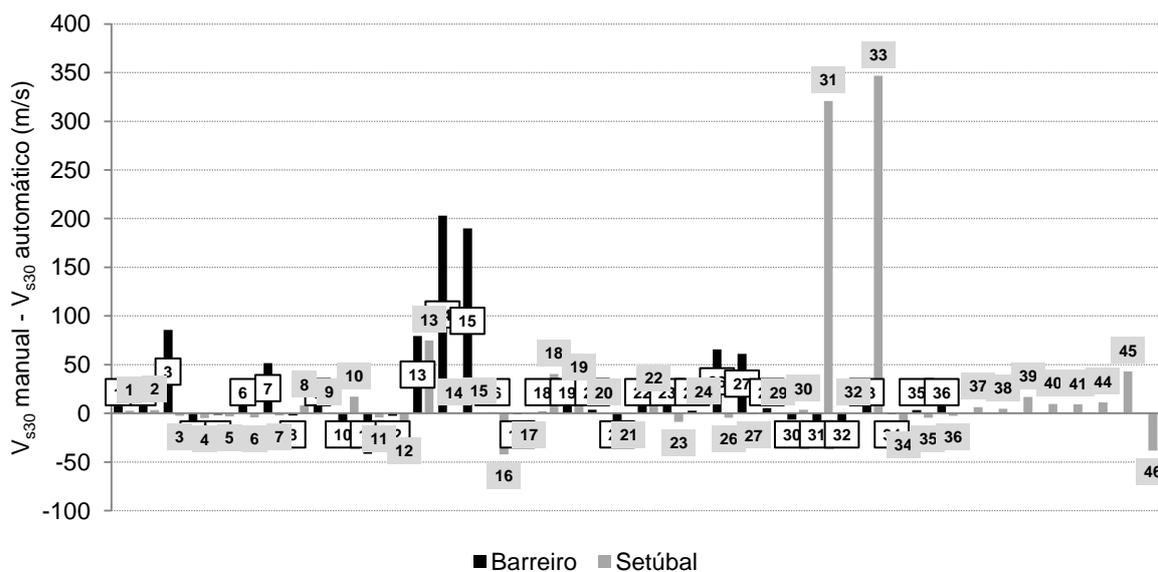


Figura 4.12 - Diferença entre os valores de  $V_{s30}$  obtidos manualmente e automaticamente com a utilização do módulo *ReMiDisper*. Os números correspondem à identificação dos ensaios ReMi.

Foram considerados como resultados finais de  $V_{s30}$  todos os valores revistos manualmente. Nos Anexos VII e VIII apresentam-se os resultados finais de  $V_{s30}$  de todos os ensaios ReMi cujos espectros apresentaram uma separação nítida entre as áreas de maior e menor energia. Nestes anexos apresenta-se também informação relativa ao tipo de ensaio (passivo ou ativo), distância entre os geofones, geologia superficial do local onde se realizaram os registos e duração do registo. Apresentam-se igualmente os valores relativos ao RMS (*root mean square error*) que correspondem à diferença entre as curvas de dispersão teóricas e experimentais em m/s.

Na Figura 4.13 apresenta-se a interpolação efetuada com os valores médios de  $V_{s30}$  para a região do Barreiro. Identificaram-se duas áreas no Holocénico onde os valores de  $V_{s30}$  apresentam velocidades inferiores a 280 m/s, uma no enfiamento da ribeira que atravessa os terrenos da Baía do Tejo S.A. e a outra localizada no terminal fluvial do Barreiro. Aqui os valores de  $V_{s30}$  apresentam velocidades de 220 m/s e as FS apresentam uma espessura de 34 m. Os terrenos pertencentes à Baía do Tejo S.A serão designados no subsequente texto por terrenos da Baía Tejo. No Holocénico do Barreiro observou-se uma variação dos valores de  $V_{s30}$  que poderá estar relacionada com a variação da espessura das FS e com o tipo de material presente (arenoso ou mais argiloso).

Os valores de  $V_{s30}$  superiores a 400 m/s foram obtidos em unidades plio-pleistocénicas com exceção dos ensaios ReMi 4 e 29 que se localizaram em terrenos holocénicos, mas próximos do limite com o Pliocénico, onde as FS poderão ter espessuras reduzidas.

Tendo em conta os valores de referência do EC8 relativos a  $V_{s30}$  (Anexo VI) e as interpolações obtidas, podemos concluir que estas duas áreas do Holocénico, e outras que apresentaram valores de  $V_{s30} < 360$  m/s, pertencerão à classe de terrenos do tipo C. Estas áreas serão as mais vulneráveis à ação sísmica pois podem sofrer efeitos locais de amplificação das ondas sísmicas e potenciar danos em determinadas estruturas.

Esta classe é quase restrita a terrenos do Holocénico, com exceção do ReMi 32 que se localizou no Pliocénico e que apresentou um valor médio de  $V_{s30}$  de 355 m/s.

Os restantes locais pertencerão à classe B ( $V_{s30}$  entre 360 e 800 m/s) e localizam-se essencialmente nos terrenos do Plio-Pleistocénico. A interpolação dos valores médios de  $V_{s30}$  está de acordo com as unidades litoestratigráficas presentes na área do Barreiro. Os valores mais baixos concentraram-se

essencialmente nas unidades do Holocénico e os mais elevados nas do Plio-Plistocénico. As exceções poderão ser consequência da alteração dos materiais, da rigidez das unidades presentes e da espessura das FS.

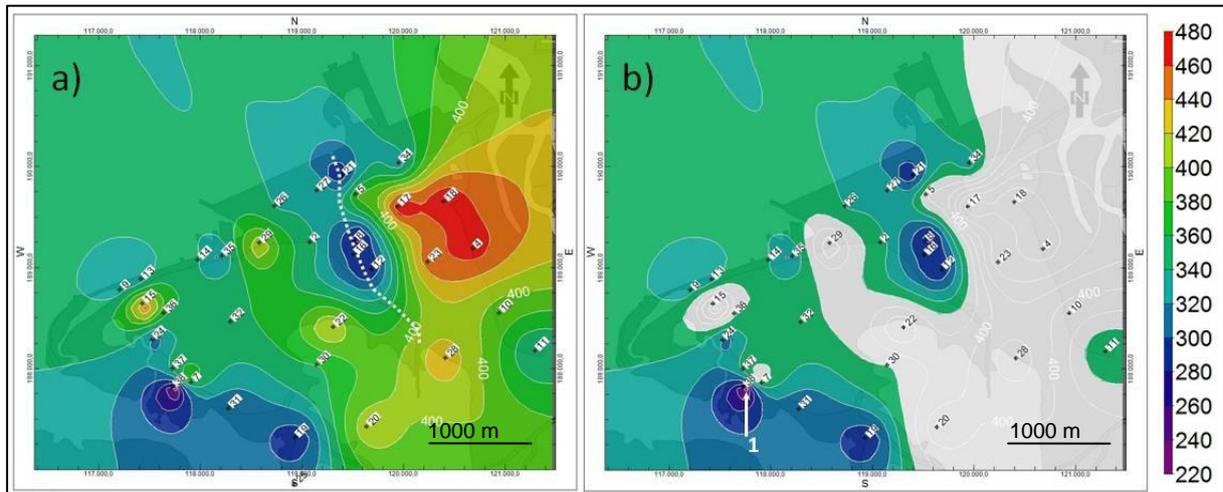


Figura 4.13 – (a) Distribuição no Barreiro dos valores médios de  $V_{s30}$  (m/s) obtida por interpolação segundo o método do inverso da da potência das distâncias. O tracejado a branco representa o troço aproximado da linha de água que atravessa a Baía Tejo; (b) identificação das áreas pertencentes à classe de terrenos do tipo C com valores de  $V_{s30}$  inferiores a 360 m/s; 1 - terminal fluvial do Barreiro onde se obteve um valor de  $V_{s30}$  inferior a 240 m/s.

Em Setúbal identificou-se uma faixa central localizada nos terrenos holocénicos da cidade onde os valores de  $V_{s30}$  se situaram entre os 190 m/s e os 300 m/s (Figura 4.14). Mais uma vez, foi nos locais onde as FS apresentaram maiores espessuras que os valores de  $V_{s30}$  foram menores. Esta faixa central apresentou espessuras de FS por vezes superiores a 30 m (Capítulo II). Esta faixa apresenta uma direção aproximada N-S, acompanha o Holocénico, e apresenta duas áreas com valores de  $V_{s30}$  inferiores a 250 m/s. Estas áreas poderão corresponder a depressões, existentes no topo do Pliocénico, que foram posteriormente preenchidas por aluviões, e poderão corresponder a paleo-depressões.

A oeste desta zona, já em terrenos do Pliocénico, identificou-se uma área em que os valores médios de  $V_{s30}$  apresentaram velocidades inferiores a 350 m/s. Foi mesmo alcançada uma velocidade de 230 m/s no local da realização dos ensaios ReMi 15. Para sul observou-se outra área, que se prolonga até ao Holocénico, em que  $V_{s30}$  também foi inferior a 360 m/s.

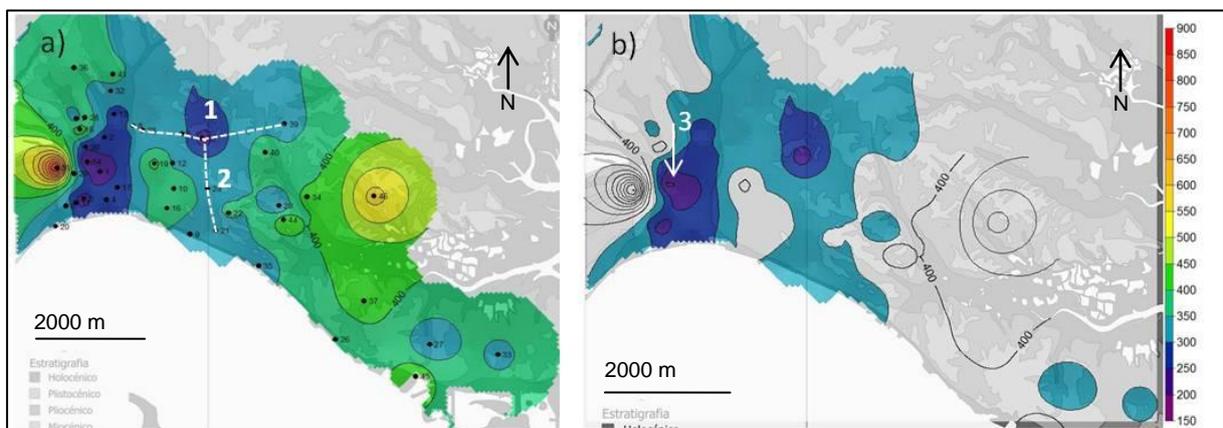


Figura 4.14 - Distribuição em Setúbal (a) dos valores médios de  $V_{s30}$  (m/s) estimados através do método do inverso da distância a uma potência; (b) áreas pertencentes à classe de terrenos do tipo C ( $V_{s30} < 360$  m/s). 1, 2, e tracejado a branco identificam os locais no Plio-Plistocénico onde  $V_{s30}$  foi inferior a 360 m/s; 3 identifica o local onde se obteve  $V_{s30}$  igual 194 m/s, o valor mais baixo de  $V_{s30}$ .

Tendo em conta os valores de referência de  $V_{s30}$  do EC8 (Anexo VI) e as estimativas obtidas, verificou-se que os terrenos pertencentes à classe C ( $V_{s30} < 360$  m/s) se dispõem segundo um núcleo central interrompido por uma área de valores superiores (Figura 4.14b). É na zona W deste núcleo, na cidade de Setúbal, que se concentram os terrenos, numa área aproximada de  $7000 \text{ m}^2$ , em que  $V_{s30}$  apresenta valores inferiores a 200 m/s. Observam-se ainda mais três núcleos isolados onde se obtiveram valores inferiores a 360 m/s. No seu conjunto estas serão as áreas mais propensas à ocorrência de efeitos locais e, por conseguinte, mais vulneráveis à ação sísmica. As restantes zonas repartem-se pelas classes de terrenos B e A do EC8.

No Barreiro e em Setúbal as áreas que apresentam os menores valores médios de  $V_{s30}$  situam-se, com poucas exceções, em unidades do Holocénico e apresentam valores mínimos de 190 m/s na cidade de Setúbal e 230 m/s no terminal fluvial do Barreiro. No entanto, quer no Barreiro quer em Setúbal, existem valores médios de  $V_{s30}$  superiores a 360 m/s (classe B) obtidos em ensaios ReMi realizados no Holocénico, mas têm todos a particularidade de terem sido efetuados perto do limite com o Pliocénico ou de conterem aterros do tipo 2 nas suas colunas de solo.

No Plio-Plistocénico do Barreiro obtiveram-se alguns valores médios de  $V_{s30}$  inferiores a 360 m/s mas perto deste limite (350 m/s). Em Setúbal observaram-se dois alinhamentos no Plio-Plistocénico com velocidades inferiores a 360 m/s: um, com orientação W-E, constituído pelos resultados dos ensaios ReMi 8, 5, 15 e 39 e outro, com orientação N-S, constituído pelos dos ensaios ReMi 21, 24 e 15 (Figura 4.14, tracejados brancos). Pode concluir-se que algumas das características dos materiais presentes podem influenciar os valores de  $V_{s30}$ . Desde logo as unidades litoestratigráficas onde se realizaram os registos ReMi e o seu grau de alteração, a espessura das FS e a rigidez dos materiais presentes. Esta conclusão está de acordo com alguns investigadores (e.g., Volti *et al.* 2016) que observaram uma diminuição dos valores de  $V_{s30}$ , obtidos por diversos métodos (SPAC, SCP, ReMi, SASW) na Austrália, relacionada com a diminuição do grau de consolidação dos sedimentos sobrejacentes ao *bedrock*.

#### 4.3.1.1. $V_{s30}$ e as formações superficiais

Na Figura 4.15 apresentam-se as interpolações dos valores médios de  $V_{s30}$  e da espessura das FS no Barreiro, obtidas com base nos *logs* das sondagens de acordo com a metodologia referida em 4.2.4.1.

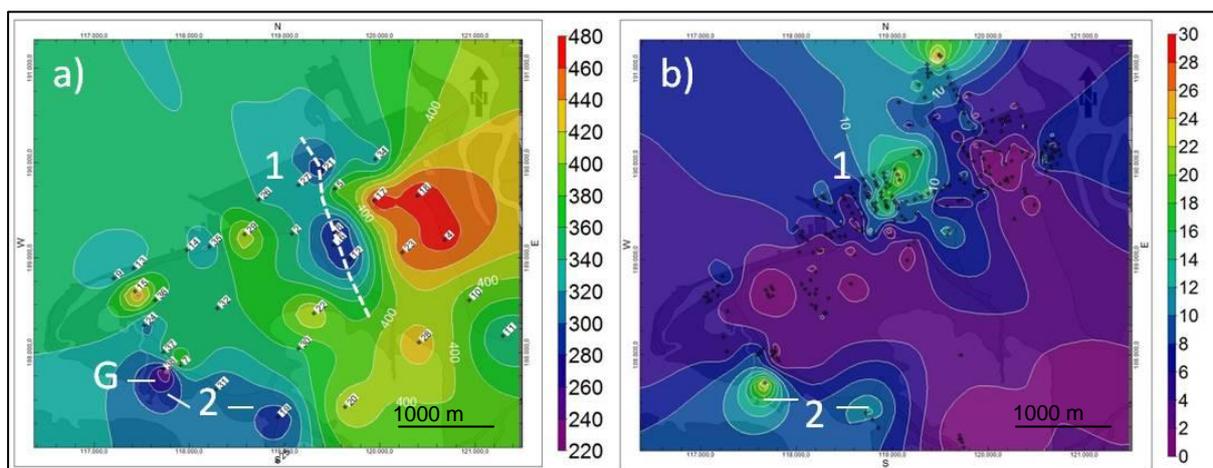


Figura 4.15 - Interpolação para o Barreiro (a) dos valores médios de  $V_{s30}$  (m/s); (b) da espessura das formações superficiais (m) obtidas com base nos *logs* das sondagens. 1 e 2 correspondem a locais onde se observa uma melhor relação entre as propriedades analisadas. G – localização do terminal fluvial do Barreiro. Linha tracejada a branco corresponde à linha de água que atravessa a Baía Tejo.

Observou-se uma estreita relação entre estas duas propriedades, as áreas com menores valores de  $V_{s30}$  coincidiram com as zonas de maiores espessuras de FS. No terminal fluvial do Barreiro, onde as formações superficiais apresentaram uma espessura de 34 m, foi onde se obteve o valor mais baixo de  $V_{s30}$  (230 m/s). Esta relação observou-se igualmente na área da Baía Tejo atravessada por uma linha de água e onde os baixos valores de  $V_{s30}$  correspondem a locais de maiores espessuras de FS.

Na Figura 4.16 apresentam-se as interpolações dos valores médios de  $V_{s30}$  e da espessura das FS para Setúbal. Tal como para o Barreiro, observou-se a existência de uma boa relação entre os valores de  $V_{s30}$  e os dados geotécnicos analisados: às áreas de maiores espessuras de FS correspondem menores valores de  $V_{s30}$ .

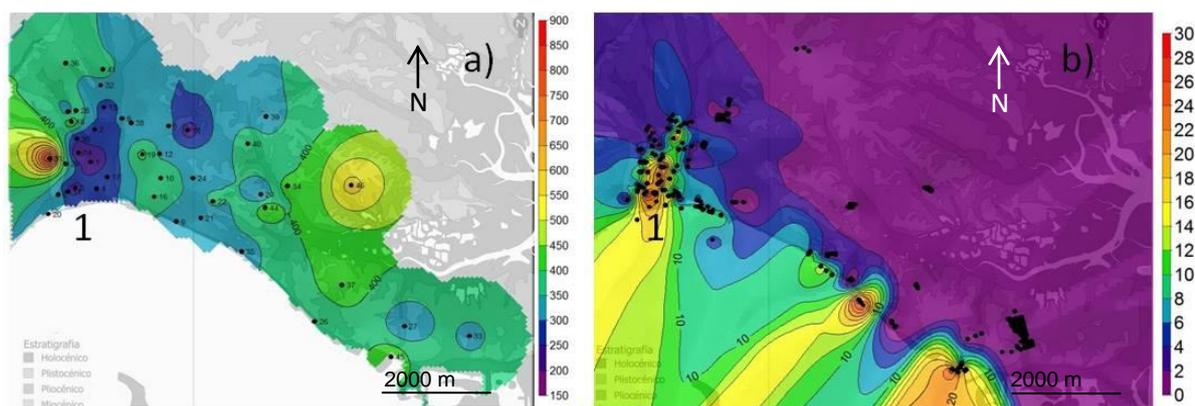


Figura 4.16 - Interpolação para Setúbal (a) dos valores médios de  $V_{s30}$  (m/s); (b) da espessura (m) das formações superficiais obtidas com base nos logs das sondagens. 1 corresponde aos locais onde se observa uma melhor relação entre  $V_{s30}$  e a espessura das FS.

Na Figura 4.17 apresentam-se as correlações calculadas para o Barreiro entre  $V_{s30}$  e a espessura das FS. As que apresentaram melhores coeficientes de correlação ( $R^2$ ) foram as que se estabeleceram de acordo com os dois primeiros critérios definidos em 4.2.4.1. A correlação calculada entre  $V_{s30}$  e as sondagens localizadas a menos de 300 m do seu ponto central foi a que apresentou o melhor  $R^2$  (= 0,6; Figura 4.17a). De acordo com as correlações obtidas, verificou-se que quanto mais espessas foram as FS menores foram os valores de  $V_{s30}$ .

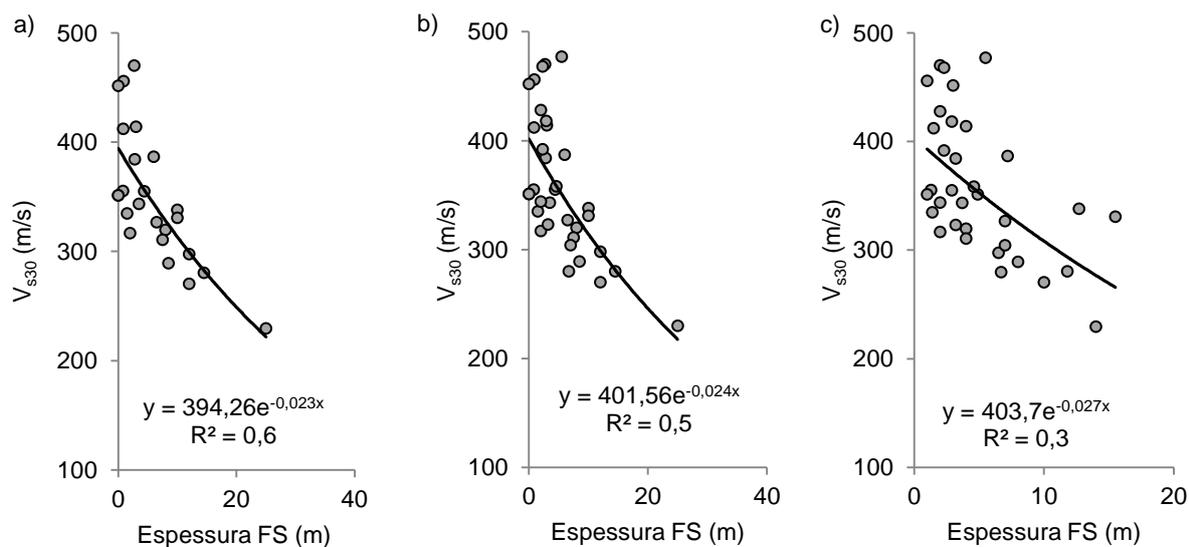


Figura 4.17 - Correlação no Barreiro entre valores médios de  $V_{s30}$  e (a) a espessura das FS retiradas de sondagens localizadas a menos de 300 m do ponto central dos ensaios ReMi; (b) a espessura das FS retiradas de sondagens localizadas a menos de 300 m do ponto central dos ensaios ReMi e com valores interpolados para os restantes pontos centrais; (c) espessura da FS obtidas por interpolação.

Em Setúbal, e seguindo a mesma metodologia, os resultados foram semelhantes, mas com coeficientes de correlação inferiores aos obtidos para o Barreiro (Figura 4.18).

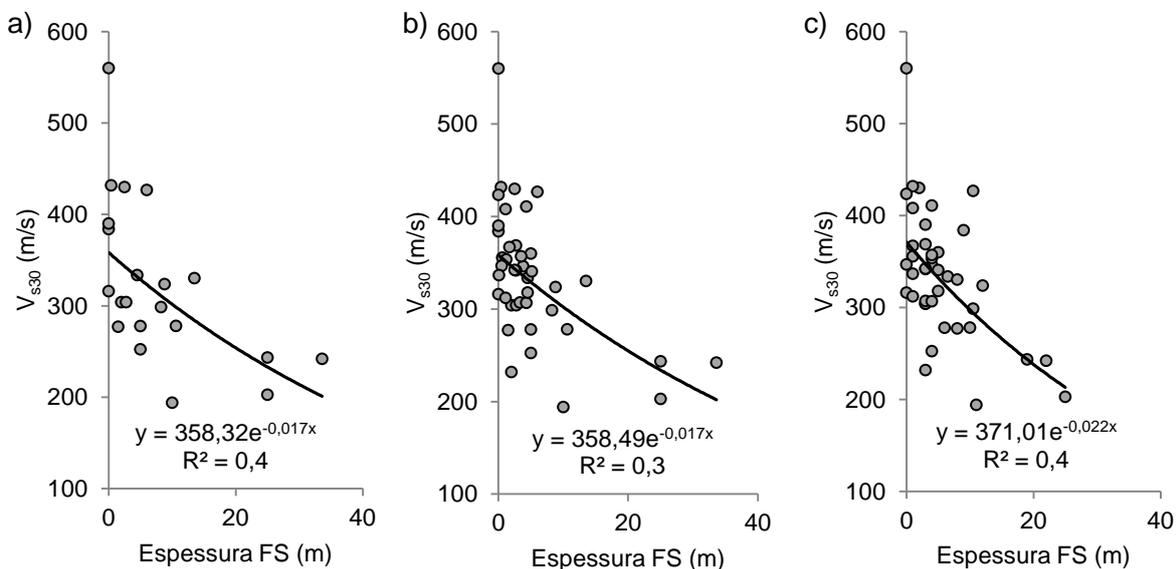


Figura 4.18 - Correlação em Setúbal entre valores médios de  $V_{s30}$  e (a) a espessura das FS retiradas de sondagens localizadas a menos de 300 m do ponto central dos ensaios ReMi; (b) a espessura das FS retiradas de sondagens localizadas a menos de 300 m do ponto central dos ensaios ReMi e com valores interpolados para os restantes pontos centrais; (c) espessura da FS obtidas por interpolação.

Na Figura 4.19 apresentam-se as correlações obtidas entre  $V_{s30}$  e a espessura das FS para o Barreiro e Setúbal em conjunto, considerando-se apenas os ensaios ReMi cujos pontos centrais se localizaram a uma distância de 300 e de 100 m de sondagens.

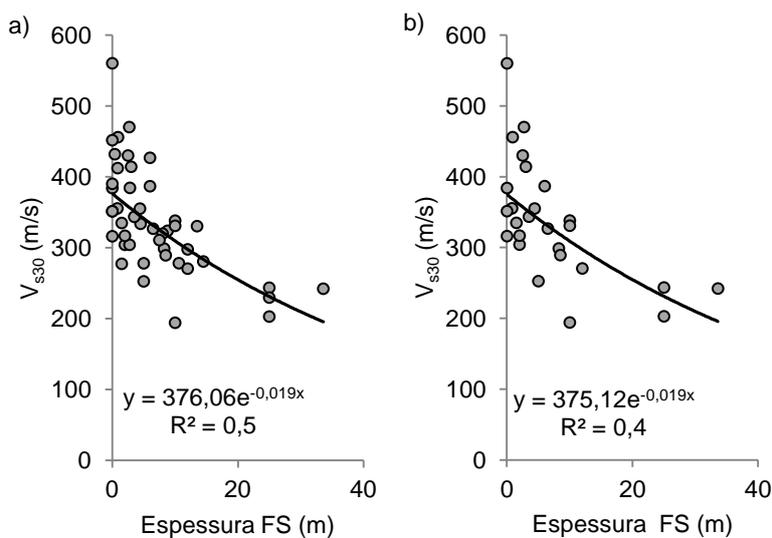


Figura 4.19 - Correlação para o Barreiro e Setúbal entre  $V_{s30}$  e a espessura das FS para uma distância entre o ponto central dos ensaios ReMi e as sondagens de (a) 300 m; (b) 100 m.

#### 4.3.1.2. $V_{s30}$ e a rigidez dos materiais

Na Figura 4.20 apresentam-se as interpolações obtidas no Barreiro com os valores médios de  $V_{s30}$  e com a profundidade de  $N_{SPT60}$ , de acordo com a metodologia definida em 4.2.4.2. Observou-se uma boa relação entre a distribuição destas duas propriedades. As áreas com valores de  $V_{s30}$  inferiores a 360 m/s coincidiram na generalidade com os locais em que a superfície de  $N_{SPT60}$  se encontrou a mais de 14 m de profundidade. No terminal fluvial do Barreiro, onde as formações superficiais apresentaram uma espessura de 34 m, obteve-se o valor mais baixo de  $V_{s30}$  (230 m/s) e foi onde a superfície de  $N_{SPT60}$  alcançou uma profundidade de 36 m. Este comportamento foi também visível nos locais em que a linha de água atravessa a Baía Tejo. Aqui os valores de  $V_{s30}$  foram inferiores a 300 m/s e a superfície de  $N_{SPT60}$  localizou-se a mais de 20 m de profundidade.

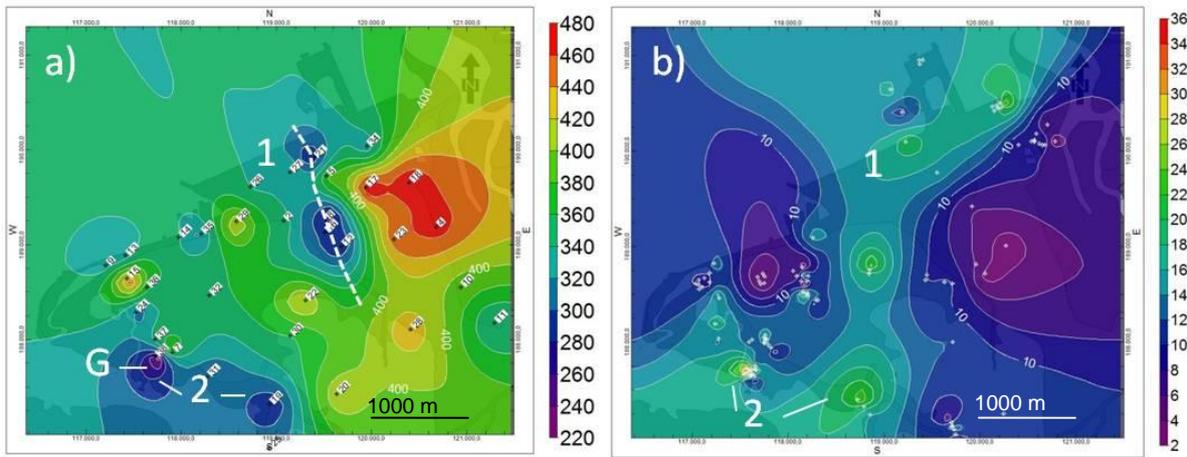


Figura 4.20 - Interpolação para o Barreiro (a) dos valores médios de  $V_{s30}$ ; (b) profundidade de  $N_{SPT60}$ . 1 e 2 correspondem a locais onde se observa melhor a relação entre estas propriedades. G – localização do terminal fluvial do Barreiro. Linha tracejada a branco corresponde à linha de água que atravessa a Baía Tejo.

Em Setúbal obteve-se também uma boa correlação entre a distribuição geográfica de  $V_{s30}$  e da profundidade de  $N_{SPT60}$  (Figura 4.21). De um modo geral, os locais em que os valores de  $V_{s30}$  foram inferiores as 300 m/s corresponderam a profundidades de  $N_{SPT60}$  superiores a 18 – 20 m.

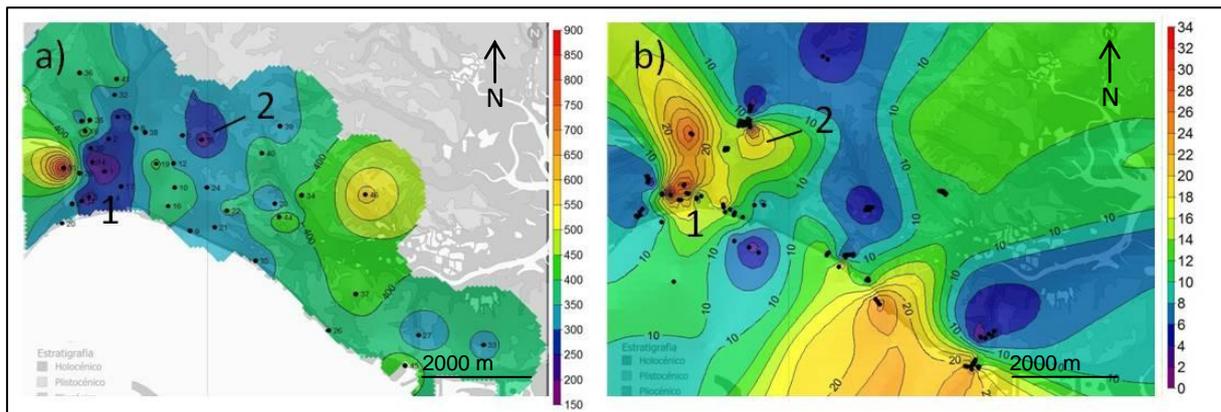


Figura 4.21 - Interpolação para Setúbal (a) dos valores médios de  $V_{s30}$  (m/s); (b) profundidade de  $N_{SPT60}$  (m). 1 e 2 correspondem a locais onde se observa uma melhor correlação entre estas propriedades dos solos.

Na Figura 4.22 apresentam-se as correlações numéricas obtidas entre os valores médios de  $V_{s30}$  e a profundidade de  $N_{SPT60}$  segundo a metodologia definida em 4.2.4.2. No Barreiro obteve-se um coeficiente de correlação entre as duas variáveis de 0,8 (Figura 4.22a) e em Setúbal de 0,4 (Figura

4.22b). Na relação obtida para o conjunto dos pontos Barreiro e Setúbal obteve-se um coeficiente de correlação de 0,5 (Figura 4.22c).

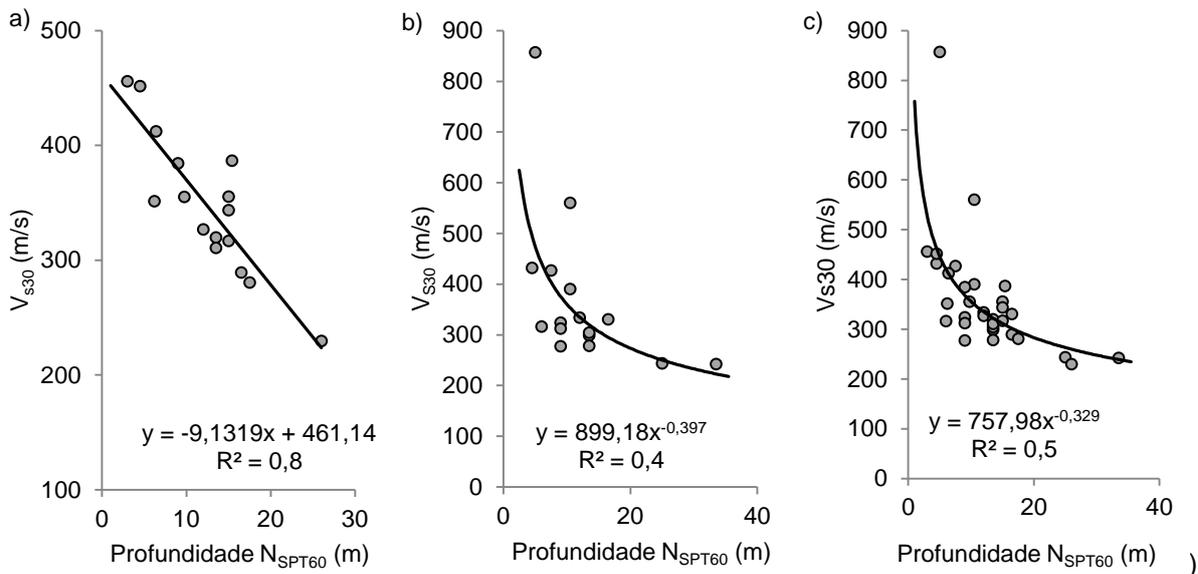


Figura 4.22 - Correlações obtidas entre os valores médios de  $V_{s30}$  e a profundidade de  $N_{SPT60}$  para (a) Barreiro; (b) Setúbal; (c) Barreiro e Setúbal. Consideraram-se apenas os ensaios ReMi com sondagens localizadas a menos de 300 m de distância do seu ponto central.

### 4.3.1.3. $V_{s30}$ e as curvas H/V

Na Figura 4.23 apresenta-se os valores médios estimados de  $V_{s30}$  e os picos de frequência interpolados obtidos a partir das curvas H/V para o Barreiro. Consideraram-se os picos de frequência  $F_0$  (Figura 4.23b) e os valores de  $F_0$  e  $F_1$  (Figura 4.23c) que se relacionaram com o limite entre o Holocénico e o Pliocénico do Barreiro (Capítulo III) (Vicêncio *et al.* 2015). Aos locais com valores de  $V_{s30}$  mais elevados (superiores a 400 m/s) correspondem picos de frequência superiores a 5 Hz. Às zonas com  $V_{s30}$  inferiores as 340 m/s associam-se picos de frequência inferiores a 3 Hz. Observou-se que nos locais onde as curvas H/V não apresentaram picos bem definidos, comportamento típico de maciços rochosos, se obtiveram valores de  $V_{s30}$  superiores a 340 m/s. O comportamento destas duas variáveis permite concluir que variam de modo semelhante: para frequências elevadas dos picos das curvas H/V, verificam-se valores de  $V_{s30}$  elevados e, à medida que os primeiros decrescem, os segundos também decrescem.

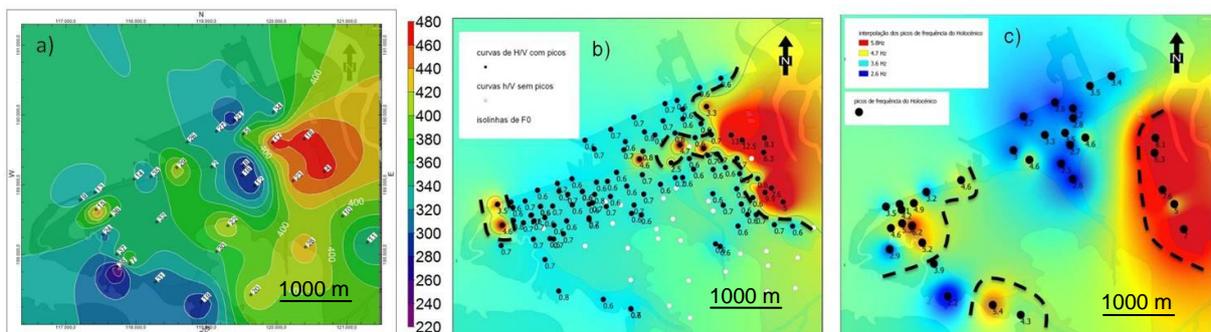


Figura 4.23 - Valores obtidos por interpolação para o Barreiro de (a) valores médios de  $V_{s30}$ ; (b) valores de  $F_0$ ; (c) valores de  $F_0$  e  $F_1$  relacionados com o limite entre o Holocénico e o Pliocénico.

Na Figura 4.24 apresentam-se os valores médios estimados de  $V_{s30}$  e das espessuras das FS do Holocénico calculadas com base nos picos de frequências das curvas H/V (segundo a metodologia

definida em 4.2.4.3). Verificou-se que aos locais com maiores valores de  $V_{s30}$  correspondem, na generalidade, locais com menor espessura de FS.

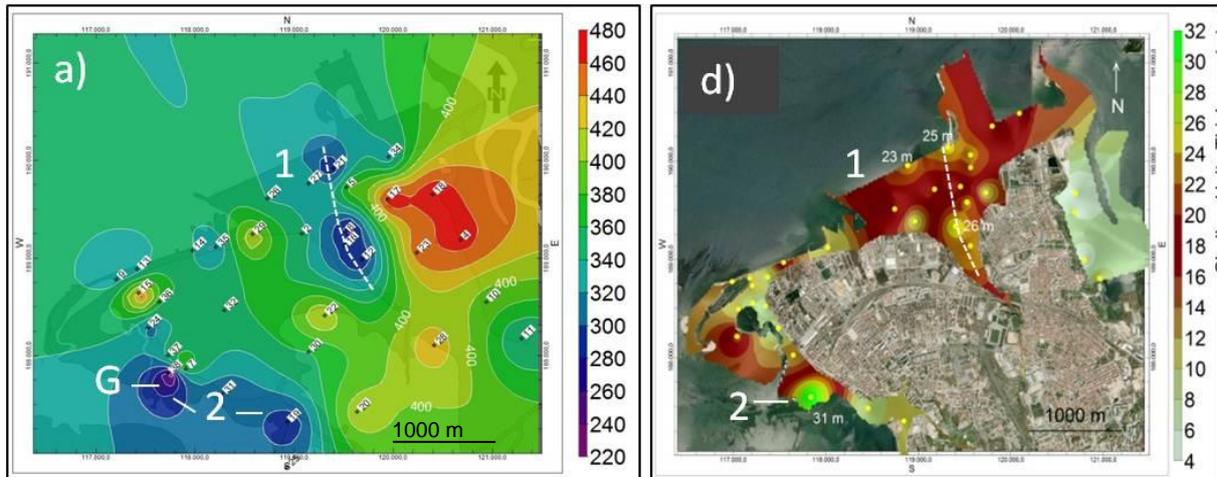


Figura 4.24 - Interpolação para o Barreiro (a) dos valores médios de  $V_{s30}$  (m/s); (b) da espessura (m) das FS obtidas com base em  $F_0$  e  $F_1$  das curvas H/V do Holocénico do Barreiro. 1 e 2 correspondem a locais onde se observa uma melhor correlação entre as várias propriedades dos solos. G – localização do terminal fluvial do Barreiro. Linha tracejada a branco corresponde à linha de água que atravessa a Baía Tejo.

Na Figura 4.25 apresenta-se a correlação obtida entre os valores das frequências dos picos das curvas H/V ( $F_0$  e  $F_1$ ) e  $V_{s30}$  de acordo com a metodologia definida em 4.2.4.3. Apresenta-se igualmente a relação obtida entre os valores médios de  $V_{s30}$  e os valores das amplitudes dos respetivos picos de frequência. Estas correlações numéricas foram obtidas exclusivamente com valores médios de  $V_{s30}$  e com as frequências associadas ao limite entre as FS e o Pliocénico do Barreiro ( $F_0$  e  $F_1$ ). O coeficiente de correlação obtido entre as frequências dos picos das curvas H/V e os valores médios de  $V_{s30}$  foi de 0,6 (Figura 4.25a). Verificou-se, para aumentos das frequências dos picos das curvas H/V, relacionados com o limite entre as FS e o Pliocénico, um aumento dos valores de  $V_{s30}$ . Embora com um menor coeficiente de correlação pode também concluir-se que para valores elevados de  $V_{s30}$  correspondem maiores amplitudes de H/V (Figura 4.25b). Segundo alguns investigadores os valores de  $V_{s30}$  correlacionam-se bem com amplificações locais (e.g., Mucciarelli & Gallipoli 2006, Odum *et al.* 2013).

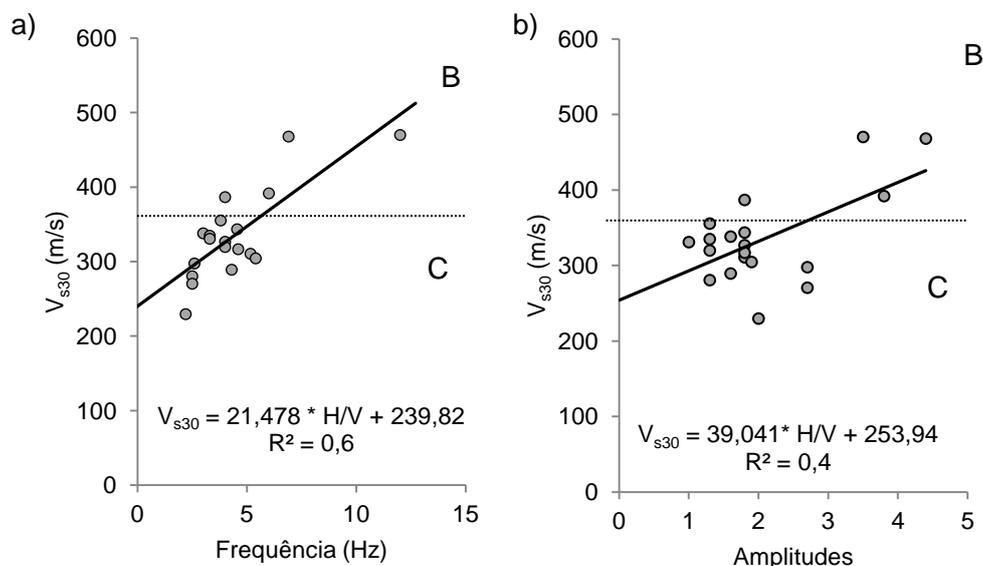


Figura 4.25 - Correlações entre os valores das curvas H/V e valores médios de  $V_{s30}$  para o Holocénico do Barreiro: (a) frequências de pico de H/V; (b) amplitudes dos picos de frequência de H/V. B e C – classificação dos terrenos segundo o EC8.

McNamara *et al.* (2014) e Stephenson *et al.* (2015) correlacionaram valores médios de  $V_{s30}$  obtidos na Virgínia (EUA) com picos de frequência de curvas H/V (HVSRS) (Figura 4.26). McNamara *et al.* (2014) obtiveram um coeficiente de correlação de 0,9.

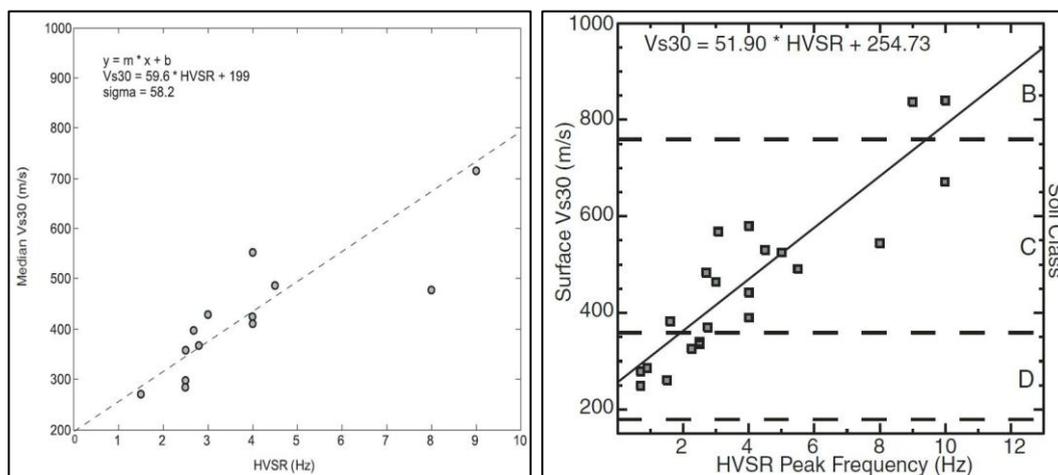


Figura 4.26 - Correlação entre valores médios de  $V_{s30}$  e picos de frequência de curvas H/V na Virgínia (EUA): (a) de Stephenson *et al.* (2015); (b) de McNamara *et al.* (2014).

Verifica-se que para as mesmas frequências, os valores de  $V_{s30}$  obtidos por Stephenson *et al.* (2015) apresentam valores superiores, o que poderá ser devido ao facto de aquele estudo ter sido realizado numa área constituída por rochas metamórficas do Proterozoico e Paleozoico.

A relação obtida para o Barreiro (Figura 4.25a) poderá ser utilizada para se estimar os valores de  $V_{s30}$  para o Holocénico, desde que o pico de frequência utilizado esteja associado ao limite entre as FS (Holocénico) e o substrato (Pliocénico).

A relação alcançada entre  $V_{s30}$  e as amplitudes das curvas H/V (Figura 4.25) está de acordo com os valores médios das amplitudes obtidos por Mucciarelli & Gallipoli (2006) (Figura 4.27). Na relação obtida no presente estudo as amplitudes correspondentes ao tipo de terreno B (segundo o EC8), com exceção de uma situação, apresentaram amplitudes superiores a 3. O valor médio obtido por Mucciarelli & Gallipoli (2006) localizou-se entre 3,41 e 3,65. No Barreiro todos os locais do tipo C apresentaram valores inferiores a 3 e Mucciarelli & Gallipoli (2006) obtiveram valores de amplitudes entre 2,67 e 2,92.

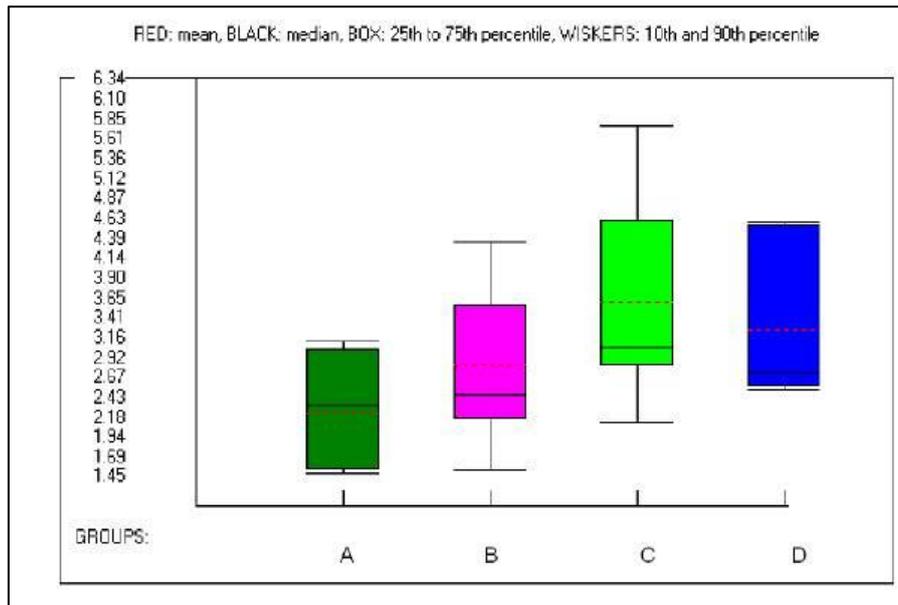


Figura 4.27 - Distribuição das amplitudes máximas de HVSR e HVNR agrupadas por classes de terrenos segundo EC8 (de Mucciarelli & Gallipoli 2006).

#### 4.3.2. Perfis verticais de $V_s$

Os perfis de  $V_s$  foram calculados para o Barreiro e Setúbal de acordo com a metodologia definida em 4.2.5. Nos Anexos IX e X apresentam-se os perfis de  $V_s$  obtidos para cada um dos locais estudados, bem como os respetivos perfis médios.

Alguns perfis apresentaram inversões de velocidade em profundidade, devido à variação da rigidez dos materiais que constituem as unidades litoestratigráficas. Consideraram-se dois tipos de inversões: um associado exclusivamente a aterros designado por tipo A (Figura 4.28), e outro, designado por tipo B, associado a pequenas heterogeneidades e que pode estar presente em todas as unidades litoestratigráficas.

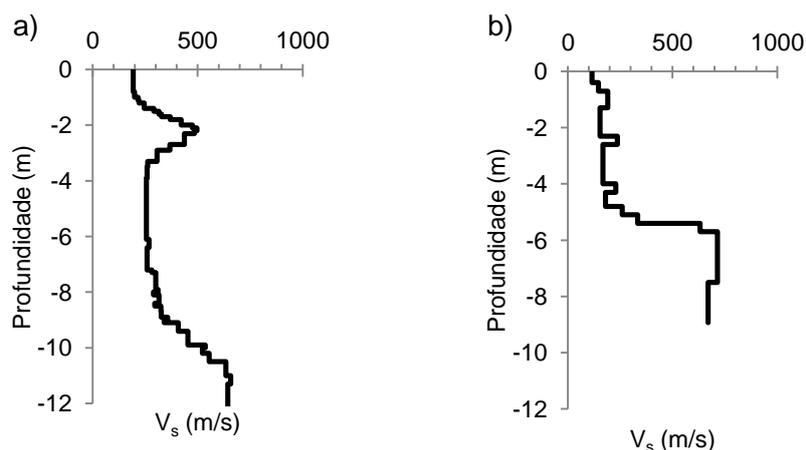


Figura 4.28 - Exemplos de Inversões da velocidade das ondas S ao longo de perfis médios. (a) tipo A - característico de alguns aterros; (b) tipo B - pode estar presente em todas as unidades litoestratigráficas.

A inversão do tipo A resultará da existência de reforços estruturais e de aterros compactados nos primeiros metros de profundidade. Gandolfo (2011) e Barros *et al.* (2012) observaram este tipo de comportamento na caracterização geotécnica de aterros quando utilizaram a técnica do MASW para obterem perfis de  $V_s$  e observaram inversões na velocidade das ondas S (Figura 4.29). Executaram

sondagens nos locais dos aterros e concluíram que estas inversões seriam consequência da presença de materiais mais rígidos que o terreno natural subjacente.

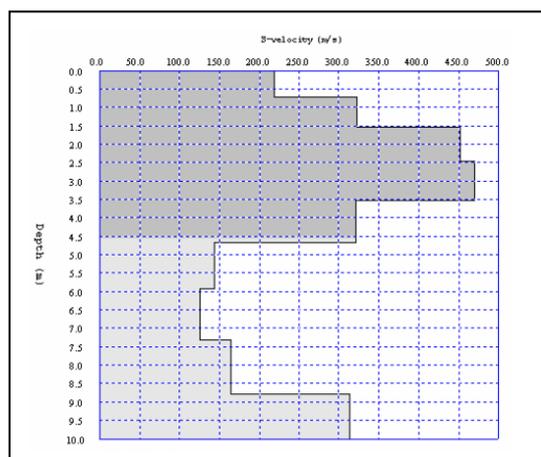


Figura 4.29 - Perfil de  $V_s$  (m/s) obtido com a técnica MASW (de Gandolfo 2011).

Na Figura 4.30 identificam-se os locais no Barreiro que apresentaram inversões dos perfis de  $V_s$  do tipo A. Este comportamento restringe-se, com uma exceção, aos terrenos do Holocénico no antigo parque da CUF e ao terminal fluvial do Barreiro, áreas fortemente intervencionadas pela atividade humana. Os perfis de  $V_s$  obtidos com o ensaio ReMi 27 no Barreiro (Anexo IX) apresentaram uma camada superficial com uma espessura aproximada de 4 m e com velocidades superiores a 500 m/s. A colocação de aterros neste local com uma espessura de 18 m, entretanto removidos, poderá ter compactado estes materiais.

A constituição destes materiais poderá também explicar as inversões de velocidade. Os aterros presentes na área do Barreiro têm grande desenvolvimento na antiga área industrial e são constituídos por materiais muito heterogêneos que variam em função do local e com alguma aleatoriedade (Geocontrole 1982, 2001a). São constituídos por solos arenosos dragados do Tejo, materiais resultantes de desmontes e fragmentos líticos. Podem estar também presentes materiais piritosos ou fosfogesso e escórias que podem atingir 7 m de espessura (ACE Golder Associates Portugal 2011).

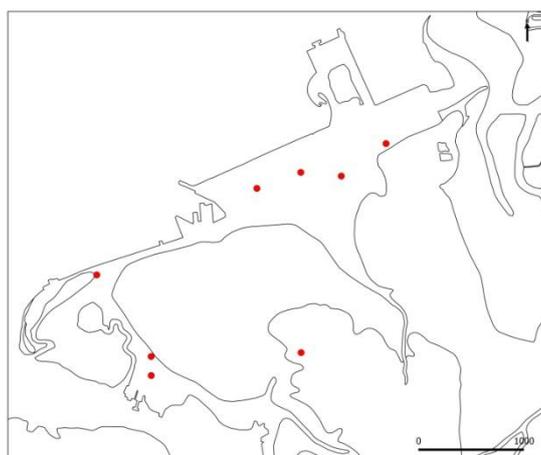


Figura 4.30 - Localização no Barreiro dos ensaios que apresentaram inversões de  $V_s$  (do tipo A).

As inversões do tipo B dependem das características naturais das unidades litoestratigráficas. As aluviões do Barreiro e de Setúbal podem apresentar uma estrutura irregular e aleatória não exibindo horizontes estratigráficos contínuos. Podem possuir uma composição granulométrica heterogénea (Geocontrole 1982, 2001a) e apresentar variações laterais de fácies materializadas por geometrias pouco regulares assumindo frequentemente formas lenticulares. Estas características geotécnicas podem ser responsáveis pela existência de pequenas inversões de velocidade com a profundidade.

Santisteban *et al.* (2012) realizaram ensaios ReMi numa área urbana com vista à elaboração de um perfil de rigidez do material de interesse. Obtiveram inversões de  $V_s$  relacionadas com a alternância de níveis arenosos com níveis mais ricos em materiais mais finos (Figura 4.31). Segundo estes autores, a área analisada caracterizou-se por uma grande variabilidade lateral de fácies que deu origem a um perfil de rigidez muito heterogéneo e com níveis de menor consistência sob outros de maior rigidez. Observaram igualmente que os níveis argilosos apresentavam menores velocidades de  $V_s$  que os arenosos. Também Odum *et al.* (2013) obtiveram perfis de  $V_s$  com inversões de velocidades em ensaios ReMi associadas a aterros superficiais com espessuras entre 1 e 3.

As inversões do tipo B obtidas no Barreiro e Setúbal poderão corresponder a situações similares, em que o material apresentará heterogeneidade nas unidades litoestratigráficas presentes.

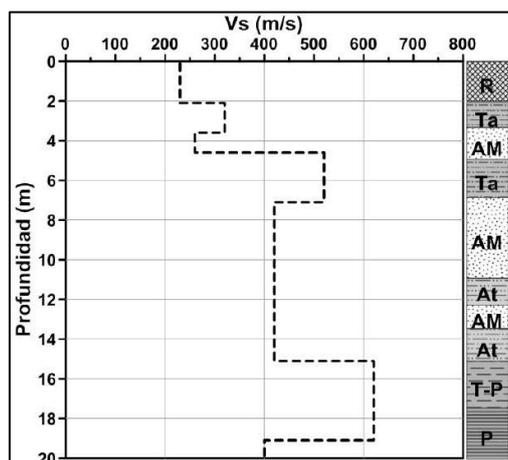


Figura 4.31 - Perfil de  $V_s$  obtido com a técnica ReMi (de Santisteban *et al.* 2012). R – Aterro; P – argilas duras; AM - <25% finos; At 25-40 % finos; Ta - 40-60 % finos; T -> 60% finos.

A observação dos perfis de  $V_s$  obtidos para o Barreiro e Setúbal (Anexos IX e X) permite-nos concluir que existe uma proximidade entre os limites das unidades litoestratigráficas definidos com base nos perfis de  $V_s$  e os que foram estabelecidos com dados geotécnicos (*logs* de sondagens, interpolação de espessuras das FS). Em alguns casos existe mesmo uma sobreposição dos resultados obtidos, por exemplo nos ensaios ReMi 8 e 23 no Barreiro e no ReMi 29 em Setúbal.

A inversão das curvas de dispersão foi realizada manualmente e, sempre que os resultados obtidos não se revelaram de acordo com a informação geotécnica disponível, foi introduzida no modelo de partida o limite entre as FS e o substrato. No entanto obtiveram-se, na maior parte dos casos, diferenças de profundidade entre os limites identificados nos perfis de  $V_s$  e os que foram identificados com dados geotécnicos. Essas diferenças dever-se-ão, provavelmente, à irregularidade das unidades litoestratigráficas que podem apresentar variações laterais de fácies (Geocontrole 1982, 2001a).

#### 4.3.2.1. Perfis médios de $V_s$ , topo do Pliocénico e o relevo

Na Figura 4.32 apresentam-se os resultados das interpolações efetuadas com as cotas do limite entre as FS e o topo do Pliocénico para o Barreiro. Estas cotas foram identificadas nos perfis médios de  $V_s$  (Anexo IX) e nos *logs* das sondagens (Capítulo II). Apresenta-se também o modelo digital do terreno calculado pelo método da triangulação para uma malha de 25x25x5 m.

As interpolações apresentam uma distribuição semelhante, bem visível na curva de nível dos 10 m com um comportamento semelhante e que segue, aproximadamente, o limite entre o Pliocénico e o Holocénico. Observando-se a distribuição da cota dos zero metros, verifica-se que os dois métodos utilizados na determinação do topo do Pliocénico apresentaram resultados idênticos: é na Baía Tejo e no terminal fluvial do Barreiro que o topo do Pliocénico apresenta cotas mais baixas.

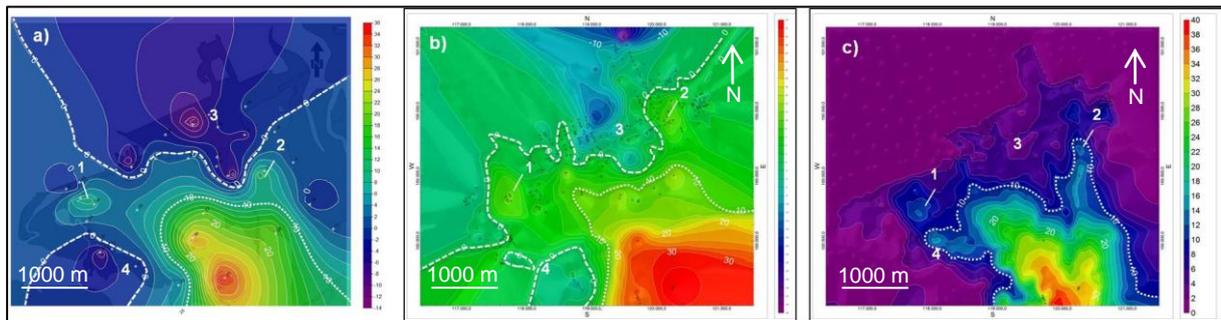


Figura 4.32 - (a) Cotas do topo do Pliocénico no Barreiro obtidas com base nos perfis médios de  $V_s$  (m/s); (b) cotas (m) do topo do Pliocénico calculadas com base nos *logs* das sondagens; (c) modelo digital do relevo calculado pelo método da triangulação. As linhas ponteadas a branco correspondem à cota 10 m. Linhas tracejadas a branco correspondem à cota zero. A numeração 1, 2, 3 e 4 a branco corresponde a locais com comportamentos idênticos.

Na Figura 4.33 apresentam-se as interpolações obtidas, para Setúbal, com as cotas do limite entre as FS e o topo do Pliocénico identificadas nos perfis médios de  $V_s$  (Anexo X) e nos *logs* das sondagens (Capítulo II). Apresenta-se também o modelo digital do terreno da região de Setúbal e Mitrena calculado pelo método da triangulação segundo uma grelha 25x25x5 m.

Tal como para o Barreiro, verifica-se existir uma boa relação entre a distribuição do topo do Pliocénico determinado com os perfis de  $V_s$  e com as sondagens (Figura 4.33). Nesta Figura identificam-se duas áreas presentes nas três interpolações que apresentam comportamento semelhante: uma (1 na Figura 4.33) onde o topo do Pliocénico se encontra a cotas inferiores e outra (2 na Figura 4.33) onde as cotas do topo do Pliocénico são superiores. Esta área tem uma expressão morfológica bem marcada no terreno segundo uma orientação N-S.

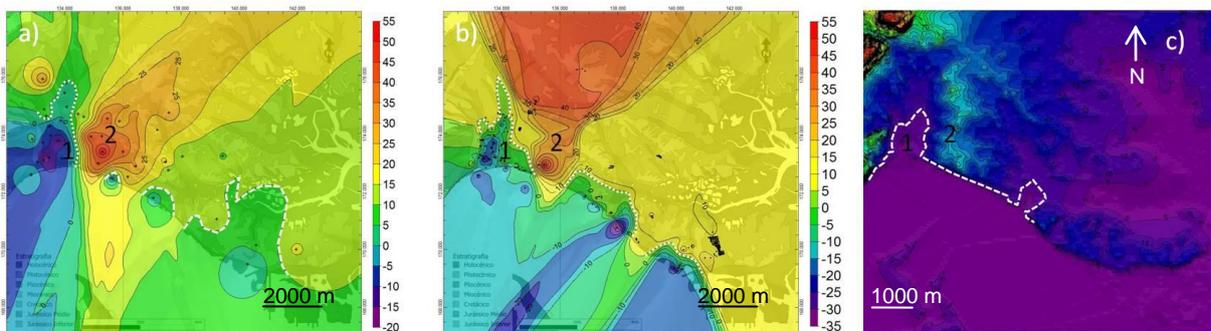


Figura 4.33 - (a) Cotas (m) do topo do Pliocénico em Setúbal obtidas com base nos perfis médios de  $V_s$ ; (b) cotas (m) do topo do Pliocénico calculadas com base nos *logs* das sondagens; (c) modelo digital do relevo obtido pelo método da triangulação. As linhas ponteadas a branco correspondem à cota 5 m. Linha tracejada a branco corresponde à cota 10 m. Os números 1 e 2 correspondem a locais com comportamentos idênticos.

#### 4.3.2.2. Perfis médios de $V_s$ e a espessura das formações superficiais

Na Figura 4.34 apresentam-se as espessuras das FS obtidas no Holocénico do Barreiro de acordo com a metodologia descrita em 4.2.5.2. O ensaio ReMi 27 executado no Barreiro apresentou uma profundidade máxima de 17,8 m sem ter alcançado o Pliocénico (Anexo IX, Figura A9.24). Considerando os 17,8 m como a profundidade a que se encontra o topo do Pliocénico (na realidade deverá ser superior), calculou-se a interpolação da espessura das FS com base nos perfis de  $V_s$  (Figura 4.34a). Verifica-se a existência de uma relação entre a distribuição das profundidades obtidas com base nos perfis de  $V_s$  e com base nos *logs* das sondagens.

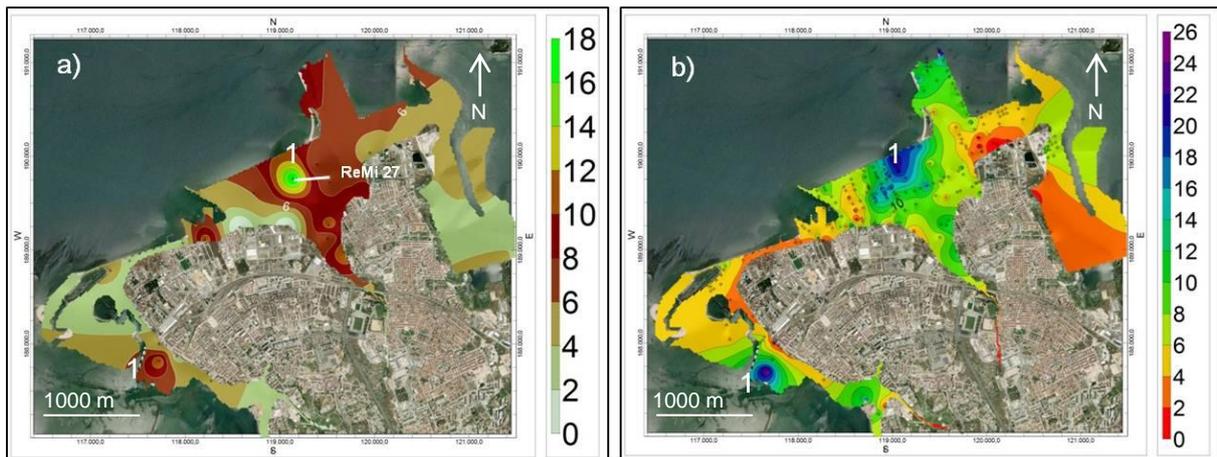


Figura 4.34 - Espessura das FS no Barreiro obtidas com base (a) nos perfis de  $V_s$ ; (b) nos *logs* das sondagens. 1 – Locais em que o topo do Pliocénico está mais profundo.

As diferenças existentes entre as duas interpolações poderão resultar do facto da maior parte dos ensaios ReMi não terem sido realizados nos locais das sondagens e também devido às variações laterais de fácies, que se materializam por geometrias irregulares (Geocontrolo 1982, 2001a). Segundo Dias *et al.* (1997) o topo do Pliocénico desta região terá sido erodido há 18.000 anos, quando o nível do mar se encontrava 120 m abaixo do atual. Este processo deverá ter formado paleo-relevos e paleo-depressões responsáveis por irregularidades do substrato e conseqüente variação da espessura das FS.

A interpolação dos valores obtidos nos ensaios ReMi conjuntamente com os das sondagens permite o cálculo, com maior rigor, das espessuras das formações superficiais (Figura 4.35). A interpolação calculada revela coerência com a distribuição das várias unidades litoestratigráficas: as áreas com maiores espessuras de FS situam-se junto das principais linhas de água e a isolinha dos 4 m de espessura das FS apresenta um padrão de distribuição semelhante ao do limite do Pliocénico com o Holocénico.

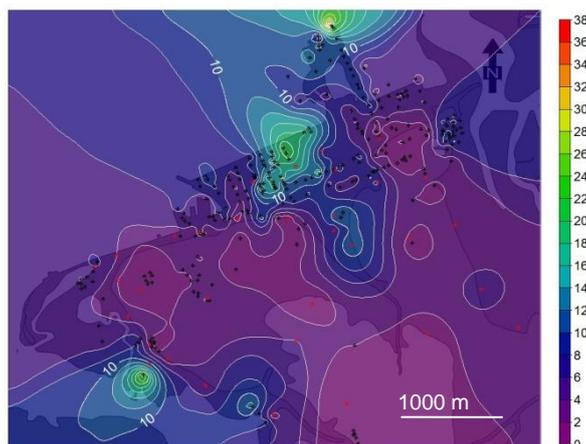


Figura 4.35 - Espessura das formações superficiais no Barreiro calculada com dados dos ensaios ReMi e dados geotécnicos. Pontos a preto – localização de sondagens; pontos a vermelho – ensaios ReMi.

Calculou-se para a cidade de Setúbal a espessura das FS com base nos perfis médios de  $V_s$  e através da modulação da informação geotécnica (*logs* das sondagens) e informação disponibilizada por Coelho (1980). Os resultados obtidos com os perfis médios de  $V_s$  mostram uma zona onde se localizam as maiores espessuras (20 m) das FS (Figura 4.36a). Comparando estes resultados com a análise dos dados geotécnicos (Figura 4.36b) conclui-se que existe uma boa aproximação entre as duas metodologias. O facto dos locais onde se executaram as sondagens estarem atualmente ocupados por estruturas, e porque se privilegiou a realização de ensaios passivos ao longo de vias, teve como consequência a falta de sobreposição das duas malhas de amostragem. Os ensaios ReMi e as sondagens realizaram-se na maior parte dos casos em locais distintos, sendo 30 m a menor distância entre um ponto central e uma sondagem (ReMi 14). Tendo em conta que a espessura das FS varia rapidamente, evidenciando um relevo do substrato por vezes pronunciado (Coelho 1980), é natural que existam diferenças entre os dois métodos utilizados. Apresenta-se também (Figura 4.36c) uma interpolação da espessura das FS calculada com os valores dos perfis de  $V_s$  e com os dados geotécnicos para a cidade de Setúbal.

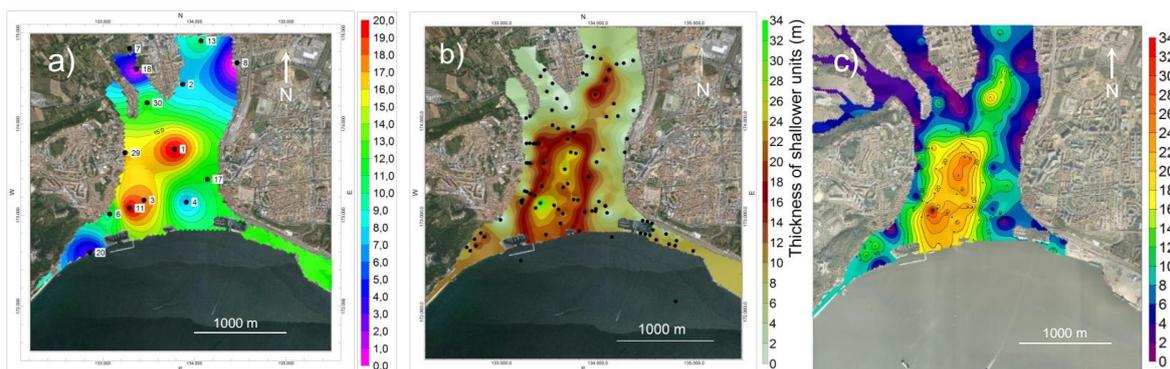


Figura 4.36 - Espessura das FS em Setúbal obtidas: (a) com os perfis médios de  $V_s$ ; (b) com as sondagens e informação disponibilizada em Coelho (1980); (c) com todos os dados anteriores. Pontos pretos: locais onde se realizaram ensaios ReMi e onde existe informação geotécnica.

### 4.3.2.3. Velocidade das ondas S e as unidades litoestratigráficas

A análise dos perfis médios de  $V_s$  e dos dados geotécnicos permitiu, de acordo com a metodologia definida em 4.2.5.3, calcular e atribuir valores médios de  $V_s$  às unidades litoestratigráficas do Barreiro (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 - Valores médios de  $V_s$  calculados para as unidades litoestratigráficas do Barreiro.

Unidades litoestratigráficas	Nº. de amostras	Velocidade das ondas S (m/s)				
		Mínima	Média das Mínimas	Média	Máxima	Média das Máximas
Aterros	16	120	169	170	225	172
Aterros 2	10	149	219	299	633	379
Aluviões	21	115	200	217	335	235
Pliocénico	30	215	275	465	1196	656

A análise dos perfis médios de  $V_s$  em conjunto com os dados geotécnicos disponíveis permitiu atribuir às unidades litoestratigráficas identificadas valores médios de  $V_s$  para Setúbal (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 - Valores médios de  $V_s$  calculados para as unidades litoestratigráficas de Setúbal.

Unidades litoestratigráficas	Nº. de amostras	Velocidade das ondas S (m/s)				
		Mínima	Média das Mínimas	Média	Máxima	Média das Máximas
Aterros	13	123	196	206	242	215
Aterros 2	16	189	261	362	794	462
Aluviões	13	165	202	224	264	243
Plistocénico	3	215	263	325	635	387
Pliocénico	39	172	272	473	1109	674
Jurássico	1	961	961	961	961	961

Analisando as Tabelas 4.2 e 4.3 verifica-se que a velocidade média dos aterros em Setúbal (206 m/s) foi superior ao valor calculado para o Barreiro (170 m/s). Observou-se o mesmo comportamento para os aterros 2 que apresentaram uma velocidade média de 299 m/s no Barreiro e de 362 m/s em Setúbal. Verificou-se uma grande semelhança entre as velocidades obtidas para as aluviões e o Pliocénico do Barreiro e Setúbal. Nesse sentido, podemos considerar como valores médios de  $V_s$  para as aluviões e para o Pliocénico, para estas duas áreas, os valores de 220 m/s e 470 m/s, respetivamente. Quando comparamos os valores mínimos e máximos observam-se diferenças entre os valores das duas regiões. Na Tabela 4.4 apresentam-se valores obtidos por diversos investigadores com a utilização da técnica ReMi. Em termos gerais observa-se que as velocidades obtidas para as unidades litoestratigráficas do Barreiro e Setúbal se enquadram nas velocidades obtidas por outros autores. Serão exceção os valores alcançados por Carvalho *et al.* (2016) para as unidades do Holocénico de Cascais e de Odum *et al.* (2013) para areias de praia, que são superiores aos do Barreiro e Setúbal.

Tabela 4.4 - Valores de  $V_s$  obtidos por outros autores com a técnica ReMi.

Unidades litoestratigráficas		$V_s$ (m/s)	Local	Referências
Aterro	Holocénico	200	Espanha	Santisteban <i>et al.</i> (2012)
Areias arcóscicas	Miocénico	514-540		
Aterro	Holocénico	254		
Areia de praia	Holocénico	311	Porto Rico	Odum <i>et al.</i> (2013)
Aterro	Holocénico	172		
Aluvião	Holocénico	184-239		
Areias secas	Holocénico	167-209	Polónia	Mendecki <i>et al.</i> (2014)
Depósitos fluviais	Holocénico	272		
Calcário	Triásico	2648		
Aluvião	Holocénico	450-590	Cascais	Carvalho <i>et al.</i> (2016)
Terraços marinhos	Holocénico	340-600		

Com o objetivo de se compararem os valores de  $V_s$  obtidos neste estudo com os resultados alcançados por outros autores, apresenta-se na Tabela 4.5 um conjunto de dados retirados de diversas publicações.

Tabela 4.5 - Valores de  $V_s$  obtidos por diferentes autores com a utilização de diversas técnicas. 1 - Valor médio calculado com os máximos e mínimos publicados pelos diferentes autores; • – valores obtidos com base nos perfis de  $V_s$ ; 2 – aluviões grosseiros; \* - Valores determinados com base em critérios geológicos e na geomorfometria dos terrenos.

Unidades	$V_s$ (m/s)	Média (m/s) <sup>1</sup>	Tipo de ensaios	Local	Referências
Aluviões	51 - 348	200	<i>Cross-hole</i>	Sacavém	Oliveira <i>et al.</i> (1997)
Aluviões	150 - 240	195	<i>Cross-hole</i>	Baixa, Lisboa	LNEC (1998)
Aluviões	100 - 230	165	MASW	Stª. I. da Azóia – F. da Casa	Lopes (2005)
Aluviões	110	110	MASW	Póvoa de Santa Iria	
Aluviões	131-214	173	<i>Cross-hole</i>	Bombarral	Apletton <i>et al.</i> (2006), Coutinho <i>et al.</i> (2006)
Pliocénico	161-390	278	<i>Cross-hole</i>	Bombarral	
Pliocénico	215-428	298 •	<i>Cross-hole</i>	Mitrena-Setúbal	LNEC (2006)
Pliocénico	160-384	405 •	<i>Cross-hole</i>	Mitrena-Setúbal	
Pliocénico	255-516	388 •	<i>Cross-hole</i>	Mitrena-Setúbal	
Pliocénico	202-459	317 •	<i>Cross-hole</i>	Mitrena-Setúbal	
Aluviões	108-166	137	Refração	Algarve- Odiáxere	Carvalho <i>et al.</i> (2009)
Pliocénico	188	188	Refração	Algarve - Odiáxere	
Pliocénico	331	331	Refração	Algarve- Odiáxere	
Pliocénico	218-349	283	Refração	Setúbal	Carvalho (2013)
Aluviões	140 - 290	215	<i>Cross-hole</i>	Alcântara, Lisboa	Freitas <i>et al.</i> (2014)
Aluviões	206-354	280	*	Portugal (continente)	Silva <i>et al.</i> (2014)
Aluviões <sup>2</sup>	272-436	310	*		
Plistocénico	256 - 348	302	*		

Verificou-se que os valores de  $V_s$  obtidos neste estudo para as diferentes unidades litoestratigráficas se enquadram na generalidade com os resultados obtidos por outros autores. São exceção os resultados obtidos por Silva *et al.* (2014) que, para as aluviões, apresentam valores superiores.

Os valores médios de  $V_s$  das aluviões do Barreiro (217 m/s) e de Setúbal (224 m/s) foram semelhantes aos valores obtidos por Oliveira *et al.* (1997), Freitas *et al.* (2014) e LNEC (1998). O valor máximo de  $V_s$  registado nas aluviões do Barreiro foi na Baía Tejo com 335 m/s (ReMi 27). Esta velocidade pode ser consequência do processo de compactação que estes terrenos terão sofrido pela ação de aterros sobrejacentes com cotas superiores a 15 m.

Os valores médios de  $V_s$  obtidos para o Pliocénico do Barreiro e Setúbal, 465 m/s e 473 m/s, respetivamente, foram superiores aos valores obtidos por diversos autores (LNEC 2006, Apletton *et al.* 2006, Coutinho *et al.* 2006, Carvalho *et al.* 2009). Esta diferença pode dever-se ao facto de se terem realizado vários ensaios ReMi passivos que alcançaram maiores profundidades e, por conseguinte, maiores velocidades.

Os resultados alcançados pelos ensaios *cross-hole* realizados pelo LNEC (2006) no Pliocénico são semelhantes aos obtidos no presente trabalho. No entanto, os valores médios obtidos pelo LNEC de 298-405 m/s (Tabela 4.5) foram inferiores aos valores obtidos neste trabalho, de 465 m/s no Barreiro e de 473 m/s em Setúbal.

Na Figura 4.37 apresentam-se perfis de  $V_s$  obtidos pelo LNEC nos ensaios *cross-hole* realizados no Pliocénico da Mitrena.

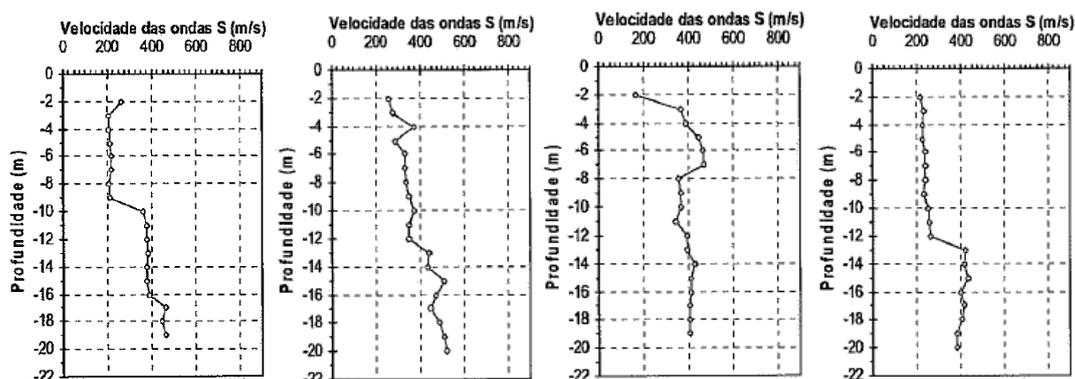


Figura 4.37 - Resultados de quatro ensaios *cross-hole* obtidos no Pliocénico da Mitrena (de LNEC 2006).

Na Figura 4.38 apresentam-se dois ensaios ReMi ativos que se realizaram a 400 m (ReMi 27) e a 1000 m de distância dos ensaios do LNEC (ReMi 33). Apresenta-se também um exemplo de um ensaio passivo realizado no Pliocénico perto da cidade de Setúbal (ReMi 19).

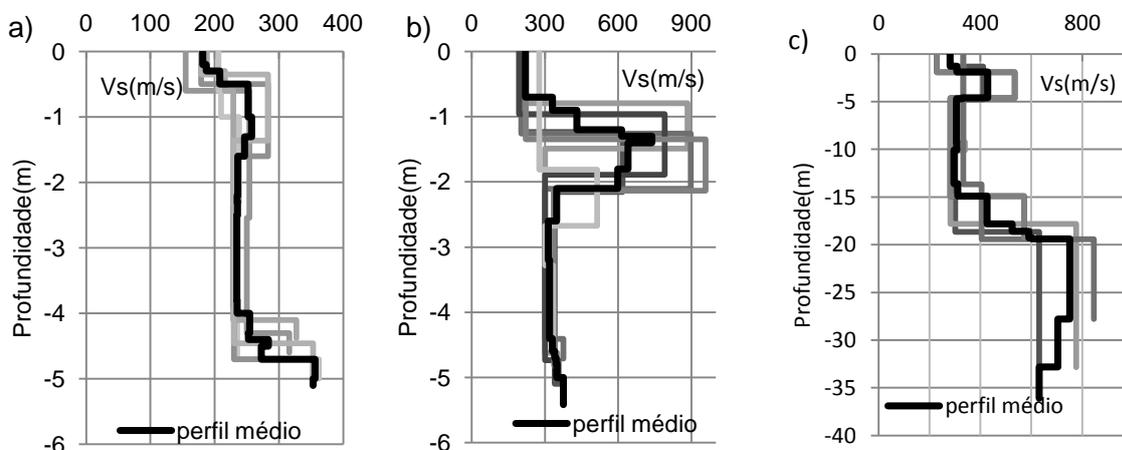


Figura 4.38 - Resultados de alguns ensaios ReMi realizados no Pliocénico da Mitrena (a) ReMi 27; (b) ReMi 33; (c) ReMi 19.

Comparando os ensaios executados pelo LNEC e os ensaios ativos realizados neste trabalho, verifica-se que os valores de  $V_s$  são semelhantes até à profundidade dos ensaios ReMi (5 m). Analisando o perfil do ensaio passivo e comparando-o com os perfis do LNEC, observa-se também uma semelhança entre as respetivas velocidades até maiores profundidades (20 m). Observa-se também que o ensaio ReMi 19 alcançou maiores profundidades (35 m) e maiores velocidades para as ondas S (quase 800 m/s). As diferenças encontradas entre os valores médios de  $V_s$  obtidos pelo LNEC e os valores aqui obtidos devem relacionar-se com as profundidades alcançadas por cada uma das metodologias utilizadas. Os ensaios do LNEC alcançaram profundidades de 20 m e os ensaios ReMi atingiram frequentemente profundidades superiores a 60 m (Anexo X). Poderá concluir-se que as diferenças encontradas entre os valores médios de  $V_s$  não residirão em discrepâncias entre os métodos utilizados.

Conclusão semelhante foi referida por outros autores que compararam resultados obtidos com ensaios ReMi com dados de *cross-hole* e *down-hole*, realizados em diferentes tipos de solo (Gamal & Pullammanapallil 2011).

O valor médio de  $V_s$  obtido para o Plistocénico de Setúbal de 325 m/s enquadra-se no valor estimado por Silva *et al.* (2014).

#### 4.3.3. Variação 2D da velocidade das ondas S e de $N_{SPT}$

Seguindo a metodologia definida em 4.2.6 elaboraram-se modelos tridimensionais para o Barreiro e para Setúbal com os perfis médios de  $V_s$  e com os perfis de  $N_{SPT}$  (Capítulo II). Nas Figuras 4.39 (Barreiro) e 4.40 (Setúbal) apresentam-se os valores de  $V_s$  e  $N_{SPT}$  obtidos em três secções horizontais executadas nos respetivos modelos tridimensionais para as cotas de 10 m, 0 m e -10 m.

As isolinhas das duas variáveis evidenciam, como seria de esperar, uma boa relação geográfica entre estas duas variáveis: zonas de maior rigidez (maiores valores de  $N_{SPT}$ ) correspondem a zonas de maiores velocidades das ondas S. Observa-se também que para cotas mais profundas aumentam os valores de  $V_s$  e de  $N_{SPT}$ .

Os resultados obtidos para o Barreiro, para as cotas de 0 m e + 10 m, mostram que o comportamento das isolinhas de  $N_{SPT20}$  e  $N_{SPT10}$  se assemelham à distribuição das isolinhas de  $V_s$  de 300 e 200 m/s, respetivamente (Figura 4.39). À cota de -10 m a relação entre  $V_s$  e  $N_{SPT}$  é mais difusa, mas os valores de  $V_s$  iguais a 400 m/s parecem relacionar-se com valores de  $N_{SPT50}$ .

Os resultados obtidos para Setúbal (Figura 4.40) apresentaram também uma boa relação, os valores de  $N_{SPT20}$  e de  $V_s = 300$  m/s mostraram um comportamento semelhante nas interpolações obtidas para as cotas +10 e 0 m. Observa-se a existência de uma relação entre a distribuição dos valores de  $N_{SPT50}$  e os valores de  $V_s$  de 600 m/s nas interpolações obtidas para as cotas -10 m. Para esta cota o valor de  $V_s$  igual a 400 m/s parece relacionar-se com  $N_{SPT30}$ .

Em termos gerais podemos concluir que os terrenos com valores de  $N_{SPT}$  iguais ou inferiores a 20 poderão corresponder a valores de  $V_s$  iguais ou inferiores a 300 m/s e pertencerão à classe B do EC8. Para valores de  $N_{SPT}$  iguais ou superiores a 40-50 os terrenos pertencerão à classe C.

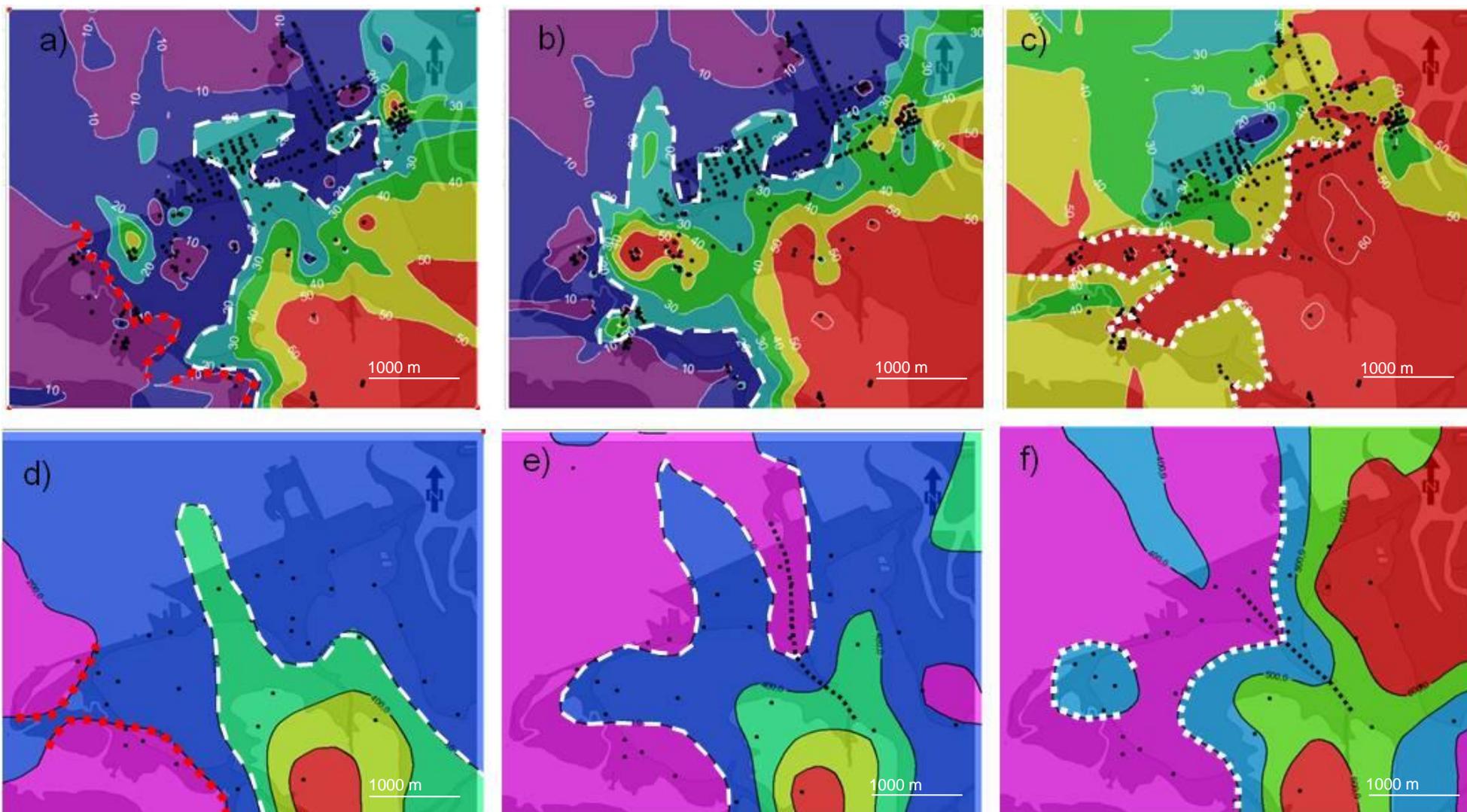


Figura 4.39 - Interpolações para o Barreiro de: (a)  $N_{SPT}$  para cota +10 m; (b)  $N_{SPT}$  cota 0 m; (c)  $N_{SPT}$  cota -10 m; (d)  $V_s$  cota +10 m; (e)  $V_s$  cota 0 m; (f)  $V_s$  cota -10 m. Tracejado branco –  $N_{SPT} = 20$  e  $V_s = 300$  m/s; ponteadado branco –  $N_{SPT} = 50$  e  $V_s = 400$  m/s; ponteadado vermelho  $N_{SPT} = 10$ ,  $V_s = 200$  m/s; ponteadado preto – linha de água.

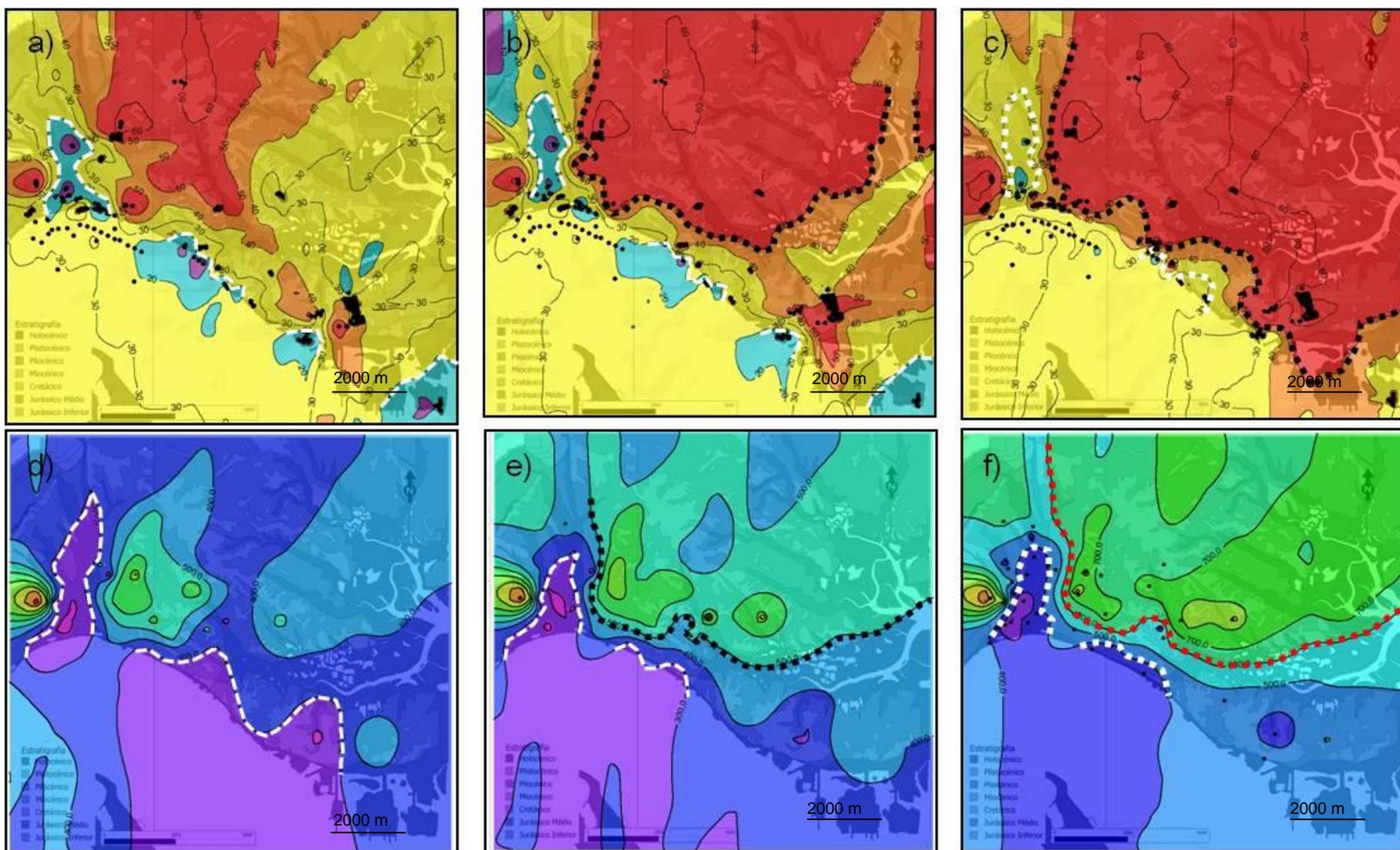


Figura 4.40 - Interpolações para Setúbal de: (a)  $N_{SPT}$  para cota +10 m; (b)  $N_{SPT}$  cota 0 m; (c)  $N_{SPT}$  cota -10 m; (d)  $V_s$  cota +10 m; (e)  $V_s$  cota 0 m; (f)  $V_s$  cota -10 m. Tracejado branco –  $N_{SPT} = 20$  e  $V_s = 300$  m/s; ponteadado preto –  $N_{SPT} = 50$  e  $V_s = 500$  m/s; ponteadado vermelho  $V_s = 600$  m/s.

Considerando a distribuição das isolinhas de  $V_s$  e de  $N_{SPT}$ , para as três cotas estudadas, e a correspondência obtida entre os respectivos valores, elaborou-se um gráfico que relaciona estas duas variáveis para o Barreiro e Setúbal (Figura 4.41). Pretendeu-se assim comparar a relação obtida entre as isolinhas de  $V_s$  e de  $N_{SPT}$  com algumas correlações que são vulgarmente utilizadas.

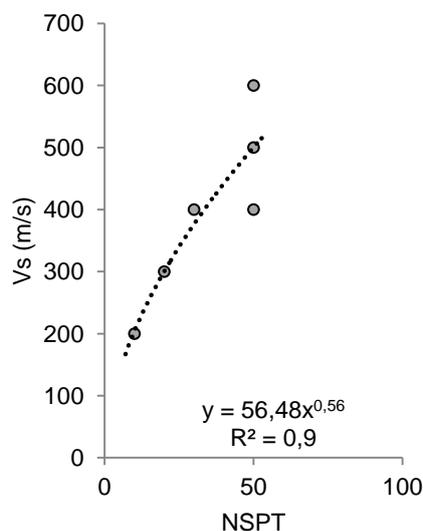


Figura 4.41 - Relação entre os valores de  $V_s$  e  $N_{SPT}$  retirados das Figuras 4.39 e 4.40.

Verifica-se que a relação obtida com os valores do Barreiro e Setúbal ( $V_s=56,48N_{SPT}^{0,56}$ ) se enquadra com outras disponíveis na literatura (Tabela 4.6), como as de Seed & Idriss (1981), Lee (1990) e Iyisan (1996).

Tabela 4.6 - Correlações entre  $V_s$  e  $N_{SPT}$  (modificado de Mhaske & Choudhury 2011).

Velocidade das ondas S (m/s)	Autores
$V_s = 84N^{0,31}$	Ohba & Toriumi (1970)
$V_s = 76N^{0,33}$	Imai & Yoshimura (1970)
$V_s = 92,1N^{0,337}$	Fujiwara (1972)
$V_s = 82N^{0,39}$	Ohsaki & Iwasaki (1973)
$V_s = 91N^{0,337}$	Imai (1977)
$V_s = 85,35N^{0,348}$	Ohta & Goto (1978)
$V_s = 61N^{0,5}$	<b>Seed &amp; Idriss (1981)</b>
$V_s = 97N^{0,314}$	Imai & Tonouchi (1982)
$V_s = 100,5N^{0,29}$	Sykora & Stokoe (1983)
$V_s = 116,1 (N+0,3185)^{0,202}$	Jinan (1987)
$V_s = 57,4N^{0,49}$	<b>Lee (1990)</b>
$V_s = 51,5N^{0,516}$	<b>Iyisan (1996)</b>
$V_s = 68,3N^{0,292}$	Kiku et al. (2001)
$V_s = 114,43N^{0,31}$ para argilas	Lee (1990)
$V_s = 80,2N^{0,292}$ para argilas	Imai (1997)
$V_s = 100N^{1/3}$ para argilas	JRA (1980)
$V_s = 80N^{1/3}$ para areias	JRA (1980)
$V_s = 5,3N+134$ para argilas e siltes	Fumal & Tinsley (1985)
$V_s = 5,1N+152$ para argilas e areias grosseiras	Fumal & Tinsley (1985)

## **Capítulo V - ANÁLISE UNIDIMENSIONAL LINEAR EQUIVALENTE**

## 5.1. Introdução

A geologia local pode alterar as amplitudes e as frequências das ondas sísmicas e aumentar a duração de um sinal sísmico (Kramer 1996). Tem-se observado em vários eventos sísmicos que a distribuição e a magnitude dos danos variam com a frequência natural dos solos e com a frequência das próprias estruturas. Por esta razão, é importante calcular as frequências naturais dos solos face à ocorrência de um ou mais sismos. A comparação destas frequências com as frequências naturais das estruturas existentes, por exemplo edifícios de habitação, permitirá identificar áreas onde essas estruturas poderão apresentar perigo de ressonância. A distribuição das frequências calculadas poderá ser utilizada no planeamento urbano: depois de conhecidas as frequências naturais dos solos a altura dos edifícios pode ser regulamentada de modo a evitarem-se fenómenos de ressonância solo-estrutura.

Segundo Parolai *et al.* (2006), para se realizarem este tipo de estudos é necessário conhecer (i) a estrutura e espessura da cobertura sedimentar, (ii) a velocidade das ondas S, (iii) o contraste de impedâncias entre os sedimentos brandos e o *bedrock*, (iv) e a geometria da sua interface.

Neste Capítulo apresenta-se o cálculo das funções de transferência de várias colunas de solo que são dadas pela razão entre o sinal sísmico à superfície da camada de solo e na rocha em profundidade, determinada no domínio da frequência. Para tal utilizou-se a aplicação informática SHAKE2000 (Ordóñez 2003) que permitiu calcular a resposta de uma coluna de solo quando sujeita a um movimento expresso em aceleração. A informação utilizada para se realizarem estes cálculos consistiu (i) nos dados geotécnicos coligidos de vários relatórios geotécnicos (Capítulo II), (ii) na informação relativa à variação da velocidade das ondas S com a profundidade obtida a partir dos ensaios ReMi (Capítulo IV), e (iii) em acelerogramas de sismos reais.

Com base nas funções de transferência identificaram-se as frequências naturais ( $F_{0s}$ ) e as amplificações máximas ( $A_{0s}$ ) para cada um dos locais do Barreiro e Setúbal onde se realizaram ensaios ReMi (Figura 5.1). Estes locais situam-se em diferentes unidades litoestratigráficas com diferentes espessuras de formações superficiais (FS) e com a superfície  $N_{SPT60}$  a diferentes profundidades. Estas duas propriedades podem modificar as características das colunas de solo (em particular a sua rigidez) influenciando, conseqüentemente, a forma das funções de transferência.

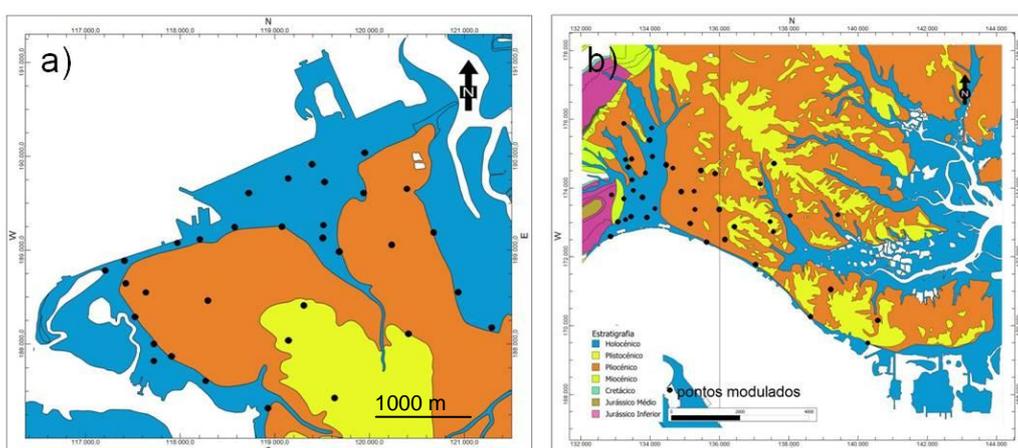


Figura 5.1 - Localização dos pontos onde se calcularam as funções de transferência com o SHAKE2000. (a) Barreiro; (b) Setúbal. Os pontos a preto correspondem aos locais onde se realizaram ensaios ReMi e para os quais se efetuaram análises unidimensionais lineares equivalentes.

Segundo vários autores (e.g. Kramer 1996, Yilmaz 2015), os valores das frequências naturais dos solos dependem da rigidez dos materiais que constituem uma coluna de solo. É possível relacionar o período natural de vibração de uma coluna de solo ( $T$ ) com a sua espessura ( $H$ ) e a velocidade média das ondas S ( $V_s$ ), segundo a relação (Kramer 1996, Yilmaz 2015):

$$T = 4H/V_s$$

Na Figura 5.2 apresentam-se duas funções de transferência que ilustram a variação da frequência natural de um solo em função da rigidez dos materiais que o constituem. A primeira (Figura 5.2a) corresponde a uma coluna de solo com uma velocidade média de  $V_s$  de 200 m/s e a segunda (Figura 5.2b) a uma coluna de solo com a mesma espessura mas com um valor médio de  $V_s$  de 1000 m/s. Verifica-se que o primeiro exemplo apresenta uma frequência natural de 2 Hz, enquanto o segundo, correspondente a material com maior rigidez, apresenta uma frequência natural do solo mais elevada (10 Hz).

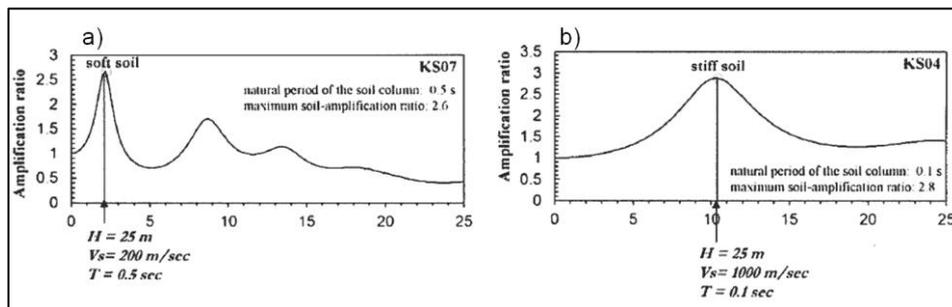


Figura 5.2 - Funções de transferência para duas colunas de solo com a mesma espessura mas constituídas por materiais com diferente rigidez. (a) coluna de solo com  $V_s=200$  m/s; (b) coluna de solo com  $V_s=1000$  m/s. (de Yilmaz 2015).

Foi também objeto do presente Capítulo estudar a relação entre as funções de transferência e a rigidez das colunas de solo. Para tal compararam-se os valores de  $F_{0s}$  e  $A_{0s}$  com as suas propriedades geotécnicas e com os valores de  $V_{s30}$  obtidos nos ensaios ReMi (Capítulo IV). Estas propriedades consistiram na espessura das FS e na profundidade da superfície de  $N_{SPT60}$ . Compararam-se igualmente as funções de transferência com as curvas médias de  $H/V$  de modo a estudar-se a relação entre as duas metodologias.

No Capítulo III foram identificadas áreas no Barreiro e em Setúbal onde os edifícios são mais suscetíveis de sofrerem fenómenos de ressonância. Para tal utilizaram-se os picos de frequências obtidos nas curvas  $H/V$  ( $F_0$  e  $F_1$ ) e no número de pisos dos edifícios. Neste Capítulo foram também identificadas essas áreas com base nos valores de  $F_{0s}$  e no número de pisos do edificado.

## 5.2. Metodologia

Para se obter a resposta de uma coluna de solo sujeita a um movimento em aceleração utilizou-se a aplicação informática SHAKE2000 (Ordóñez 2003). Esta aplicação considera que a coluna de solo analisada é constituída por camadas horizontais infinitas homogéneas e isotrópicas e simula a resposta não linear do terreno numa dimensão (1D) baseando-se na aproximação linear equivalente (Schnabel *et al.* 1972).

Antes de se calcular a resposta 1D foi necessário definir e introduzir na aplicação vários parâmetros relacionados com as colunas de solo e escolher acelerogramas que servissem de *input* para os cálculos das funções de transferência.

Em primeiro lugar foi necessário definir o número de camadas que constituíam cada perfil estudado, e caracterizá-las quanto à espessura, à velocidade de propagação das ondas S, peso volúmico, modelo de comportamento não linear em função das curvas de redução do módulo e das curvas de amortecimento (Figura 5.3). Posteriormente pesquisaram-se acelerogramas para servirem de *input* aos cálculos da resposta das colunas de solo de forma a obterem-se funções de transferência.

Para cada uma das funções de transferência identificaram-se as frequências naturais de vibração do solo ( $F_{0s}$ ) e respetivas amplificações ( $A_{0s}$ ) (Figura 5.3).

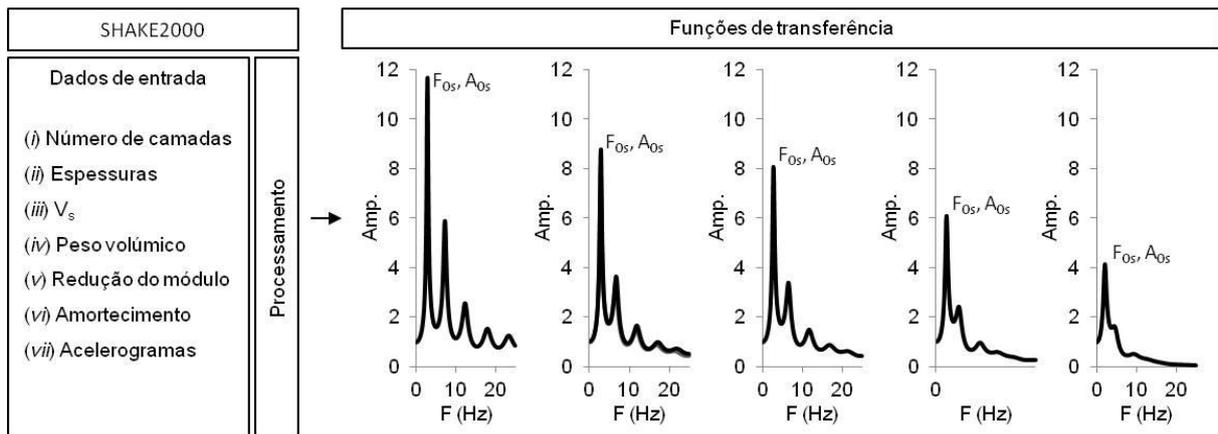


Figura 5.3 – Metodologia seguida na obtenção das funções de transferência.  $F_{0s}$  – Frequência natural dos solos (Hz);  $A_{0s}$  – amplificação máxima.

### 5.2.1. Propriedades geotécnicas das colunas de solo

As colunas de solo estudadas corresponderam às secções de terreno onde se realizaram os ensaios ReMi (Figura 5.1). Estes ensaios permitiram obter perfis médios de  $V_s$  para cada um desses locais (Capítulo IV) que foram utilizados nos cálculos com o SHAKE2000.

Foi com o recurso aos perfis médios de  $V_s$  que se definiram alguns dos parâmetros considerados no SHAKE2000: o número de camadas, as suas espessuras e a velocidade de propagação das ondas S. Segundo vários autores a velocidade das ondas S e a espessura das camadas superficiais são os parâmetros que mais condicionam a resposta da coluna de um solo (Rajiv 2005, Veludo 2008). A utilização da técnica ReMi na determinação dos valores de  $V_s$  poderá contribuir para uma melhor qualidade dos resultados obtidos.

A análise dos *logs* de sondagens, a modelação das espessuras das formações superficiais (Capítulo II), conjuntamente com os perfis médios de  $V_s$  (Capítulo IV) permitiram identificar as unidades presentes em cada uma das camadas constituintes das colunas de solo estudadas.

Na Figura 5.4 apresenta-se um exemplo de um perfil médio de  $V_s$  que resultou do cálculo do valor médio de quatro perfis. Este é constituído por doze camadas, duas pertencem ao Holocénico (aterros) e as restantes ao Pliocénico. Os valores das espessuras das várias camadas e das respetivas velocidades foram considerados nos cálculos efetuados com o SHAKE2000.

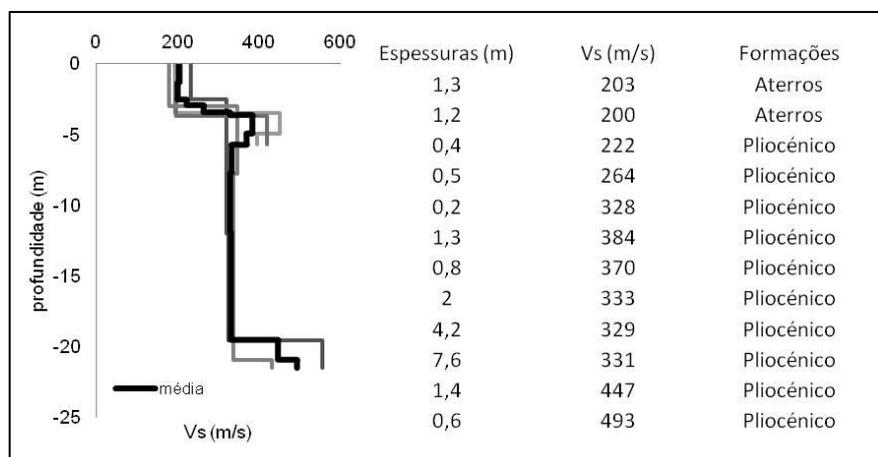


Figura 5.4 - Exemplo de um perfil médio de  $V_s$  (a preto) constituído por doze camadas. Este foi obtido com base em quatro perfis de  $V_s$  resultantes de ensaios ReMi (a cinzento). Apresentam-se as correspondentes espessuras, velocidades ( $V_s$ ) e unidades geológicas.

Foi necessário atribuir a cada uma das camadas dos perfis médios de  $V_s$  valores relativos aos pesos volúmcos e às propriedades dinâmicas (curvas de redução do módulo e de amortecimento). A própria aplicação SHAKE2000 contém uma base de dados que permite atribuir essas propriedades em função do tipo de material presente (por exemplo, cascalho, areia, argila ou rocha). As camadas constituintes dos vários perfis foram classificadas segundo as unidades geotécnicas consideradas nos Capítulos II e IV: aterros do tipo 2 (aterros compactados), aterros, aluviões, do Plio-Plistocénico, Miocénico e Jurássico.

Os pesos volúmcos foram estimados com base nos valores publicados por Coelho (1980) para Setúbal e por Geocontrolo (1982) para o Barreiro. Na Tabela 5.1 apresentam-se os valores mínimos, máximos e médios referentes aos pesos volúmcos de cada um dos complexos geotécnicos estudados por Coelho (1980).

Tabela 5.1- Valores dos pesos volúmcos considerados para os diferentes complexos geotécnicos de Setúbal (de Coelho 1980).

Complexos geotécnicos	$\gamma$ mínimo (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ máximo (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ médio (kN/m <sup>3</sup> )
Aterros e aluviões fluvio marinhas	15	20	17,5
Aluviões, cobertura arenosa superficial	17	18	17,5
Plio-Plistocénico	18	22	20,0
Miocénico	19	24	21,5
Jurássico	22	26	24,0

Os valores disponibilizados por Geocontrolo (1982) permitiram obter valores médios para os pesos volúmcos das aluviões e do Plio-Plistocénico no Barreiro de 15,3 kN/m<sup>3</sup> e 19,7 kN/m<sup>3</sup>, respetivamente.

Os pesos volúmicos utilizados nos cálculos correspondem aos valores médios do Barreiro e Setúbal (Tabela 5.2). O valor atribuído ao peso volúmico dos aterros do tipo 2, aterros compactados com  $V_s$  médio de 299 m/s (Capítulo IV), foi obtido com base nos valores disponibilizados por Barros *et al.* (2012).

Tabela 5.2 – Valores dos pesos volúmicos das unidades geotécnicas consideradas no estudo da resposta 1D dos solos do Barreiro e Setúbal.

Unidades	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
Aterros tipo 2 (aterros compactados)	19,5
Aterros	17,5
Aluviões	17,5
plio-pleistocénicas	20,0
miocénicas	21,5
jurássicas	24,0

As curvas de redução do módulo correspondem ao modo como o módulo de corte varia com a amplitude da deformação de corte, e a curva do amortecimento ilustra a variação do amortecimento com a amplitude da deformação cisalhante.

No Barreiro e em Setúbal as FS podem apresentar várias litologias, argilas, siltes, areias, seixos e materiais de origem antropogénica. Na maior parte dos locais onde se realizaram os ensaios ReMi não foi possível obter informação detalhada acerca das unidades litológicas presentes. Para se transpor essa limitação considerou-se que a litologia dominante nas duas áreas era de cariz arenosa com diferentes graus de rigidez. Por esse facto utilizaram-se as curvas de Seed & Idriss (1970) no cálculo da redução do módulo e do amortecimento das camadas de aterros, aluviões e do Plio-Pleistocénico (Tabela 5.3 e Figura 5.5). Estas curvas apresentam três limites: superior, médio e inferior (Figura 5.5). A curva referente ao limite inferior relaciona-se com material de menor rigidez e com menor amortecimento e foi empregue nas unidades de menor rigidez (aterros). A do limite superior foi utilizada nas unidades de maior rigidez (plio-pleistocénicas) e a do limite médio nas aluviões. Para as unidades do Miocénico e Jurássico e sempre que se atingiu o *bedrock* no Pliocénico, utilizou-se a curva de Schnabel (1973) que se aplica a maciços rochosos.

Tabela 5.3 – Curvas de redução do módulo e razão do amortecimento utilizadas nas diferentes unidades.

Unidades	Redução do módulo	Amortecimento
Aterros do tipo 2	Sand Upper G/Gmax - Sand , Upper Bound (Seed & Idriss 1970)	Sand upper Damping for SAND, Upper Bound (Seed & Idriss 1970)
Aterros	Sand Lower G/Gmax - Sand , Lower Bound (Seed & Idriss 1970)	Sand lower Damping for SAND, Lower Bound (Seed & Idriss 1970)
Aluviões	Sand Avg. G/Gmax - Sand , Average (Seed & Idriss 1970)	Sand Avg. Damping for SAND, Average (Seed & Idriss 1970)
plio-pleistocénicas	Sand Upper G/Gmax - Sand , Upper Bound (Seed & Idriss 1970)	Sand upper Damping for SAND, Upper Bound (Seed & Idriss 1970)
miocénicas e jurássicas	Rock (Schnabel 1973)	Rock (Schnabel 1973)

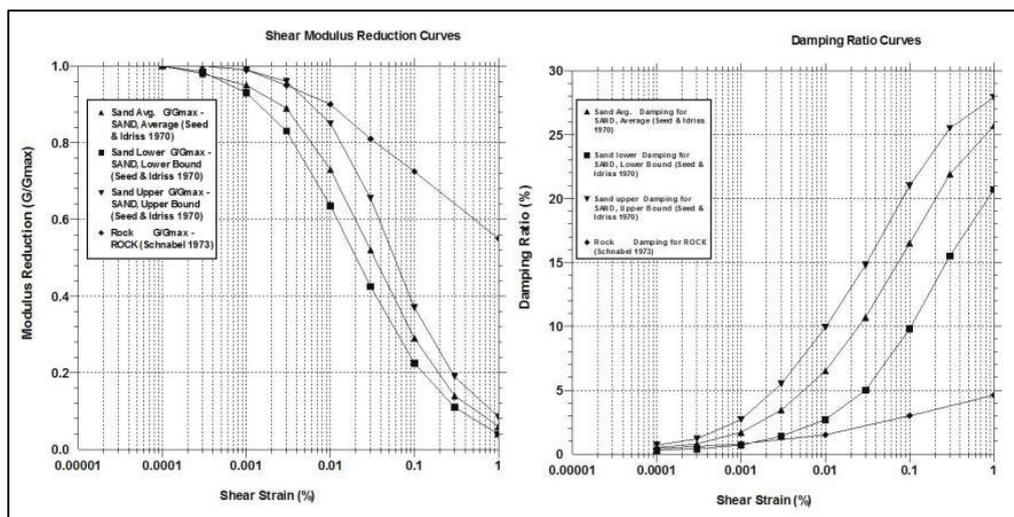


Figura 5.5 – Curvas da redução do módulo e de amortecimento (de Seed & Idriss 1970).

Considerou-se um fator de amortecimento de 5% em todos os cálculos efetuados com o SHAKE2000.

## 5.2.2. Acelerogramas

A escolha dos acelerogramas que serviram de *input* aos cálculos com o SHAKE2000, teve em conta (i) a localização e magnitudes de alguns sismos históricos e, (ii) algumas das estruturas neotectónicas suscetíveis de afetar as áreas do Barreiro e de Setúbal referidas no Capítulo II (vide Figura 2.6). Procuraram-se estações sísmicas com acelerogramas de sismos com magnitudes compreendidas entre 6,0 e 8,0 e distâncias epicentrais entre 10 km e 270 km. Para esse efeito utilizaram-se as bases de dados do SHAKE2000, Americana (PEER) e Japonesa (K- NET e KiK – net).

Em primeiro lugar pesquisaram-se sismos com distâncias epicentrais inferiores a 20 km e com magnitudes entre 6,0 e 7,0 e que pudessem corresponder a um sismo com epicentro localizado na falha de Pinhal Novo - Alcochete. O acelerograma escolhido foi o da estação Nishi-Akashi (PEER) localizada a cerca de 13 km do epicentro do sismo de Kobe (Japão, 1995) com uma magnitude 6,9 e uma movimentação *strike slip*. Este acelerograma serviu para modular o comportamento dos solos face à ocorrência de um potencial sismo localizado na falha do Pinhal Novo e com epicentro a cerca de 13 km do Barreiro e de Setúbal (Figura 5.6 e Tabela 5.4).

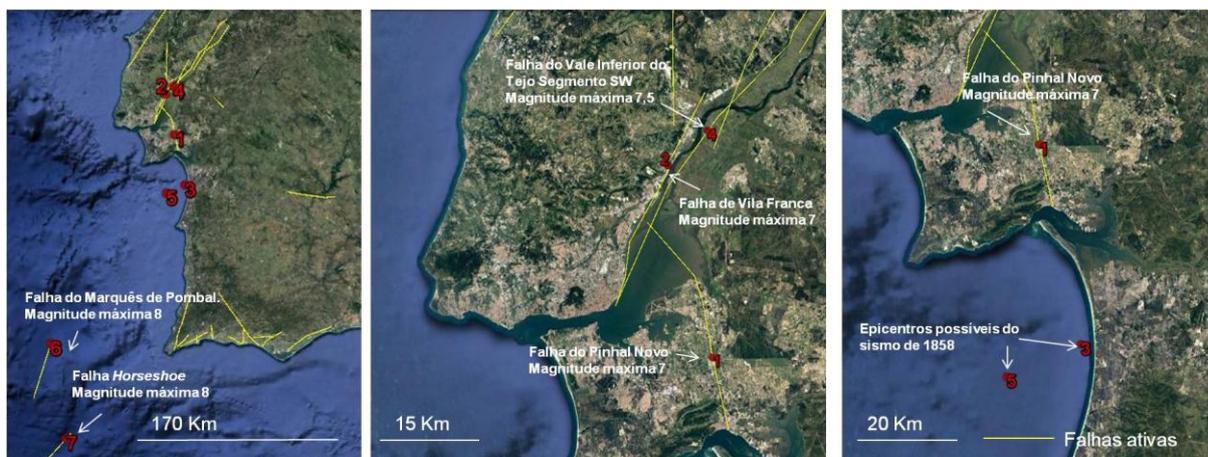


Figura 5.6 – Localização dos epicentros dos sismos utilizados para o cálculo das funções de transferência. Apresentam-se igualmente as falhas ativas e as magnitudes máximas que elas podem gerar (IGME 2015).

Tabela 5.4 – Localização dos potenciais epicentros e lista dos sismos utilizados com as respetivas magnitudes. Identificação das estações selecionadas, distâncias epicentrais, valor de  $V_{s30}$  dos locais onde se localizam as estações e da base de dados onde foram selecionados os registos.

Epicentros (Figura 5.6)	Sismos	Magnitude	Estações	Distâncias epicentrais (km)	$V_{s30}$ (m/s)	Base de dados
1	Kobe (Japão, 1995)	6,9	Nishi-Akashi	13	609	PEER
2, 3	Tottori (Japão, 2000)	6,6	OKYH09	30	518	PEER
4, 5	Northridge (EUA, 1994)	6,4	Big Tujunga	38	550	SHAKE2000
6	Hokkaido3 (Japão, 2003)	8	KKW08	180	460	K-NET, KiK-net
7	Hokkaido2 (Japão, 2003)	8	IBUH07	267	270	K-NET, KiK-net

O sismo de 1858 terá provocado uma intensidade de IX ( $I_{MM}$ ) na cidade de Setúbal (Oliveira 1986) e correspondeu a um dos maiores sismos intraplaca com uma magnitude estimada de 7,1 (Johnston & Kantler 1990). Vilanova & Fonseca (2007) e Stucchi *et al.* (2013) consideraram distâncias epicentrais do sismo de 1858 à cidade de Setúbal de 30 e de 38 km, respetivamente. Segundo Moniz (2010), este sismo localizou-se provavelmente na plataforma continental a S de Setúbal e poderá ter sido gerado num possível segmento meridional da Zona de Falha de Pinhal Novo-Alcochete. A movimentação dominante desta estrutura será transpressiva esquerda e poderá gerar sismos de magnitude entre 6,0 e 7,0 (Moniz 2010). Cabral *et al.* (2011a) consideraram que esta estrutura se estende até à cidade de Setúbal e será capaz de gerar sismos com magnitude até 7,0.

Tendo em conta os danos que um sismo semelhante ao de 1858 poderá infligir na Península de Setúbal, pesquisaram-se acelerogramas de sismos com magnitudes entre 6,0 e 7,0, registados em estações com distâncias epicentrais entre 30 km e 38 km, de modo a cobrir as distâncias epicentrais do sismo de 1858 consideradas por Vilanova & Fonseca (2007) e Stucchi *et al.* (2013). Selecionaram-se dois acelerogramas, um da estação OKYH09 (PEER) do sismo de Tottori (Japão, 2000) com uma magnitude de 6,6 e movimentação *strike slip*, e outro da estação Big Tujunga (SHAKE2000) do sismo de Northridge (Estados Unidos da América, 1994) com uma magnitude 6,4 e movimento inverso (Figura 5.6 e Tabela 5.4).

Estes acelerogramas permitiram estudar o comportamento dos solos em Setúbal face à ocorrência de dois sismos, com magnitudes e distâncias epicentrais idênticas, localizados na região onde se pensa ter ocorrido o sismo de 1858. Permitiram igualmente estudar o comportamento dos solos do Barreiro face à ocorrência de dois sismos com epicentros localizados em duas estruturas identificadas como ativas, a Falha de Vila Franca de Xira (Cabral *et al.* 2011b) e o segmento SW da falha do Vale Inferior do Tejo (Besana-Ostman *et al.* 2011) localizados a cerca de 30 e 38 km do Barreiro, respetivamente (Figura 5.6).

Para se analisar a resposta dos solos face à ocorrência de sismos com magnitudes mais elevadas e epicentros mais afastados considerou-se a falha do Marquês de Pombal (Gràcia *et al.* 2010b) e a estrutura do *Horseshoe* (Gràcia *et al.* 2010a) (Figura 5.6). Pesquisaram-se sismos de magnitude 8,0 e cujos acelerogramas tivessem sido registados em estações com distâncias epicentrais de 180 km a 190 km (*Horseshoe*) e de 260 km a 280 km (Marquês de Pombal). Selecionaram-se as estações KKW08 (K-NET, KiK-net) com uma distância epicentral de 180 km do epicentro do sismo de Hokkaido (Japão, 2003) de magnitude 8,0 e a estação IBUH07 (K-NET, KiK-net) a 270 km do epicentro do mesmo sismo (Tabela 5.4).

Na Figura 5.7 apresentam-se os acelerogramas dos sismos que serviram de *input* na modelação efetuada com o SHAKE2000.

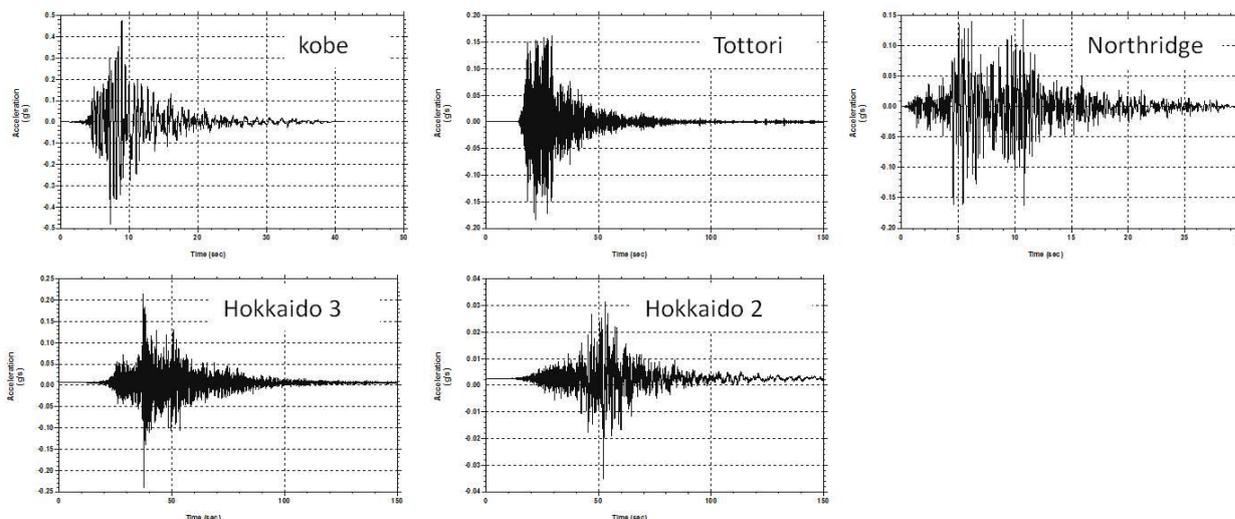


Figura 5.7 - Acelerogramas dos sismos que serviram de *input* para os cálculos efetuados com o SHAKE2000. (Kobe e Tottori PEER; Northridge SHAKE2000; Hokkaido3 e Hokkaido2 K-NETe KiK-net).

### 5.2.3. Cálculo das funções de transferência

Para cada um dos locais onde se realizaram os ensaios ReMi (Figura 5.1) foram efetuados cinco cálculos com o SHAKE2000 (para os cinco sismos considerados) e obtiveram-se as respetivas funções de transferência (Figura 5.8).

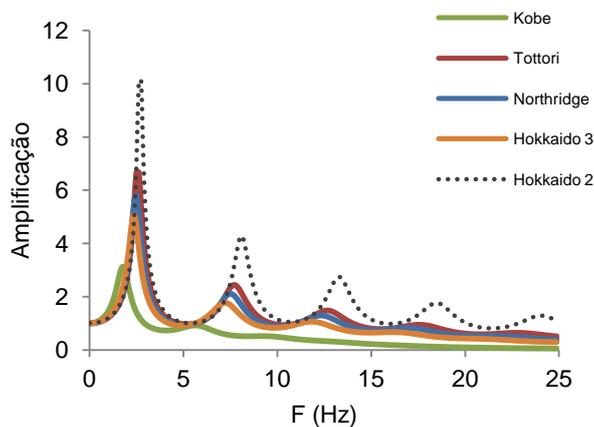


Figura 5.8 – Exemplo de cinco funções de transferência obtidas no Holocénico da região de Setúbal.

Para cada função de transferência é possível identificarem-se os valores de  $F_{0s}$  e  $A_{0s}$ . Na Figura 5.9 apresentam-se como exemplo cinco funções de transferências calculadas para um local do Holocénico. Neste exemplo a frequência natural dos solos ( $F_{0s}$ ) situou-se entre 2 Hz e 3 Hz, com amplificações máximas ( $A_{0s}$ ) entre 4 a 12. A função de transferência obtida com o sismo de maior magnitude e maior distância epicentral (Hokkaido2) exibiu a frequência e amplificação mais elevadas. O sismo mais próximo (Kobe) apresentou a menor amplificação e a menor frequência natural dos solos.

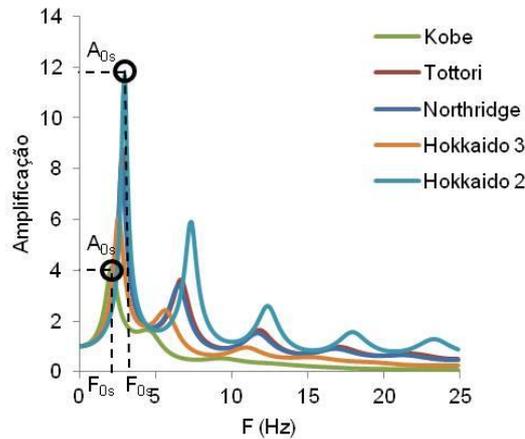


Figura 5.9 - Exemplo de cinco funções de transferência obtidas com cinco sismos e para um mesmo local no Holocénico de Setúbal.  $F_{0s}$  – frequência natural do solo;  $A_{0s}$  – amplificação máxima.

#### 5.2.4. Frequências naturais dos solos e amplificações

A distribuição de  $F_{0s}$  e  $A_{0s}$  foi efetuada por interpolação para cada um dos sismos com que se realizaram os cálculos com o SHAKE2000. Para tal identificaram-se os valores de  $F_{0s}$  e  $A_{0s}$  de todas as funções de transferência que foram calculadas com um mesmo sismo. Para os cálculos das interpolações foram considerados apenas os valores de  $F_{0s} \leq 12$  Hz (gammas de frequências com interesse no estudo da ressonância do edificado).

Na Figura 5.10 exemplifica-se o procedimento adaptado na obtenção destas duas distribuições, que pode ser separado em duas etapas:

- Em primeiro lugar obtiveram-se os valores de  $F_{0s}$  e  $A_{0s}$  de cada um dos pontos onde se realizaram ensaios ReMi. Para isso identificaram-se os valores de  $F_{0s}$  e  $A_{0s}$  em todas as funções de transferência calculadas com o mesmo sismo;
- Com base nesses valores de  $F_{0s}$  e  $A_{0s}$  foram elaboradas interpolações para cada um dos sismos.

Estas interpolações espelham a distribuição geográfica destas variáveis e podem ser comparadas com interpolações relativas às propriedades geotécnicas dos solos, com os resultados H/V e com os valores de  $V_{s30}$ .

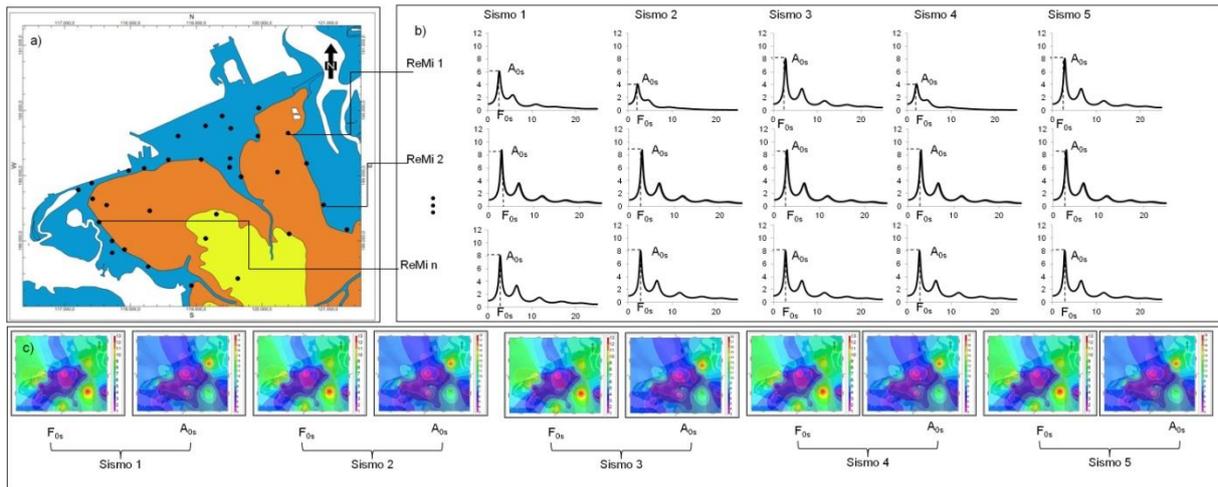


Figura 5.10 - Metodologia seguida na obtenção de grelhas de interpolação de  $F_{0s}$  e  $A_{0s}$ . (a) Localização dos locais onde se obtiveram funções de transferência (pontos pretos); (b) funções de transferência obtidas com cada um dos sismos; (c) grelhas de interpolação de  $F_{0s}$  e  $A_{0s}$  calculadas com cada um dos sismos.

### 5.2.5. Funções de transferência, propriedades geotécnicas, curvas H/V e $V_{s30}$

As propriedades geotécnicas das colunas de solo, nomeadamente a sua rigidez, podem influenciar as suas funções de transferência. Foram desenvolvidas metodologias para se compararem os valores de  $F_{0s}$  e  $A_{0s}$  com as propriedades geotécnicas dos terrenos. Os valores de  $F_{0s}$  e  $A_{0s}$  foram obtidos com a utilização de duas técnicas. A primeira consistiu na realização dos ensaios ReMi (Capítulo IV) e obtenção de perfis médios de  $V_s$  e a segunda na utilização desses perfis como *input* nos cálculos com o SHAKE2000.

No Capítulo III estudaram-se as frequências e amplitudes dos solos obtidas a partir das curvas H/V que agora se comparam com os valores de  $F_{0s}$  e  $A_{0s}$ . O resultado desta comparação tem como objetivo estudar a relação entre os resultados obtidos com o ReMi-SHAKE2000 e os resultados alcançados pelo método de Nakamura (Nakamura 1989).

#### 5.2.5.1. Funções de transferência e propriedades geotécnicas

As funções de transferência obtidas no Pliocénico deverão apresentar, para um mesmo acelerograma, frequências superiores a outras calculadas no Holocénico. Por essa razão será de esperar a existência de uma relação entre os valores de  $F_{0s}$  e as unidades litoestratigráficas para as quais se realizaram os cálculos das funções de transferência. Para se estudar esta relação foram utilizadas cartas geológicas das áreas de estudo e as grelhas de interpolação de  $F_{0s}$  e  $A_{0s}$ .

Por outro lado, dentro das mesmas unidades litoestratigráficas, por exemplo no Holocénico, as funções de transferência deverão variar em função das espessuras das FS e da profundidade a que se encontra  $N_{SPT60}$ . Estas variáveis foram analisadas com o recurso a grelhas de interpolação destas duas propriedades que serão comparadas com as grelhas de interpolação de  $F_{0s}$  e  $A_{0s}$ .

Para se estudar a correlação entre  $F_{0s}$  e a espessura das FS, selecionaram-se os valores de  $F_{0s}$  que resultaram dos perfis médios de  $V_s$  obtidos no Holocénico e em que se alcançou o Plio-Plistocénico ou o Jurássico. Tendo em conta que se obtiveram cinco valores de  $F_{0s}$  para cada coluna de solo (um com cada sismo), calculou-se o valor médio dessas frequências de modo a correlacionarem-se as duas variáveis.

Para se correlacionarem os valores de  $F_{0s}$  com a profundidade de  $N_{SPT60}$ , consideraram-se apenas as frequências das funções de transferência que resultaram de perfis médios de  $V_s$  que cumprissem

simultaneamente três condições: (i) que se localizassem a menos de 300 m de distância de um furo de sondagem com ensaios SPT, (ii) que os ensaios SPT e ReMi tivessem sido executados na mesma litologia e (iii) que as curvas médias de  $V_s$  tivessem alcançado profundidades superiores à profundidade da superfície de  $N_{SPT60}$ . Os valores de  $N_{SPT60}$  foram obtidos em sondagens situadas nos locais onde se realizaram os ensaios ReMi ou nas grelhas de interpolação elaboradas com os dados geotécnicos (Capítulo II) mas cumprindo sempre a primeira condição.

### 5.2.5.2. Comparação dos resultados 1D com as curvas H/V

A metodologia empregue na comparação destes resultados compreendeu dois tipos de aproximação: (i) o estudo da distribuição geográfica das interpolações obtidas com os valores de  $F_{0s}$ ,  $F_0$  e  $F_1$  e (ii) a comparação gráfica e numérica das funções de transferência com as curvas H/V. No primeiro tipo de aproximação utilizaram-se as interpolações de  $F_{0s}$  e  $A_{0s}$  elaboradas segundo a metodologia definida em 5.2.4.

Na Figura 5.11 apresentam-se as funções de transferência calculadas com os cinco sismos e a curva H/V calculada para o mesmo local. A partir dos cinco valores de  $F_{0s}$  calculou-se o valor médio. Neste exemplo verificou-se que o valor médio de  $F_{0s}$  foi semelhante ao valor obtido para  $F_0$ .

Na comparação numérica entre as curvas H/V e as funções de transferência consideraram-se os valores médios, máximos (Hokkaido2) e mínimos (Kobe) de  $F_{0s}$ , os valores do conjunto das funções de transferência analisadas, e os valores  $F_0$  e  $F_1$  e, se necessário,  $F_2$ .

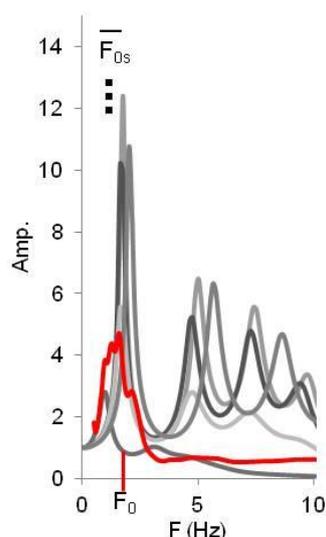


Figura 5.11 - Funções de transferência calculadas com cinco sismos e a curva H/V obtida para o mesmo local.  $F_{0s}$  – valor médio da frequência natural calculado com os cinco valores de  $F_{0s}$ ;  $F_0$  – pico de frequência da curva H/V (a vermelho).

#### 5.2.5.2.1. Distribuição geográfica de $F_{0s}$ , $F_0$ e $F_1$

O estudo da distribuição dos valores de  $F_{0s}$ ,  $F_0$  e  $F_1$  compreendeu duas aproximações: (i) a primeira em que se compararam as interpolações dos valores de  $F_{0s}$  com as interpolações referentes aos picos  $F_0$  e  $F_1$  calculadas no Capítulo III; (ii) a segunda que consistiu no cálculo das grelhas de interpolação resultantes das subtrações das interpolações ( $F_{0s}-F_{01}$ ) para o Barreiro e ( $F_{0s}-F_0$ ) para

Setúbal. Os valores de  $F_{01}$  corresponderam aos picos  $F_0$  ou  $F_1$  associados ao limite entre as FS e o Pliocénico no Barreiro (Vicêncio *et al.* 2015) (Capítulo III). Em Setúbal as comparações foram realizadas entre as interpolações de  $F_{0s}$  e  $F_0$ .

### 5.2.5.2.2. Funções de transferência e curvas H/V

Pretendem-se comparar as funções de transferência e as curvas H/V obtidas num mesmo local ou em locais próximos de modo a verificar-se a compatibilidade dos resultados obtidos com o recurso a duas técnicas distintas (ReMi-SHAKE2000 e Nakamura).

Na Figura 5.12 apresentam-se exemplos de funções de transferência e de curvas H/V obtidos em locais próximos aos ensaios ReMi. Nestes exemplos verificou-se que os picos H/V que se aproximaram mais do valor médio de  $F_{0s}$  foram os picos  $F_1$  e  $F_0$  das curvas H/V b) e c).

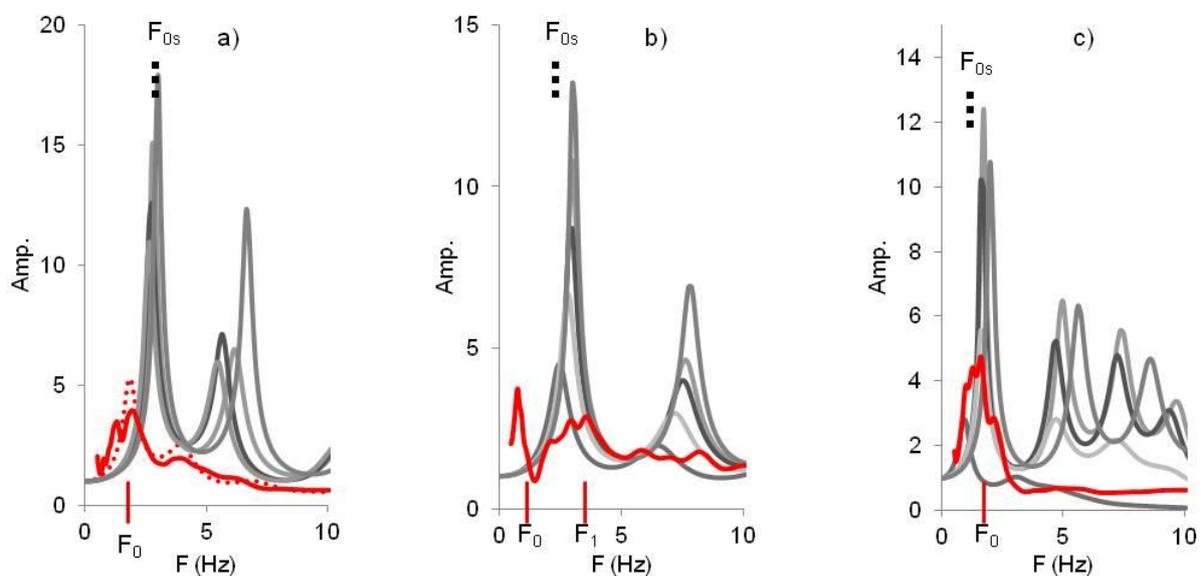


Figura 5.12 - Funções de transferência calculadas para três locais diferentes (a) ReMi A; (b) ReMi B; (c) ReMi C e com cinco sismos. Apresentam-se as curvas H/V (a vermelho cheio e a pontado) dos locais mais próximos dos ensaios ReMi.  $F_{0s}$  – Valor médio de  $F_{0s}$  calculado com os cinco valores de  $F_{0s}$ ,  $F_0$  e  $F_1$  – picos de frequência das curvas H/V.

Para se compararem os resultados obtidos com os dois métodos, selecionaram-se as funções de transferência e as curvas H/V de acordo com os seguintes critérios:

- Escolheram-se as funções de transferência obtidas para o Holocénico e cujos perfis médios de  $V_s$  tenham alcançado o *bedrock* (Pliocénico, Miocénico ou Jurássico). Pretendeu-se que os perfis  $V_s$  selecionados apresentassem um limite bem definido entre as FS e materiais mais rijos;
- Escolheram-se as curvas médias H/V mais próximas do ponto central dos ensaios ReMi cujos perfis médios foram utilizados nos cálculos das funções de transferência. Pretende-se com este critério diminuir a distância entre os ensaios ReMi e H/V, de modo a evitar grandes variações nas propriedades geotécnicas dos terrenos analisados. Sempre que possível utilizaram-se curvas H/V com picos bem individualizados e com amplitudes superiores a 2;
- Consideraram-se apenas os ensaios (ReMi e H/V) que se localizavam nas mesmas unidades geotécnicas;
- A comparação entre as funções de transferência e a curva H/V realizou-se, sempre que possível, segundo perfis para os quais foi possível obter informação relativa à espessura das

FS e  $N_{SPT60}$ . Com este critério pretende-se relacionar as frequências obtidas com propriedades geotécnicas.

Para cada conjunto de cinco funções de transferência, obtidas para um mesmo local, calculou-se um valor médio para  $F_{0s}$  (Figura 5.12).

No exemplo referente ao ReMi C (Figura 5.12c) os valores de  $F_{0s}$  obtidos com cada um dos sismos foram: Kobe 1 Hz, Tottori 1,8 Hz, Northridge 1,6 Hz, Hokkaido3 1,6 Hz e Hokkaido2 2 Hz. Com base nestes valores calculou-se o valor médio de  $F_{0s}$  (1,6 Hz) e identificou-se o valor mínimo (1 Hz) e o valor máximo de  $F_{0s}$  (2 Hz). A curva H/V apresentou um valor de  $F_0$  (1,3 Hz) próximo de  $F_{0s}$  e o seu registo foi efetuado a uma distância de 80 m do ensaio ReMi C.

Na Tabela 5.5 apresentam-se o valor médio, mínimo e máximo de  $F_{0s}$  para os cálculos efetuados com os resultados do ensaio ReMi C. Apresenta-se também o valor de  $F_0$  e a distância que separa o local onde se realizou o ensaio ReMi C e o local da curva H/V. Na apresentação dos resultados serão apresentadas tabelas idênticas de modo a resumir os dados que se pretendem comparar.

Tabela 5.5 – Frequência natural média, mínima e máxima do solo obtidas para o local do ensaio ReMi C e pico de frequência da curva H/V mais próxima. Média- frequência média das frequências naturais ( $F_{0s}$ ) dos cálculos efetuados com os cinco sismos; Min. – Valor mínimo de 1D (Kobe); Max. – Valor máximo 1D (Hokkaido2). Apresentam-se as distâncias [m] entre o ponto central do ensaio ReMi C e o local onde se registaram as vibrações ambientais.

Resultados obtidos com os cálculos do SHAKE2000 - $F_{0s}$ (Hz)	
Média; Min.; Max.	
1,6; 1,0; 2,0	
Resultados obtidos com as curvas H/V (frequência de pico)	
[Distância (m) entre H/V- ReMi C]	
H/V	1,3 Hz ( $F_0$ ) [80]

A comparação numérica entre as funções de transferência e as curvas H/V utiliza o valor médio de  $F_{0s}$ .

### 5.2.5.2.3. Comparação de $A_{0s}$ , $A_0$ e $A_1$

O estudo da distribuição geográfica dos valores de  $A_{0s}$ ,  $A_0$  e  $A_1$  compreendeu, tal como para as frequências, duas aproximações. Na primeira compararam-se as distribuições dos valores de  $A_{0s}$  com as distribuições referentes aos picos  $F_0$  e  $F_1$  calculadas no Capítulo III. A segunda consistiu no cálculo das distribuições resultantes das subtrações das distribuições ( $A_{0s}-A_{01}$ ) para o Barreiro e ( $A_{0s}-A_0$ ) para Setúbal. Os valores de  $A_{01}$  corresponderam às amplitudes dos picos  $F_0$  e  $F_1$  associados ao limite entre as FS e o Pliocénico no Barreiro (Vicêncio *et al.* 2015) (Capítulo III). Em Setúbal as comparações foram realizadas entre as distribuições de  $A_{0s}$  e  $A_0$ .

### 5.2.5.3. Funções de transferência e $V_{s30}$

A rigidez dos materiais pode influenciar os valores de  $F_{0s}$  e  $V_s$  pelo que as distribuições espaciais destas duas variáveis deverão estar relacionadas. Para se compararem as distribuições destas duas propriedades serão comparadas as interpolações de  $F_{0s}$  e  $V_{s30}$ .

### 5.2.6. Suscetibilidade dos edifícios a efeitos de ressonância

Os danos no edificado aumentam quando o período natural de vibração dos edifícios iguala, ou se aproxima, do período predominante dos solos, em virtude de se observarem fenómenos de ressonância. Oliveira & Navarro (2010) obtiveram uma relação entre o período de vibração dos edifícios e o número de pisos segundo a relação  $T=0,045N$  (sendo N o número de pisos). Para se identificarem as áreas onde os edifícios podem sofrer fenómenos de ressonância utilizou-se a seguinte metodologia:

- Para cada local analisado obtiveram-se cinco funções de transferência (Figura 5.13). Com base nos cinco valores de  $F_{0s}$  calculou-se um valor médio de  $F_{0s}$ ;
- Calcularam-se as distribuições espaciais com os valores médios de  $F_{0s}$ ;
- Com base na relação  $T=0,045N$  calculou-se o número de pisos dos edifícios que poderão entrar em ressonância (Tabela 5.6).

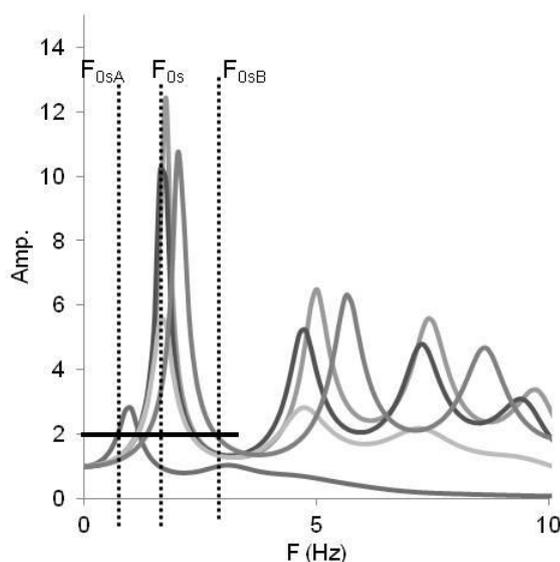


Figura 5.13 – Funções de transferência obtidas para determinado local.  $F_{0s}$  - valor médio das cinco funções de transferência;  $F_{0sA}$  - valor mínimo de  $F_{0s}$  do conjunto das funções que apresenta amplificação  $\geq 2$ ;  $F_{0sB}$  - valor de máximo de  $F_{0s}$  do conjunto das funções que apresenta amplificação = 2.

Tabela 5.6 - Relação entre o número de pisos dos edifícios e as frequências.

Número de pisos dos edifícios	Valores de $F_{0s}$ (Hz)
8 ou mais pisos	1-3
7 a 5 pisos	3-5
4 e 3 pisos	5-8
2 e 1 pisos	$\geq 8$

Os resultados obtidos com esta metodologia fornecem uma indicação dos locais de maior perigo de ocorrência de fenómenos de ressonância mas por defeito. Na Figura 5.13 apresentam-se cinco funções de transferência calculadas com os cinco sismos para um mesmo local. É possível definir para estas cinco funções um intervalo de frequências em que as amplificações calculadas são superiores a 2. Esse intervalo corresponde aos valores compreendidos entre  $F_{0sA}$  e  $F_{0sB}$  (Figura 5.13). É neste intervalo que se situa o valor médio de  $F_{0s}$  que foi utilizado na interpolação utilizada na metodologia. Não obstante, verifica-se que existe um conjunto de frequências com amplificações superiores a 2 e que não são consideradas na presente metodologia. Ou seja, existem edifícios com diferentes frequências que podem existir nesse local e que não são contemplados na presente análise.

### 5.3. Resultados e discussão

Seguidamente apresentam-se os resultados obtidos com a metodologia atrás descrita.

#### 5.3.1. Funções de transferência

Os cálculos efetuados com os cinco acelerogramas permitiram obter funções de transferência para 34 locais no Barreiro e 42 em Setúbal. Calcularam-se para estas duas áreas 380 funções de transferência, 170 para o Barreiro e 210 para Setúbal (Anexo XII).

Considerando-se os resultados obtidos para o Barreiro e Setúbal (Anexo XII), verificou-se que as funções de transferência obtidas com o sismo de Kobe foram as que apresentaram menores valores de amplificações ( $A_{0s}$ ), na maior parte dos casos inferiores a 5.

As amplificações máximas, pontualmente superiores a 10, encontraram-se nos cálculos efetuados com o sismo de Hokkaido2 para frequências naturais superiores a 5 Hz. Os valores de  $A_{0s}$  mais elevados (superiores 20) foram calculados com o sismo de Hokkaido2 na zona E do Barreiro. Estes cálculos foram realizados com perfis médios de  $V_s$  obtidos no Pliocénico, com exceção do perfil do ensaio ReMi 34 que foi executado no Holocénico. Em Setúbal, os valores mais elevados de  $A_{0s}$  (superiores a 20) foram igualmente obtidos com o sismo de Hokkaido2 e para locais situados no Pliocénico e no Jurássico. Os perfis médios de  $V_s$  que serviram de *input* nos cálculos foram obtidos com ensaios ReMi ativos com exceção do ReMi 10.

Observou-se na maior parte das funções de transferência a existência de vários picos de frequências com amplificações superiores a 2 (Anexo XII). Este facto tem como consequência a existência de amplificações do movimento do solo em diversas frequências para um mesmo local (Boon *et al.* 2015).

Na Figura 5.14 apresentam-se cinco funções de transferência obtidas para um mesmo local e observa-se um primeiro intervalo de frequências onde se situam os valores mais elevados de  $A_{0s}$  ( $F_{0sA}$ ). Para além destes valores existem outros ( $F_{0sB}$  e  $F_{0sC}$ ) onde se obtiveram valores de  $A_{0s}$  superiores a 2. Estes picos de amplificação podem ser responsáveis por fenómenos de ressonância em edifícios com diferentes alturas mas localizados numa mesma área.

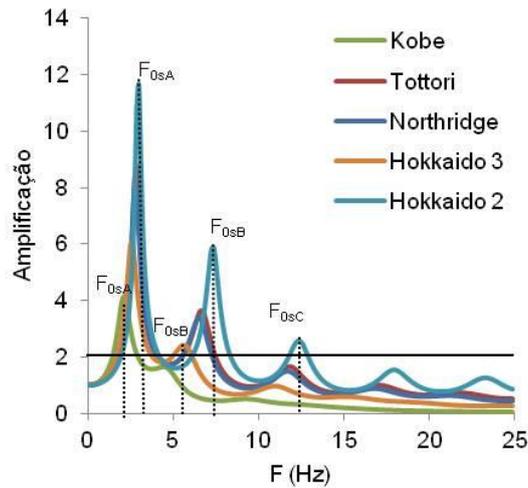


Figura 5.14 – Cinco funções de transferência calculadas para um mesmo local e picos de frequências com amplificações superiores a 2.

Alguns autores obtiveram com o SHAKE2000 e com sísmos de magnitudes entre 5,0 e 7,7 frequências naturais dos solos compreendidas entre 1 Hz e 7,5 Hz e amplificações entre 3 e 20 (Anbazhagan *et al.* 2006 e 2013, Thaker *et al.* 2009, Chandrasekaran *et al.* 2012, Nunziata *et al.* 2012, Firat *et al.* 2015). Roy *et al.* (2013) utilizaram a mesma aplicação no cálculo de funções de transferência para diferentes distâncias epicentrais. Usaram acelerogramas de cinco estações com diferentes distâncias epicentrais (entre 37 km e 200 km) de um sismo de magnitude 6,6 e verificaram que a resposta da coluna de solo apresentou, com o aumento da distância epicentral, um aumento das frequências ( $F_{0s}$ ) e das amplificações máximas ( $A_{0s}$ ) (Figura 5.15).

Pode concluir-se que os resultados de  $F_{0s}$  e  $A_{0s}$  obtidos para o Barreiro e Setúbal (Anexo XII) se enquadram nos resultados obtidos pelos autores acima referidos.

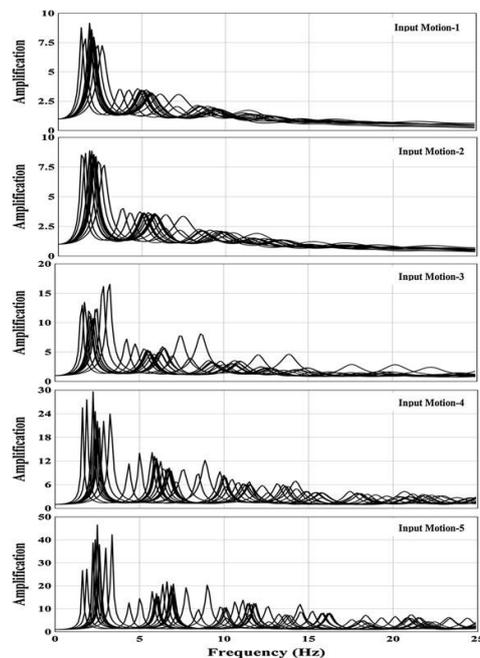


Figura 5.15 - Variação dos espectros de amplificação em função das distâncias epicentrais. *Input Motion-1*: 37 km; *Input Motion-2*: 50 km; *Input Motion-3*: 103 km; *Input Motion-4*: 150 km; *Input Motion-5*: 202 km (de Roy *et al.* 2013).

### 5.3.2. Distribuição das frequências naturais dos solos e respectivas amplificações

A distribuição espacial das frequências naturais dos solos no Barreiro foram idênticas para os cinco sismos modelados (Figuras 5.16 e 5.17). Observou-se uma área bem definida em que  $F_{0s}$  apresentou valores iguais ou inferiores a 5 Hz, que se localiza no enfiamento da ribeira que atravessa os terrenos da Baía Tejo, de S para N, bem visível no Holocénico da carta geológica do Barreiro e que se prolonga no Plio-Plistocénico até ao terminal fluvial do Barreiro já no Holocénico. Existe uma outra zona a SE e no Holocénico com o mesmo intervalo de frequências.

As áreas com  $F_{0s}$  inferiores a 2 Hz localizam-se numa área relativamente restrita do Holocénico do Barreiro. Seria de esperar, em função das espessuras das FS, que neste local alcançaram os seus valores mais elevados (Capítulo II), que estas frequências se distribuíssem por uma maior superfície. Este facto poderá ser explicado pela existência de aterros do tipo 2 neste local, terrenos com velocidades de  $V_s$  mais altas, constituídos por material antropogénico (Capítulos II e IV). O facto do ensaio ReMi 27 (executado neste local do Holocénico) não ter atingido o Pliocénico aos 17,8 m de profundidade pode ter contribuído para que os cálculos efetuados com o SHAKE2000 tenham apresentado valores de  $F_{0s}$  entre os 3 Hz (Kobe) e os 5,6 Hz (Hokkaido2).

O padrão da distribuição dos valores de  $A_{0s}$  foi semelhante para os cinco sismos e análoga à distribuição dos valores de  $F_{0s}$ . Nas áreas em que as frequências naturais dos solos apresentaram valores iguais ou inferiores a 5 Hz, os valores das amplificações variaram entre 5 (Kobe) e 15 (Hokkaido2).

Tendo em conta as diferenças encontradas entre a distribuição dos valores de  $F_{0s}$  e  $A_{0s}$  e a distribuição das diferentes unidades litoestratigráficas, pode concluir-se que deverão existir outros fatores que poderão ter condicionado a distribuição das frequências dos solos. A espessura das FS e a profundidade a que se encontra  $N_{SPT60}$  poderão influenciar a distribuição de  $F_{0s}$  e  $A_{0s}$ .

Nas Figuras 5.18 e 5.19 apresentam-se as distribuições das frequências naturais dos solos para Setúbal e as respetivas amplificações. Verificou-se que, tal como para o Barreiro, o padrão de distribuição geográfica das frequências naturais dos solos foi idêntico com os cinco sismos. Obtiveram-se valores de  $F_{0s} \leq 4-5$  Hz no Holocénico e nalgumas áreas restritas do Plio-Plistocénico localizadas a E da ribeira do Livramento. Obtiveram-se frequências inferiores no Holocénico, no Plio-Plistocénico a NE da ribeira do Livramento e em mais cinco locais na direção da península da Mitrena.

O padrão da distribuição dos valores de  $A_s$  foi semelhante ao padrão observado para  $F_{0s}$  e, nos locais em que a frequência dos solos foi inferior a 5 Hz, os valores de  $A_{0s}$  foram inferiores a 5 (Kobe) e 15 (Hokkaido2).

Ao contrário do Barreiro, onde se obtiveram frequências superiores ou iguais a 5 Hz no Holocénico, em Setúbal estas frequências localizaram-se exclusivamente no Plio-Plistocénico ou no Mesozoico.

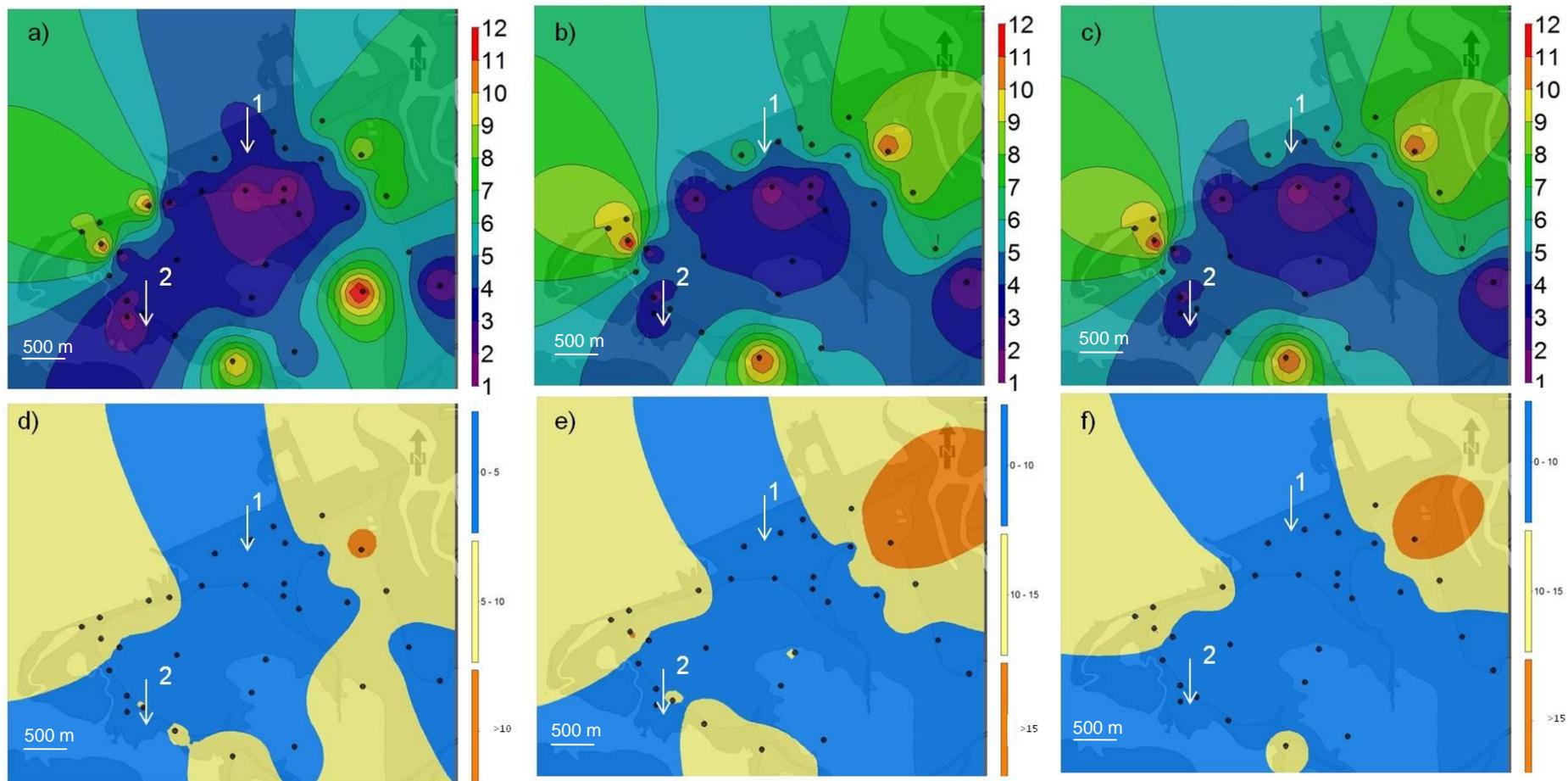


Figura 5.16 – Resultados da distribuição dos valores de  $F_{0s} \leq 12$  Hz para o Barreiro calculados com os sismos (a) Kobe; (b) Tottori; (c) Northridge. Resultados da distribuição dos valores de  $A_{0s}$  calculados com os sismos (d) Kobe; (e) Tottori; (f) Northridge. 1 – Terrenos da Baía Tejo; 2 – Terminal fluvial do Barreiro.

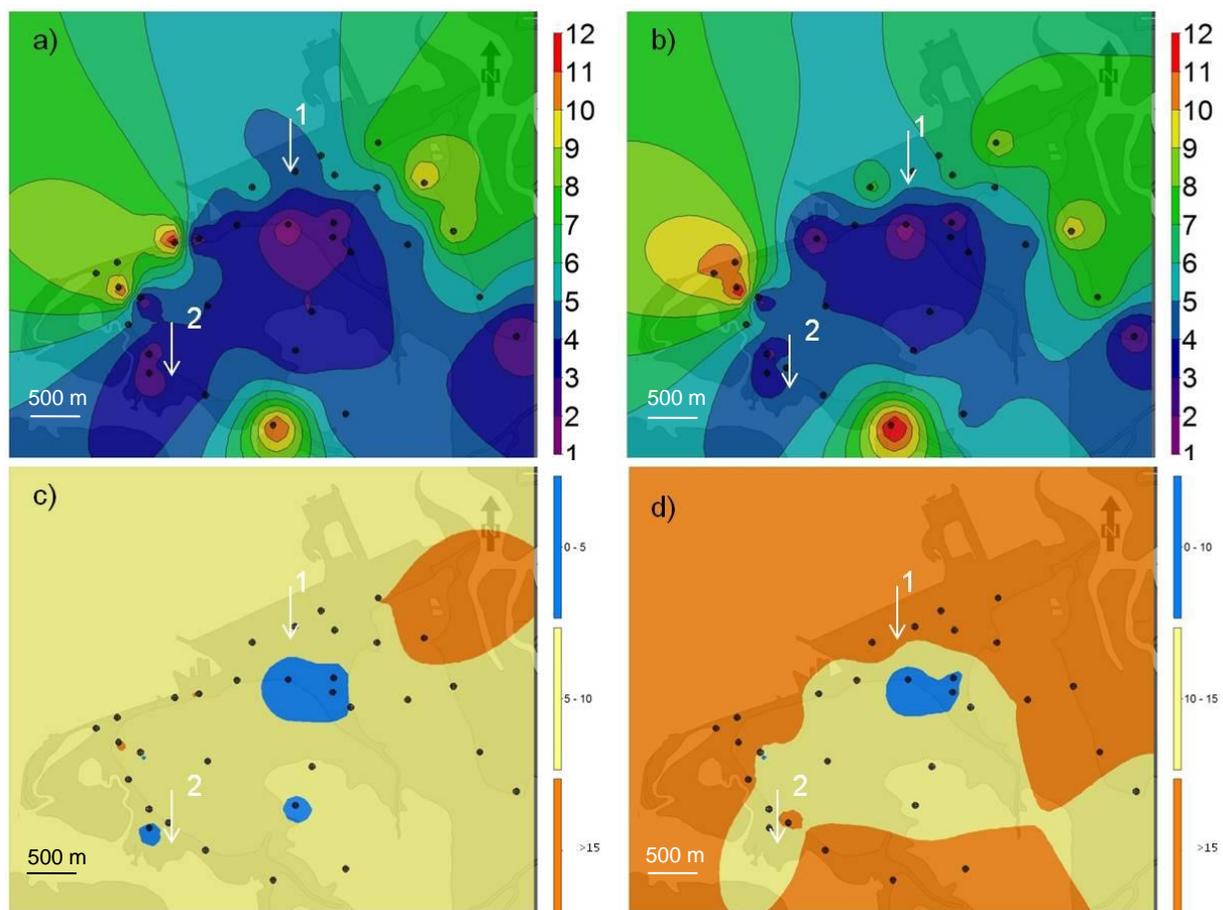


Figura 5.17 - Resultados da distribuição dos valores de  $F_{0s} \leq 12$  Hz para o Barreiro calculados com os sismos (a) Hokkaido3; (b) Hokkaido2. Resultados da distribuição dos valores de  $A_{0s}$  calculados com os sismos (c) Hokkaido3; (d) Hokkaido2. 1 – Terrenos da Baía Tejo; 2 – Terminal fluvial do Barreiro.

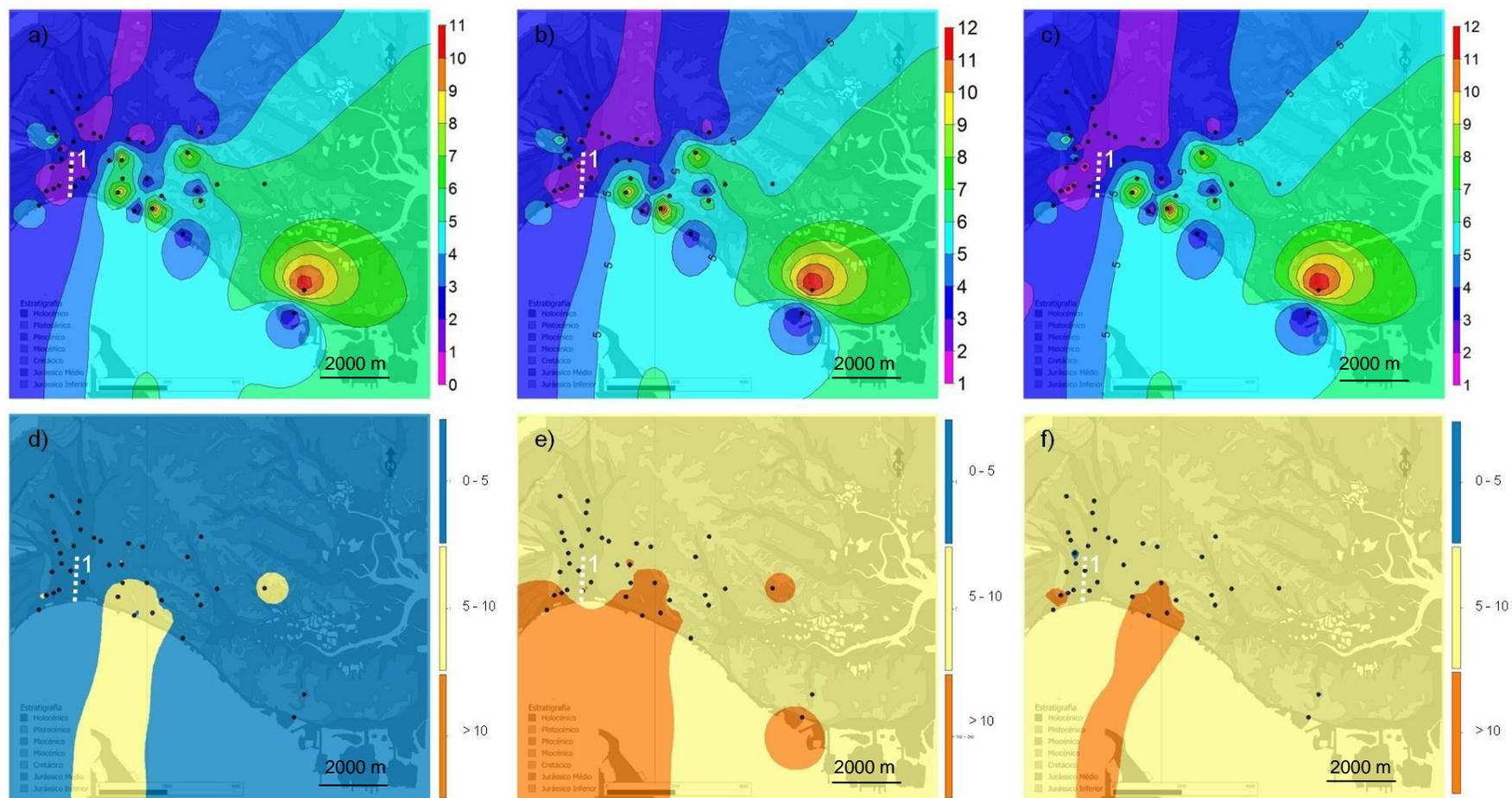


Figura 5.18 - Resultados da distribuição dos valores de  $F_{0s} \leq 12$  Hz para Setúbal calculados com os sismos (a) Kobe; (b) Tottori; (c) Northridge. Resultados da distribuição dos valores de  $A_{0s}$  calculados com os sismos (d) Kobe; (e) Tottori; (f) Northridge. 1 – localização aproximada da Ribeira do Livramento.

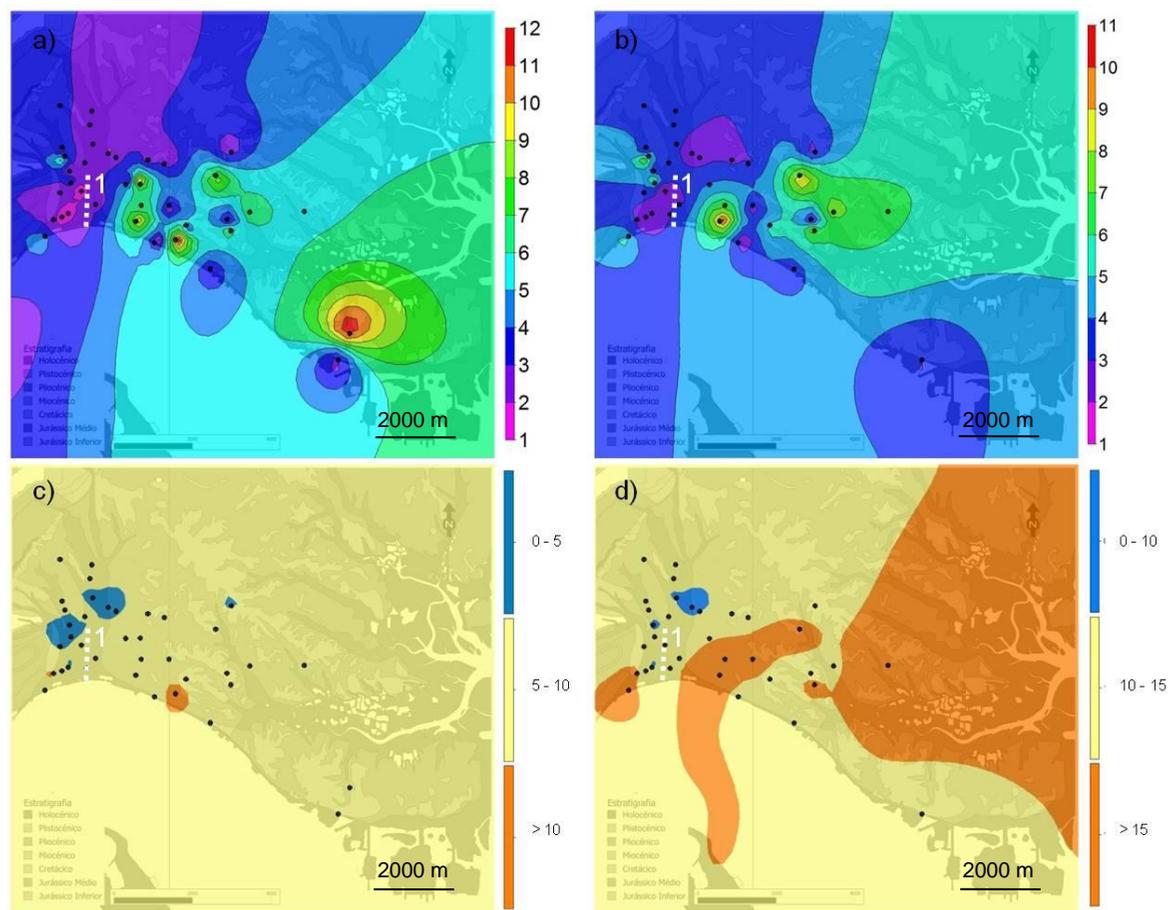


Figura 5.19 - Resultados da distribuição dos valores de  $F_{0s} \leq 12$  HZ para Setúbal calculados com os sismos (a) Hokkaido3; (b) Hokkaido2. Resultados da distribuição dos valores de  $A_{0s}$  calculados com os sismos (c) Hokkaido3; (d) Hokkaido2. 1 – localização aproximada da Ribeira do Livramento.

### 5.3.3. Comparação das funções de transferência com propriedades geotécnicas, H/V e $V_{s30}$

Compara-se a distribuição das frequências naturais dos solos e respetivas amplificações com propriedades geotécnicas e com  $V_{s30}$ . Relacionam-se os valores de  $F_{0s}$ ,  $A_{0s}$  com  $F_0$ ,  $A_0$  e comparam-se algumas funções de transferência com curvas H/V.

As interpolações obtidas com os valores de  $F_{0s}$  e  $A_{0s}$  calculados com os cinco sismos mostraram uma grande semelhança (secção 5.3.2). Por essa razão, as análises subsequentes, que poderiam ser efetuadas com os resultados obtidos com todos os sismos, serão realizadas apenas com as interpolações do sismo de Kobe. As conclusões obtidas com esta análise poderão ser estendidas aos restantes resultados obtidos com os restantes sismos.

#### 5.3.3.1. Frequência natural dos solos e propriedades geotécnicas

As colunas de solo do Holocénico apresentam geralmente maiores espessuras de FS (aterros e aluviões) do que as colunas do Plio-Plistocénico e, em termos gerais, as FS são menos rígidas que o Plio-Plistocénico. Tendo em conta os valores médios de  $N_{SPT}$  obtidos para o Barreiro e Setúbal, verificou-se que as FS possuem menor rigidez do que os materiais presentes nas secções do Plio-Plistocénico (Capítulo II). Os valores médios de  $N_{SPT}$  obtidos para as FS no Barreiro e Setúbal foram de 12-18 e de 15-27, respetivamente. O valor médio de  $N_{SPT}$  alcançado para o Plio-Plistocénico foi de 46 para as duas regiões.

Como já foi referido, as frequências naturais de um solo relacionam-se com a rigidez dos materiais (Kramer 1996, Yilmaz 2015), pelo que será de esperar a existência de uma relação entre as frequências naturais e as unidades litoestratigráficas. Assim, os valores de  $F_{0s}$  calculados para o Plio-Plistocénico deverão ser superiores aos calculados para o Holocénico.

Para se estudar esta hipótese consideraram-se os cinco valores de  $F_{0s}$  obtidos para cada local (um valor por cada função de transferência determinada com um sismo) e calculou-se um valor médio de  $F_{0s}$ . Separaram-se os valores médios de  $F_{0s}$  provenientes dos ensaios ReMi efetuados no Holocénico dos que foram executados no Plio-Plistocénico para as regiões de Barreiro e Setúbal. Os valores médios de  $F_{0s}$  obtidos para o Holocénico e Plio-Plistocénico foram de 5,6 Hz e 5,5 Hz para o Barreiro e de 3,0 Hz e 6,3 Hz para Setúbal. No Barreiro não se verificou uma diferenciação dos valores médios de  $F_{0s}$  em função das unidades litoestratigráficas mas, em Setúbal, os resultados corroboraram a hipótese formulada.

Esta diferenciação de comportamentos entre o Barreiro e Setúbal poderá dever-se à circunstância de ter sido possível realizar um maior número de ensaios ReMi passivos no Holocénico de Setúbal. Este facto permitiu alcançar maiores profundidades nos perfis de  $V_s$  utilizados nos cálculos com o SHAKE2000 e, por conseguinte, considerar uma maior espessura das FS nas funções de transferência.

Na Figura 5.20 apresentam-se quatro exemplos de funções de transferência em que os valores de  $F_{0s}$  obtidos no Plio-Plistocénico foram superiores aos alcançados no Holocénico. As funções obtidas no Holocénico da cidade de Setúbal, onde as FS apresentaram as espessuras mais elevadas, mostraram frequências mais baixas. No local R1, onde se realizaram os ensaios ReMi 1, a espessura das FS apresentou um valor de 20 m e o valor de  $F_{0s}$  situou-se entre 1 Hz e 2 Hz. No troço dos ensaios ReMi 2, onde a espessura das FS exibiu um valor de 7 m, o valor de  $F_{0s}$  situou-se entre 2 Hz e 3 Hz. As curvas obtidas no Plio-Plistocénico, onde a espessura das FS é por vezes inexistente, exibiram valores de  $F_{0s}$  de 6 Hz para o local do ensaio ReMi 10, onde não existiram FS, e de 13 Hz

para o local dos ensaios ReMi 27, onde se identificou uma fina camada de FS com 0,4 m de espessura.

Constatou-se para estas quatro funções de transferência que os valores de  $A_{0s}$  no Plio-Plistocénico são superiores ( $A_{0s}=20$ ) do que no Holocénico ( $A_{0s}=12-13$ ). No entanto, quando se calcularam os valores médios de  $A_{0s}$  tal como para  $F_{0s}$ , verificou-se que não existem diferenças significativas nos resultados obtidos para as duas unidades. Os valores médios de  $A_{0s}$  obtidos para o Barreiro foram de 9,5 (para o Holocénico) e 10,9 (para o Plio-Plistocénico) e, para Setúbal, foram 7,7 (Holocénico) e 9,3 (Plio-Plistocénico).

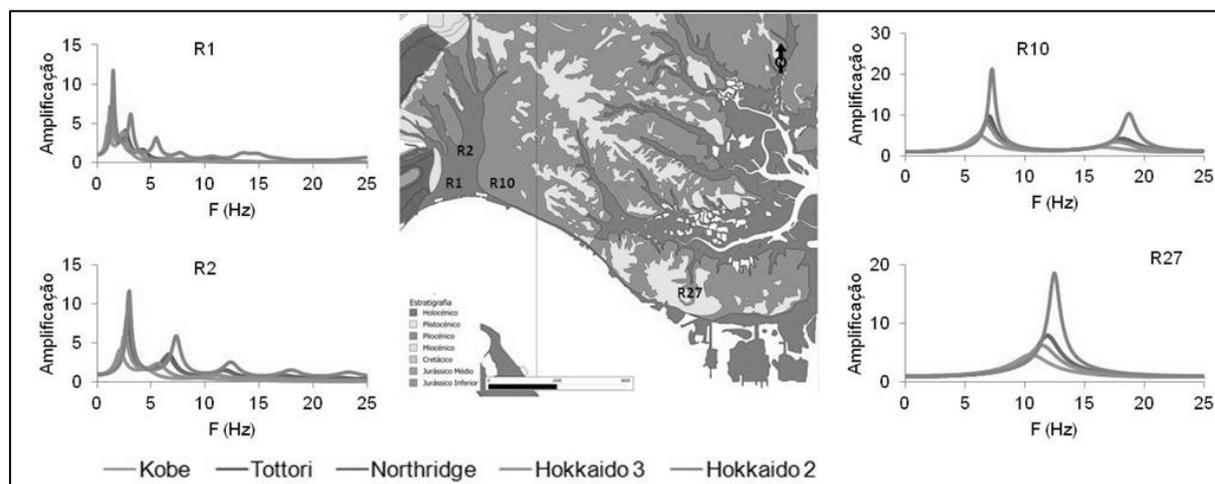


Figura 5.20 - Funções de transferência obtidas no Holocénico (R1 – ReMi 1; R2 – ReMi 2) e no Plio-Plistocénico (R10 – ReMi 10; R27 – ReMi 27) de Setúbal.

Na Figura 5.21 apresentam-se as distribuições de  $F_{0s}$ ,  $A_{0s}$  e da espessura das formações superficiais obtidas a partir dos logs de sondagens. Observou-se a existência de uma boa relação entre essas variáveis: as áreas de maiores espessuras de FS, localizadas no Holocénico, apresentaram frequências inferiores ou iguais a 5-6 Hz e amplificações inferiores a 5. Os locais com valores superiores a 8-10 Hz e com as amplificações superiores localizam-se em zonas com reduzida espessura de FS. A zona de implementação do quartel dos Bombeiros Voluntários do Barreiro e uma área central são locais em que não se verifica esta relação (Figura 5.21c). Na área central, onde a espessura das FS é reduzida, os valores de  $F_{0s}$  são iguais a 5-6 Hz e no local do quartel do Bombeiros com espessuras de FS superiores 12 m apresenta valores de  $F_{0s}$  superiores ao que seria de esperar.

A desconformidade detetada na área central do Barreiro poderá ser devida à falta de dados relativos a sondagens. Neste local, esta lacuna de informação relativa à espessura das FS, pode traduzir-se numa distribuição das espessuras das FS que não corresponderá à realidade. A discrepância detetada na área do quartel dos Bombeiros pode ter resultado do facto do ensaio ReMi, do qual se retirou o perfil médio de  $V_s$ , ter sido realizado no limite entre o Pliocénico e o Holocénico onde a espessura das FS é de apenas 3 m. A cerca de 100 m para W, na direção do rio, existem sondagens onde estas espessuras alcançam valores entre 9 m e 13 m e que são responsáveis pelas distribuições obtidas.

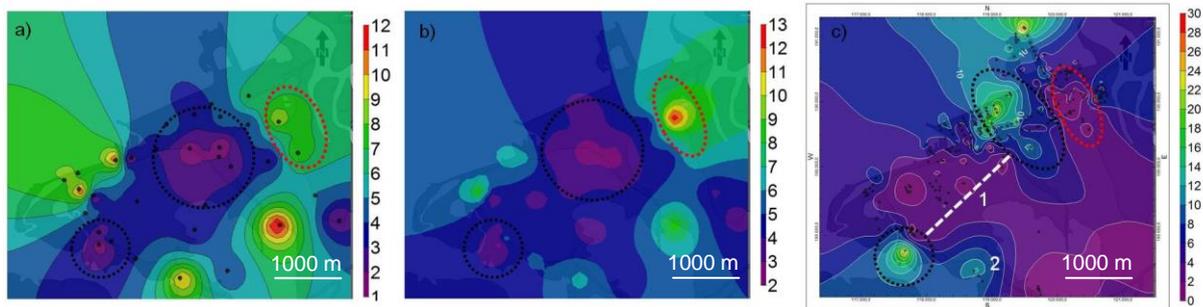


Figura 5.21 - Distribuição espacial para o Barreiro e com o sismo de Kobe de: (a)  $F_{0s}$  (Hz); (b)  $A_{0s}$ ; (c) espessura das FS (obtidas com base nos *logs* de sondagens). Ponteados a preto locais com menores frequências, menores  $A_{0s}$  e maiores espessuras de FS ( $F_{0s} \leq 5-6$  Hz;  $A_s \leq 5$ ; FS  $\geq 4$  m). Ponteados a vermelho locais com maiores frequências e amplificações e menores espessuras de FS. 1 - Áreas de desconformidade entre as distribuições apresentadas; 2 - localização do quartel dos Bombeiros do Barreiro.

Na área de Setúbal, mais vasta que a do Barreiro, verificou-se igualmente a existência de uma boa relação entre as distribuições da espessura das FS e dos valores de  $F_{0s}$ . Esta relação é bem visível no Holocénico da cidade de Setúbal. As áreas com maior espessura de FS ( $> 14$  m) estão associadas a valores de  $F_{0s} \leq 2$  Hz e  $A_{0s} \leq 4$  (Figura 5.22). São exceção algumas áreas mais para E, onde a interpolação obtida para a espessura das FS apresenta valores entre 20 m e 30 m e onde se obtiveram valores de  $F_{0s}$  superiores a 10 Hz. Aqui parece existir um comportamento contrário, mas que se explica pela ausência de ensaios ReMi efetuados no Holocénico: a ausência de pontos de baixas frequências, típicas do Holocénico com espessuras consideráveis de FS, possibilita o aparecimento de áreas no Holocénico com elevadas frequências que não corresponderão à realidade.

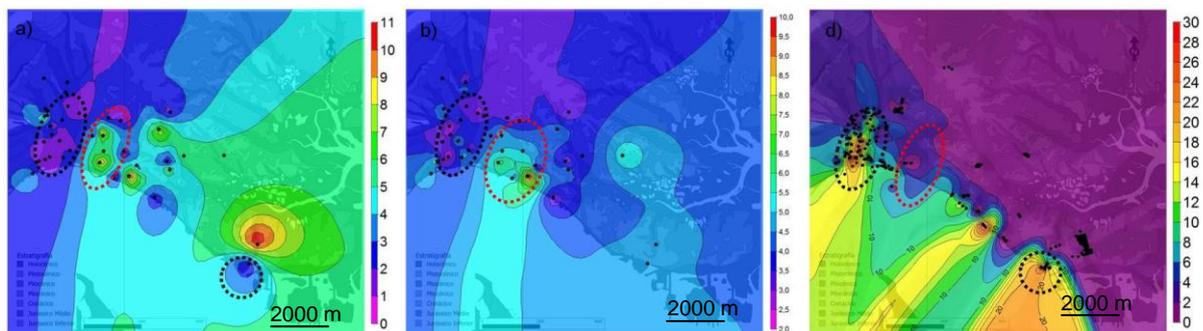


Figura 5.22 - Distribuição espacial para Setúbal e com o sismo de Kobe de: (a)  $F_{0s}$  (Hz); (b)  $A_{0s}$ ; (c) espessura das FS (obtidas com base nos *logs* de sondagens). Ponteados a preto locais com menores frequências, menores  $A_{0s}$  e maiores espessuras de FS ( $F_{0s} \leq 2$  Hz;  $A_s \leq 4$ ; FS  $\geq 14-16$  m). Ponteados a vermelho locais com maiores frequências e amplificações e menores espessuras de FS.

Para se estudar no Barreiro a correlação numérica entre  $F_{0s}$  e a espessura das FS consideraram-se os critérios de seleção descritos na metodologia (5.2.5.1). Em Setúbal, aplicaram-se os mesmos critérios mas analisou-se apenas uma parte do Holocénico da cidade. A escolha desta área teve como objetivo obter-se uma correlação numa zona com uma maior densidade de pontos (116) com informação relativa à espessura das FS.

A aplicação dos critérios de seleção às duas áreas permitiu obter 19 pontos para o Barreiro (Figura 5.23a) e 13 pontos para a zona S da cidade de Setúbal (Figura 5.23b).

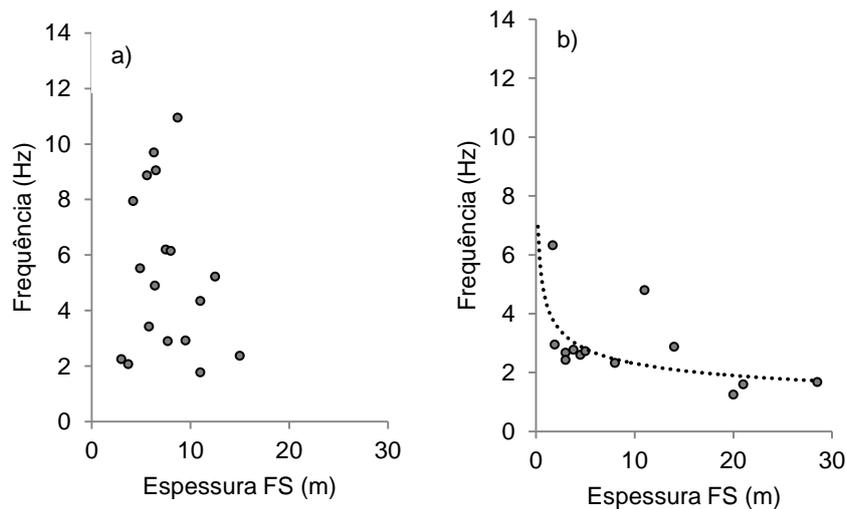


Figura 5.23 - Relação entre os valores médios de  $F_{0s}$  identificados nas funções de transferência calculadas com os cinco sismos e a espessura das formações superficiais para: (a) o Barreiro; (b) Holocénico da zona sul da cidade de Setúbal.

A relação obtida para o Barreiro apresenta um comportamento dispersivo, sem uma correlação entre  $F_{0s}$  e a espessura das FS. A parte sul da cidade Setúbal, com menos valores, apresentou uma correlação entre as duas variáveis segundo a relação  $y=4,4201x^{-0,282}$  e com um valor de  $R^2 = 0,4$ .

O carácter dispersivo encontrado na relação  $F_{0s}$  – espessura das FS para o Barreiro, pode ser explicado pelo menor número de sondagens utilizadas na interpolação da espessura dessas formações. O facto de não ter sido possível obter qualquer função de transferência associada a locais com espessuras entre 20 m e 30 m poderá também ter contribuído para este resultado.

Na Figura 5.24 apresenta-se a distribuição no Barreiro das frequências naturais do solo para o sismo de Kobe e as profundidades a que se encontra a superfície de  $N_{SPT60}$ . Verifica-se que a maiores profundidades da superfície de  $N_{SPT60}$  (superiores a 16 m) correspondem menores frequências naturais dos solos (entre 1 Hz e 6 Hz) e, nas áreas em que  $N_{SPT60}$  se apresenta à superfície, os valores das frequências são superiores. Obteve-se uma relação mais estreita entre a distribuição de  $F_{0s}$  e a de  $N_{SPT60}$  do que a obtida entre  $F_{0s}$  e a espessura das FS.

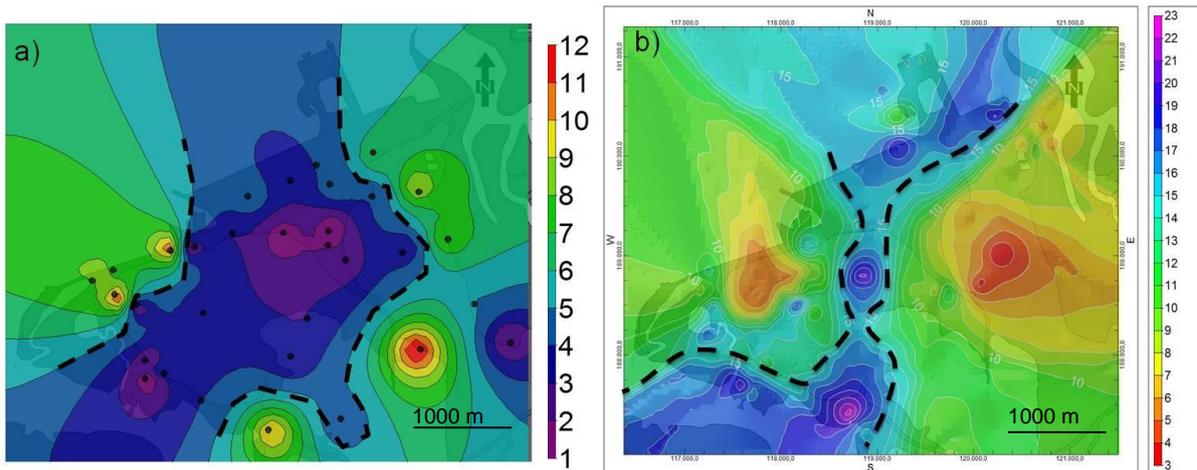


Figura 5.24 - Distribuição no Barreiro de (a)  $F_{0s}$  (Hz) com o sismo de Kobe; (b) profundidade a que se encontra a superfície de  $N_{SPT60}$  (m). Tracejado a preto: isolinhas de  $F_{0s} \approx 5-6$  Hz;  $N_{SPT60} \approx 14-15$  m.

Em Setúbal observa-se igualmente a existência de uma boa relação entre a distribuição geográfica das interpolações obtidas com as duas variáveis. Os solos do Holocénico da cidade de Setúbal apresentam uma faixa contínua com valores de  $F_{0s}$  inferiores a 4 Hz. Esta distribuição é semelhante à disposição da superfície de  $N_{SPT60}$  com 10 m de profundidade (Figura 5.25). As áreas em que o nível de  $N_{SPT60}$  se encontra mais à superfície correspondem aos locais onde as frequências naturais são mais elevadas e estão localizadas no Plio-Plistocénico.

Tal como na Figura 5.24, existem áreas mais para E, no Holocénico, onde as duas distribuições apresentam comportamento contrário: zonas com maiores profundidades de  $N_{SPT60}$  apresentam frequências superiores a 10 Hz. Esta diferença explica-se, também, pela ausência de ensaios ReMi realizados nesses locais do Holocénico.

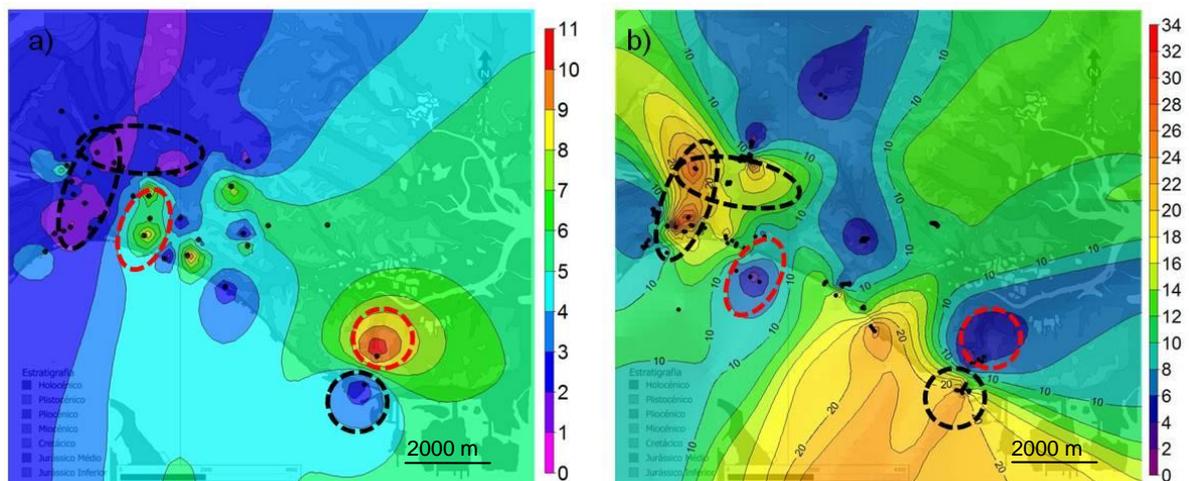


Figura 5.25 - Distribuição em Setúbal de (a) valores de  $F_{0s} \leq 12$  Hz obtidos com o sismo de Kobe; (b) distribuição da profundidade de  $N_{SPT60}$  (m). Tracejado a preto – locais com baixas frequências e maiores profundidades de  $N_{SPT60}$  ( $F_{0s} \leq 4$  Hz;  $N_{SPT60} \approx 14-16$  m); tracejado a vermelho – locais com maiores frequências e menores profundidades de  $N_{SPT60}$  ( $F_{0s} > 6$  Hz;  $N_{SPT60} < 6$  m).

Aplicou-se a metodologia delineada em 5.2.5.1 para se estudar a relação entre  $F_{0s}$  e  $N_{SPT60}$  tendo-se obtido 95 funções de transferência de 19 locais (11 em Setúbal e 8 no Barreiro). Na Figura 5.26 apresentam-se as correlações obtidas entre  $F_{0s}$  e  $N_{SPT60}$  para o Barreiro, Setúbal e para Barreiro e Setúbal em conjunto.

Obtiveram-se as seguintes correlações e respetivos coeficientes de correlação:

- (i) Barreiro:  $y=12,8x^{-0,579}$   $R^2 = 0,4$ ;
- (ii) Setúbal:  $y=24,6x^{-0,953}$   $R^2 = 0,6$ ;
- (iii) Barreiro e Setúbal:  $y=13,8x^{-0,4608}$   $R^2 = 0,5$ .

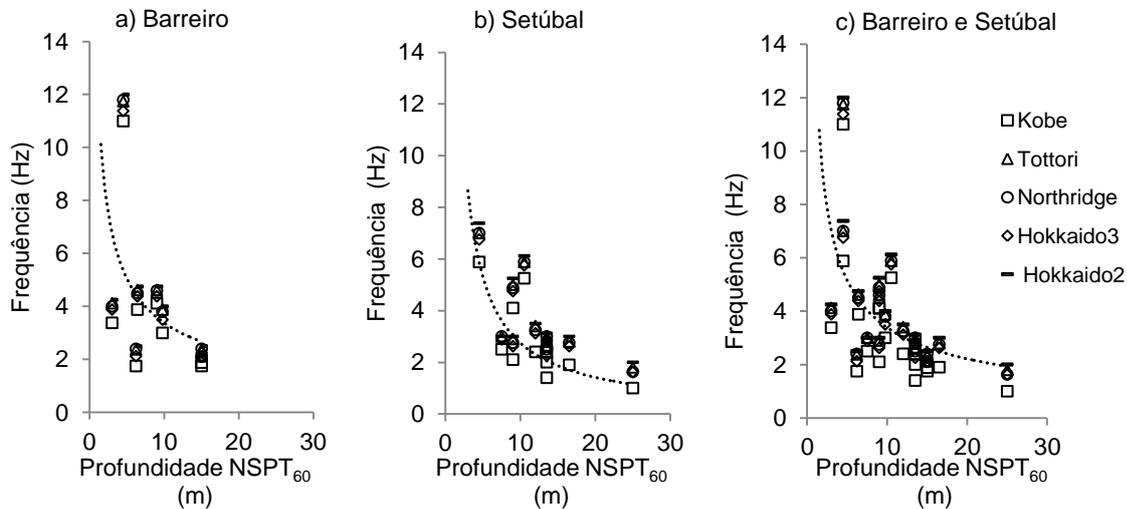


Figura 5.26 - Correlações entre  $F_{0s}$  e a profundidade de  $N_{SPT60}$  para: (a) Barreiro; (b) Setúbal; (c) Barreiro e Setúbal.

As correlações obtidas estão de acordo com a relação existente entre a rigidez das colunas de solo e a sua frequência natural: quanto menor for a sua rigidez menor será a sua frequência natural (Kramer 1996, Yilmaz 2015).

Na Figura 5.27 apresenta-se a relação entre amplificações ( $A_{0s}$ ) e a profundidade de  $N_{SPT60}$ . Observa-se, ao contrário das frequências naturais dos solos, que não existe uma relação entre estas duas variáveis.

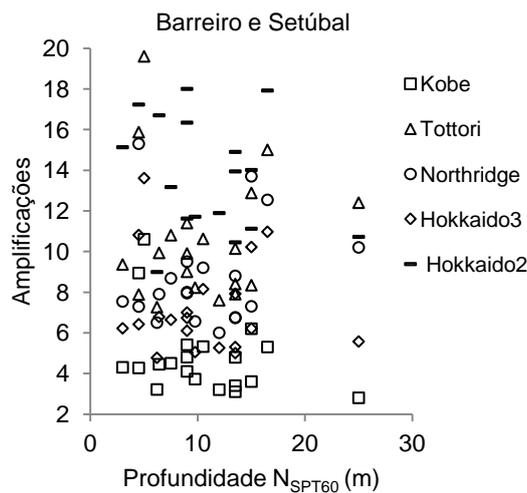


Figura 5.27 - Relação entre as amplificações ( $A_{0s}$ ) e a profundidade de  $N_{SPT60}$  para Barreiro e Setúbal.

### 5.3.3.2. Análise unidimensional e curvas H/V

#### 5.3.3.2.1. Distribuição de $F_{0s}$ , $F_0$ , e $F_1$

Apresentam-se os resultados obtidos de acordo com a metodologia definida em 5.2.5.2.1. Na Figura 5.28 apresentam-se as distribuições de  $F_{0s}$ ,  $F_0$  e de  $F_0$  e  $F_1$  das curvas H/V obtidas nas unidades do Holocénico ( $F_{01}$ ).  $F_{01}$  são picos de frequências que podem ser  $F_0$  ou  $F_1$  mas que estão sempre associados ao limite entre as FS e o Pliocénico do Barreiro (Vicêncio *et al.* 2015) (Capítulo III).

As colunas de solo com maiores frequências naturais ( $F_{0s}$ ) coincidem na generalidade com os locais onde se observaram os valores de  $F_0$  mais elevados (Figura 5.28). Foi exceção a zona sul onde se identificou um valor de  $F_{0s}$  superior a 10 Hz, ausente na distribuição obtida com os valores de  $F_0$ . Esta diferença desaparece quando se considera a interpolação obtida com os valores de  $F_0$  e  $F_1$  ( $F_{01}$ ) (Figura 5.28c). Em alguns locais onde não se identificaram picos nas curvas H/V, comportamento típico de maciços rochosos, poderão existir valores de  $F_{0s}$  elevados.

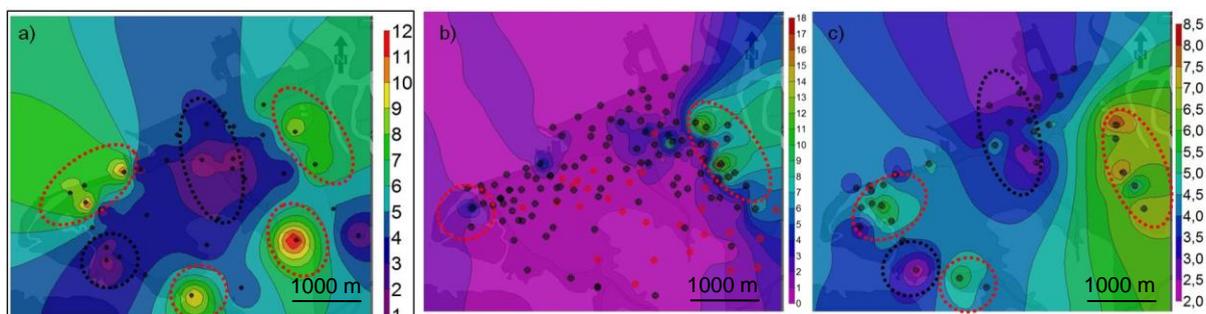


Figura 5.28 – Interpolações obtidas para o Barreiro: (a)  $F_{0s}$  (Hz) obtidos com o sismo de Kobe; (b)  $F_0$  (Hz); (c)  $F_{01}$  (Hz). Ponteados a preto - locais com menores frequências ( $F_{0s} \leq 2-4$  Hz;  $F_{01} \leq 2-4$  Hz); ponteados a vermelho – locais com maiores frequências ( $F_{0s} \geq 7$  Hz;  $F_0 \geq 3-5$  Hz;  $F_{01} \geq 6$  Hz).

Na Figura 5.29 apresentam-se os resultados da subtração das grelhas de interpolação de  $F_{0s}$ - $F_{01}$  para as funções de transferência calculadas com os cinco sismos e para valores de  $F_{0s} \leq 12$  Hz. Verificou-se que as grelhas resultantes foram semelhantes e que na região do Barreiro os valores de  $F_{0s}$  foram na generalidade superiores a  $F_0$  e  $F_1$ . Os locais em que os resultados mais se aproximaram foram, com algumas exceções, no Holocénico e corresponderam a diferenças compreendidas entre -1 e +1. Nestes locais os dois métodos (ReMi-SHAKE2000 e curvas H/V) apresentaram resultados semelhantes.

As maiores diferenças entre  $F_{0s}$  e os picos das curvas H/V (por exemplo  $F_{0s}-F_{01} > 5$ ) podem dever-se às distâncias existentes entre os locais onde se realizaram os ensaios ReMi e as curvas H/V. Com o aumento destas distâncias, mesmo em poucos metros, podem existir diferenças significativas nas unidades presentes e na espessura das formações superficiais que se traduzem em diferentes valores de  $F_{0s}$  e  $F_{01}$ . Recordar-se que as aluviões apresentam nesta área uma estrutura irregular e aleatória, muitas vezes com horizontes estratigráficos descontínuos e com composição granulométrica heterogénea de seqüências lenticulares (Geocontrolo 1982, 2001a) (Capítulo II).

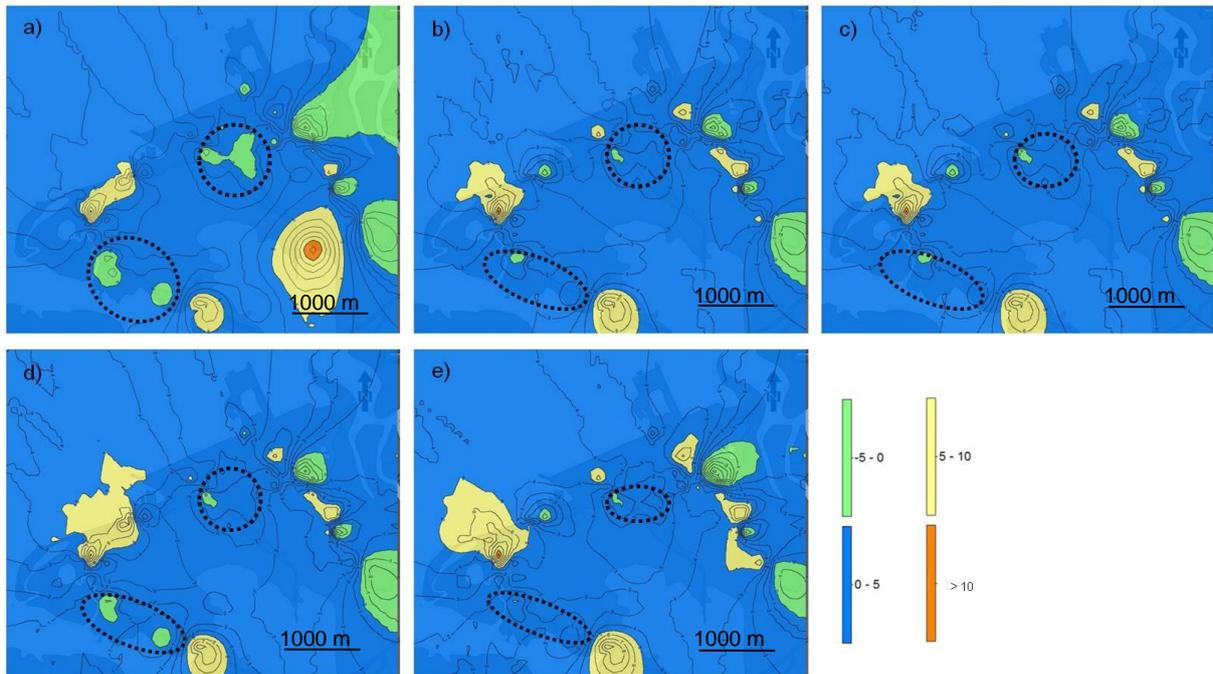


Figura 5.29 - Grelhas obtidas para o Barreiro com base na subtração  $F_{0s}-F_{01}$  obtidas com os sismos de (a) Kobe, (b)Tottori, (c) Northridge, (d) Hokkaido3 e (e) Hokkaido2. Linhas ponteadas - locais em que  $F_{0s}-F_{01}$  se aproximaram mais. Na distribuição de  $F_{0s}$  consideraram-se apenas os valores de  $F_{0s}\leq 12\text{Hz}$ .

Verifica-se que os resultados obtidos para Setúbal são idênticos aos do Barreiro: foi nas unidades do Holocénico junto à Serra da Arrábida que os resultados de  $F_{0s}$  e  $F_0$  mais se aproximaram ( $F_{0s}-F_0\approx 1-2\text{Hz}$ ) (Figura 5.30). Nos locais de maior espessura das FS, por exemplo na cidade de Setúbal e no Holocénico da Península da Mitrena, foram obtidas diferenças compreendidas entre 0-2 Hz. Os valores de  $F_0$  foram superiores aos de  $F_{0s}$  nas imediações da Serra da Arrábida onde os picos de frequência  $F_0$  estarão associados a FS com pouca espessura.

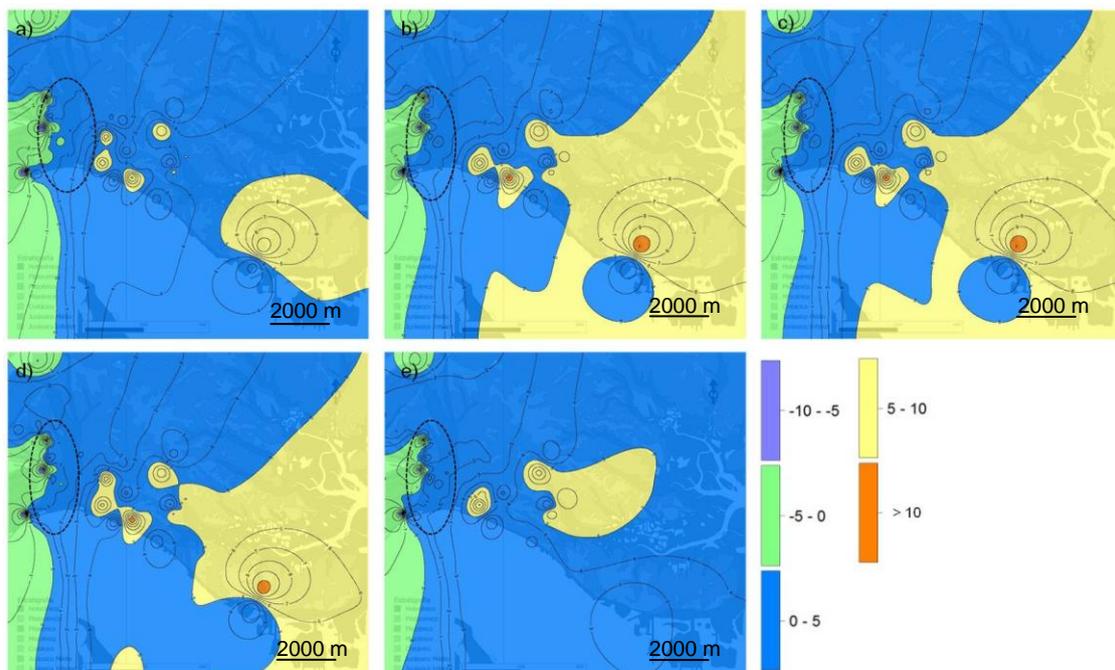


Figura 5.30 - Grelhas obtidas para Setúbal com base na subtração de  $F_{0s}-F_0$  obtidas com os sismos de (a) Kobe, (b)Tottori, (c) Northridge, (d) Hokkaido3 e (e) Hokkaido2. Na distribuição de  $F_{0s}$  consideraram-se apenas os valores de  $F_{0s}\leq 12\text{Hz}$ .

Os valores alcançados com as subtrações  $F_{0s}-F_{01}$  e  $F_{0s}-F_0$ , para o Barreiro e Setúbal, permitem concluir que as duas técnicas (ReMi-SHAKE2000 e Nakamura) apresentaram os resultados mais semelhantes no Holocénico. Verificou-se igualmente que a técnica conjunta ReMi-SHAKE2000 apresentou, na maior parte das grelhas de interpolação, frequências superiores aos resultados obtidos com a técnica de Nakamura (curvas H/V).

### 5.3.3.2.2. Funções de transferência e curvas H/V

A comparação entre as funções de transferência e as curvas H/V seguiu a metodologia definida em 5.2.5.2.2 e realizou-se segundo quatro perfis, dois no Barreiro e dois em Setúbal.

Para se definirem os perfis no Barreiro selecionaram-se funções de transferência e curvas H/V de acordo com os critérios de seleção estabelecidos. Obtiveram-se seis funções de transferência resultantes dos ensaios ReMi 4, 5, 8, 10, 16 e 21, e nove curvas H/V 98, 100, 104, 105, 112, 184, 187, 191 e 196. Estes ensaios foram agrupados segundo dois perfis (Figura 5.31), o primeiro localizado no enfiamento da ribeira que atravessa os terrenos da Baía Tejo (ReMi 21, 5, 8 e 16) e o segundo situado no Holocénico do concelho da Moita (ReMi 4 e 10).



Figura 5.31 – Perfis no Barreiro utilizados na comparação das funções de transferência com as curvas médias H/V. Perfil 1: ReMi 21, 5, 8 e 16; curvas médias H/V: 112, 104, 105, 98 e 100; perfil 2: ReMi 4 e 10; curvas médias H/V: 184, 187, 191 e 195.

Na Figura 5.32 apresentam-se os gráficos das funções de transferência e das curvas H/V do perfil 1. As funções de transferência e as curvas H/V foram distribuídas pelos quatro gráficos de modo a se agruparem as curvas resultantes dos ensaios mais próximos. Na Tabela 5.7, elaborada de acordo com o definido em 5.2.4.2.2, apresentam-se os valores médios, mínimos e máximos de  $F_{0s}$ , as frequências dos picos considerados para cada uma das curvas H/V ( $F_0$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ ) e as distâncias medidas entre os ensaios ReMi e os locais onde se registaram as vibrações ambientais.

As curvas H/V (104 e 112), apresentam picos, de amplitude 2, aos 4,7 Hz ( $F_2$ ) e 5,8 Hz ( $F_2$ ) que se situam na gama dos valores obtidos nas funções transferência provenientes do ReMi 21: 4,1 Hz

(Kobe) e 6 Hz (Hokkaido2). Os resultados 1D obtidos com base nos ensaios ReMi 5 apresentam um intervalo de frequências entre 5,2 Hz e 7 Hz, superior aos picos de identificados nas curvas H/V 104 e 105 ( $F_2=4$  Hz e  $F_0=4$  Hz). Os resultados 1D associados ao ReMi 8 apresentam um intervalo de frequências inferiores (entre 1,2 Hz e 2 Hz) relativamente aos valores obtidos para as curvas H/V 98, de 2,5 Hz ( $F_0$ ) e da curva H/V 100, de 2,6 Hz ( $F_1$ ). As funções de transferência do ensaio ReMi 16 apresentam picos de frequências aos 1,6 Hz e 3,6 Hz que se encontram no mesmo intervalo de frequências do pico obtido para a curva H/V 100 (2,6 Hz).

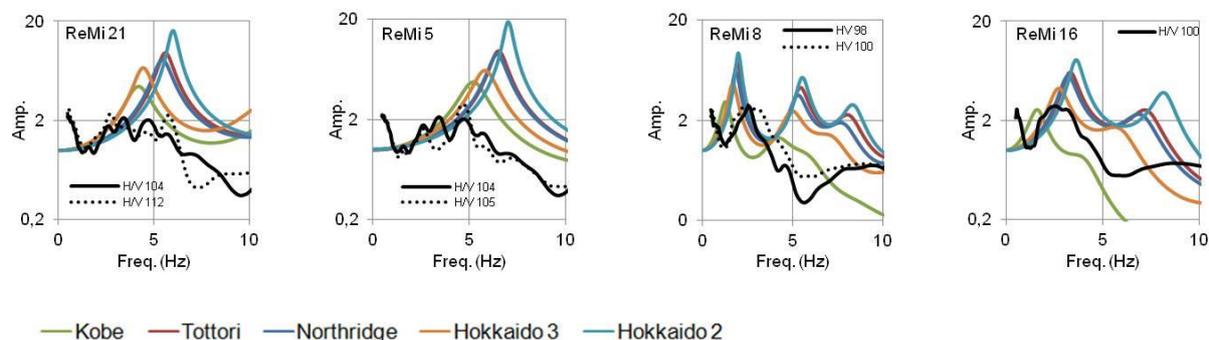


Figura 5.32 – Funções de transferência do Barreiro ao longo do perfil 1: ReMi 21, 5, 8 e 16 e curvas médias H/V 104, 112, 104, 105, 98 e 100.

Tabela 5.7 – Frequências naturais médias, mínimas e máximas do solo obtidas para cada um dos locais dos ensaios ReMi e picos de frequência das curvas H/V segundo o perfil 1. Média- corresponde à frequência média das frequências naturais ( $F_{0s}$ ) dos cálculos efetuados com os cinco sismos; Min. – Valores mínimos de 1D (Kobe); Max. – Valores máximos 1D (Hokkaido2). Apresentam-se as distâncias [m] entre o ponto central dos ensaios ReMi e o local onde se realizaram os registos das vibrações ambientais.

Resultados obtidos com os cálculos do SHAKE2000 – $F_{0s}$ (Hz)				
	ReMi 21	ReMi 5	ReMi 8	ReMi 16
	Média: Min.: Max. (Hz)	Média: Min.: Max. (Hz)	Média: Min.: Max. (Hz)	Média: Min.: Max. (Hz)
	5,1; 4,1; 6	6,2; 5,2; 7	1,7; 1,2; 2	2,9; 1,6; 3,6
Resultados obtidos com as curvas H/V (frequência de pico)				
	[Distância (m) entre H/V- ReMi 21]	[Distância (m) entre H/V- ReMi 5]	[Distância (m) entre H/V- ReMi 5]	[Distância (m) entre H/V- ReMi 16]
104	4,7 Hz ( $F_2$ ) [196 m]	4,7 Hz ( $F_2$ ) [70 m]	-	-
112	5,8 Hz ( $F_2$ ) [177 m]	-	-	-
105	-	4,7 Hz ( $F_0$ ) [145 m]	-	-
98	-	-	2,5 Hz ( $F_0$ ) [138 m]	-
100	-	-	2,6 Hz ( $F_1$ ) [130 m]	2,6 Hz ( $F_1$ ) [50 m]

As diferenças encontradas entre alguns dos valores de  $F_{0s}$  e os picos das curvas H/V podem ser devidas a heterogeneidades laterais das FS (Geocontrolo 1982, 2001a) (Capítulo II). As distâncias existentes entre os ensaios ReMi e os locais dos registos de vibrações ambientais associadas a estas heterogeneidades podem explicar as diferenças encontradas. Os ensaios que se realizaram a menor distância (ReMi 16 e H/V 100) foram os que apresentaram maior semelhança entre  $F_{0s}$  e  $F_1$ .

Na Figura 5.33 apresenta-se a variação da espessura das FS, obtida a partir da interpolação efetuada com dados de sondagens (Capítulo II), para a área do perfil 1. Os valores dos picos de H/V apresentados no gráfico correspondem aos valores médios calculados com base nos picos das curvas H/V consideradas para cada ensaio ReMi. Por exemplo, considerou-se que o pico de H/V associado ao ReMi 21 foi o valor médio (5,3 Hz) calculado com as frequências 4,7 Hz (H/V 104) e 5,8 Hz (H/V 112). Em termos gerais verificou-se uma coerência no comportamento das variáveis estudadas e as diferenças existentes poderão ser devidas às já referidas heterogeneidades laterais das FS.

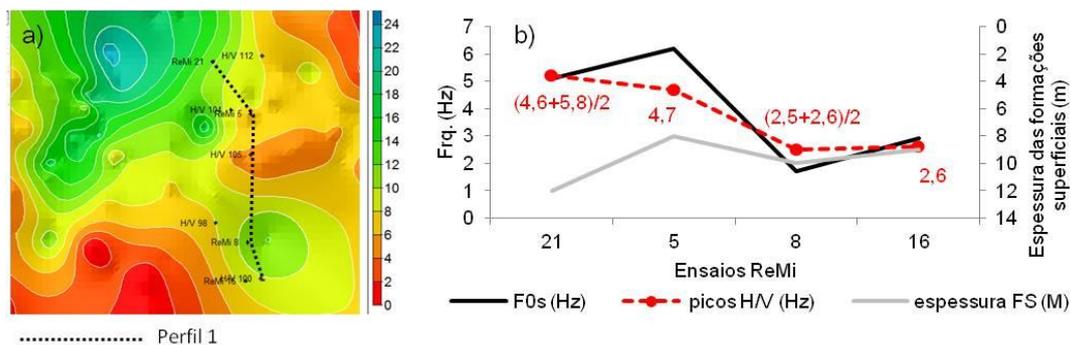


Figura 5.33 – (a) Espessura das FS no Barreiro ao longo do perfil 1, localização dos ensaios ReMi 21, 5, 8 e 16 e dos registos de vibrações ambientais 98, 100, 104, 105, 112; (b) variação dos valores de F<sub>0s</sub> (Hz), dos picos H/V (Hz) e da espessura das FS segundo o perfil 1.

No perfil 2 (Figura 5.34) observa-se uma boa relação entre as funções de transferência e algumas das curvas H/V obtidas nessa área. O valor médio de F<sub>0s</sub> resultante do ensaio ReMi 4 apresentou um valor de 8,8 Hz, próximo de F<sub>0</sub> (8,4 Hz) da curva H/V 187 (Tabela 5.8). O valor médio de F<sub>0s</sub> obtido no ensaio ReMi 10 apresentou um valor médio de F<sub>0s</sub> (6,6 Hz) também muito próximo a F<sub>0</sub> (7 Hz) da curva H/V 195.

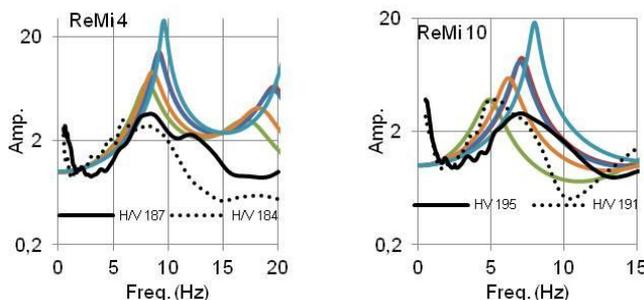


Figura 5.34 – Funções de transferência no Barreiro ao longo do perfil 2: ReMi 4, 10 e curvas médias H/V selecionadas segundo os critérios acima referidos.

Tabela 5.8 – Frequências naturais médias, mínimas e máximas dos solos obtidas para cada um dos locais dos ensaios ReMi e picos de frequência das curvas H/V segundo o perfil 2. Média- corresponde à frequência média das frequências naturais (F<sub>0s</sub>) dos cálculos efetuados com os cinco sismos; Min. – Valores mínimos de 1D (Kobe); Max. – Valores máximos 1D (Hokkaido2). Apresentam-se as distâncias [m] entre o ponto central dos ensaios ReMi e o local onde se realizaram os registos das vibrações ambientais.

Resultados obtidos com os cálculos do SHAKE2000 - F <sub>0s</sub> (Hz)		
	ReMi 4	ReMi 10
	Média; Min.; Max. (Hz)	Média; Min.; Max. (Hz)
	8,8; 8; 9,6	6,6; 4,8; 8
Resultados obtidos com as curvas H/V (frequência de pico)		
	[Distância (m) entre H/V- ReMi 4]	[Distância (m) entre H/V- ReMi 10]
187	8,4 Hz (F <sub>0</sub> ) [224 m]	-
184	5,8 Hz (F <sub>0</sub> ) [288 m]	-
195	-	7 Hz (F <sub>0</sub> ) [172 m]
191	-	3,8 Hz (F <sub>0</sub> ) [249 m]

O perfil 1 localizou-se numa linha de água que terá sido responsável pelo enchimento aluvionar de uma paleo-depressão do Plistocénico. Esta hipótese é confirmada pelos resultados obtidos com a interpolação da espessura das FS, que nos dá indicação sobre a morfologia irregular do topo do Pliocénico (Figura 5.33a). Por essa razão o perfil 1 localiza-se numa área com grande variabilidade na espessura destas formações. Esta variação associada às distâncias existentes entre os ensaios ReMi e as curvas H/V poderá ter sido responsável pelas diferenças encontradas entre os valores de

$F_{0s}$  e os picos das curvas H/V. Verificou-se nos perfis analisados que os valores das amplitudes obtidos nas curvas H/V ( $A_0$ ) foram inferiores às amplificações obtidas nas análises 1D ( $A_{0s}$ ).

Em Setúbal foram estudados dois perfis no Holocénico da cidade de Setúbal, um com uma orientação aproximada N-S e W-E (perfil 3; Figura 5.35) e o outro N-S (perfil 4; Figura 5.37). A direção destes perfis foi escolhida com o objetivo de se estudarem as variações de  $F_{0s}$  e  $F_0$  em função da espessura das FS, de  $N_{SPT60}$  e das unidades presentes.

O perfil 3 iniciou-se no Mesozoico (Jurássico) (ReMi 31), prosseguiu com maior extensão no Holocénico (ReMi 20, 6, 11, 3, 4 e 17), e terminou no Pliocénico (ReMi 10) (Figura 5.35). Junto ao limite entre o Holocénico e o Miocénico ou com o Mesozoico (Jurássico) as espessuras das FS são reduzidas. Foi na zona central da área correspondente ao Holocénico que se encontraram as maiores espessuras de aterros e aluviões (Capítulo II). Os valores relativos à espessura das FS e a profundidade de  $N_{SPT60}$  foram obtidos com base nas interpolações de dados geotécnicos (sondagens). Foi exceção o valor de  $N_{SPT60}$  atribuído ao local onde se realizou o ReMi 31 que foi retirado dos valores das sondagens mais próximas (executadas no Jurássico).



Figura 5.35 - Localização em Setúbal dos ensaios do perfil 3 (ensaios ReMi 31, 20, 6, 11, 3, 4, 17 e 10) (curvas H/V 495, 402, 403, 412, 445, 442, 431 e 439).

Na Figura 5.36 apresentam-se os gráficos que relacionam as funções de transferência e as curvas médias H/V ao longo do perfil 3. Estas curvas foram agrupadas em função das distâncias medidas entre o ponto central dos ensaios ReMi e o local do registo das vibrações ambientais. Reuniram-se no mesmo gráfico as curvas resultantes dos ensaios mais próximos. Apresenta-se igualmente um histograma em que se relacionam os valores de  $F_{0s}$ ,  $F_0$ , FS e  $N_{SPT60}$  ao longo do perfil 3.

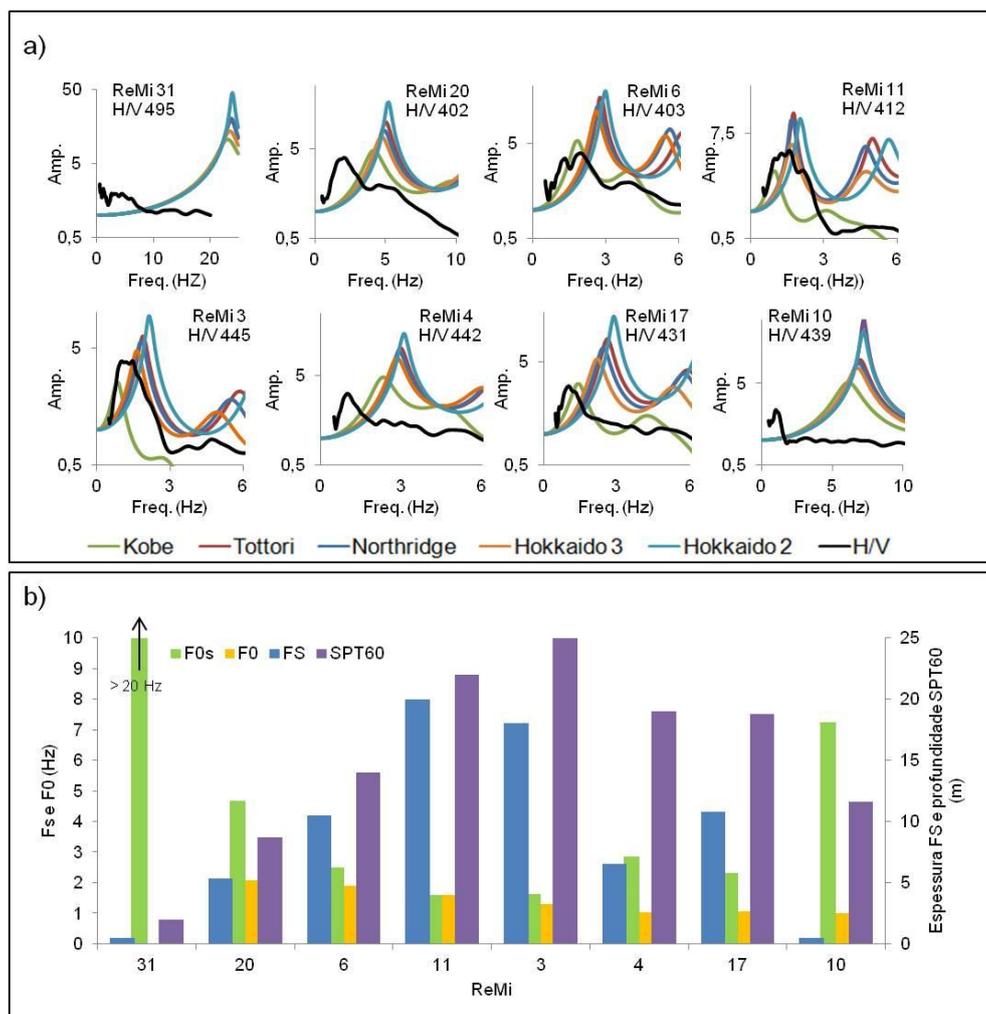


Figura 5.36 - Perfil 3 em Setúbal: (a) funções de transferência e curvas H/V; (b) Frequências naturais dos solos ( $F_{0s}$ ), picos de H/V ( $F_0$ ), espessuras das formações superficiais (FS) e profundidade de  $N_{SPT60}$ .

No início do perfil (ReMi 31) observou-se que a curva H/V não apresentou picos de frequência bem individualizados (resposta típica de maciços rochosos) e o valor de  $F_{0s}$  apresentou frequências superiores a 20 Hz. O perfil médio de  $V_s$  obtido para esta coluna de solo apresentou valores de  $V_s$  superiores a 800 m/s a partir dos 4 m de profundidade (Capítulo IV, Anexo X) o que confirmou a presença de um maciço rochoso a poucos metros de profundidade.

Nos pontos seguintes (ReMi 20 e 6) as curvas H/V estão deslocadas para a esquerda relativamente às curvas das funções de transferência. Foi exceção o valor de  $F_{0s}$  obtido com o ReMi 6 nos cálculos com o sismo de Kobe (sismo mais próximo) que apresentou o mesmo valor de  $F_0$ . O facto dos valores de  $F_{s0}$  serem superiores aos de  $F_0$  poderá dever-se ao facto de  $F_0$  se relacionar com uma ou mais interface(s) mais profunda(s) do que  $F_{0s}$ . Esta(s) interface(s) poderá corresponder ao topo do Mesozoico no ReMi 20 e ao topo do Miocénico no ReMi 6 (Vicêncio *et al.* 2015) (Capítulo III). A corroborar esta hipótese existem dois factos: (i) a existência de um conjunto de sondagens executadas perto do local onde se realizou o ensaio ReMi 20, nas quais se identificou material do Jurássico subjacente às formações superficiais (Tecnasol FGE 2000a); (ii) o ReMi 6 realizou-se a cerca de 60 m do Miocénico que terá uma inclinação de  $15^\circ$  para E (Costa *et al.* 2005c).

Nos pontos subsequentes (ReMi 11 e 3) as frequências de  $F_{0s}$  e  $F_0$  aproximaram-se. Nestes locais a espessura das unidades do Holocénico será superior, o que terá provocado uma diminuição da

rigidez dos materiais constituintes das colunas de solo e, por conseguinte, uma redução dos valores de  $F_{0s}$ .

Para E desta zona (ReMi 4 e 17) as FS diminuem de espessura e, por conseguinte, as funções de transferência deslocam-se para valores de frequências superiores. Verificou-se comportamento inverso nos valores de  $F_0$ , com 1,3 Hz na curva H/V 445 e 1,1 Hz nas curvas H/V 442 e 431.

Já no Pliocénico, o ponto ReMi 10 apresenta comportamento semelhante ao observado no início do perfil. A função de transferência deslocou-se para a direita apresentando uma frequência superior ( $F_{0s} = 8$  Hz), típica de material com maior rigidez. Neste local o valor de  $F_0$  é o menor de todas as curvas H/V do perfil 3 (1 Hz), o que pode corroborar a inclinação do topo do Miocénico para E.

O perfil 4 foi orientado aproximadamente segundo NNE-SSW com início no Holocénico a N da cidade de Setúbal (ReMi 32) e terminou a alguns metros da linha de costa no Holocénico (ReMi 20). Intersecta os pontos onde se realizaram os ensaios ReMi 32, 13, 1, 3, 11, 6 e 20 e pontos dos registos das vibrações ambientais das curvas H/V 511, 463, 411, 412, 403, 402 (Figura 5.37).



Figura 5.37 - Localização em Setúbal dos ensaios do perfil 4 (ensaios ReMi 32, 13, 1, 3, 11, 6 e 20) (curvas H/V 511, 463, 411, 412, 403 e 402).

Na Figura 5.38 apresentam-se os gráficos que relacionam as funções de transferência obtidas com cada um dos cinco sismos estudados e as curvas médias H/V ao longo do perfil 4. As funções de transferência e as curvas H/V foram distribuídas pelos sete gráficos de modo a se agruparem as curvas resultantes dos ensaios mais próximos. Apresenta-se igualmente um histograma com variação dos valores de  $F_{0s}$ ,  $F_0$ , FS e  $N_{SPT60}$  ao longo do perfil 4.

Se os valores de  $F_0$  estiverem associados ao topo do Miocénico, que apresenta inclinação para E, será de esperar que os valores de  $F_0$  se mantenham mais ou menos constantes segundo N-S uma vez que a profundidade da superfície do topo do Miocénico se manterá relativamente constante ao longo desta direção. A orientação do perfil dos ensaios ReMi 32, 13, 1 e 3 apresenta uma direção aproximada N-S até ao local do ensaio ReMi 3 e os valores de  $F_0$  apresentaram frequências

semelhantes (1-1,1 Hz). Posteriormente, o perfil inflete na direção do maciço da Serra da Arrábida, onde o Miocénico e o Mesozoico se aproximam da superfície do terreno. Nesta parte final do perfil, como seria de esperar, observou-se um aumento dos valores de  $F_0$  (H/V 403: 1,9Hz; H/V 402: 2 Hz).

Os valores de  $F_{0s}$  apresentaram, nos dois primeiros pontos (ReMi 32 e 13), frequências médias de 2,8 e 2,7 Hz. Estas frequências diminuíram de valores nos pontos seguintes (ReMi 1, 3 e 11), apresentando valores de 1,25 Hz (ReMi 1) e 1,6 Hz (ReMi 3 e 11). Esta diminuição de frequências ao longo do perfil está em consonância com o aumento da espessura das FS. É na área dos ensaios ReMi 1, 3 e 11 que estas espessuras apresentam os valores mais elevados (18 m a 20 m) e o nível de  $N_{SPT60}$  se encontra mais profundo (22 m a 26 m). A superfície associada ao conjunto destas frequências, que deverá ser o topo do Pliocénico, apresentou um aumento de profundidades de N para S, o que está de acordo com a distribuição da espessura das FS obtidas para este local com dados geotécnicos (vide Capítulo II, Figura 2.47).

Nos pontos seguintes (ReMi 6 e 20) verificou-se, à medida que o perfil se aproximou da Serra da Arrábida, um aumento dos valores de  $F_{0s}$  (2,5 Hz e 4,6 Hz), uma diminuição da espessura das FS e da profundidade a que se situa o nível de  $N_{SPT60}$ .

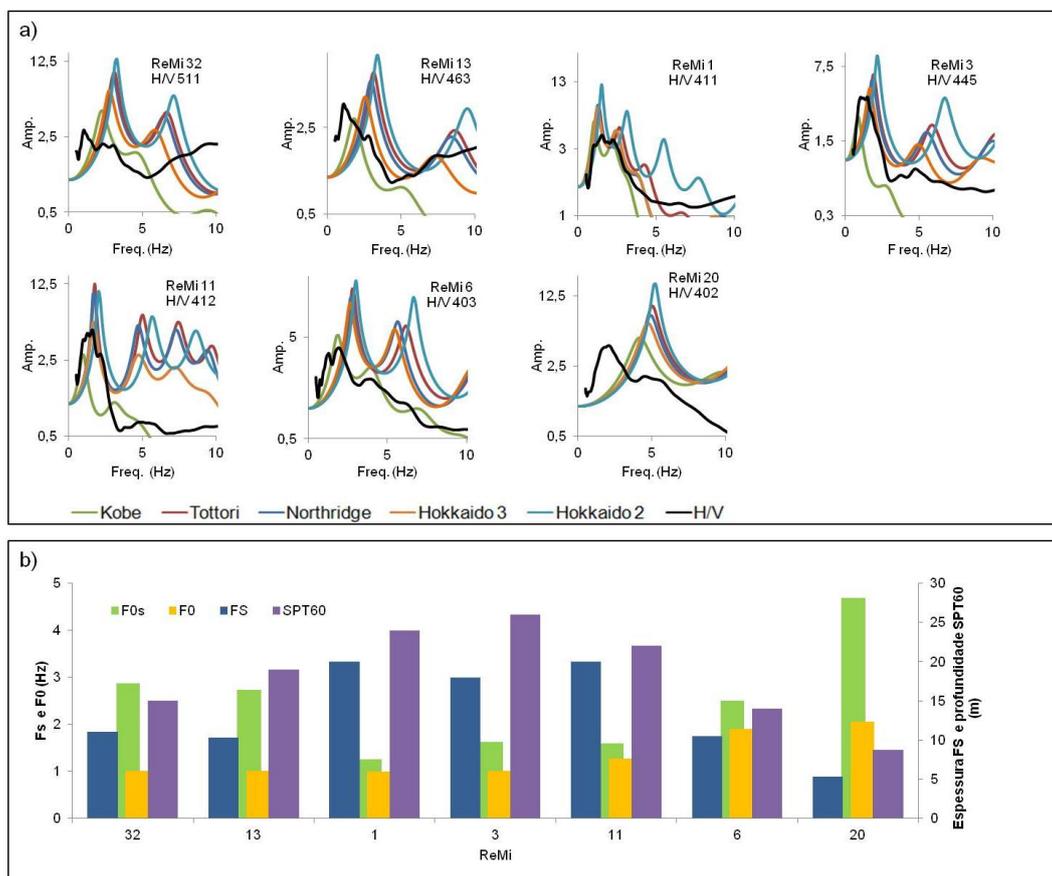


Figura 5.38 - Perfil 4 em Setúbal: (a) funções de transferência e curvas H/V; (b) Frequências naturais dos solos ( $F_{0s}$ ), picos de H/V ( $F_0$ ), espessuras das formações superficiais (FS) e profundidade de  $N_{SPT60}$ .

Em Setúbal observou-se uma relação mais estreita entre valores de  $F_{0s}$  e a espessura das FS. No entanto esta relação não é direta, não se podem associar os valores de  $F_{0s}$  à profundidade a que se encontra o limite entre as FS e o Pliocénico, estas frequências relacionam-se na maior parte dos casos com interfaces mais profundas.

Tome-se, por exemplo, a relação existente entre o valor médio de  $F_{0s}$  (2,5 Hz) resultante do ensaio ReMi 6 e a espessura das FS. Para se analisar a relação entre esses dois valores utilizou-se a relação:

$$T = 4H/V_s$$

Considerou-se um valor de 10 m para a espessura das FS de acordo com as velocidades do perfil médio de  $V_s$  (Figura 5.39a). Esta espessura foi comparada com os valores resultantes da interpolação realizada com dados de sondagens. A espessura estimada com estas interpolações variou entre os 12 m e os 13 m o que confirmou a verosimilhança da curva média de  $V_s$ . Calculou-se o valor médio de  $V_s$  para esse troço de 10 m e obteve-se um valor de 241 m/s. Utilizou-se a relação  $T = 4H/V_s$  e obteve-se uma frequência natural de 5,3 Hz, superior ao valor médio de  $F_{0s}$  (2,5 Hz). Esta frequência poderá estar associada a um segundo conjunto de picos de frequências presente na função de transferência (Figura 5.39c).

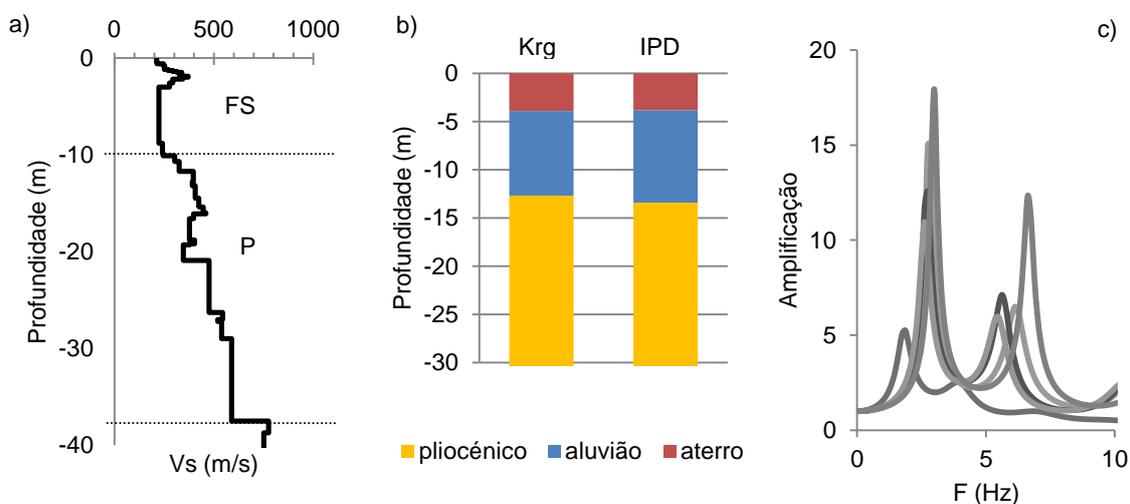


Figura 5.39 - (a) Perfil médio de  $V_s$  obtido no ensaio ReMi 6 (Setúbal) FS – formações superficiais, P – Pliocénico; (b) espessura das diferentes unidades presentes no local dos ensaios ReMi obtidas por interpolação de dados geotécnicos (Krg – Krigagem, IPD - inverso da potência da distância); (c) funções de transferência obtidas com o perfil médio de  $V_s$  e com cinco sismos.

Observando-se o perfil médio de  $V_s$  foi possível identificar uma interface mais profunda (com maior impedância) a 37,5 m de profundidade (Figura 5.39a). A velocidade média determinada para esta coluna de solo apresentou um valor de 415 m/s. O resultado calculado para a frequência natural desta coluna de solo foi 2,7 Hz, valor mais compatível com o valor médio de  $F_{0s}$  (2,5 Hz) obtido com as funções de transferência (Figura 5.39). Foram realizadas análises idênticas para os valores de  $F_{0s}$  das modelações 1D dos ensaios ReMi 1, 12 e 21 e obtiveram-se resultados semelhantes.

A análise dos quatro perfis realizados para o Barreiro (perfis 1 e 2) e Setúbal (perfis 3 e 4) permitiu obter conclusões relativas à variação dos valores de  $F_{s0}$ ,  $F_0$ , espessura das FS e do nível a que se encontra  $N_{SPT60}$ : (i) verificou-se a existência de uma relação entre os valores de  $F_{0s}$ ,  $F_0$ , a espessura das FS e  $N_{SPT60}$ ; (ii) esta relação permite concluir que as diferenças encontradas entre as funções de transferência e as curvas H/V dever-se-ão à profundidade a que se encontram determinadas interfaces e não a limitações ou erros associados às duas técnicas; (iii) esta relação foi mais evidente em Setúbal do que no Barreiro. No Barreiro o perfil 1 localiza-se numa área com grande variabilidade na espessura das formações superficiais. Esta variação associada às distâncias existentes entre os ensaios ReMi e as curvas H/V poderá ter sido responsável pelas diferenças encontradas entre os valores de  $F_{0s}$  e os picos das curvas H/V; (iv) as frequências naturais das colunas de solo diminuem à medida que aumenta a espessura das FS e a profundidade de  $N_{SPT60}$ ; (v) o comportamento de  $F_0$  ao

longo de todo o perfil 3 (Setúbal) aponta para um aprofundamento gradual para E de uma interface que poderá corresponder ao topo do Miocénico (Vicêncio *et al.* 2015); (vi) no perfil 4 (Setúbal) a distribuição dos valores de  $F_0$  foi mais ou menos constante na direção N-S e observou-se um aumento de frequências na direção do maciço da Arrábida. Este facto está de acordo com a relação existente entre as frequências naturais e a rigidez dos materiais em presença; (vii) apesar da relação observada entre  $F_{0s}$  e a espessura das FS em Setúbal, os valores de  $F_{0s}$  não se associaram diretamente às profundidades a que se encontra o limite entre as FS e o Pliocénico. Estas frequências devem relacionar-se com interfaces mais profundas cujas profundidades variam com a espessura das FS; (viii) os valores das amplitudes obtidos nas curvas H/V ( $A_0$ ) foram inferiores às amplificações obtidas nas análises 1D ( $A_{0s}$ ).

Podem-se referir vários autores que obtiveram boas aproximações entre  $F_{0s}$  e  $F_0$  (Nunziata 2007, Zaslavsky *et al.* 2008, Teves-Costa *et al.* 2014, Farrugia *et al.* 2015) e outros que verificaram que na maior parte dos casos os valores de  $F_{0s}$  foram superiores a  $F_0$  (Ansary & Rahman 2013).

### 5.3.3.2.3. Comparação de $A_{0s}$ com $A_0$

Tendo em conta a metodologia definida em 5.2.5.2.3 apresenta-se na Figura 5.40 a distribuição das amplificações máximas ( $A_{0s}$ ) no Barreiro para o sismo de Kobe e a distribuição das amplitudes máximas ( $A_0$ ) obtidas a partir das curvas médias H/V. As áreas de maior amplificação (superior  $\approx 10$ ), localizadas na zona E do Barreiro coincidem, em parte, com as áreas de maiores amplitudes ( $A_0$ ). Esta semelhança também está presente nos resultados obtidos com os restantes sismos. Contudo, os valores destes dois parâmetros não são iguais pois  $A_0$  apresenta quase sempre valores inferiores aos de  $A_{0s}$ .

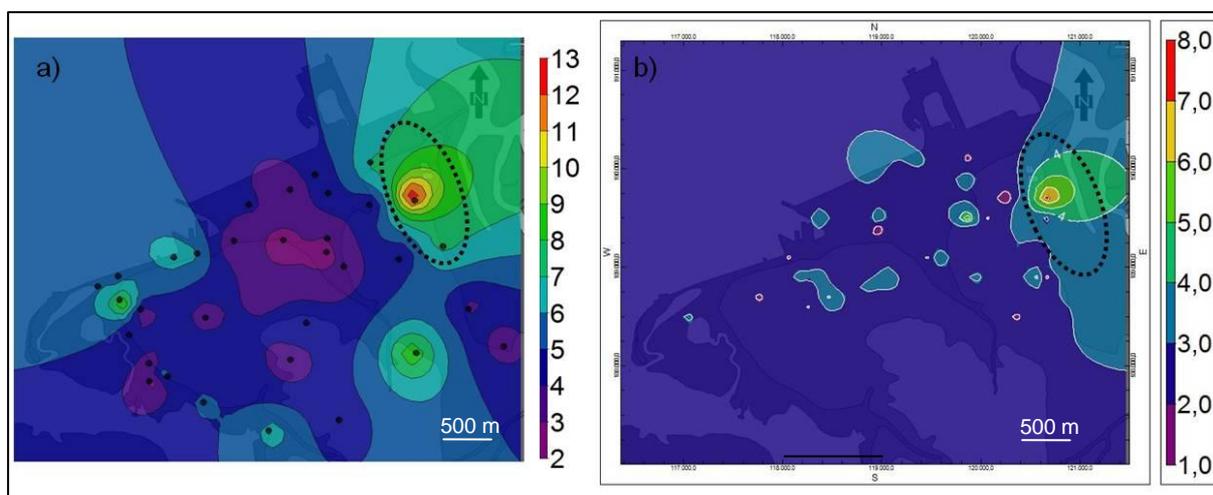


Figura 5.40 - Distribuição no Barreiro de: (a)  $A_{0s}$  obtidas com o sismo Kobe; (b)  $A_0$  (a partir das curvas médias H/V). Áreas de ponteadó – locais com as maiores amplificações.

Na Figura 5.41 apresentam-se os valores resultantes da subtração das grelhas de interpolação de  $A_s - A_0$ , para cada um dos sismos modelados para o Barreiro. O sismo de Kobe (Figura 5.41a) foi o que apresentou maiores semelhanças entre os valores de  $A_{0s}$  e  $A_0$ . Os locais onde as grelhas de interpolação de  $A_{0s} - A_0$  apresentaram valores negativos ( $A_0 > A_s$ ) são residuais, quando comparados com os restantes e restringiram-se aos resultados obtidos com o sismo de Kobe.

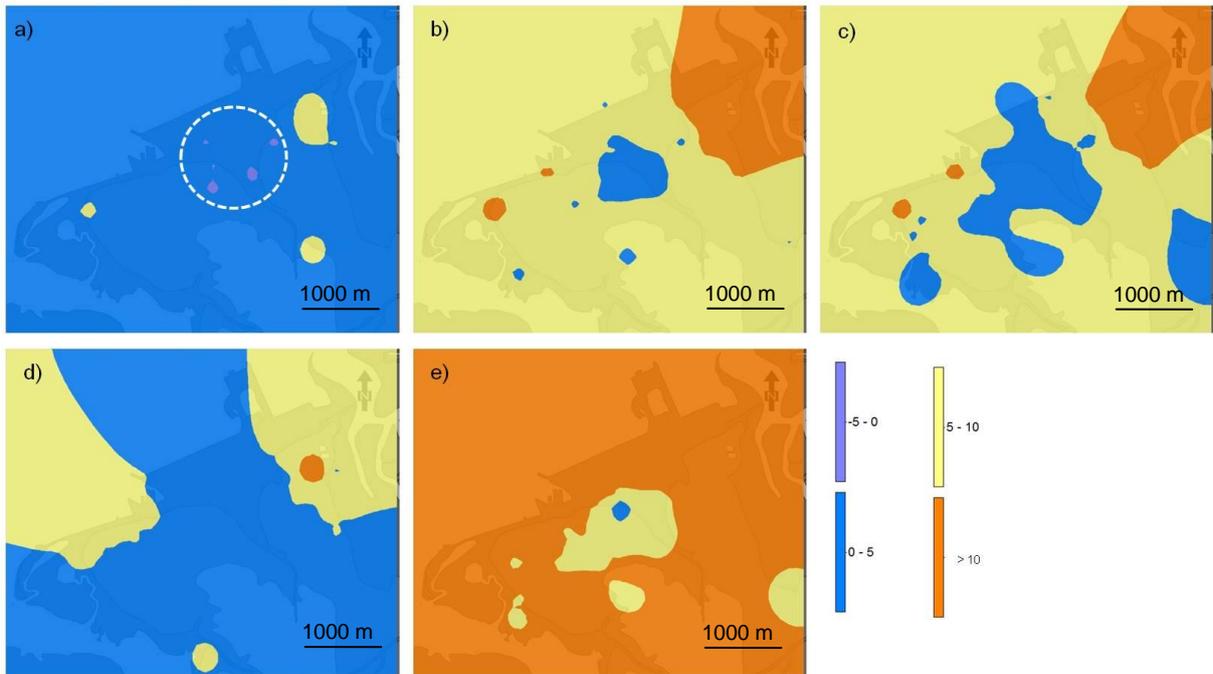


Figura 5.41 – Grelhas resultantes da subtração entre  $A_{0s} - A_0$  para o Barreiro com os sismos de (a) Kobe; (b) Tottori; (c) Northridge; (d) Hokkaido3; (e) Hokkaido2. Consideraram-se apenas os valores  $A_{0s}$  relativos aos valores de  $F_{0s} \leq 12$  Hz. Tracejado – localização de áreas com valores negativos.

Na Figura 5.42 apresentam-se as interpolações obtidas com os valores de  $A_{0s}$  e  $A_0$  em Setúbal para o sismo de Kobe. As amplificações distribuem-se segundo uma alternância de zonas de maiores e menores amplificações. Os locais de maiores amplificações ( $> 5$ ) situam-se no Plio-Plistocénico para frequências superiores a 6 Hz. Os valores de  $A_0$  mais elevados apresentaram valores entre 4 e 8 e localizaram-se no Holocénico (Figura 5.42b). É nesta área que os valores de  $A_{0s}$  apresentaram as menores amplificações ( $A_{0s} \leq 3$ ).

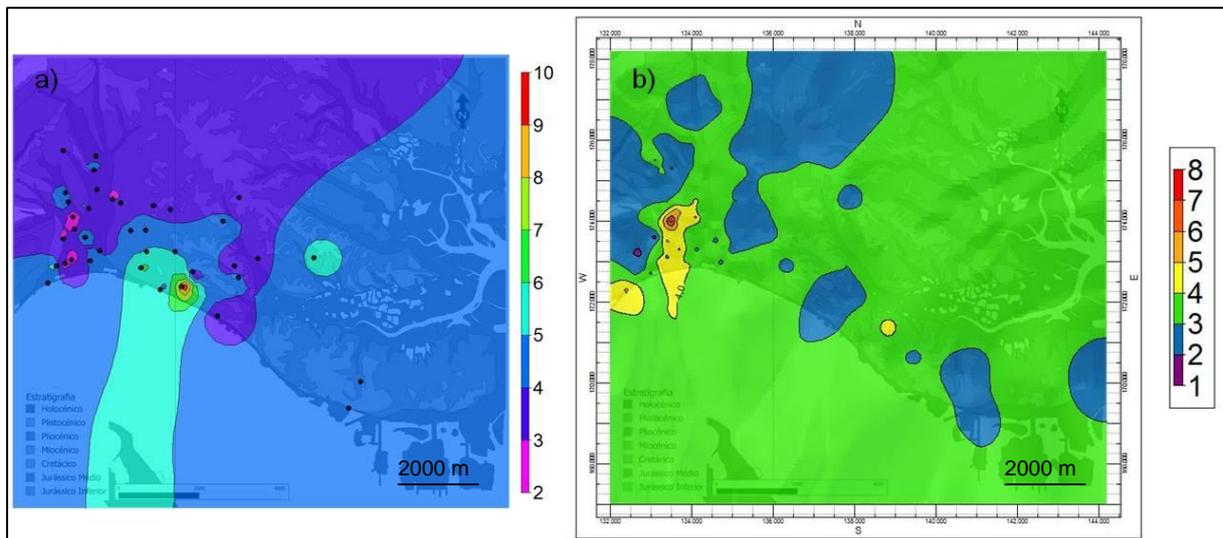


Figura 5.42 – Setúbal: (a) distribuição das amplificações máximas ( $A_{0s}$ ) com o sismo de Kobe e  $F_{0s} \leq 12$  Hz; (b) distribuição das amplitudes máximas H/V ( $A_0$ ). Consideraram-se apenas os valores  $A_{0s}$  relativos aos valores de  $F_{0s} \leq 12$  Hz.

Na Figura 5.43 apresentam-se os valores resultantes da subtração das grelhas de interpolação de  $A_{0s} - A_0$  e verifica-se que as modelações efetuadas com os sismos de Kobe (Figura 5.43a) e Hokkaido3 (Figura 5.43d) são as que apresentaram maiores semelhanças entre amplificações e as amplitudes. Os resultados obtidos com os sismos de Tottori (Figuras 5.43b) e Hokkaido2 (Figura 5.43e) são os

que evidenciaram diferenças mais significativas. Observam-se valores negativos ( $A_{0s} < A_0$ ) no Holocénico da cidade de Setúbal em todos os resultados com exceção do sismo de Hokkaido2.

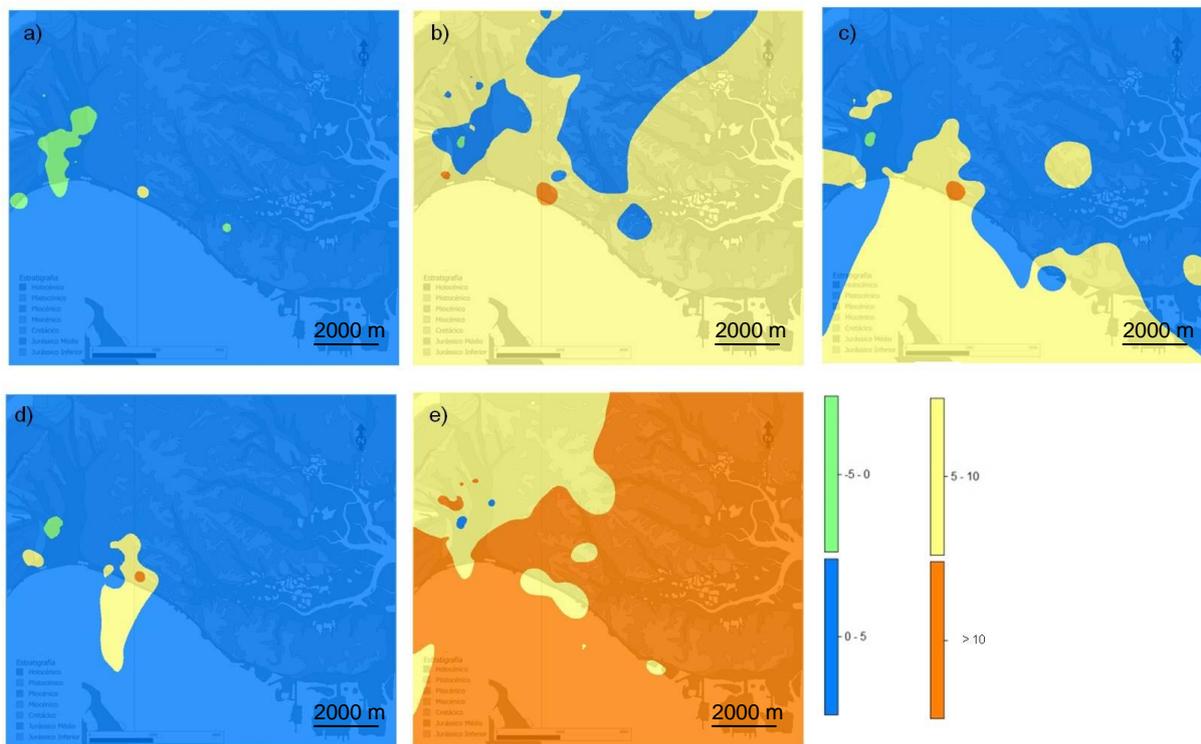


Figura 5.43 - Grelhas resultantes da subtração entre  $A_{0s} - A_0$  para Setúbal com os sismos de (a) Kobe; (b) Tottori; (c) Northridge; (d) Hokkaido3; (e) Hokkaido2. Consideraram-se apenas os valores  $A_{0s}$  relativos aos valores de  $F_{0s} \leq 12$  Hz.

### 5.3.3.3. Análise 1D e $V_{s30}$

No Capítulo IV observou-se que os valores mais baixos de  $V_{s30}$  obtidos para o Barreiro e para Setúbal se registaram em unidades do Holocénico e os mais elevados em unidades do Plio-Plistocénico e Jurássico. A rigidez dos materiais constituintes das colunas de solo influencia, como já foi referido, os valores de  $V_{s30}$  e os valores de  $F_{0s}$ .

Na Figura 5.44 apresentam-se as distribuições obtidas para o Barreiro com os valores de  $F_{0s}$  e com os valores de  $V_{s30}$ . Como seria de esperar, verificou-se que os locais de baixas frequências se localizam nas áreas de baixos valores de  $V_{s30}$ .

Os solos com frequências naturais até 6 Hz apresentaram valores de  $V_{s30}$  inferiores a 340 m/s. Existem, no entanto, exceções, nomeadamente na zona central onde os valores de  $F_{0s}$  são inferiores a 6 Hz e onde  $V_{s30}$  apresentou valores superiores a 340 m/s. No local do quartel dos Bombeiros do Barreiro a situação foi inversa: a valores de  $F_{0s}$  elevados corresponderam  $V_{s30}$  inferiores a 300 m/s. Nos locais em que  $V_{s30}$  foi inferior a 300 m/s os valores  $F_{0s}$  situaram-se entre 1 e 3 Hz.

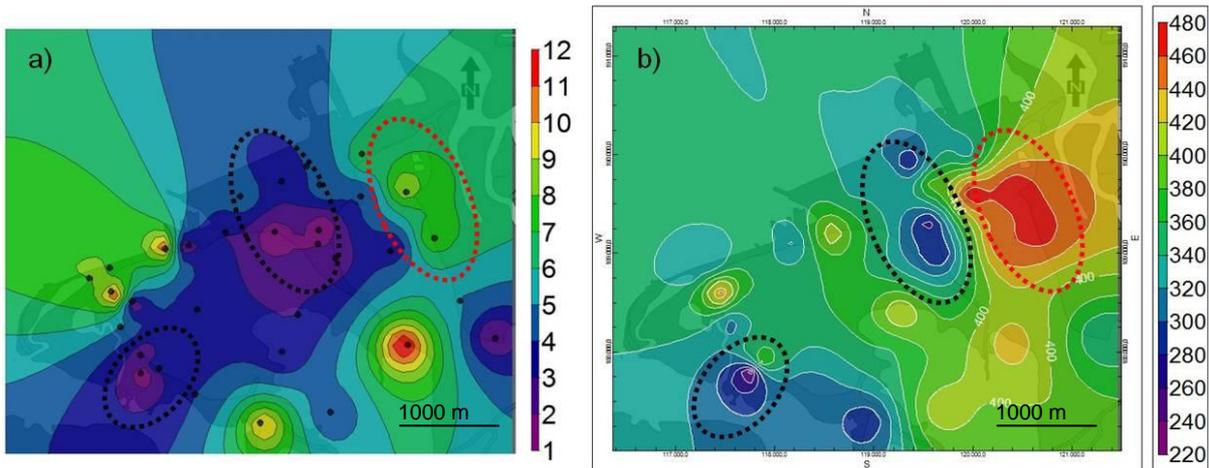


Figura 5.44 – Valores obtidos para o Barreiro relativos à distribuição de: (a)  $F_{0s}$  obtida com o sismo de Kobe; (b)  $V_{s30}$ . Ponteados a preto - locais com menores frequências e menores valores de  $V_{s30}$  ( $F_{0s} \leq 1-3$  Hz;  $V_{s30} \leq 320-340$  m/s); ponteados a vermelho – locais com maiores frequências e maiores valores de  $V_{s30}$  ( $F_{0s} \geq 7$  Hz;  $V_{s30} > 420$  m/s).

Em Setúbal, os locais com menores valores de  $V_{s30}$  (inferiores a 300 m/s) corresponderam, regra geral, a frequências inferiores a 4 Hz com valores de  $A_{0s}$  entre 4 e 8 (Figura 5.45). Para valores de  $V_{s30}$  superiores a 350 m/s as amplificações são normalmente superiores a 9 para frequências superiores a 5 Hz.

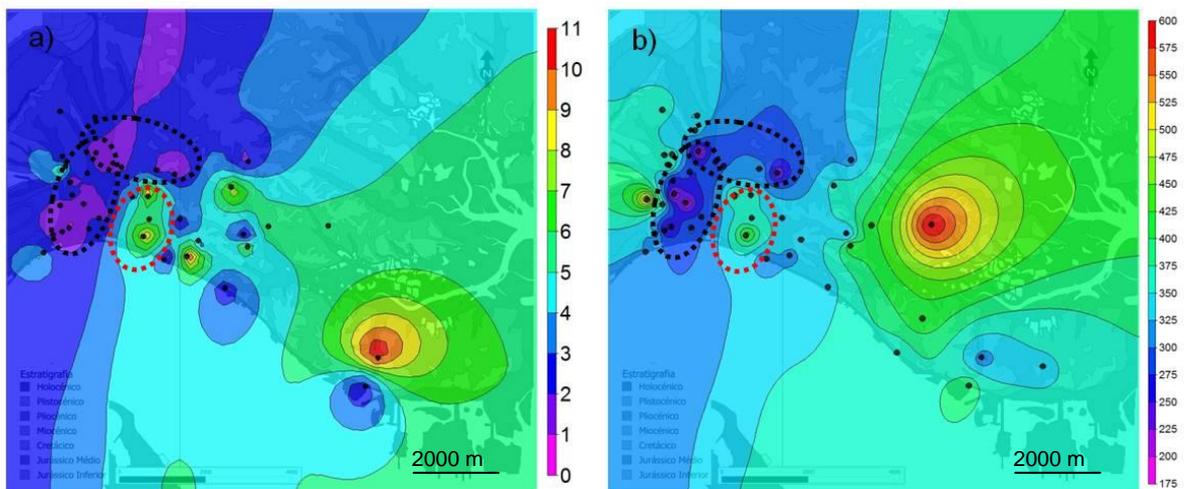


Figura 5.45 - Valores obtidos para Setúbal relativos à distribuição de: (a)  $F_{0s}$  obtida com o sismo de Kobe; (b)  $V_{s30}$ . Consideraram-se apenas valores de  $F_{0s} \leq 12$  Hz. Ponteados a preto - locais com menores frequências e menores valores de  $V_{s30}$  ( $F_{0s} \leq 1-3$  Hz;  $V_{s30} \leq 300$  m/s); ponteados a vermelho – locais com maiores frequências e maiores valores de  $V_{s30}$  ( $F_{0s} \geq 5$  Hz;  $V_{s30} > 350$  m/s).

### 5.3.4. Zonas com maior suscetibilidade de produzir ressonância nos edifícios

Apresentam-se as áreas que poderão apresentar maior suscetibilidade à ressonância nos edifícios de acordo com a metodologia definida em 5.2.6. Estas áreas foram identificadas para o Barreiro e para Setúbal (Figura 5.46) em função do número de pisos dos edifícios (segundo a relação  $T=0,045N$ ).

Em terrenos do Holocénico os edifícios mais suscetíveis às ocorrências de ressonância deverão ser os de maior altura (com 5 ou mais pisos). No entanto identificaram-se alguns locais no Holocénico do Barreiro onde os edifícios que podem apresentar maior suscetibilidade são os de 1 e 2 pisos. Estas

áreas correspondem a locais com baixas espessuras de FS (Figura 5.21c) e com o nível de  $N_{SPT60}$  localizado a pouca profundidade (Figura 5.24b). As áreas do Holocénico de Setúbal, localizadas a E da cidade e que se prolongam pela península da Mitrena, podem apresentar perigo de ressonância para edifícios com mais de 3 pisos. Estes resultados terão de ser complementados com mais ensaios ReMi ao longo do Holocénico, com o cálculo dos respetivos valores de  $F_{0s}$  e estudos de resistência estrutural do edificado. Neste troço do Holocénico as espessuras das formações superficiais são por vezes consideráveis, podendo atingir valores superiores a 30 m. Nestes locais, tal como para o olocénico da cidade de Setúbal, os edifícios com maior perigo de sofrer ressonância deverão ser os de maior número de pisos (com mais de 5 pisos nas áreas de menores espessuras e com mais de 8 pisos nas áreas de maiores espessuras de FS).

Em terrenos do Plio-Plistocénico, os edifícios com menor número de pisos (1 a 4 pisos) poderão ser os mais suscetíveis de sofrerem ressonância. Existem algumas faixas no Plio-Plistocénico, quer no Barreiro quer em Setúbal, onde os edifícios mais susceptíveis deverão ser os de 8 ou mais pisos. No Barreiro estas zonas correspondem a locais onde o nível de  $N_{SPT60}$  se encontra a maiores profundidades no Plio-Plistocénico (Figura 5.24). Em Setúbal estas zonas apresentaram valores de  $V_{s30}$  na ordem dos 300 m/s podendo alcançar valores inferiores a 250 m/s (Figura 5.45b).

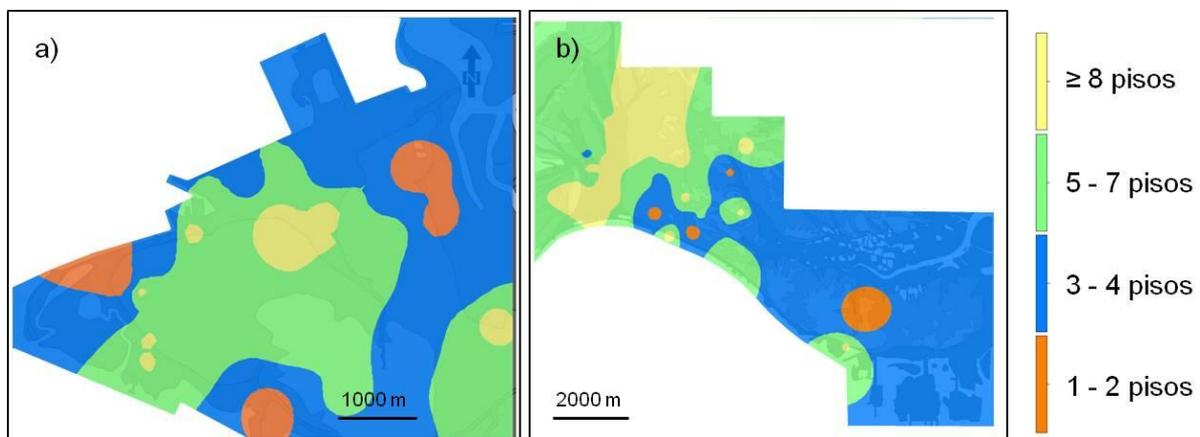


Figura 5.46 - Áreas onde os edifícios poderão sofrer ressonância, dependendo do número de pisos (a) Barreiro; (b) Setúbal.

Em termos gerais é possível concluir que existe uma boa relação entre as unidades litoestratigráficas e as áreas onde os edifícios poderão sofrer ressonância, em função do seu número de pisos. No entanto, podem verificar-se exceções que estão associadas às propriedades geotécnicas dos terrenos de fundação.



# **CAPÍTULO VI - SUSCETIBILIDADE DO EDIFICADO DA CIDADE DE SETÚBAL A SOFRER EFEITOS DE RESSONÂNCIA**

## 6.1 Introdução

O comportamento de um edifício face a solicitações sísmicas depende da sua tipologia, assim como do seu período de vibração natural e do seu coeficiente de amortecimento. Além disso, as características geotécnicas do terreno onde está implantado também podem influenciar o seu comportamento sísmico.

Tem-se verificado em inúmeros sismos (e.g., Northridge, Califórnia 1994; Kobe, Japão 1995; Izmit, Turquia 1999; Colima, México 2003) que os danos no edificado aumentam quando o período natural de vibração dos edifícios iguala, ou se aproxima, do período predominante dos solos, em virtude de se observarem fenómenos de ressonância (Navarro *et al.* 2004; Oliveira & Navarro 2010). Quando a frequência de vibração de um solo e de um edifício é igual, a amplitude da vibração do edifício pode aumentar duas vezes (Keçeli & Cevher 2015).

Assumindo, que não existem diferenças sistemáticas nos projetos dos edifícios ou nas práticas de construção dos edifícios de betão armado, e que o período fundamental é função linear do número de pisos (e.g, Navarro *et al.* 2004), pretende-se estimar quantos edifícios da cidade de Setúbal, construídos em terrenos do Holocénico, são suscetíveis à ocorrência de fenómenos de ressonância.

Esta estimativa utiliza informação do número de edifícios existentes em cada subseção estatística e o número de pisos de cada um deles (INE 2012). Para uma análise individual, selecionaram-se alguns edifícios cuja distância ao ensaio ReMi mais próximo fosse inferior a 150 m.

Foi escolhido o Holocénico da cidade de Setúbal para efetuar este estudo pelo facto de ter sido neste local que se realizou um maior número de ensaios ReMi passivos, tendo sido possível estimar, em muitos dos ensaios, velocidades das ondas S até cerca de 20 m de profundidade. Por outro lado, é nesta unidade que se encontram as maiores espessuras de formações superficiais.

Os dados relativos ao edificado dos censos de 2011 (INE 2012) permitem caracterizar o edificado em função do número de pisos. Neste estudo, não foram diferenciadas as tipologias construtivas nem foi tomado em consideração o estado de conservação das estruturas, apesar de serem fatores importantes na avaliação da vulnerabilidade sísmica do edificado.

Segundo os censos de 2011, os locais da cidade com menor quantidade de edifícios situam-se a sul da Av. Luísa Todi. Foi calculada, com base nos dados dos censos, a relação “*número de edifícios/área do polígono da subseção estatística \*10.000*” que nos permite definir a concentração do número de edifícios em cada subseção estatística (Figura 6.1).

Pela análise da Figura 6.1 é possível constatar que as áreas de maior concentração localizam-se no centro urbano antigo da cidade, entre a Av. Luísa Todi e as Avenidas 5 de Outubro e dos Combatentes da Grande Guerra.

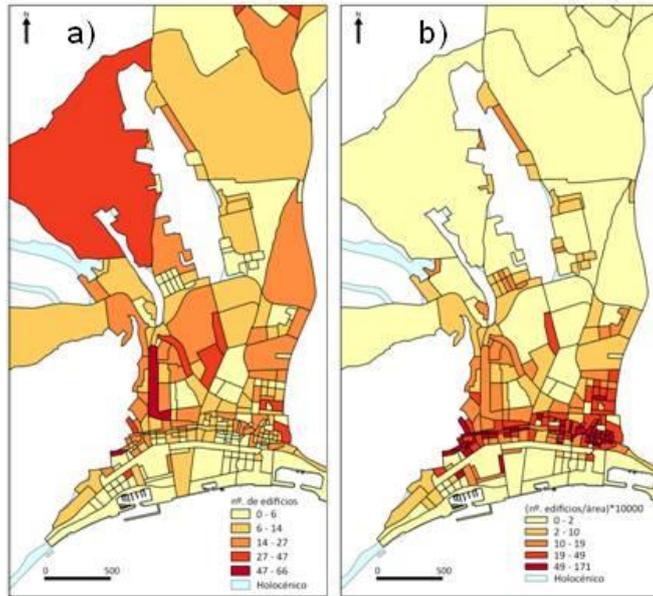


Figura 6.1 – (a) Número de edifícios existentes em Setúbal em cada subseção estatística; (b) concentração de edifícios em cada subseção estatística (número de edifícios/área do polígono \*10.000).

Na Figura 6.2 apresentam-se as percentagens relativas ao número total de edifícios por subseção estatística, para quatro classes de alturas e segundo duas classes de percentagens (0-49% e 50%-100%). Existe uma faixa localizada no centro urbano antigo onde se concentram os edifícios de menor altura (1-2 e 3-4 pisos) (Figuras 6.2a, b) e que é coincidente com as áreas de maior concentração do edificado (Figura 6.1b). Os edifícios mais altos (5-9 pisos e com mais de 10 pisos) concentram-se a norte do centro urbano antigo (Figuras 6.2c, d).

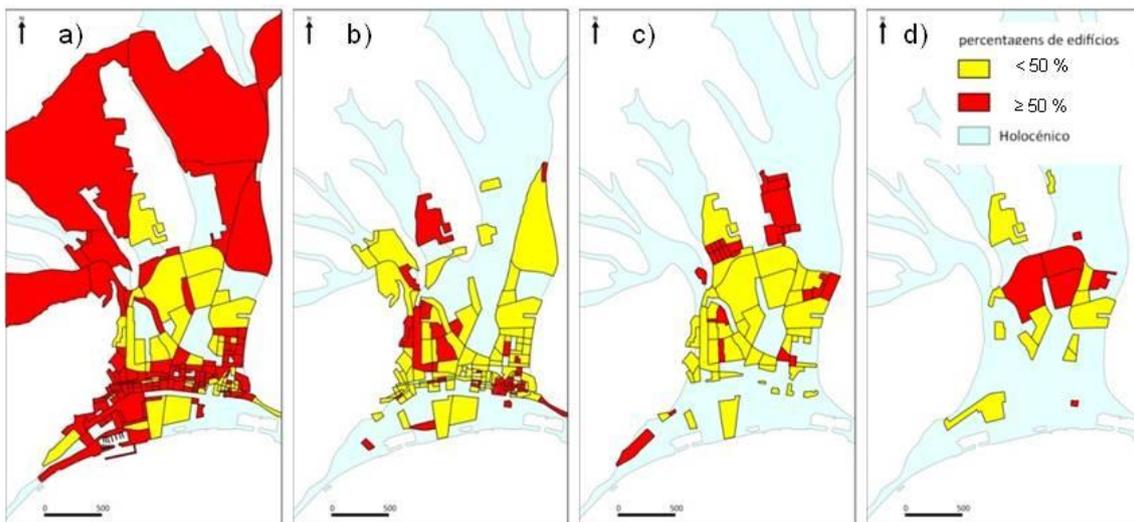


Figura 6.2 – Percentagem de edifícios existentes em Setúbal segundo o número de pisos por subseção estatística: (a) Edifícios com 1 e 2 pisos; (b) edifícios com 3 e 4 pisos; (c) edifícios com 5 a 9 pisos; (d) edifícios com 10 ou mais pisos. Amarelo - Subseções estatísticas com percentagens de edifícios entre 0 e 49%; Vermelho - Subseções estatísticas com percentagens de edifícios entre 50 e 100% dos edifícios existentes.

No conjunto das subseções representadas nas Figuras 6.1 e 6.2 existem algumas que não apresentam edifícios na área de estudo, ou porque não são zonas urbanas ou porque, apesar de possuírem uma parte da sua área em terrenos holocénicos, os seus edifícios inserem-se em unidades do Pliocénico. Tendo em conta que o presente estudo se restringe ao Holocénico da cidade de Setúbal, identificaram-se 257 subseções estatísticas que intersestavam o Holocénico (Figura 6.3). A estas retiraram-se 42 subseções, em que 29 não continham edifícios e 13 apresentavam os seus edifícios apenas no Pliocénico. Para as restantes 215 subseções obteve-se a distribuição do número de edifícios existentes em função do número de pisos.

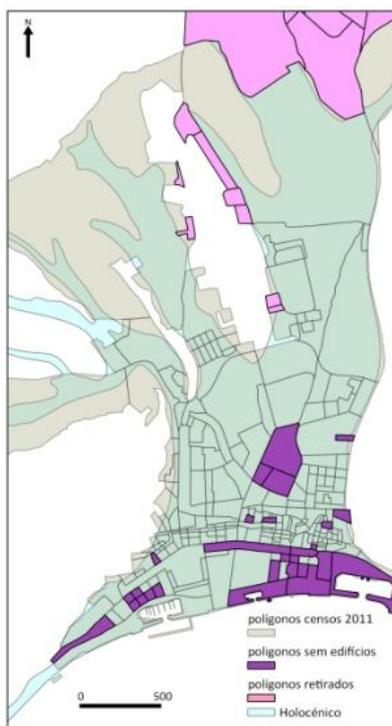


Figura 6.3 – 215 subseções estatísticas de Setúbal consideradas no presente estudo.

Cerca de 60% do edificado da área de estudo caracteriza-se por possuir entre 1 e 2 pisos (Figura 6.4) e localiza-se essencialmente no centro urbano antigo (Figura 6.2). Mais de 80% corresponde a edifícios até 4 pisos e apenas 3% apresentam mais de 10 pisos.

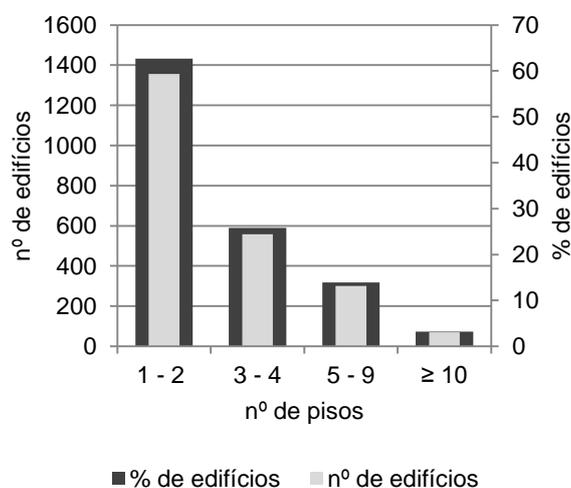


Figura 6.4 – Distribuição em Setúbal do número e percentagem de edifícios em função do número de pisos.

## **6.2 Metodologia**

O estudo da suscetibilidade do edificado à ressonância realizou-se para dois níveis: (i) ao nível da subsecção estatística e, (ii) segundo análises individualizadas de alguns edifícios. Estes dois níveis, pelas diferenças de escala e de informação, envolveram diferentes metodologias, uma mais abrangente, ao nível das subsecções estatísticas e outra executada para cada um dos edifícios selecionados.

### **6.2.1 Estudo dos possíveis efeitos de ressonância estrutura-solo ao nível das subsecções estatísticas**

Nesta metodologia começou por analisar-se a resposta sísmica do solo através do cálculo de funções de transferência obtidas com vários registos de sismos utilizando o *software* SHAKE2000 (Ordóñez 2003). A partir desta análise determinaram-se as amplificações dos diferentes depósitos de solos agrupando-as, posteriormente, em classes de frequências. O cruzamento destas classes com a informação sobre o edificado proveniente do Censos 2011 e com a frequência natural do edificado permitiu estimar, para cada subsecção estatística, o número de edifícios suscetíveis a efeitos de ressonância.

#### **6.2.1.1 Determinação das amplificações máximas do solo por classes de frequências**

Para determinação das amplificações máximas do solo por classes de frequências, foram selecionadas as funções de transferência do capítulo anterior (Capítulo V) que se obtiveram para as colunas de solo do Holocénico da cidade de Setúbal. Estas funções foram calculadas com os sismos de Northridge (1994), Kobe (1995), Tottori (2000), Hokkaido2 (2003) e Hokkaido3 (2003) e com o recurso ao programa SHAKE2000 (Ordóñez 2003) (modelação 1D). Os depósitos de solo foram definidos a partir da informação obtida nos relatórios geotécnicos e nos ensaios ReMi (espessura das camadas e velocidade das ondas de corte) (Capítulos II e V). Consideraram-se para cada uma das funções de transferência nove classes de frequências (0,5-0,9 Hz; 1-1,9 Hz; 2-2,9 Hz; 3-3,9 Hz; 4-4,9 Hz; 5-5,9 Hz; 6-6,9 Hz; 7-7,9 Hz e 8-22 Hz) e, para cada uma delas, calculou-se a amplificação máxima do solo. A Figura 6.5 representa a metodologia utilizada na determinação dessas amplificações por classes de frequências, que compreende três fases.

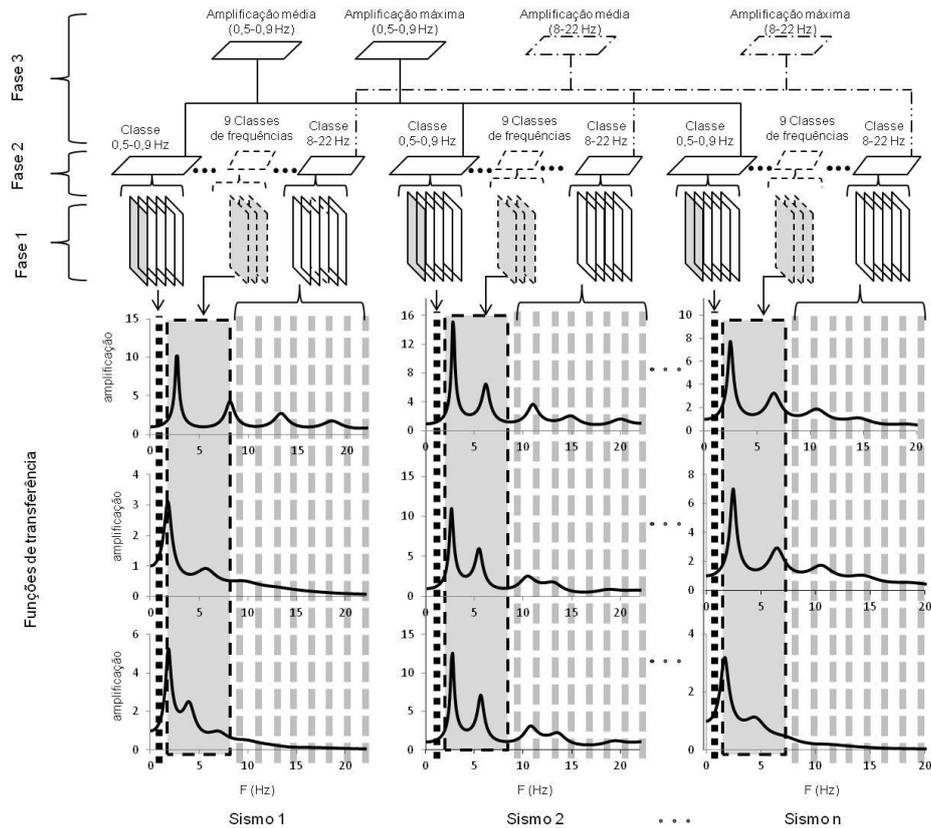


Figura 6.5 – Metodologia utilizada no cálculo dos valores das amplificações do solo a partir das funções de transferência. Fase 1: cálculo das grelhas amplificação para cada frequência; fase 2: integração das grelhas da fase 1 segundo classes de frequência; fase 3: integração das classes de amplificação de cada um dos sismos.

**Fase 1 – Cálculo das amplificações.** Com base nas funções de transferência retiraram-se as amplificações obtidas para as frequências compreendidas entre 0,5 Hz e 22 Hz. Entre 0,5 Hz e 7,9 Hz utilizaram-se intervalos de 0,1 Hz; de 8 Hz até 22 Hz, utilizaram-se intervalos de 1 Hz. Obtiveram-se nesta fase 450 grelhas distribuídas pelas várias classes e pelos cinco sismos. Por exemplo, para a classe de frequências 0,5-0,9 Hz do sismo Hokkaido3 consideraram-se os valores das amplificações obtidas para as frequências de 0,5 Hz, 0,6 Hz, 0,7 Hz, 0,8 Hz e 0,9 Hz (Figura 6.6).

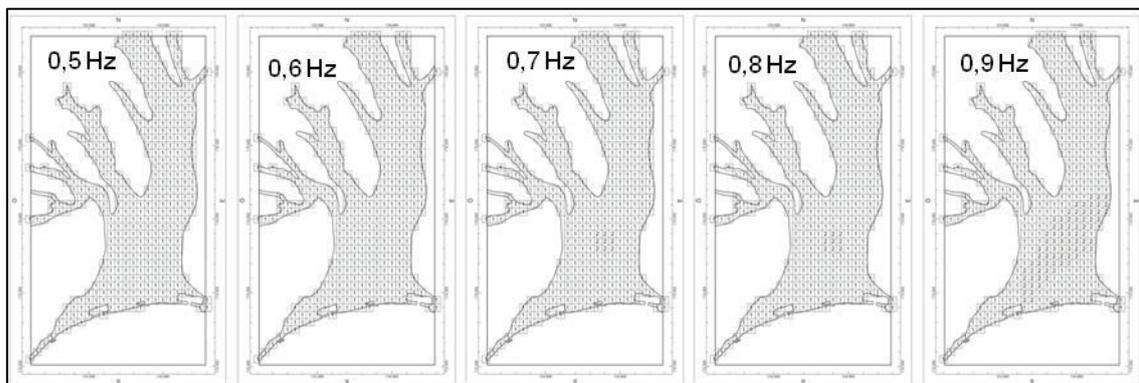


Figura 6.6 - Grelhas de amplificação do sismo Hokkaido3 obtidas com base nas funções de transferência para cada uma das frequências da classe 0,5-0,9 Hz. Interpolação efetuada pelo método do inverso do quadrado da distância para uma grelha de 100x100 m.

**Fase 2 – Integração de grelhas de amplificação.** Integraram-se as várias grelhas de amplificação constituintes de cada classe de frequências numa única grelha. Por exemplo, as cinco grelhas de

amplificação constituintes da classe 0,5-0,9 Hz foram integradas numa única grelha de amplificações (Figura 6.7).

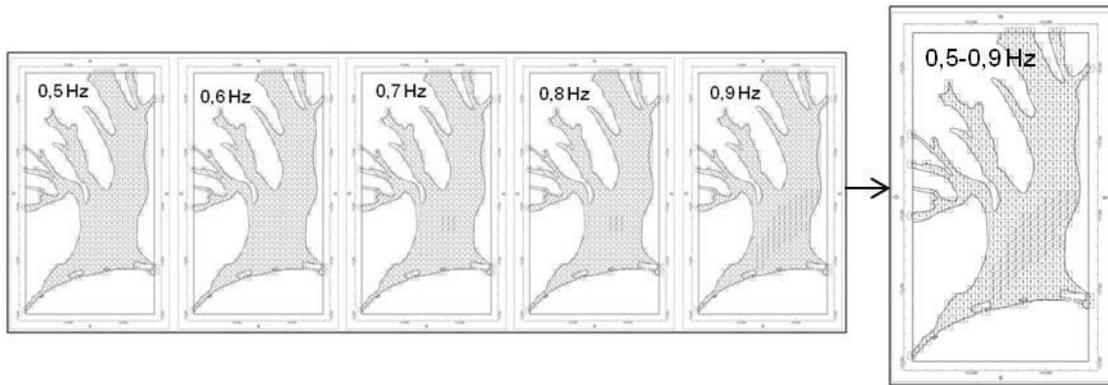


Figura 6.7 – Integração das cinco grelhas de amplificação obtidas para a classe 0,5-0,9 Hz.

Para se efetivar esta integração, compararam-se os valores de amplificação de cada célula e consideraram-se os valores máximos na elaboração de uma grelha final para cada classe (Figura 6.8).

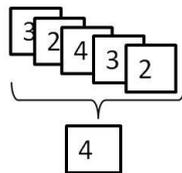


Figura 6.8 - Cálculo do valor final de amplificação de uma célula pelo método do valor máximo. Exemplifica-se com valores de amplificação de cinco células de cinco grelhas diferentes.

**Fase 3 – Integração das grelhas das classes de frequência dos vários sismos.** Integraram-se as grelhas de amplificação de cada classe de frequência dos vários sismos numa única grelha. Esta integração operou-se segundo dois métodos, um em que se calculou o valor máximo de cada célula das grelhas finais (Figura 6.8) e outro em que se calculou o valor médio (Figura 6.9).

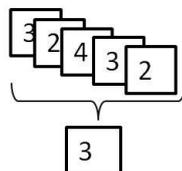


Figura 6.9 - Determinação de valores médios de amplificação. Apresentam-se cinco células das grelhas de amplificação máximas obtidas para cada um dos sismos e o respetivo valor médio arredondado à unidade.

A informação que resulta desta última fase, consiste em 18 cartas de classes de frequências que integram os cinco sismos modulados e nas quais se poderá observar a variação geográfica das amplificações segundo dois intervalos ( $2 \leq \text{amplificação} < 5$  e  $\text{amplificação} \geq 5$ ).

### 6.2.1.2 Identificação da frequência natural dos edifícios

O período fundamental de um edifício pode ser determinado através de relações empíricas que relacionam o período com o número de pisos, através de modulações numéricas ou através de medidas experimentais (por exemplo, o registo de vibrações ambientais).

A utilização de vibrações ambientais registadas em edifícios é um método rápido e económico que permite obter o período fundamental das estruturas. Devido à pequena deformação induzida, as vibrações ambientais permitem obter informação apenas sobre a resposta elástica das estruturas (Gueguen *et al.* 2014). Esta metodologia baseia-se no princípio de que as vibrações ambientais servem de *input* para a estrutura do edifício, podendo ser amplificadas para diferentes frequências dependendo da resposta dinâmica do edifício (Oliveira & Navarro 2010). A amplitude do espectro de Fourier e a curva H/V podem evidenciar picos de frequência que corresponderão à frequência fundamental do edifício. Estes picos serão mais pronunciados nos edifícios com maior altura (baixas frequências) ao contrário dos edifícios com poucos pisos, onde poderão ser difíceis de identificar.

Oliveira (2004) e Oliveira & Navarro (2010) realizaram em Portugal um conjunto vasto de ensaios de vibrações ambientais em edifícios de betão armado. Estes ensaios, que se destinaram a obter a frequência natural de edifícios, realizaram-se em Lisboa e outras cidades localizadas no sul do continente. Com base nos resultados obtidos para 235 edifícios e considerando algumas tipologias construtivas, Oliveira & Navarro (2010) disponibilizaram um conjunto de retas de regressão que relacionam o número de pisos e o período fundamental dos edifícios.

Na Tabela 6.1 apresentam-se diferentes relações entre o número de pisos (N) e o período natural dos edifícios (T) obtidas por vários autores com o recurso a medidas de vibrações ambientais.

Tabela 6.1- Relações obtidas por vários autores entre o período de vibração dos edifícios (T) e o número de pisos (N). Os valores obtidos por Aranda *et al.* (2014) foram obtidos em edifícios após a ocorrência do sismo do Chile de 2010.

Relação entre T e N	Nº edifícios	Locais	Autores
$T=0,051N$	21	Granada (Espanha)	Kobayashi <i>et al.</i> (1995)
$T=0,05N$	34	Almeria (Espanha)	Enomoto <i>et al.</i> (1999)
$T=0,089N+0,032$	25	Barcelona (Espanha)	Espinoza (1999)
$T=0,06N$	57	Caracas (Venezuela)	Enomoto <i>et al.</i> (2000)
$T=0,049N$	39	Adra (Espanha)	Sánchez <i>et al.</i> (2002)
$T=0,049N$	89	Granada (Espanha)	Navarro <i>et al.</i> (2002)
$T=0,057N$	28	Addis Ababa (Etiópia)	Messele & Tades (2002)
$T=0,045N$	235	Lisboa e sul do continente	Oliveira & Navarro (2010)
$T=0,048N$	244	Vários (Báltico)	Gallipoli <i>et al.</i> (2010)
$T=0,057N$	99	Vinã del Mar City (Chile)	Aranda <i>et al.</i> (2014)
$T=0,054N\pm 0,002$	59	Lorca (Espanha)	Gueguen <i>et al.</i> (2014)

Alguns autores verificaram um aumento do período fundamental dos edifícios após terem sido submetidos à ação sísmica, devido à redução da sua rigidez (Salameh *et al.* 2014). Gueguen *et al.*

(2014) observaram o mesmo efeito em edifícios que sofreram danos provocados pelo sismo de Lorca (2011) (Figura 6.10).

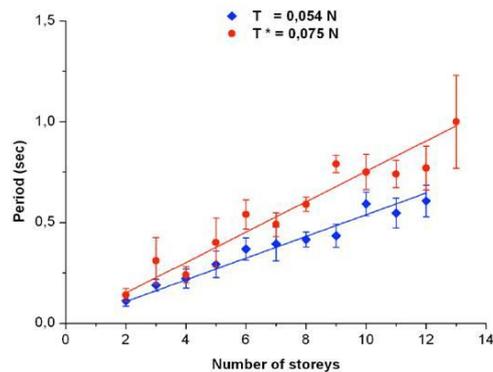


Figura 6.10 - Modificação do período natural dos edifícios devido ao sismo de Lorca de 2011. Azul - períodos antes do sismo; Vermelho - períodos após a ocorrência do sismo (de Gueguen *et al.* 2014).

Salameh *et al.* (2014) realizaram registos de vibrações ambientais em 303 edifícios na cidade de Beirute e concluíram que a frequência natural de um edifício é controlada essencialmente pela sua altura. Obtiveram duas relações entre a altura e o período, uma para os edifícios localizados em rocha ( $T=0,0434N$ ) e outra para edifícios localizados em solos ( $T=0,0555N$ ) (Figura 6.11).

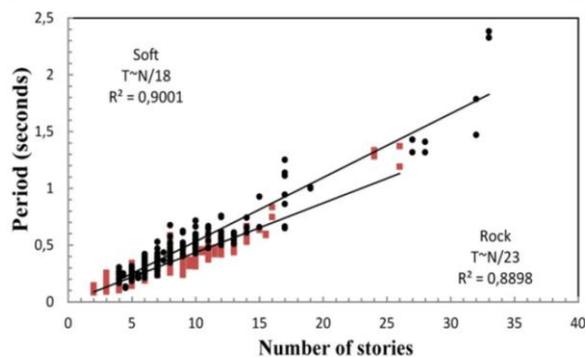


Figura 6.11 - Correlação entre o número de pisos e o período dos edifícios localizados em solos e em rocha (de Salameh *et al.* 2014).

Herak (2009) verificou uma possível contaminação da frequência natural dos edifícios pela frequência dos solos em locais onde a amplificação do solo pode ser significativa.

O método que foi adotado no presente estudo para determinar a frequência natural dos edifícios foi o das vibrações ambientais registadas em edifícios. Os registos realizaram-se com uma estação sísmica portátil de banda larga Güralp CMG 6TD colocada no último piso dos edifícios (Figura 6.12). Os registos foram realizados com uma taxa de amostragem de 100 Hz e com uma duração média de 15 minutos. Utilizou-se a aplicação *Geopsy* para o cálculo das curvas médias H/V e para a elaboração dos espectros das componentes longitudinais e transversais.



Figura 6.12 – Exemplo de um local (cobertura de um edifício) onde se realizou um registo de vibrações ambientais.

A componente norte-sul do sismómetro foi orientada segundo a direção longitudinal dos edifícios, tendo-se considerado como direção longitudinal a direção cujo comprimento é o maior e a transversal o menor. Para edifícios simétricos ou de geometria irregular não se fez distinção entre as componentes longitudinal e transversal.

### **6.2.1.3 Determinação da suscetibilidade dos edifícios a efeitos de ressonância ao nível das subseções estatísticas**

Para se determinar a localização e o número de edifícios suscetíveis de sofrerem efeitos de ressonância em terrenos do Holocénico são necessários três níveis de informação.

O primeiro diz respeito à distribuição, ao nível da subseção estatística, do número de edifícios em função do número de pisos. Segundo os conceitos para efeitos censitários, são considerados edifícios apenas aqueles que possuem pelo menos um alojamento, não sendo recenseados os edifícios que são utilizados exclusivamente para fins diferentes de habitação. Segundo este conceito existem estruturas pertencentes a vários setores (comércio, turismo, ensino, saúde) que não estão disponibilizadas na informação dos censos de 2011. Assim, o presente estudo não inclui a totalidade dos edifícios existentes na área de investigação, pelo que será uma análise por defeito.

O segundo relaciona-se com as funções de transferência e respetivas amplificações calculadas para as várias classes de frequências. Para cada uma das classes de frequência consideraram-se duas categorias, uma com amplificações superiores ou iguais a 2 e inferiores a 5 ( $2 \leq \text{amplificação} < 5$ ) e outra com amplificações iguais ou superiores a 5 ( $\text{amplificação} \geq 5$ ).

O terceiro relaciona-se com a frequência natural dos edifícios em função do seu número de pisos. A relação entre as classes de frequências do solo e a altura do edificado obtém-se com base numa relação empírica que relaciona o período com o número de pisos. A título de exemplo, se a reta de regressão utilizada nessa relação for  $T=0,0535N$  ( $T$  - período;  $N$  - número de pisos), os edifícios com 10 a 16 pisos apresentarão períodos de 0,5 e 0,9 s respetivamente (frequências de 2 a 1,1 Hz).

A determinação das subseções que apresentam amplificações pode efetuar-se segundo dois métodos: (i) pela determinação da interseção das subseções estatísticas pelos polígonos das amplificações e (ii) na identificação das subseções estatísticas que se localizam totalmente no interior dos polígonos das amplificações. Com o objetivo de se estudarem as vantagens e inconvenientes na utilização de cada um dos métodos foi efetuada uma comparação de resultados. Na Figura 6.13 apresentam-se as subseções estatísticas com amplificação igual ou superior a 2 para classe de frequências de 1-1,9 Hz calculadas pelos dois métodos. Verifica-se que pelo método da interseção se obtêm 218 polígonos e pelo segundo se obtêm 145.

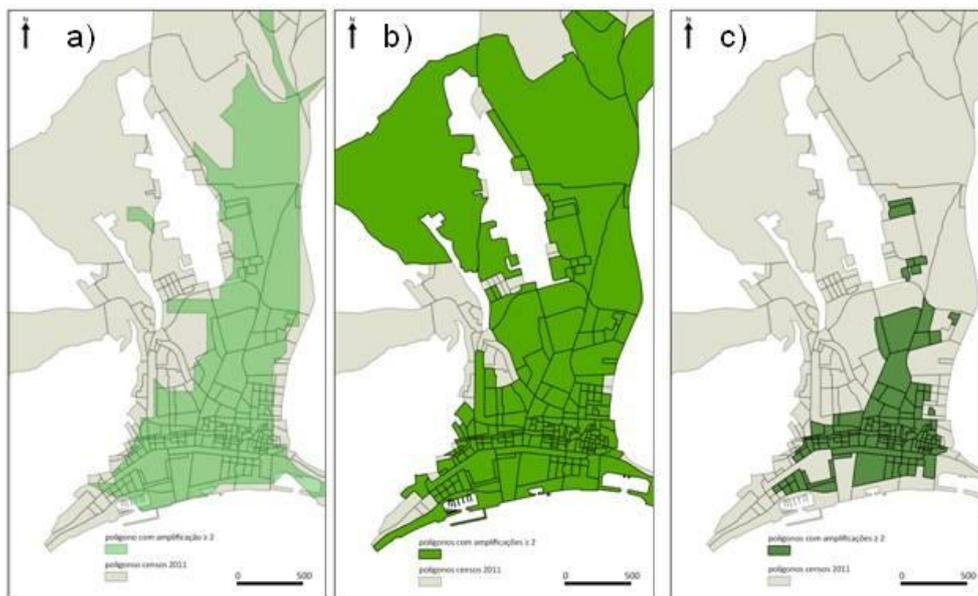


Figura 6.13 - Métodos para a seleção das subseções estatísticas que apresentam ampliações. (a) Subseções estatísticas com amplificação  $\geq 2$ ; (b) método da interseção; (c) subseções estatísticas contidas no polígono de ampliações.

Ambos os métodos apresentam inconvenientes: o método da interseção leva à seleção de subseções estatísticas por excesso, pois existem subseções estatísticas selecionadas que na realidade apresentam uma pequena parte no interior do polígono das ampliações; o segundo método leva à seleção por defeito, ou seja, há subseções estatísticas que apresentam áreas consideráveis no interior dos polígonos das ampliações e que não são selecionadas. No presente estudo optou-se pelo método da interseção que é mais conservativo.

Para se estimar o número de edifícios suscetíveis à ocorrência de efeitos de ressonância, utilizaram-se dois passos para cada uma das classes de frequências consideradas (Figura 6.14):

1. Interseção das subseções estatísticas com os polígonos das ampliações do solo (obtidos com base nas funções de transferência) (Figura 6.14b). Desta interseção resultam subseções estatísticas que apresentam ampliações para as seguintes categorias:  $2 \leq$  amplificação  $< 5$  (Figura 6.14c) e amplificação  $\geq 5$  (Figura 6.14d). (Nota: para cada uma das classes de frequências existem dois polígonos de ampliações (médio – Figura 6.6 e máximo – Figura 6.7).
2. Identificação das subseções estatísticas com edifícios suscetíveis à ressonância para a categoria de  $2 \leq$  amplificação  $< 5$  (Figura 6.14e); Identificação das subseções estatísticas com edifícios suscetíveis à ressonância para a categoria de amplificação  $\geq 5$  (Figura 6.14f).

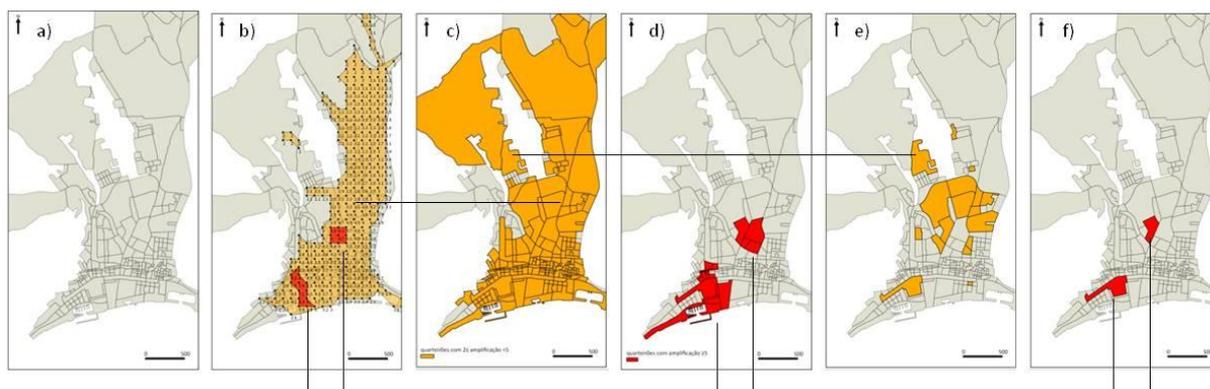


Figura 6.14 – Esquema da metodologia utilizada na estimativa do número de edifícios com 10 a 16 pisos suscetíveis à ressonância (para ampliações médias por classes de frequência). (a) Subseções estatísticas; (b) Polígonos de ampliações do solo (obtidos com base nas funções de transferência), para o intervalo de frequências 1-1,9 Hz: a laranja -  $2 \leq$  amplificação  $< 5$ ; a vermelho - amplificação  $\geq 5$ ; (c) Subseções estatísticas que interseitam a categoria  $2 \leq$  amplificação  $< 5$ ; (d) Subseções estatísticas que interseitam a categoria de amplificação  $\geq 5$ ; (e) Subseções estatísticas que possuem edifícios com 10 a 16 pisos, suscetíveis à ressonância no intervalo  $2 \leq$  amplificação  $< 5$ ; (f) Subseções estatísticas que possuem edifícios com 10 a 16 pisos, suscetíveis à ressonância no intervalo amplificação  $\geq 5$ .

A Figura 6.14 exemplifica a metodologia seguida na determinação da suscetibilidade ao efeito de ressonância de edifícios com 10 a 16 pisos para ampliações médias. Após a aplicação dos passos atrás descritos, contabilizaram-se os edifícios existentes em cada uma das subseções estatísticas e para cada uma das classes de amplificação (Tabela 6.2).

Tabela 6.2 - Número de edifícios com 10 a 16 pisos suscetíveis a fenómenos de ressonância para 2 categorias de amplificação ( $2 \leq$  amplificação  $< 5$  e amplificação  $\geq 5$ ) e para ampliações médias.

Número de pisos	Número de edifícios suscetíveis à ressonância ( $2 \leq$ amplificação $< 5$ )	Número de edifícios suscetíveis à ressonância (amplificação $\geq 5$ )
10-16	62	8

## 6.2.2 Análise de edifícios individualizados

Para a análise de edifícios individualizados, estudaram-se 14 edifícios localizados a menos de 150 m dos lugares onde se realizaram ensaios ReMi. O estabelecimento desta distância tem como objetivo limitar a influência da variabilidade das características das formações superficiais nos perfis da velocidade das ondas S e nas funções de transferência.

Para estes locais obtiveram-se as funções de transferência obtidas com os cinco sismos selecionados, utilizando o *software* SHAKE2000, que se compararam com as frequências naturais dos edifícios. Quando as frequências naturais do solo e dos edifícios apresentam valores próximos considera-se que o efeito de ressonância é provável (Navarro *et al.* 2004). Gosar (2010) apresentou critérios de classificação para o perigo de ressonância estrutura-solo com base na razão frequência natural do edifício/frequência natural do solo.

A metodologia aplicada no presente estudo considerou dois índices de perigo, um que diz respeito aos critérios apresentados por Gosar (2010) (índice 1) e o outro desenvolvido no âmbito desta tese e que relaciona os valores de amplificação máxima, resultantes da interseção da frequência natural do edifício com a curva de amplificação do solo (índice 2). Do cruzamento destes dois índices calcularam-se os valores finais de suscetibilidade à ressonância solo-estrutura.

A metodologia proposta por Gosar (2010) e seguida por outros autores (Warnana *et al.* 2011, Fnais *et al.* 2014), analisa a distância existente entre a frequência natural do edifício e a frequência do solo, selecionando a frequência do edifício (longitudinal ou transversal) que está mais próxima da frequência do solo e calculando a razão entre elas. Com base na diferença encontrada considera as seguintes classes de perigo à ressonância solo-estrutura:

- Se a diferença se situa entre  $\pm 15\%$  (razão entre 0,85 e 1,15) – perigo alto;
- Se a diferença se situa no intervalo  $\pm 15\%$ -25% (razão entre 0,75 e 0,85 ou entre 1,15 e 1,25) – perigo médio;
- Se a diferença é maior do que  $\pm 25\%$  (razão inferior a 0,75 ou superior a 1,25) – perigo baixo.

Como exemplo, apresentam-se na Tabela 6.3 as frequências naturais de dois edifícios e as frequências naturais dos solos, e a classificação quanto ao perigo de ressonância segundo os critérios de Gosar (2010).

Tabela 6.3 - Perigo de ressonância solo-estrutura segundo Gosar (2010).

Frequência longitudinal (Hz)	Frequência transversal (Hz)	Frequência do solo (Hz)	Perigo de ressonância solo-estrutura
6,9	7,3	3,2	Baixo
3,7	3,6	3,7	Alto

Para ilustrar o índice de perigo desenvolvido na presente tese (índice 2), que compara as curvas de amplificação dos solos com os valores das frequências naturais dos edifícios, apresenta-se na Figura 6.15 a curva de amplificação de um solo e os valores das frequências naturais de quatro edifícios (A, B, C e D).

A curva de amplificação apresenta o seu máximo aos 2,8 Hz e os edifícios possuem frequências naturais entre os 1 e 6 Hz (A=1,8 Hz; B=2,2 Hz; C=3 Hz; D=6 Hz). A interseção da frequência natural do edifício A com a curva de amplificação do solo corresponde a um valor de amplificação inferior a 2, enquanto para o edifício C corresponde a um valor de amplificação de 9.

Em termos de classificação de perigo, este índice segue os seguintes critérios:

- Amplificação  $< 2$  – perigo baixo;
- $2 \leq$  Amplificação  $< 5$  – perigo médio;
- Amplificação  $\geq 5$  – perigo alto.

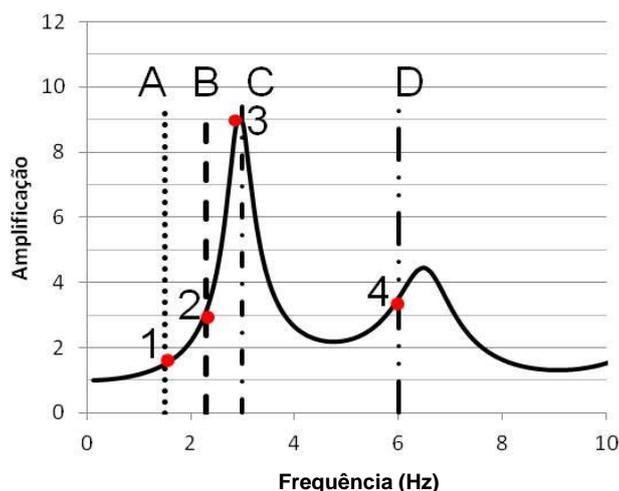


Figura 6.15 – Exemplificação da determinação do índice de classificação do perigo à ressonância de quatro edifícios, com base na análise das funções de transferência.

Para cada um dos dois índices de perigo anteriores calculou-se um índice final de perigo que corresponde ao valor médio dos índices obtidos para cada uma das funções de transferência calculadas com cada sismo. A suscetibilidade dos edifícios face à ressonância definiu-se com base na conjugação destes índices finais e segundo a matriz da Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Matriz de classificação da suscetibilidade dos edifícios à ressonância com base em dois índices finais de perigo.

Índice 1 Critérios de perigo à ressonância definidos por Gosar (2010)	Índice 2 Valores da interseção obtidos entre a função de transferência com a frequência natural do edifício		
	Amplificação <2 (Perigo baixo)	2 ≤ Amplificação <5 (Perigo médio)	Amplificação ≥ 5 (Perigo alto)
>±25% (Perigo baixo)	Baixa	Baixa - Média	Média
±15%-25% (Perigo médio)	Baixa - Média	Média	Média-Alta
±15% (Perigo alto)	Média	Alta	Muito Alta

## **6.3 Resultados e discussão**

Seguidamente apresentam-se os resultados obtidos com a aplicação da metodologia atrás descrita.

### **6.3.1 Análise ao nível das subsecções estatísticas**

Os resultados apresentados correspondem à identificação do número de edifícios existentes em cada subsecção estatística suscetíveis de sofrerem efeitos de ressonância.

#### **6.3.1.1 Amplificação do movimento do solo**

A Figura 6.16 representa a distribuição das amplificações calculadas com base no valor médio das funções de transferência obtidas com os diferentes sismos considerados, para as diferentes classes de frequência definidas. Observa-se que para a primeira classe de frequências (0,5-1 Hz) as amplificações máximas são inferiores a 5, mas para as restantes classes existem inúmeros locais com valores superiores.

Nas duas primeiras classes (0,5-0,9 Hz e 1-1,9 Hz) as amplificações máximas localizam-se nas áreas onde as espessuras das formações superficiais alcançam maiores espessuras (valores superiores a 10 m).

Nas classes seguintes assiste-se ao deslocamento dos locais de maiores amplificações para áreas de menores espessuras de formações superficiais. Verifica-se que as frequências compreendidas entre 1 e 3,9 Hz são as que apresentam maiores áreas com amplificações iguais ou superiores a 2. As frequências entre os 2 e os 3,9 Hz são as que evidenciam maiores extensões com amplificações superiores a 5.

Na Figura 6.17 apresenta-se a distribuição das amplificações calculadas com base nos valores máximos das funções de transferência obtidas com os diferentes sismos. Como seria de esperar, observa-se igualmente a influência da espessura das formações superficiais na distribuição das amplificações: a distribuição dos locais com maiores amplificações nas duas primeiras classes (0,5-0,9 Hz e 1-1,9 Hz) coincide com os locais de maiores espessuras das formações espessuras.

No intervalo entre os 3 e os 4,9 Hz verifica-se igualmente esta influência: os locais de menores amplificações (inferiores a 2) localizam-se essencialmente nas áreas de maior espessura das formações superficiais. Em termos gerais o padrão de distribuição das amplificações é semelhante ao da Figura 6.16, mas as intensidades das amplificações e as suas extensões são superiores.

O padrão de distribuição das amplificações estimadas para a cidade de Setúbal está de acordo com a influência da rigidez dos materiais. Segundo Kramer (1996) e Yilmaz (2015), quanto maior for a espessura das formações superficiais, menor será o valor da frequência para o qual possui maior amplificação. Em Setúbal observa-se que, nas áreas onde o Holocénico apresenta maior espessura, as maiores amplificações localizam-se nas classes de menor frequência. Quando o topo do Pliocénico diminui de profundidade, as amplificações máximas concentram-se nas classes de maior frequência.

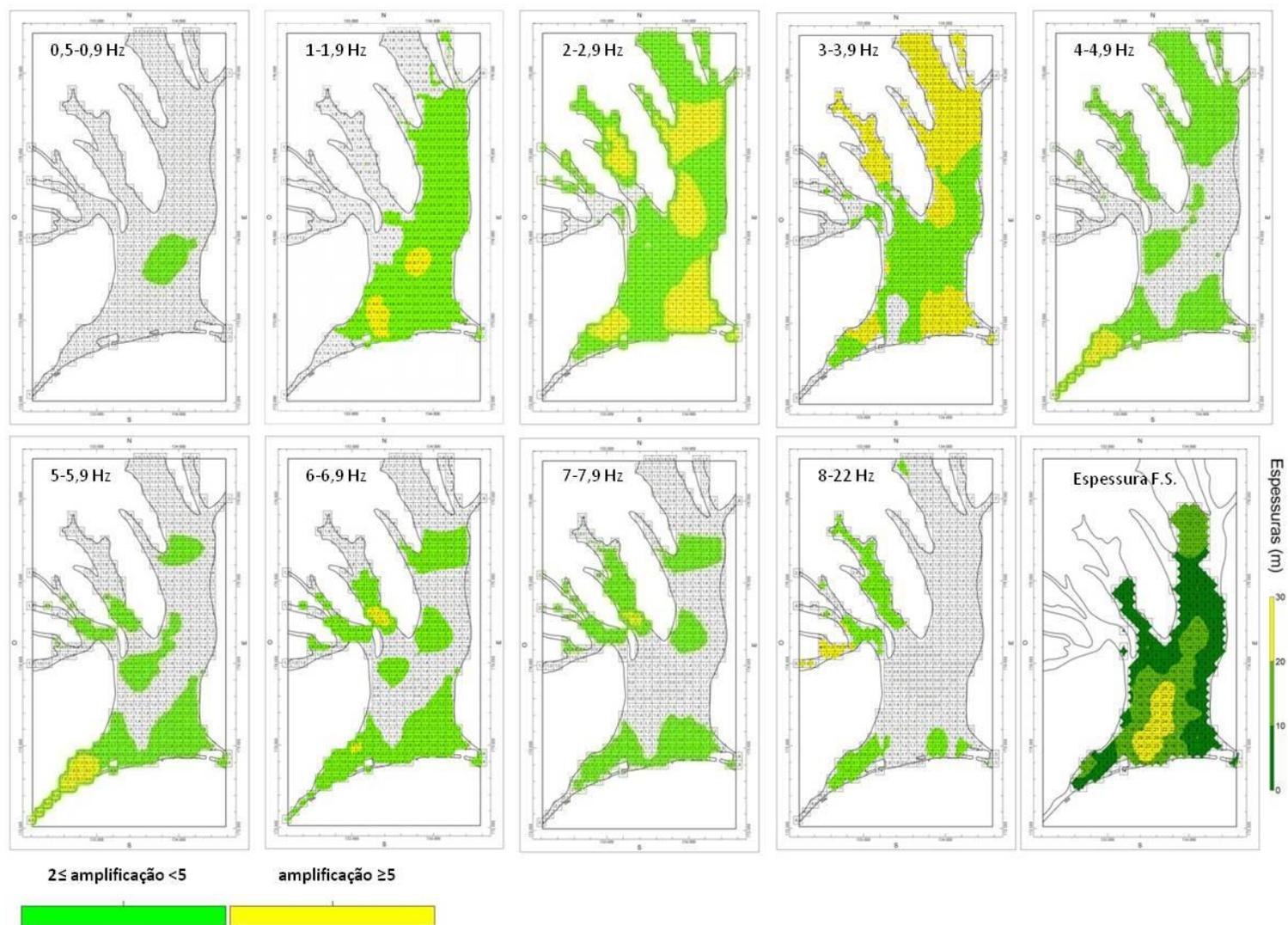


Figura 6.16 - Amplificações médias do movimento do solo na cidade de Setúbal em cada classe de frequência. A última figura representa a espessura das formações superficiais do Holocénico. Interpolação efetuada pelo método do inverso do quadrado da distância para uma grelha de 100x100 m.

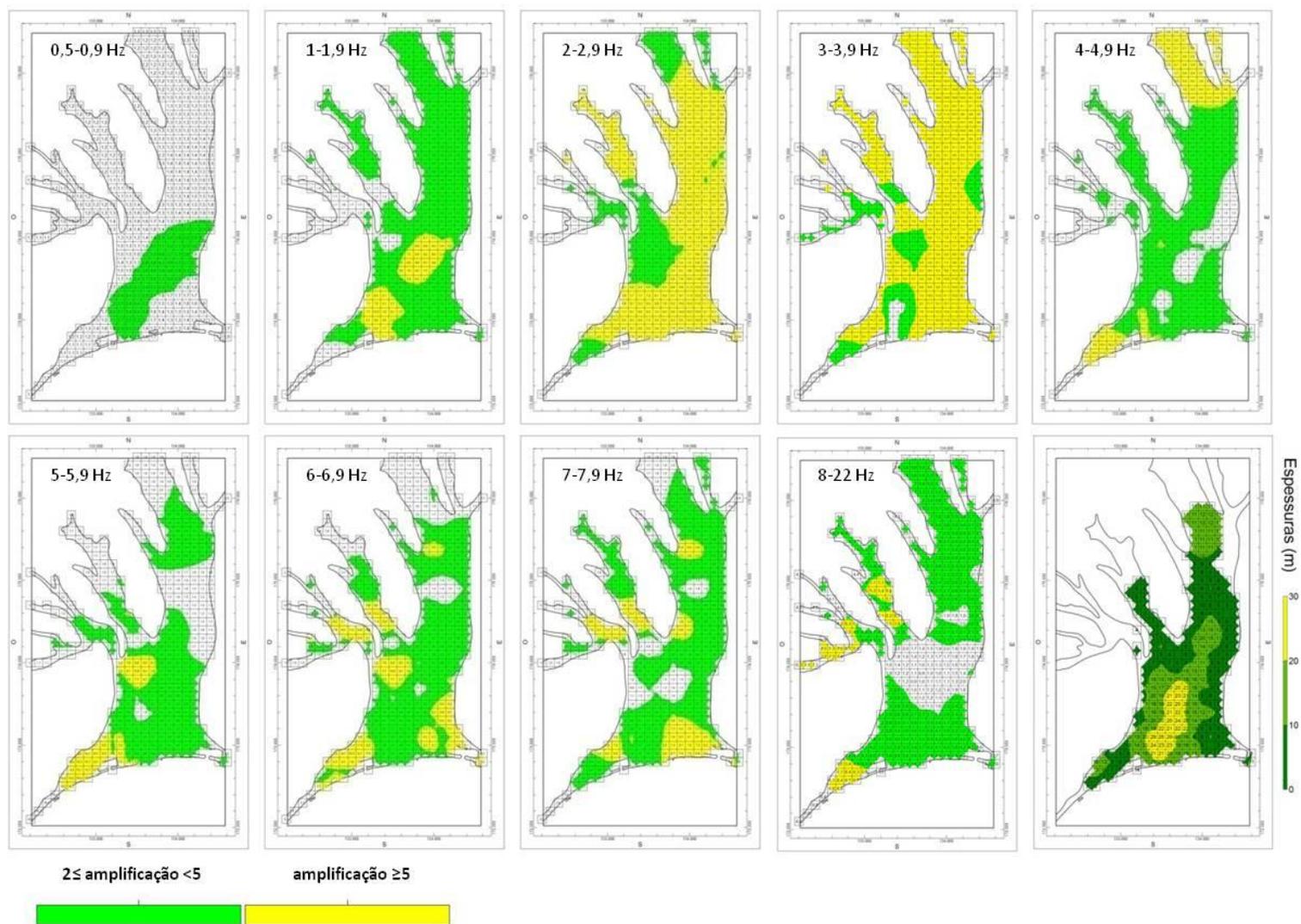


Figura 6.17 - Amplificações máximas do movimento do solo na cidade de Setúbal em cada classe de frequência. A última figura representa a espessuras das formações superficiais do Holocénico. Interpolação efetuada pelo método do inverso do quadrado da distância para uma grelha de 100x100 m.

### 6.3.1.2 Frequência natural dos edifícios

Com o objetivo de se obter uma relação entre o número de pisos e o período de vibração dos edifícios, executaram-se registos de vibrações ambientais em 37 edifícios (31 localizados no Holocénico e 6 nas unidades plio-pleistocénicas) (Figura 6.18). A seleção dos edifícios foi executada de modo a abranger estruturas com diferentes alturas e tipologias (de betão e alvenaria), tendo ainda em conta a preocupação que a Câmara Municipal de Setúbal mostrou pela segurança de edifícios públicos (biblioteca, finanças, escolas, hospitais) e históricos (convento de Jesus). Alguns dos edifícios localizados em terrenos do Holocénico apresentavam as suas soleiras sobrelevadas, provavelmente pelo facto de se situarem em áreas sujeitas a inundação.

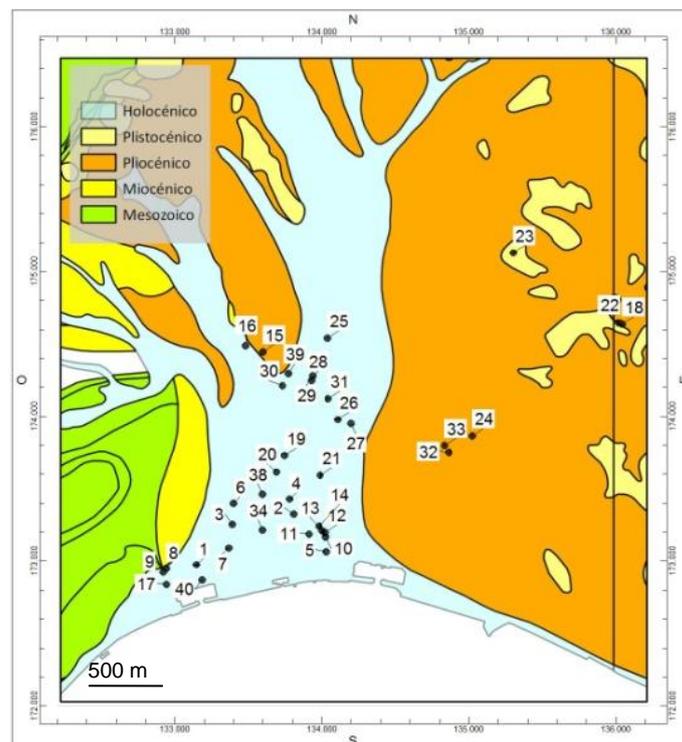


Figura 6.18 – Localização na carta geológica dos edifícios da cidade de Setúbal onde se executaram registos de vibrações ambientais.

Quanto à tipologia dos edifícios, ensaiaram-se 29 edifícios de betão e 8 de alvenaria e procurou obter-se uma relação que abrangesse conjuntamente estas duas tipologias construtivas. Esta relação média foi utilizada conjuntamente com os dados do censo de 2011 na determinação da suscetibilidade dos edifícios à ressonância.

Na Figura 6.19 apresenta-se um exemplo de um registo efetuado na cobertura de um edifício de 8 pisos implantado no Holocénico, assim como a curva média H/V e os espectros das amplitudes obtidos para as três componentes.

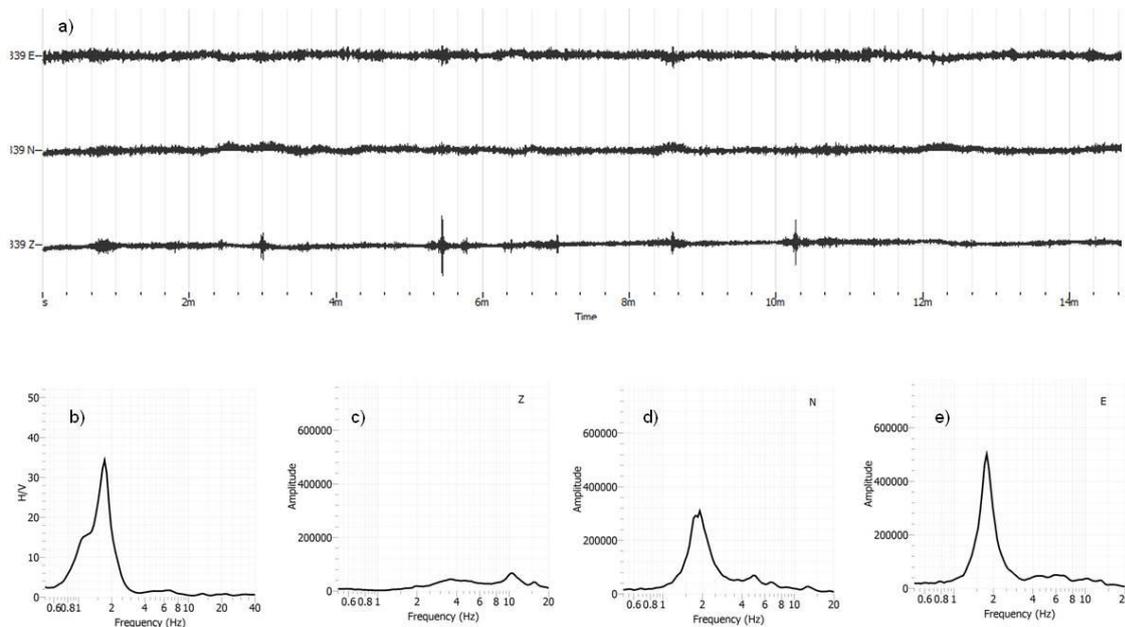


Figura 6.19 – (a) Registo das vibrações ambientais efetuado na cobertura de um edifício de betão com 8 pisos na cidade de Setúbal; (b) curva média H/V<sub>E</sub>; (c) espectros médios da componente vertical; (d) da componente N-S (longitudinal); (e) da componente E-W (transversal).

O espectro de Fourier evidencia normalmente um pico cuja frequência corresponde à frequência fundamental do edifício e que é tanto mais pronunciado quanto mais alta for a estrutura. Também foram identificados, principalmente em edifícios de alvenaria, picos de frequência associados à vibração natural do solo (Figura 6.20). A curva média H/V obtida no topo do edifício (Figura 6.20a) e no solo (Figura 6.20b) apresentam um pico comum que corresponde à vibração natural do solo (cerca de 1 Hz). No entanto, a curva H/V obtida no topo do edifício apresenta um segundo pico a uma frequência superior (cerca de 6,7 Hz) que está bem presente na componente transversal, é menos evidente na longitudinal, e que corresponde à frequência natural do edifício.

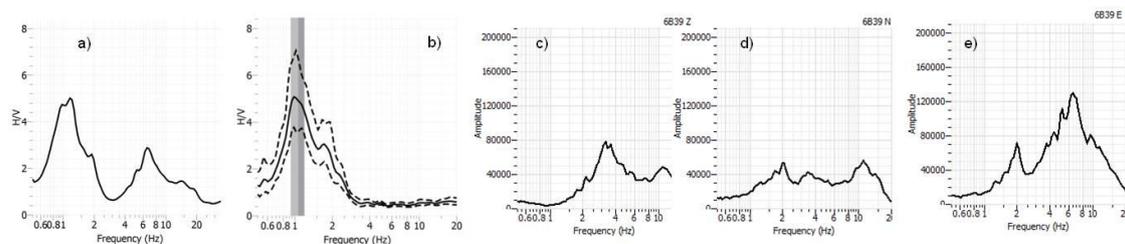


Figura 6.20 – (a) Curva média H/V<sub>E</sub> obtida num edifício de alvenaria com 2 pisos na cidade de Setúbal; (b) curva média H/V obtida num registo efetuado no solo (a cerca de 150 m do edifício); (c) espectro das amplitudes para a componente vertical; (d) para a componente N-S (longitudinal); (e) para a componente E-W (transversal).

No Anexo XIII descrevem-se as características físicas dos edifícios ensaiados (número de pisos, comprimento e largura), e apresentam-se os resultados das frequências naturais calculadas com base nas curvas médias H/V<sub>E</sub> e com base nos espectros das componentes longitudinais e transversais.

Os valores de frequência retirados dos picos das curvas médias de H/V<sub>E</sub> correspondentes à frequência natural dos edifícios, permitiram estabelecer relações entre o número de pisos e a frequência natural dos edifícios (Figura 6.21).

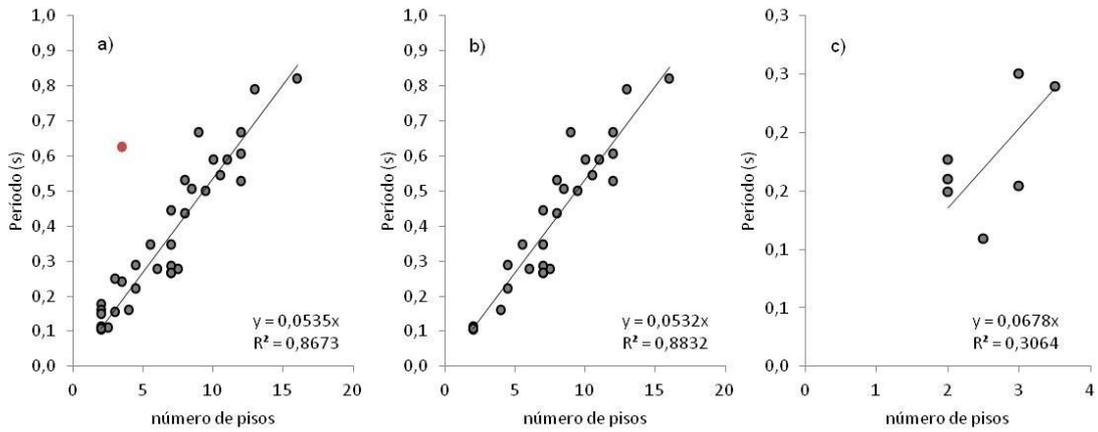


Figura 6.21 - Relação entre o número de pisos e a frequência natural de um conjunto de 36 edifícios da cidade de Setúbal determinada a partir da análise das curvas médias de H/V<sub>E</sub>: (a) todos os edifícios (o ponto assinalado a vermelho corresponde a um *outlier* obtido para o edifício 2); (b) edifícios de betão; (c) edifícios de alvenaria (sem *outlier*). Nota: o resultado do *outlier*, obtido num edifício de alvenaria, não foi considerado nas correlações.

Foi também possível calcular os espectros das componentes longitudinais (28 edifícios) e transversais (30 edifícios) para edifícios de alvenaria e de betão (Figura 6.22).

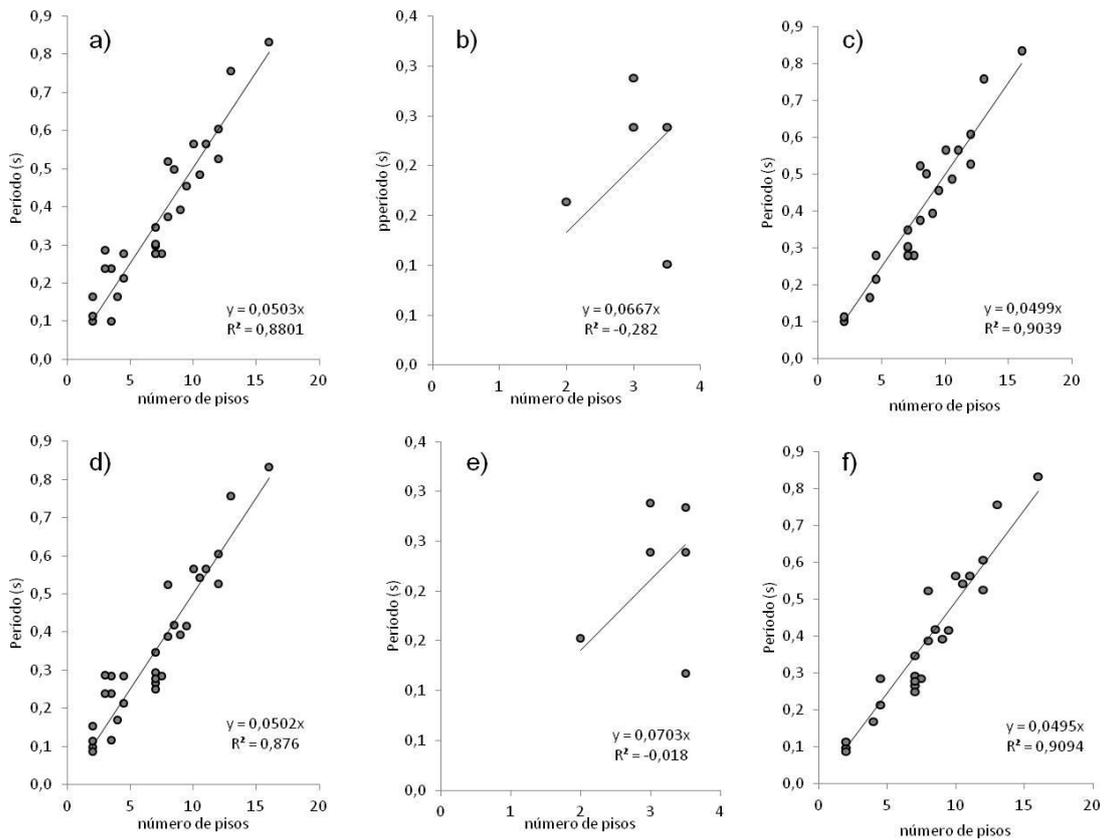


Figura 6.22 – Relação entre o número de pisos e a frequência natural obtida para a cidade de Setúbal. Direção longitudinal: (a) todos os edifícios; (b) edifícios de alvenaria; (c) edifícios de betão. Direção transversal: (d) todos os edifícios; (e) edifícios de alvenaria; (f) edifícios de betão. Nota: o resultado do *outlier*, obtido num edifício de alvenaria, não foi considerado nas correlações.

Na Tabela 6.5 apresentam-se as correlações obtidas entre a frequência natural dos edifícios e o número de pisos.

Tabela 6.5 – Correlações obtidas para a cidade de Setúbal entre a frequência natural dos edifícios e o número de pisos.  $H/V_E$  – período determinado com base na curva H/V;  $T_L$  – período na direção longitudinal;  $T_T$  – período na direção transversal. O resultado do *outlier*, obtido num edifício de alvenaria, não foi considerado nas correlações.

Tipo de edifícios	Curvas $H/V_E$			Espectro da componente longitudinal			Espectro da componente transversal		
	Relações	$R^2$	Nº edifícios	Relações	$R^2$	Nº edifícios	Relações	$R^2$	Nº edifícios
Todos	$T=0,0535N$	0,87	36	$T_L=0,0503N$	0,88	28	$T_T=0,0502N$	0,88	30
Betão	$T=0,0532N$	0,88	29	$T_L=0,0499N$	0,90	23	$T_T=0,0495N$	0,91	24
Alvenaria	$T=0,0678N$	0,31	7	$T_L=0,0667N$	-0,28	5	$T_T=0,0703N$	-0,02	6

Em termos gerais concluiu-se que os resultados obtidos para a cidade de Setúbal são semelhantes às relações obtidas por diversos autores (Tabela 6.1). Considerando as relações para todos os edifícios (Tabela 6.1), as que mais se aproximam das de Setúbal são as obtidas por Kobayashi *et al.* (1995) para a cidade de Granada, Enomoto *et al.* (1999) para Almeria, e Gueguen *et al.* (2014) para Lorca. As relações que mais se assemelham com as obtidas por Oliveira & Navarro (2010) são as das componentes longitudinais e transversais para os edifícios de betão.

Vários investigadores (e.g., Oliveira & Navarro 2010, Gueguen *et al.* 2014) aconselham a utilização dos espectros das componentes individuais para determinar a frequência natural dos edifícios. Contudo, Gallipoli *et al.* (2008, 2010, 2014) sugerem que a utilização da técnica HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*), ou seja, a utilização das curvas médias H/V, é apropriada para a determinação das frequências naturais de edifícios com mais de 10 m de altura ( $\approx$  3 pisos), mas deve ser evitada para edifícios mais baixos e rígidos. Estes autores consideram igualmente que para locais onde os solos apresentam grandes amplificações, os picos observados nos edifícios podem corresponder a picos do próprio solo. Mucciarelli *et al.* (2012) utilizaram a técnica HVSR na determinação das frequências fundamentais de edifícios em L'Aquila (Itália) que sofreram danos durante a ocorrência do sismo em 2009.

A relação utilizada no presente estudo ( $T=0,0535N$ ), foi a obtida a partir da análise das curvas  $H/V_E$  pois foi a metodologia possível de ser utilizada em todos os edifícios (de betão e de alvenaria) e também porque 80% dos edifícios ensaiados apresentam 3 ou mais pisos. Verifica-se igualmente que esta relação é muito semelhante às obtidas com os espectros das componentes longitudinais ( $T=0,0503N$ ) e transversais ( $T=0,0502N$ ). Com base na relação  $T=0,0535N$  estabeleceu-se a correspondência entre o número de pisos dos edifícios e os intervalos de frequências que foram considerados na análise do comportamento dos solos, Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Relação entre o número de pisos dos edifícios e os intervalos de frequências correspondentes.

Número de pisos dos edifícios	Classes de frequência dos solos (Hz)
1-2	8-22
3	6-6,9
4	4-4,9
5-6	3-3,9
7-9	2-2,9
10-16	1-1,9

### 6.3.1.3 Determinação do número de edifícios suscetíveis de sofrer ressonância em cada subsecção estatística

A localização dos edifícios suscetíveis aos efeitos da ressonância depende da distribuição do valor das amplificações do solo em cada classe de frequências (Figuras 6.16 e 6.17) e do modo como o edificado se distribui pelas subsecções estatísticas.

Nas Figuras 6.23, 6.24 e 6.25 apresenta-se a distribuição geográfica do número de edifícios suscetíveis de sofrer ressonância em cada subsecção estatística. Estes resultados apresentam-se em função do número de pisos, para as duas classes de amplificação ( $2 \leq \text{amplificação} < 5$  e  $\text{amplificação} \geq 5$ ) e em função dos valores médios ou máximos das amplificações do solo.

Observa-se que para os edifícios mais altos, com 7 ou mais pisos, as subsecções estatísticas com suscetibilidade à ressonância mais elevada localizam-se, com poucas exceções, a norte do centro urbano antigo da cidade e até cerca de 1000 m para norte do Estádio do Bonfim (Figura 6.23).

Relativamente aos edifícios com 4 a 6 pisos, verifica-se que as subsecções com suscetibilidade mais elevada começam por ocupar os bordos da bacia holocénica da área analisada (Figuras 6.24a, b, c). Este padrão modifica-se para os edifícios com 4 pisos onde as subsecções mais suscetíveis à ocorrência de ressonância ocupam também a zona central do centro urbano antigo (Figura 9.24d).

Os edifícios com 3 pisos, com suscetibilidade à ressonância, localizam-se essencialmente numa faixa onde se situa o centro urbano antigo (Figuras 6.25a, b). Esta área, que percorre todo o Holocénico de leste para oeste, apresenta uma largura entre os 200 e os 250 m.

Os edifícios com 1 e 2 pisos passíveis de sofrerem ressonância, para valores médios de amplificação, localizam-se na zona oeste da cidade (Figura 6.25c). Este padrão modifica-se para as amplificações máximas em que se assiste a uma generalização da suscetibilidade destes edifícios a quase toda a cidade (Figura 6.25d).

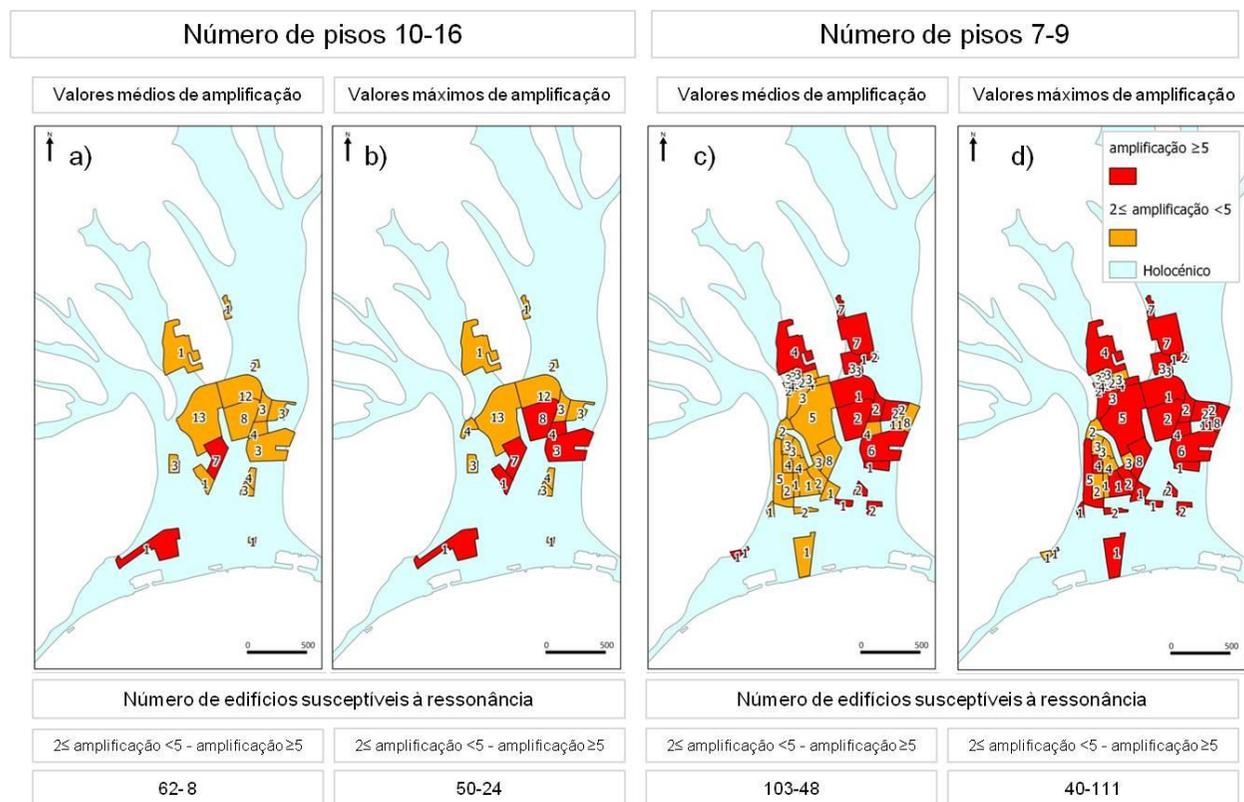


Figura 6.23 - Distribuição geográfica na cidade de Setúbal ao nível das subseções estatísticas do número de edifícios, com 16 a 7 pisos, suscetíveis a efeitos de ressonância.

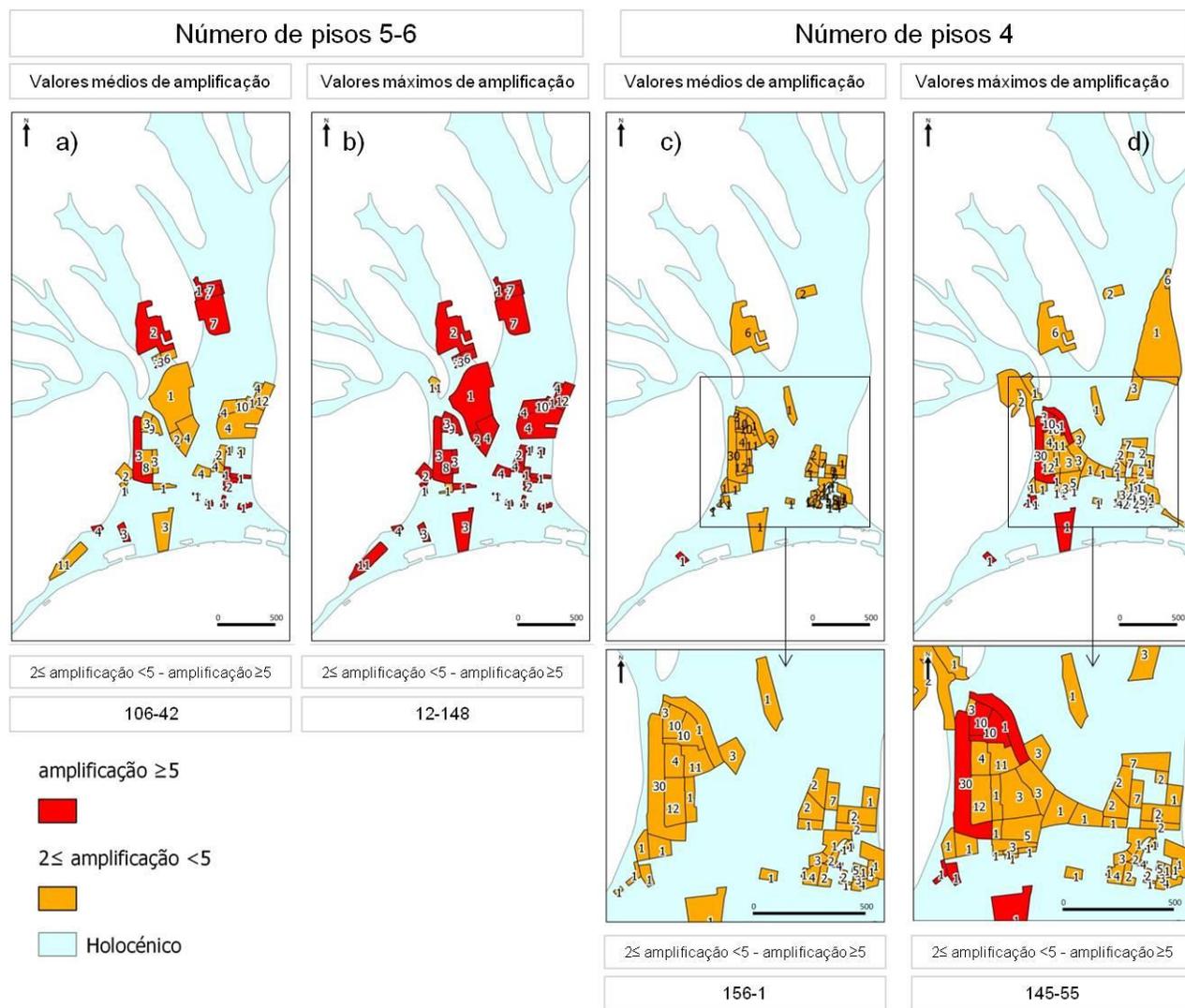


Figura 6.24 - Distribuição geográfica na cidade de Setúbal ao nível das subseções estatísticas do número de edifícios, com 6 a 4 pisos, suscetíveis a efeitos de ressonância.

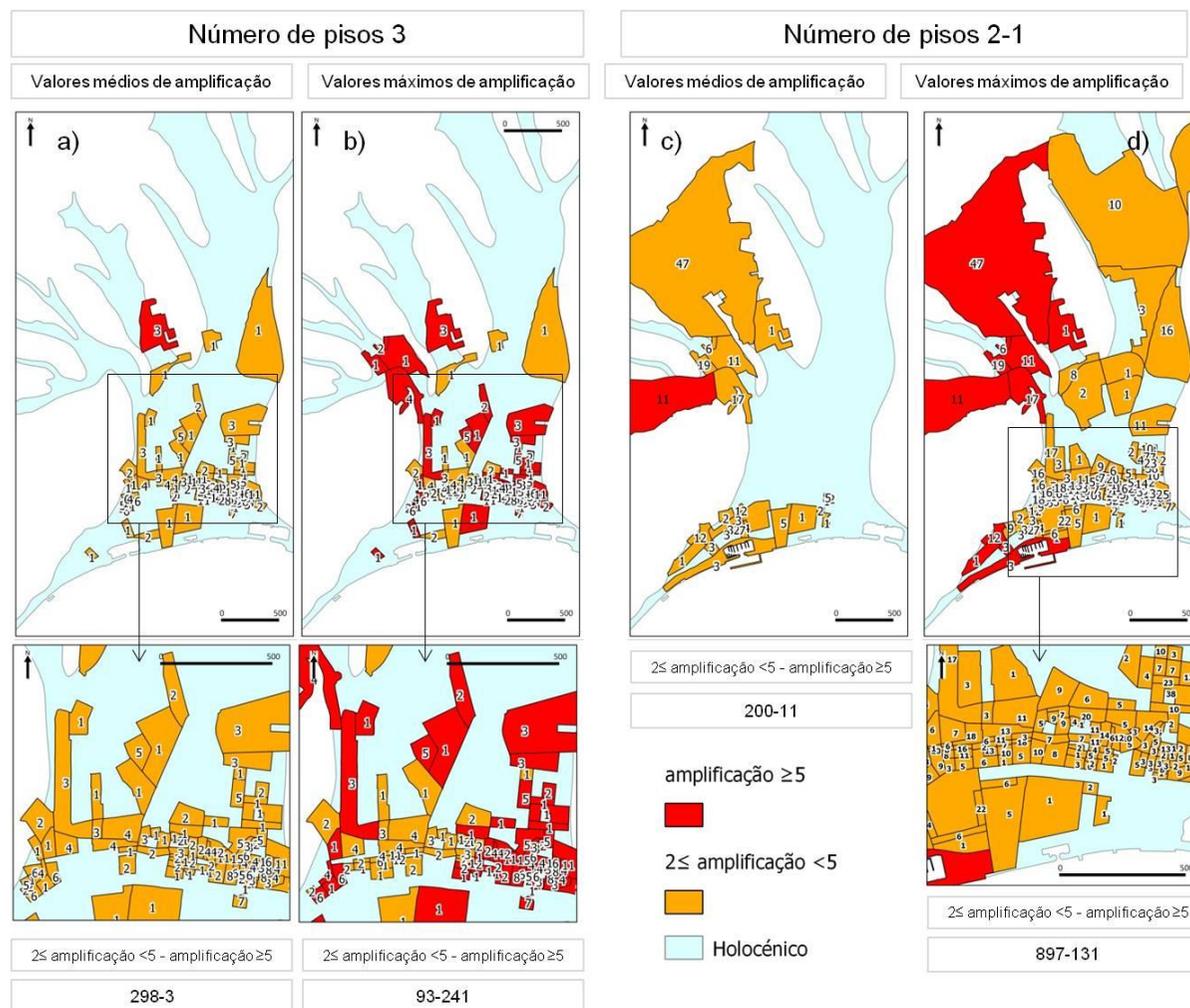


Figura 6.25 – Distribuição geográfica na cidade de Setúbal ao nível das subseções estatísticas do número de edifícios, com 3 a 1 pisos, suscetíveis a efeitos de ressonância.

Na Tabela 6.7 apresenta-se o número total de edifícios suscetíveis a fenómenos de ressonância em função do número de pisos, considerando os valores médios e os valores máximos das amplificações.

Tabela 6.7 – Número total de edifícios suscetíveis de sofrerem ressonância.

Número de pisos	Valores médios das amplificações		Valores máximos das amplificações	
	$2 \leq$ Amplificação $< 5$	Amplificação $\geq 5$	$2 \leq$ Amplificação $< 5$	Amplificação $\geq 5$
10-16	62	8	50	24
9-7	103	48	40	111
5- 6	106	42	12	148
4	156	1	145	55
3	298	3	93	241
1-2	200	11	897	131
Total de edifícios	925	113	1237	710

O número de edifícios que podem sofrer efeitos de ressonância, para valores de amplificação entre 2 e 5, situa-se entre os 925 e os 1237 edifícios; de igual modo, o número de edifícios que podem sofrer fenómenos de ressonância para amplificações superiores ou igual a 5 situa-se entre os 113 e os 710 edifícios. O centro urbano antigo da cidade de Setúbal possui um número elevado de edifícios suscetíveis de sofrerem ressonância (Figura 6.25). Estes edifícios têm entre 1 e 3 pisos e, na sua maioria, deverão ser de construção anterior ao Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA 1983).

### 6.3.2 Análise dos edifícios selecionados

Como já foi referido, no Anexo XIII apresenta-se a caracterização dos edifícios ensaiados assim como as respetivas frequências naturais obtidas experimentalmente. No Anexo XIV apresentam-se os resultados obtidos para cada um dos índices de perigo e a classificação da suscetibilidade de cada um dos edifícios analisados. Seguidamente apresenta-se a classificação de suscetibilidade à ressonância dos edifícios selecionados (com ensaios ReMi a menos de 150 m).

O edifício 1 (Edifício das Águas do Sado; Figura 6.26), de construção em betão com sete pisos, localiza-se na Av. Luísa Todi no centro de Setúbal, em terrenos do Holocénico (Figura 6.18) e a distância ao ensaio ReMi mais próximo é de 70 m.

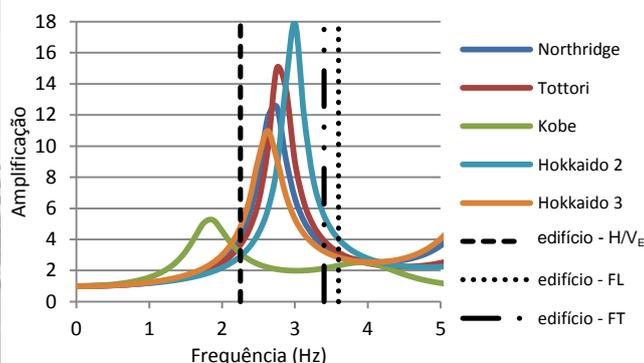


Figura 6.26 - Edifício 1 (Águas do Sado); Funções de transferência calculadas com os cinco sismos; frequências naturais do edifício: edifício - H/V<sub>E</sub>: frequência natural do edifício determinada pela curva média H/V; edifício - F<sub>L</sub>: frequência natural do edifício na direção longitudinal; edifício F<sub>T</sub> - frequência natural do edifício na direção transversal.

As interseções dos valores das frequências naturais do edifício com as funções de transferência mostram que o edifício poderá sofrer ampliações entre 2 e 4. O cruzamento entre a função de transferência obtida com o sismo de Hokkaido2 e o valor da frequência natural do edifício na direção transversal indica uma amplificação igual a 5,5. Tendo em conta os valores dos índices de perigo e a matriz de suscetibilidade (Tabela 6.4), considera-se que este edifício apresenta uma suscetibilidade Baixa-Média.

O edifício 3 (pertencente à Cáritas Diocesana de Setúbal; Figura 6.27) tem uma altura entre três e quatro pisos, é de construção em alvenaria, localiza-se na Praça Teófilo Braga, em terrenos do Holocénico (Figura 6.18), e dista cerca de 100 m de um ensaio ReMi.

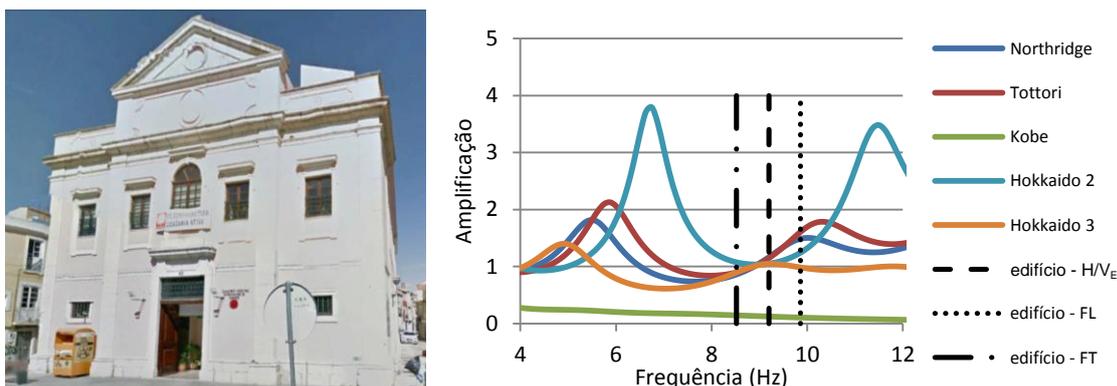


Figura 6.27 - Edifício 3 (Cáritas Diocesana de Setúbal); Funções de transferência calculadas com os cinco sismos; frequências naturais do edifício: edifício -  $H/V_E$ : frequência natural do edifício determinada pela curva média  $H/V$ ; edifício -  $F_L$ : frequência natural do edifício na direção longitudinal; edifício -  $F_T$  - frequência natural do edifício na direção transversal.

As interseções das frequências naturais do edifício com as funções de transferência apresentam ampliações abaixo de 2, mas o primeiro índice de perigo apresenta valores altos (Anexo XIV). Tendo em conta os valores do índice 2 de perigo e a matriz de suscetibilidade (Tabela 6.4), considera-se que este edifício apresenta uma suscetibilidade Média.

O edifício 5 (condomínio residencial, Figura 6.28) é de betão, com 12 pisos, localiza-se na Av. Luísa Todi, em terrenos do Holocénico (Figura 6.18) e dista de um ensaio ReMi cerca de 140 m.

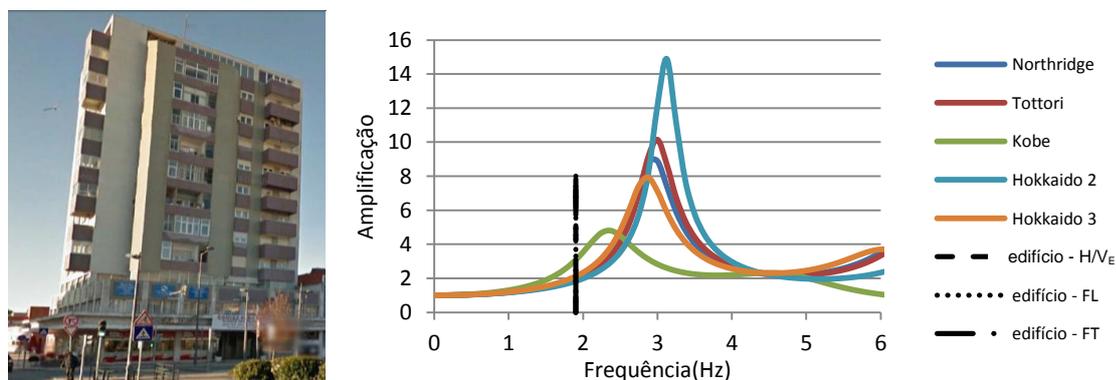


Figura 6.28 - Edifício 5; Funções de transferência calculadas com os cinco sismos; frequências naturais do edifício: edifício -  $H/V_E$ : frequência natural do edifício determinada pela curva média  $H/V$ ; edifício -  $F_L$ : frequência natural do edifício na direção longitudinal; edifício  $F_T$  - frequência natural do edifício na direção transversal.

As interseções das frequências naturais do edifício com as funções de transferência apresentam valores de amplificação inferiores a 2, com exceção da função de transferência calculada com o sismo de Kobe (em que se atinge o valor de 3). Tendo em conta os valores dos índices de perigo e a matriz de suscetibilidade (Tabela 6.4), considera-se que este edifício apresenta uma suscetibilidade Baixa.

O edifício 7 (Torre de São João, condomínio residencial; Figura 6.29), com 16 pisos e de betão, é um dos edifícios mais altos da cidade de Setúbal. Localiza-se na Av. Luísa Todi, em terrenos do Holocénico (Figura 6.18) e dista de um ensaio ReMi 76 m.

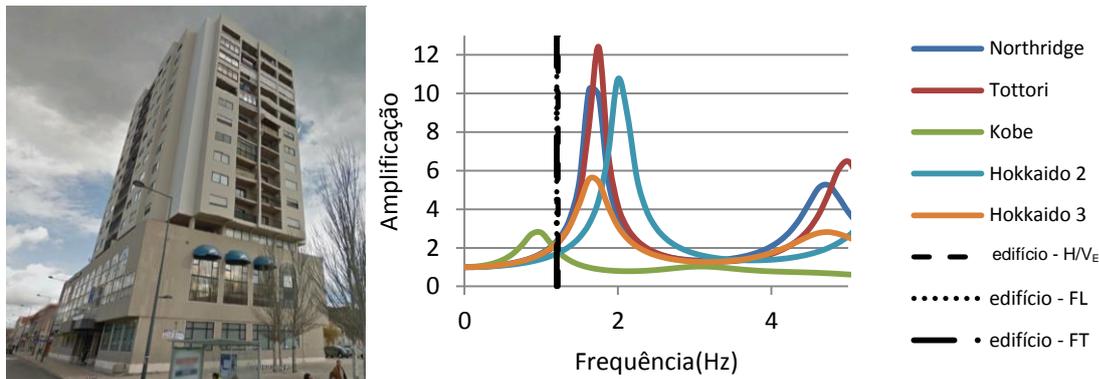


Figura 6.29 - Edifício 7; Funções de transferência calculadas com os cinco sismos; frequências naturais do edifício: edifício -  $H/V_E$ : frequência natural do edifício determinada pela curva média H/V; edifício -  $F_L$ : frequência natural do edifício na direção longitudinal; edifício  $F_T$  - frequência natural do edifício na direção transversal.

Todos os pontos de interseção das frequências do edifício com as funções de transferência apresentam valores de amplificação perto de 2. Tendo em conta os valores dos índices de perigo e a matriz de suscetibilidade (Tabela 6.4), considera-se que este edifício apresenta uma suscetibilidade Baixa-Média.

O edifício 10 (Biblioteca Municipal; Figura 6.30), localiza-se na Av. Luísa Todi, em terrenos holocénicos (Figura 6.18), é de alvenaria, apresenta três pisos e o ensaio ReMi mais próximo localiza-se a cerca de 130 m. Para este edifício só foi possível identificar a sua frequência com base na curva média  $H/V_E$ .

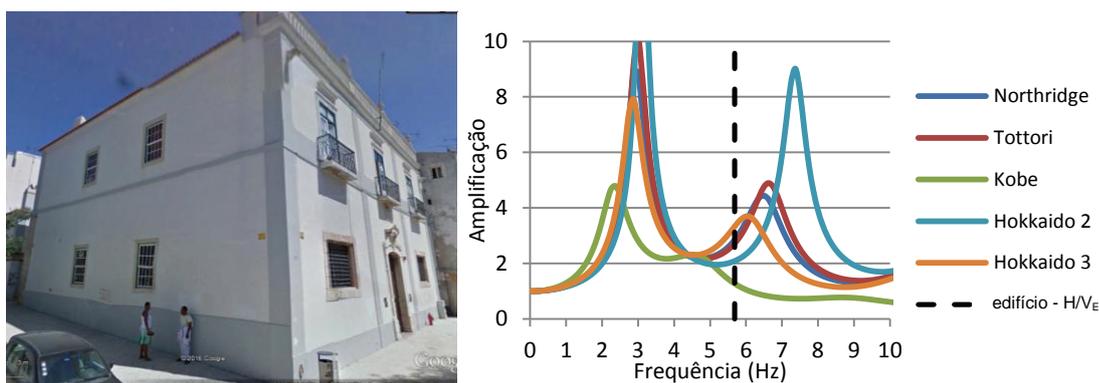


Figura 6.30 – Edifício 10 (Biblioteca Municipal); Funções de transferência calculadas com os cinco sismos; frequências naturais do edifício: edifício -  $H/V_E$ .

Com exceção da função de transferência calculada com o sismo de Kobe, que apresenta uma interseção com a frequência natural do edifício inferior a uma amplificação de 2, todos os outros apresentam valores superiores. O primeiro índice apresenta valores com perigo alto para todos os sismos com exceção dos sismos de Kobe e Hokkaido2 (Anexo XIV). Tendo em

conta os valores dos índices de perigo e a matriz de suscetibilidade (Tabela 6.4), considera-se que este edifício apresenta uma suscetibilidade Alta.

O edifício 11 (Hotel Esperança; Figura 6.31) localiza-se na Av. Luísa Todi, em terrenos do Holocénico (Figura 6.18), apresenta seis pisos, é de construção em betão e tem um ensaio ReMi a 40 m de distância. Para este edifício só foi possível determinar a sua frequência natural com base na curva média  $H/V_E$ .

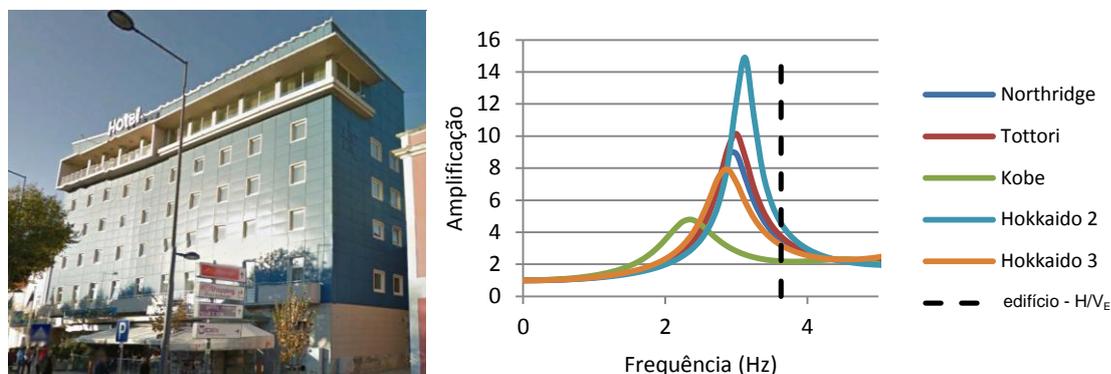


Figura 6.31 - Edifício 11 (Hotel Esperança); Funções de transferência calculadas com os cinco sismos; frequências naturais do edifício: edifício -  $H/V_E$ .

As interseções da frequência do edifício com as funções de transferência apresentam valores de amplificação entre 2 e 5. Os valores obtidos para os dois índices são médios para as funções de transferência calculadas com os sismos de Northridge e Tottori e baixos para as restantes. Tendo em conta os valores dos índices de perigo (Anexo XIV) e a matriz de suscetibilidade (Tabela 6.4), considera-se que este edifício apresenta uma suscetibilidade Baixa.

O edifício 13 (Sociedade Musical Capricho de Setúbal; Figura 6.32) localiza-se no Largo da Misericórdia, em terrenos do Holocénico (Figura 6.18), apresenta uma altura que se situa entre três e quatro pisos, é de alvenaria e dista 130 m de um ensaio ReMi.

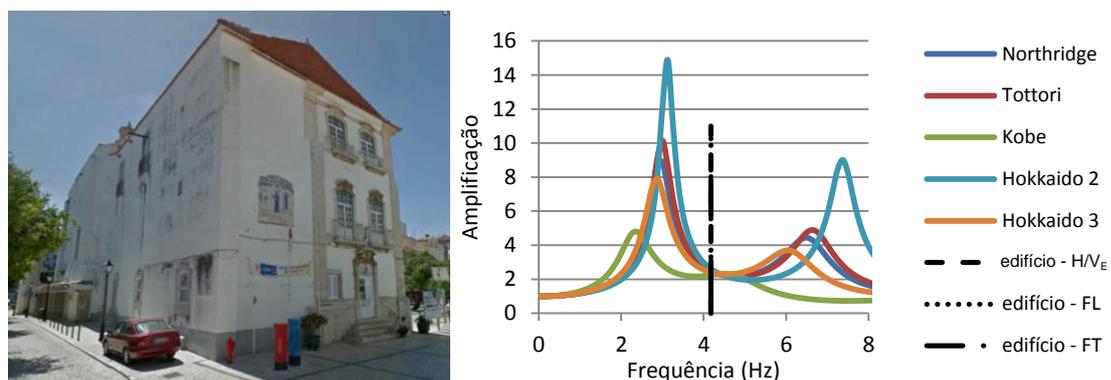


Figura 6.32 – Edifício 13 (Sociedade Musical Capricho de Setúbal); Funções de transferência calculadas com os cinco sismos; frequências naturais do edifício: edifício -  $H/V_E$ : frequência natural do edifício determinada pela curva média  $H/V$ ; edifício - FL: frequência natural do edifício na direção longitudinal; edifício  $F_T$  - frequência natural do edifício na direção transversal.

A frequência natural do edifício obtida através da curva média  $H/V_E$  e dos espectros das componentes longitudinal e transversal foi de 4,18 Hz. O primeiro índice de perigo apresenta valores baixos para todas as funções de transferência e o segundo valores médios (Anexo XIV). Tendo em conta os valores dos índices de perigo (Anexo XIV) e a matriz de suscetibilidade (Tabela 6.4), considera-se que este edifício apresenta uma suscetibilidade Baixa-Média.

O edifício 14 (utilização mista; Figura 6.33) localiza-se no Largo da Misericórdia, também em terrenos holocénicos (Figura 6.18), é de alvenaria, com três pisos e tem um ensaio ReMi localizado a cerca de 120 m.

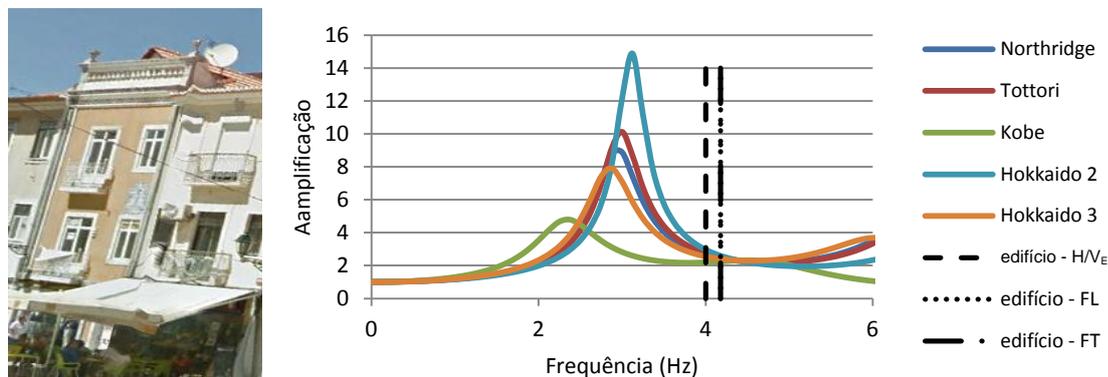


Figura 6.33 - Edifício 14; Funções de transferência calculadas com os cinco sismos; frequências naturais do edifício: edifício -  $H/V_E$ : frequência natural do edifício determinada pela curva média H/V; edifício -  $F_L$ : frequência natural do edifício na direção longitudinal; edifício  $F_T$  - frequência natural do edifício na direção transversal.

Este edifício apresenta valores de  $H/V_E$ ,  $F_T$  e  $F_L$  análogos (4 Hz, 4,18 Hz e 4,18 Hz) e os valores obtidos para os dois índices são semelhantes ao edifício 13 (Anexo XIV). Tendo em conta os valores dos índices de perigo (Anexo XIV) e a matriz de suscetibilidade (Tabela 6.4), considera-se que este edifício apresenta uma suscetibilidade Baixa-Média.

O edifício 19 (condomínio residencial; Figura 6.34) localiza-se na Av. 22 de dezembro, em terrenos do Holocénico (Figura 6.18), é de betão, possui oito pisos e apresenta um ensaio ReMi localizado a 37 m.

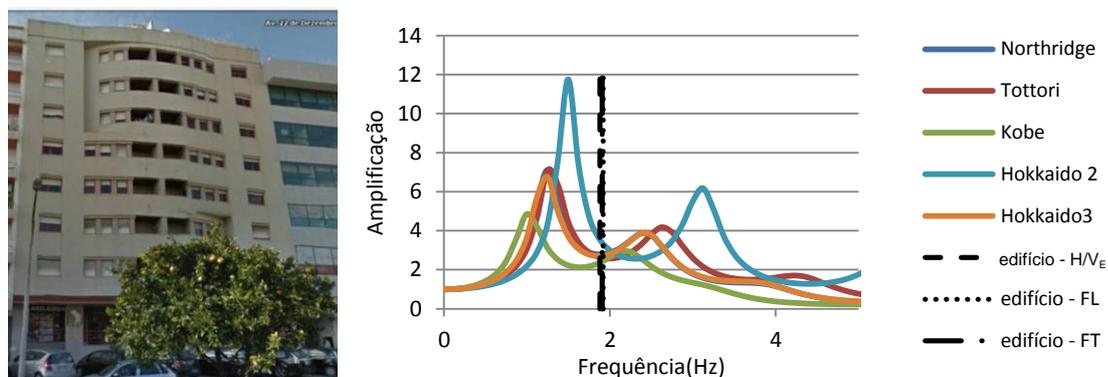


Figura 6.34 - Edifício 19; Funções de transferência calculadas com os cinco sismos; frequências naturais do edifício: edifício -  $H/V_E$ : frequência natural do edifício determinada pela curva média H/V; edifício -  $F_L$ : frequência natural do edifício na direção longitudinal; edifício  $F_T$  - frequência natural do edifício na direção transversal.

As frequências naturais obtidas são semelhantes  $H/V_E$  (1,88 Hz),  $F_L$  (1,92 Hz),  $F_T$  (1,91 Hz), mas o primeiro índice apresenta alguma variabilidade para as funções de transferência efetuadas com os diferentes sismos: com o sismo de Kobe apresenta perigo alto e, com os restantes, médio-baixo. O segundo índice apresenta valores médios para todas as funções de transferência. Tendo em conta os valores dos índices de perigo (Anexo XIV) e a matriz de suscetibilidade (Tabela 6.4), considera-se que este edifício apresenta uma suscetibilidade Média.

O edifício 20 (condomínio residencial; Figura 6.35) localiza-se igualmente na Av. 22 de dezembro, em terrenos holocénicos (Figura 6.18), possui 11 pisos, é de betão e tem um ensaio ReMi a cerca de 130 m.

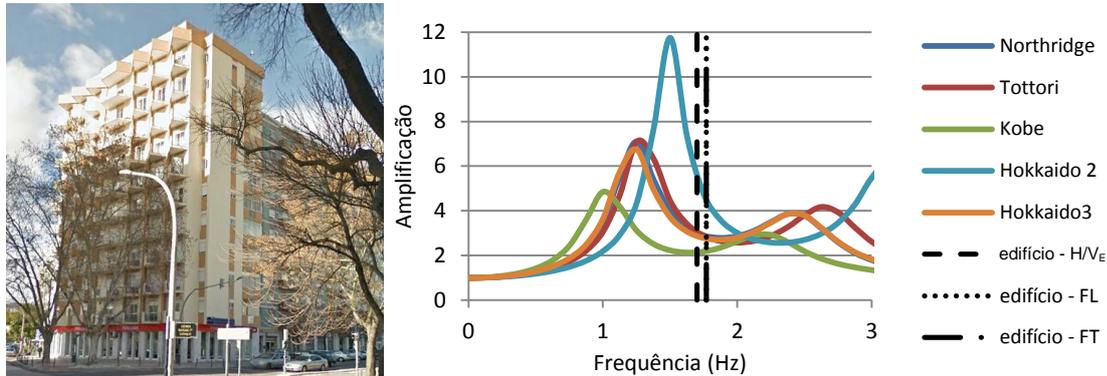


Figura 6.35 – Edifício 20; Funções de transferência calculadas com os cinco sismos; frequências naturais do edifício: edifício -  $H/V_E$ : frequência natural do edifício determinada pela curva média H/V; edifício -  $F_L$ : frequência natural do edifício na direção longitudinal; edifício  $F_T$  - frequência natural do edifício na direção transversal.

As frequências naturais obtidas são semelhantes,  $H/V_E$  (1,70 Hz),  $F_L$  (1,77 Hz),  $F_T$  (1,77 Hz) e interseitam as funções de transferência segundo valores de amplificação entre 2 e 4. É exceção a função de transferência obtida com o sismo de Hokkaido2 onde se alcançam valores de amplificação superiores. Tendo em conta os valores dos índices de perigo (Anexo XIV) e a matriz de suscetibilidade (Tabela 6.4), considera-se que este edifício apresenta uma suscetibilidade Média.

O edifício 24 (Escola Básica dos Pinheirinhos; Figura 6.36) localiza-se na Praceta Francisco Gentil, em terrenos do Pliocénico (Figura 6.18), é de construção em betão, com dois pisos e tem um ensaio ReMi localizado a 120 m.

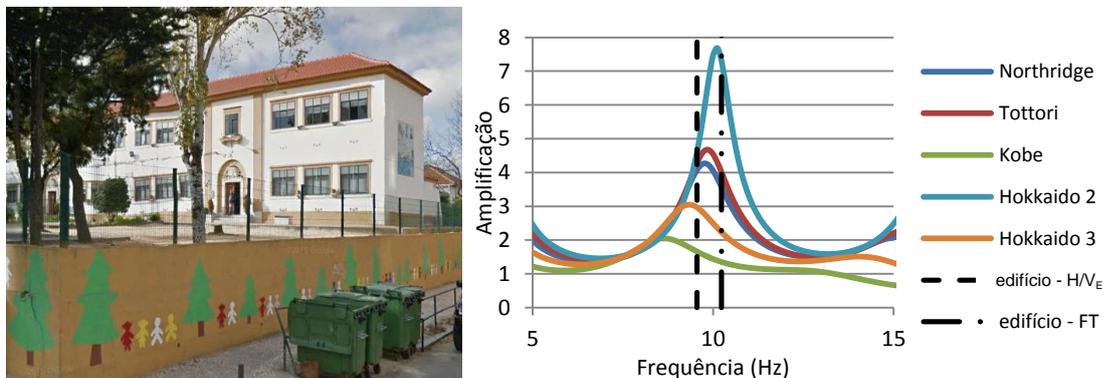


Figura 6.36 - Edifício 24 (Escola Básica dos Pinheirinhos); Funções de transferência calculadas com os cinco sismos; frequências naturais do edifício: edifício -  $H/V_E$ : frequência natural do edifício determinada pela curva média H/V; edifício  $F_T$  - frequência natural do edifício na direção transversal.

As frequências naturais deste edifício são de 9,56 Hz ( $H/V_E$ ) e de 10,23 Hz ( $F_T$ ). A interseção das frequências naturais com a função de transferência obtida com o sismo de Hokkaido2 alcança valores superiores a 7. Tendo em conta os valores dos índices de perigo (Anexo XIV) e a matriz de suscetibilidade (Tabela 6.4), considera-se que este edifício apresenta uma suscetibilidade Alta.

O Hospital de São Bernardo (HSB) localiza-se na Av. Dom João II, é constituído por vários edifícios e possui um ensaio ReMi a cerca de 130 m. Foram ensaiados dois edifícios, um correspondente ao hospital mais recente e o outro ao mais antigo.

O edifício 32 (HSB, edifício recente; Figura 6.37) apresenta sete pisos, é de betão, localiza-se em terrenos do Pliocénico (Figura 6.18) e apresenta frequências naturais de 3,3 Hz ( $H/V_E$ ), 3,3 Hz ( $F_L$ ) e 3,6 Hz ( $F_T$ ).

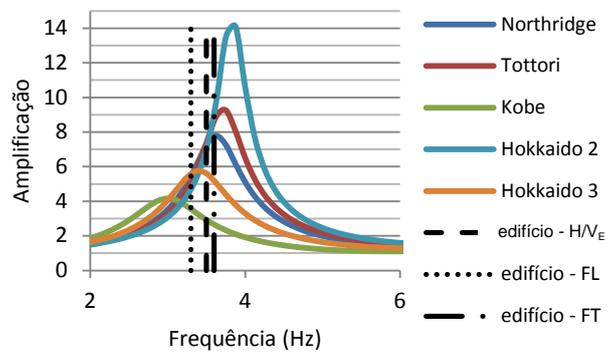


Figura 6.37 – Edifício 32 (HSB edifício recente); Funções de transferência calculadas com os cinco sismos; frequências naturais do edifício: edifício -  $H/V_E$ : frequência natural do edifício determinada pela curva média  $H/V$ ; edifício -  $F_L$ : frequência natural do edifício na direção longitudinal; edifício  $F_T$  - frequência natural do edifício na direção transversal.

A interseção das frequências naturais do edifício com as funções de transferência faz-se sempre para valores de amplificação superiores a 2 e alcança valores máximos de 9. Tendo em conta os valores dos índices de perigo (Anexo XIV) e a matriz de suscetibilidade (Tabela 6.4), considera-se que este edifício apresenta uma suscetibilidade Muito Alta.

O edifício 33 (HSB, edifício mais antigo; Figura 6.38) é de betão, localiza-se também em terrenos pliocénicos (Figura 6.18), tem sete pisos e apresenta frequências naturais de 3,7 Hz ( $H/V_E$ ), 3,6 Hz ( $F_L$ ) e 4 Hz ( $F_T$ ).

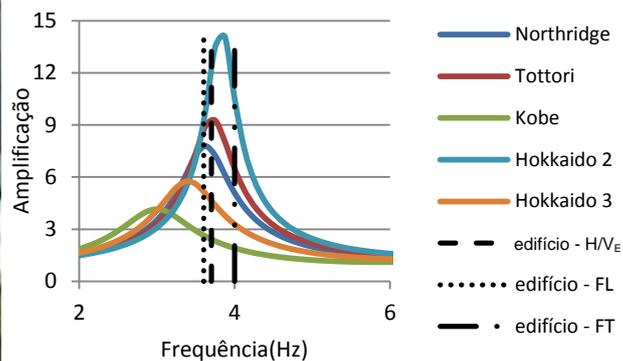


Figura 6.38 - Edifício 33 (HSB edifício antigo); Funções de transferência calculadas com os cinco sismos; frequências naturais do edifício: edifício -  $H/V_E$ : frequência natural do edifício determinada pela curva média  $H/V$ ; edifício -  $F_L$ : frequência natural do edifício na direção longitudinal; edifício  $F_T$  - frequência natural do edifício na direção transversal.

A interseção das frequências naturais do edifício com as funções de transferência apresenta valores de amplificação superiores a 2 e alcança valores máximos de 12. Tendo em conta os valores dos índices de perigo (Anexo XIV) e a matriz de suscetibilidade (Tabela 6.4), considera-se que este edifício apresenta uma suscetibilidade Muito Alta.

O edifício 34 (Divisão Policial da Polícia de Segurança Pública de Setúbal; Figura 6.39) localiza-se na Av. Luísa Todi, em terrenos do Holocénico (Figura 6.18), tem dois pisos e é em alvenaria. As frequências naturais obtidas são semelhantes,  $H/V_E$  igual a 6,54 Hz e  $F_T$  igual a 6,54 Hz.

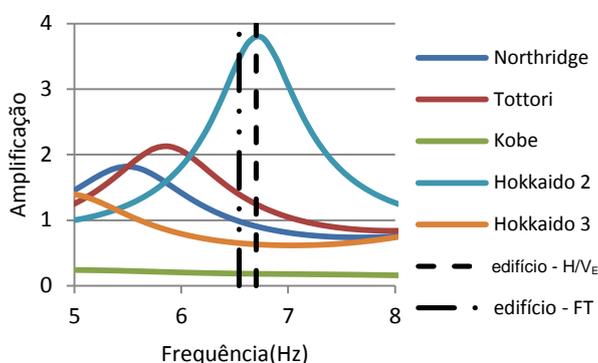


Figura 6.39 - Edifício 34 (PSP de Setúbal); Funções de transferência calculadas com os cinco sismos; frequências naturais do edifício: edifício -  $H/V_E$ : frequência natural do edifício determinada pela curva média  $H/V$ ; edifício  $F_T$  - frequência natural do edifício na direção transversal.

As interseções das frequências naturais do edifício com as funções de transferência são inferiores a valores de amplificação de 2 com exceção da função de transferência obtida com o sismo de Hokkaido2. O primeiro índice apresenta valores com alguma variabilidade, alto para os sismos de Tottori e Hokkaido2 e baixo para os restantes. Tendo em conta os valores dos índices de perigo (Anexo XIV) e a matriz de suscetibilidade (Tabela 6.4), considera-se que este edifício apresenta uma suscetibilidade Baixa-Média.

Na Tabela 6.8 apresenta-se um resumo da classificação preliminar da suscetibilidade à ressonância atribuída aos edifícios analisados individualmente.

Tabela 6.8 – Suscetibilidade à ressonância dos edifícios analisados individualmente.

Edifícios	Classes de suscetibilidade
1 - Edifício das Águas do Sado	Baixa-Média
3 - Cáritas Diocesana de Setúbal	Média
5 - Condomínio residencial	Baixa
7 - Torre de São João, condomínio residencial	Baixa-Média
10 - Biblioteca Municipal	Alta
11- Hotel Esperança	Baixa
13 - Sociedade Musical Capricho de Setúbal	Baixa-Média
14 - Utilização mista	Baixa-Média
19 - Condomínio residencial	Média
20 - Condomínio residencial	Média
24 - Escola Básica dos Pinheirinhos	Alta
32 – Hospital de São Bernardo (edifício recente)	Muito Alta
33 - Hospital de São Bernardo (edifício mais antigo)	Muito Alta
34 - Divisão Policial da P.S.P. de Setúbal	Baixa-Média

Verifica-se que cerca de 72% dos edifícios analisados apresentam uma suscetibilidade Baixa a Média e 28% apresentam suscetibilidades Alta e Muito Alta (Tabela 6.9).

Tabela 6.9 – Distribuição dos edifícios por classes de suscetibilidade.

Suscetibilidade	% de edifícios
Baixa	14,3
Baixa-Média	35,7
Média	21,4
Média-Alta	0
Alta	14,3
Muito Alta	14,3

A percentagem dos edifícios analisados individualmente em Setúbal com suscetibilidade alta e muito alta foi de 28,6 %, valor superior aos obtidos por Gosar (2010) para 14 edifícios localizados no Noroeste da Eslovénia (14%). O valor referente à susceptibilidade média obtida em Setúbal (21,4%) foi igual ao valor obtido por Gosar (2010) (21%).

Do conjunto de edifícios analisados no presente estudo, os mais suscetíveis à ocorrência de fenómenos de ressonância são a Biblioteca Municipal de Setúbal, a Escola Básica dos Pinheirinhos, e os dois edifícios do Hospital São Bernardo (Hospital antigo e o Hospital recente). Estes edifícios, com exceção do Hospital recente, são estruturas construídas antes da publicação do Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA 1983), pelo que poderão não estar preparados para resistir a um evento sísmico forte, podendo sofrer danos significativos durante a ocorrência de um sismo.

O facto da susceptibilidade à ressonância de um edifício ser alta ou muito alta, não implica que essa estrutura venha a sofrer danos estruturais (por exemplo colapso). Os resultados obtidos no presente capítulo devem ser complementados com estudos de resistência estrutural dos edifícios analisados.

No entanto, a susceptibilidade à ressonância poderá potenciar o aparecimento de danos durante a acção sísmica. Os resultados obtidos neste capítulo podem ser utilizados no planeamento urbano, de modo a acautelar sobreposições das frequências naturais de novos edifícios com as frequências dos solos de forma a mitigar fenómenos de ressonância.

## **CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS**

## 7.1. Conclusões

A investigação desenvolvida e apresentada nesta dissertação consistiu na avaliação da possibilidade de se verificarem efeitos de sítio em duas áreas localizadas nos concelhos do Barreiro e Setúbal face à ocorrência de sismos fortes. Estas duas zonas localizam-se na Península de Setúbal que já sofreu intensidades máximas MM de X-IX (sismos de 1755 e de 1858) pelo que se justifica a realização deste estudo. No trabalho realizado analisaram-se relações espaciais e numéricas entre propriedades geotécnicas e outras, calculadas com o recurso ao registo de vibrações ambientais. Na cidade de Setúbal identificou-se, ao nível das subseções estatísticas, o número de edifícios que podem sofrer efeitos de ressonância devido à resposta sísmica dos solos. Procedeu-se também a uma análise individual dessa suscetibilidade à ressonância para alguns edifícios notáveis, sejam de habitação, de serviços, de ensino ou de cuidados de saúde.

A utilização dos ensaios ReMi nas áreas urbanas do Barreiro e Setúbal revelou-se positiva, permitindo obter um vasto conjunto de perfis de  $V_s$  e valores de  $V_{s30}$ , parâmetros importantes para a classificação dos terrenos de acordo com o Eurocódigo 8 e para se avaliar a potencial ocorrência de efeitos de sítio. Estes ensaios podem ser utilizados com diferentes objetivos: identificação de aterros ou de outras estruturas de maior rigidez, identificação das espessuras das formações superficiais, obtenção de estimativas de  $V_{s30}$ , etc. As velocidades das ondas S obtidas com os ensaios ReMi, para as várias unidades litoestratigráficas do Barreiro e Setúbal, foram semelhantes aos resultados obtidos por outros investigadores. Esta comparação permite concluir que os ensaios ReMi se revelaram fiáveis na determinação da velocidade das ondas S nas áreas estudadas.

Obteve-se, na maior parte dos casos, uma boa correlação entre as distribuições espaciais das propriedades geotécnicas estudadas (espessura das FS e  $N_{SPT}$ ) e os resultados provenientes dos ensaios H/V e ReMi e também com os resultados obtidos com as análises 1D efetuadas.

O conhecimento da geologia e das propriedades geotécnicas dos locais estudados permitiu relacionar os picos das curvas H/V com os limites entre diferentes unidades (FS-Pliocénico, Pliocénico-Miocénico). A distribuição da espessura da cobertura sedimentar obtida para Setúbal e Mitrena, calculada com base nos picos de frequência das curvas H/V ( $F_0$ ), sugere a existência de uma estrutura, que poderá corresponder à Falha de Pinhal Novo-Alcochete, que terá afetado pelo menos o topo do Miocénico e que separou dois blocos, com descida relativa do bloco oriental.

As duas técnicas empregues na estimativa das frequências naturais dos solos (Nakamura e ReMi-SHAKE2000) apresentaram, em termos gerais, uma coerência na distribuição espacial dos resultados obtidos. Foi nas unidades do Holocénico que esses resultados mais se aproximaram, mas a técnica conjunta ReMi-SHAKE2000 apresentou, na maior parte dos casos, frequências superiores às obtidas com a técnica de Nakamura.

A partir dos resultados obtidos, foi possível identificar diversas áreas do Barreiro e de Setúbal que podem sofrer efeitos de sítio. Estas áreas apresentam características distintas:

1. Terrenos com frequências entre 1-4 Hz. Correspondem a locais em que a espessura de FS e a profundidade de  $N_{SPT60}$  são mais elevadas e em que os terrenos apresentam valores de  $V_{s30}$  inferiores a 340 m/s para o Barreiro e 300 m/s para Setúbal. Localizam-se essencialmente no Holocénico e em áreas restritas do Plio-Plistocénico nas quais as profundidades de  $N_{SPT60}$  são mais elevadas. Os picos de frequência ( $F_0$  ou  $F_1$ ) das curvas H/V associados ao limite entre o Holocénico e o Pliocénico do Barreiro apresentam valores entre 1 e 4 Hz. Ao

contrário do Barreiro, em Setúbal não foi possível estabelecer uma relação entre esses picos de frequência e a espessuras das FS e  $N_{SPT60}$ ;

2. Terrenos com frequências superiores a 5 Hz. Nestes locais as espessuras das FS e as profundidades de  $N_{SPT60}$  são inferiores, os valores de  $V_{s30}$  são superiores a 340 m/s no Barreiro e 350 m/s em Setúbal. Os picos de frequência associados ao limite entre o Holocénico e o Pliocénico no Barreiro apresentam frequências superiores a 5 Hz. Localizam-se nas áreas do Holocénico com espessuras das FS muito reduzidas e no Plio-Plistocénico.

Para se identificarem os edifícios que podem sofrer efeitos de ressonância recorreu-se a três metodologias: (i) na primeira, utilizaram-se as frequências naturais dos solos obtidas nas curvas H/V; (ii) na segunda, utilizaram-se as frequências naturais dos solos calculadas com as análises 1D; (iii) na terceira, analisaram-se as frequências naturais dos solos, calculadas com as análises 1D, em conjunto com as frequências naturais dos edifícios. As duas primeiras metodologias apresentam, na generalidade, resultados semelhantes quer para o Barreiro quer para Setúbal. A terceira metodologia foi aplicada exclusivamente à cidade de Setúbal e permitiu estimar o número de edifícios que podem sofrer fenómenos de ressonância: entre 925 e 1237 edifícios para amplificações até cinco e entre 113 e 710 edifícios para amplificações superiores a cinco. No centro urbano identificou-se um número elevado de edifícios com um, dois e três pisos que são suscetíveis a este tipo de fenómeno: entre 498 e 990 edifícios para amplificações até cinco e entre 14 e 372 edifícios para amplificações superiores a cinco. Estes edifícios são, na sua maioria, de construção anterior ao Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (1983). Tratam-se de estruturas vulneráveis à ocorrência de sismos fortes, próximos ou afastados dos dois concelhos.

Do conjunto de edifícios que foram analisados individualmente, os mais suscetíveis à ocorrência de fenómenos de ressonância serão a Biblioteca Municipal de Setúbal, a Escola Básica dos Pinheirinhos, e os dois edifícios do Hospital São Bernardo (Hospital antigo e o Hospital recente). Estes edifícios, com exceção do Hospital recente, são estruturas construídas antes da publicação do Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes, pelo que poderão não estar preparados para resistir a um evento sísmico forte. Devido à elevada concentração de população jovem, a Escola Básica dos Pinheirinhos merece atenção prioritária, deverá ser alvo de estudos de resistência estrutural e se necessário intervencionada de modo a evitar-se o seu colapso durante a ocorrência de um sismo. O edifício antigo do Hospital de São Bernardo, pela importância que terá na fase de resposta, deverá ser igualmente sujeito a estudos de resistência estrutural e alvo de intervenções caso se revele necessário.

Os resultados obtidos nesta investigação têm aplicação e devem ser incorporados no planeamento urbano, de modo a acautelar sobreposições das frequências naturais de novos edifícios com as frequências dos solos. É também no planeamento urbano que se podem implementar regulamentos e normas de construção de forma a evitar fenómenos de ressonância.

Grande parte da cidade de Setúbal encontra-se ocupada por edifícios suscetíveis de sofrer o fenómeno de ressonância. A preparação para a resposta e a informação pública serão as medidas que poderão ser utilizadas para mitigar os efeitos de um sismo.

Os resultados obtidos para a área do Barreiro, embora calculados com base nas duas primeiras metodologias, podem ser igualmente empregues no planeamento urbano de modo a contribuir para a segurança das pessoas e bens.

## **7.2. Considerações finais e trabalhos futuros**

A metodologia empregue na presente investigação poderá ser aplicada no estudo de efeitos de sítio noutras áreas da Península de Setúbal, no estudo da bacia Meso-Cenozoica e na identificação de acidentes tectónicos.

Por outro lado, a sua aplicação a locais onde se registaram efeitos de sítio decorrentes de sismos fortes poderá confirmar a sua aplicabilidade a situações reais.

Será importante também obter-se um maior número de correlações entre o número de pisos e as frequências naturais dos edifícios na Península de Setúbal. Os estabelecimentos de ensino, as unidades de saúde e os edifícios com importância na gestão de catástrofes deverão ser alvo de análises individualizadas relativamente à suscetibilidade de sofrerem fenómenos de ressonância. Os resultados das análises individualizadas de alguns dos edifícios da cidade de Setúbal resultaram da aplicação de uma metodologia desenvolvida na presente tese. Estes resultados deverão ser complementados com estudos da resistência estrutural destes edifícios, tomando em consideração as características geotécnicas dos solos das suas fundações.

Deverão ser elaborados planos de emergência específicos para os locais com maior número de edifícios suscetíveis de sofrerem fenómenos de ressonância, em que o parque urbano seja anterior a 1983 e se apresente mais degradado. Na elaboração destes planos deverá ser contemplada a informação pública bem como a sua participação antes, durante e depois da ocorrência de um sismo destruidor.

# BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

## A) Autores

ACE Golder Associates Portugal (2011) *Estudo Final de Caracterização do Estado de Contaminação dos Solos e das Águas Subterrâneas e Avaliação do Risco para os Territórios da Quimiparque EGF.*

AHEAD – Archive of Historical Earthquake Data, <http://www.emidius.eu/AHEAD/>, último acesso em Maio 2016.

Alexander D. (2002) *Principles of emergency planning and management.* Dunedin Academic Press Ltd., 319 pp.

Alves T., Moita C., Cunha T., Ullnaess M., Myklebust R., Monteiro J. & Manuppella G. (2009) Diachronous evolution of Late Jurassic–Cretaceous continental rifting in the northeast Atlantic (west Iberian margin). *Tectonics*, 28: TC 4003, 32 pp.

Anbazhagan P., Sheikh M. & Parihar A. (2013) Influence of Rock Depth on Seismic Site Classification for Shallow Bedrock Regions. *Natural Hazards Review*, 14(2): 108-121.

Anbazhagan P., Sitharam T. & Divya C. (2006) Site Amplification and Liquefaction studies for Bangalore City. *Indian Geotechnical Conference*: 823-826.

Ansary, M. & Rahman Md. (2013) Site amplification investigation in Dhaka, Bangladesh, using H/V ratio of microtremor. *Environ Earth Sci*, 70: 559-574.

Appleton J., Costa A., Travassos N. & Coutinho A. (2006) Viadutos sobre os rios Galvão e Real – I: Superestrutura. 4as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa, Portugal.

Aranda C., Vidal F., Alguacil G., Navarro M. & Palacios V. (2014) Ground Conditions Influence on Earthquake Damage in Viña del Mar City. Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, 3pp.

Asten M.W., Dhu T. & Lam N. (2004) Optimized array design for microtremor array studies applied to site classification; comparison of results with SCPT logs. 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, Canada. Paper No. 2903, 16 pp.

Bakavoli M., Haghshenas E. & Bazzaz J. (2012) Effect of nearby topography on amplification of seismic motion in topographic irregularities: the case of a hilly site in Tehran. 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal, 10 pp.

Barros J., Gandolfo O. & Rocha R. (2012) A Determinação do Módulo de Cisalhamento Máximo pelo Método MASW. XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Porto de Galinhas, 9 pp.

Besana-Ostman G., Nemser E. & Martín R. (2011) Lower Tagus Valley (1/2): Lower Tagus Valley SW segment (PO035). In: *Quaternary Active Faults Database of Iberia v.3.0* - November 2015 (García-Mayordomo *et al.*, eds.), IGME, Madrid.

Bonnefoy-Claudet S., Köhler A., Cornou C., Wathelet M. & Bard P.-Y. (2008) Effects of Love Waves on Microtremor H/V Ratio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98: 288–300.

- Bonnefoy-Claudet S., Baize S., Bonilla L., Berge-Thierry C., Pasten C., Campos J., Volant P. & Verdugo R. (2009) Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements. *Geophys. J. Int.*, 176: 925-937.
- Boon D., Sargeant S., Mike R., Dashwood B., Morgan D. & Gunn D. (2015) Assessing the impact of local geology on ground motion amplification in south east England. SECED2015 conference: Earthquake Risk and Engineering towards a Resilient World, Cambridge UK, 8 pp.
- Boore D. (2004) Can site response be predicted? *J. Earthq. Eng.*, 8: 1–41.
- Boore D., Joyner W. & Fumal T. (1997) Equations for estimating horizontal response spectra acceleration from western North American earthquakes: A summary of recent work. *Seismological Research Letters*, 68: 128-153.
- Borcherdt R. (1970) Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 60: 29–61.
- Cabral J. & Ribeiro A. (1988) Carta Neotectónica de Portugal Continental, Escala 1:1.000.000. Serv. Geol. de Portugal, Lisboa.
- Cabral J., Moniz C., Ribeiro P., Terrinha P. & Matias L. (2003) Analysis of seismic reflection data as a tool for the seismotectonic assessment of a low activity intraplate basin- the Lower Tagus Valley (Portugal). *Journal of Seismology*, 7: 431– 447.
- Cabral J., Ribeiro P., Figueiredo P., Pimentel N. & Martins A. (2004) The Azambuja fault: An active structure located in an intraplate basin with significant seismicity (Lower Tagus Valley, Portugal) *Journal of Seismology*, 8: 347–362.
- Cabral J., Besana-Ostman G., Nemser E. & Banda R. (2011a) Pinhal Novo Fault: (PO019). In: *Quaternary Active Faults Database of Iberia v.3.0 - November 2015* (García-Mayordomo *et al.*, eds.), IGME, Madrid.
- Cabral J., Carvalho J., Nemser E. & Banda, R. (2011b) Vila Franca de Xira (complete) (PO017). In: *Quaternary Active Faults Database of Iberia v.3.0 - November 2015* (García-Mayordomo *et al.*, eds.), IGME, Madrid.
- Cabral J., Moniz C., Batlló J., Figueiredo P., Carvalho J., Matias L., Teves-Costa P., Dias R. & Simão N. (2013) The 1909 Benavente (Portugal) earthquake: search for the source. *Nat Hazards*, 69(2): 1211-1227.
- Cara F., Di Giulio G., Milana G., Bordoni P., Haines J. & Rovelli A. (2010) On the stability and reproducibility of the Horizontal to-Vertical spectral ratios on ambient noise: case study of Cavola, Northern Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100: 1263–1275.
- Carvalho J. (2013) *Perfil de refração sísmica realizado em Setúbal*. Relatório não publicado. Laboratório Nacional de Engenharia e Geologia.
- Carvalho J., Cabral J., Gonçalves R., Torres L. & Mendes-Victor L. (2006) Geophysical methods applied to fault characterization and earthquake potential assessment in the lower Tagus valley, Portugal. *Tectonophysics*, 418: 277–297.
- Carvalho J., Rabeh T., Cabral J., Carrilho F. & Miranda J. (2008) Geophysical characterization of the Ota – Vila Franca de Xira – Lisbon – Sesimbra fault zone, Portugal. *Geophys. J. Int.*, 174: 567–584.

- Carvalho J., Torres L., Castro R., Dias R. & Mendes-Victor L. (2009) Seismic velocities and geotechnical data applied to the soil microzoning of western Algarve, Portugal. *Journal of Applied Geophysics*, 68: 249-258.
- Carvalho J., Teves-Costa P., Almeida L. & Almeida I. (2016) Seismic susceptibility map for Cascais County (Portugal): a simple approach. *Bull Eng Geol Environ*, 23 pp.
- Castellaro S. & Mulargia F. (2009)  $V_{s30}$  Estimates Using Constrained H/V Measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99: 761–773.
- Castellaro S., Mulargia F. & Rossi P. (2008)  $V_{s30}$ : proxy for seismic amplification? *Seismol Res Lett*, 79: 540–543.
- Chandrasekaran S., Bharadwaja G., Bharathi P. & Dutt H. (2012) Seismic Ground Response Analysis for a Site in Coimbatore. Iset Golden Jubilee Symposium, Indian Society of Earthquake Technology, Paper A005, 7pp.
- Chávez-García F.J. & Bard P-Y. (1994) Site effects in Mexico City eight years after the September 1985 Michoacan earthquakes. *Soil Dyn Earthq Eng*, 13: 229– 247.
- Coelho A.G. (1980) A Cartografia Geotécnica no Planeamento Regional e Urbano. Experiência na Região de Setúbal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Costa C., Clavijo E. (coord.); Pais J. (nov. levant.) (2005a) - Carta geológica de Portugal na escala 1:50.000, folha 34-D Lisboa. Protocolo Colab. Desenv. Cart. Geol. Área Metropolitana Lisboa, INETI/IGM.
- Costa C., Dias R. P. & Kullberg J. (coord.); Dias R. P. & Pais J. (coord. carta) (2005b) – Carta geológica de Portugal na escala 1:50.000, folha 35-C Santo Isidro de Pegões. Protocolo Colab. Desenv. Cart. Geol. Área Metropolitana Lisboa, INETI/IGM.
- Costa C., Clavijo E., Dias R. & Kullberg J. (coord.); Pais J. & Kullberg J. C. (coord. carta) (2005c) – Carta geológica de Portugal na escala 1:50.000, folha 38-B Setúbal. Protocolo Colab. Desenv. Cart. Geol. Área Metropolitana Lisboa, INETI/IGM.
- Costa C., Clavijo E., Dias R. & Kullberg J.(coord.); Pais J. (coord. carta) (2005d) – Carta geológica de Portugal na escala 1:50.000, folha 39-A Águas de Moura. Protocolo Colab. Desenv. Cart. Geol. Área Metropolitana Lisboa. Inst. Geol. Mineiro.
- Coutinho A., Appleton J., Costa A., Travassos N., Dias J. & Lopes P. (2006) Viadutos sobre os rios Galvão e Real – II: Fundações. 4as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa, Portugal.
- Custódio S., Dias N., Carrilho F., Góngora E., Rio I., Marreiros C., Morais I., Alves P. & Matias L. (2015) Earthquakes in western Iberia: improving the understanding of lithospheric deformation in a slowly deforming region. *Geophys. J. Int.*, 203: 127– 145.
- Daniell J., Khazai B., Wenzel F. & Vervaeck A. (2011) The CATDAT damaging earthquakes database. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11: 2235– 2251.
- DeMets C., Gordon R. & Argus D. (2010) Geologically current plate motions. *Geophys. J. Int.*, 181: 1-80.
- Dias J., Rodrigues, A. & Magalhães, F. (1997) Evolução da linha de costa, em Portugal, desde o último máximo glaciário: Síntese dos conhecimentos. *Estudos do Quaternário*, 1: 53-66

- Enomoto T., Navarro M., Sánchez F., Vidal F., Seo K., García F., Martín J. & Romacho M. (1999) Evaluación del comportamiento de los edificios en Almería mediante el análisis del ruido ambiental. 1ª Asamblea Hispano-Lusa. Almería, Spain.
- Enomoto T., Schmitz M., Matsuda I., Abeki N., Masaki k., Navarro M., Rocabado V. & Sanchez A. (2000) Seismic risk assessment using soil dynamics in Caracas, Venezuela. 12 WCEE, Auckland, New Zeland.
- Espinoza F. (1999) *Determinación de las características dinámicas de estructuras*. Tesis Doctoral, Universidade Politècnica de Catalunya.
- Fah D., Ruttener E., Noack T. & Kruspan P. (1997) Microzonation of the city of Basel. *Journal of Seismology*, 1: 87–102.
- Farrugia D., Paolucci E., D'Amico S. & Galea P. (2015) Site Characterisation and Response Study in Rabat, Malta. Proceedings of the International Conference: Georisks in the Mediterranean and their Mitigation, 174 -179.
- Field E.H. & Jacob K. (1993) The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise. *Geophysical Research Letters*, 20–24: 2925– 2928.
- Firat S., Isik N., Arman H., Demir M. & Vural I. (2015) Investigation of the soil amplification factor in the Adapazari region. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(1): 141–152.
- Fnais M., Al-Amri A., Abdelrahman K., Al-Yousef K., Loni O. & Moneim E. (2014) Assessment of soil-structure resonance in southern Riyadh City, Saudi Arabia. *Arab J Geosci.*, 8(2): 1017-1027.
- Frankel D., Carver D. & Williams R. (2002) Nonlinear and linear site response and basin effects in Seattle for the M 6.8 Nisqually, Washington, earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 92: 2090–2109.
- Freitas R., Alcântara M., Rodrigues F. & Pedro C. (2014) Caracterização Geológica-Geotécnica na zona da Baixa de Alcântara (Lisboa), para o desnivelamento ferroviário de Alcântara. 14º Congresso Nacional de Geotecnia, Covilhã, Portugal.
- Fujiwara T. (1972) Estimation of ground movements in actual destructive earthquakes. In: Proceedings of the fourth European symposium on earthquake engineering, London, UK, pp 125–132.
- Fumal T. & Tinsley J. (1985) Mapping shear wave velocities of near surface geological materials; predicting areal limits of earthquake induced landsliding. In: Ziony TI (ed) Evaluation of earthquake hazards in the Los Angeles region—an earth science perspective, USGS Paper 1360: 127–150.
- Gallipoli M., Gueguen P., Masi A., Mucciarelli M. & Perrault M. (2014) Ambient Vibration for Updating of Period-Height Relationships. Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, Turkey.
- Gallipoli M., Mucciarelli M. & Vona M. (2008) Empirical estimate of fundamental frequencies and damping for Italian buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38: 973-988.
- Gallipoli M., Mucciarelli M., Šket-Motnikar B., Zupan'čić P., Gosar A., Prevolinik S., Herak M., Stip'cevi'c J., Herak D., Milutinovi'c Z., Olum'ceva T. (2010) Empirical estimates of dynamic parameters on a large set of European buildings, *Bull Earthquake Eng*, 8: 593–607.
- Gamal M. & Pullammanapallil S. (2011) Validity of the refraction microtremors (ReMi) method for determining shear wave velocities for different soil types in Egypt. *Int J Geosci*, 2: 530–540.

Gandolfo O. (2011) Ensaios sísmicos (refração utilizando ondas P e S e ensaio com ondas superficiais) na caracterização geotécnica de um aterro. 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil, 4 pp.

García-Fernández M. & Jiménez M. (2012) Site characterization in the Vega Baja, SE Spain, using ambient-noise H/V analysis. *Bull Earthquake Eng*, 10: 1163–1191.

García-Mayordomo J., Insua-Arévalo J., Martínez-Díaz J., Jiménez-Díaz A., Martín-Banda R., Martín-Alfageme S., Álvarez-Gómez J., Rodríguez-Peces M., Pérez-López R., Rodríguez-Pascua M., Masana E., Perea H., Martín-González F., Giner-Robles J., Nemser E. & Cabral J. (2012) The Quaternary Active Faults Database of Iberia (QAFI v.2.0). *Journal of Iberian Geology*, 38: 285-302.

Geopsy: <http://www.geopsy.org/index.html>

Giulio G., Cara F., Rovelli A., Lombardo G. & Rigano R. (2009) Evidences for strong directional resonances in intensely deformed zones of the Pernicana fault, Mount Etna, Italy. *Journal of Geophysical Research*, 114, 18 pp.

Gosar A. (2009) A microtremor hvsr study of the seismic site effects in the area of the town of Brežice (se Slovenia). *Acta Geotechnica Slovenica*, 2: 31-45.

Gosar A. (2010) Site effects and soil-structure resonance study in the Kobarid basin (NW Slovenia) using microtremors. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10: 761–772.

Gràcia E., Bartolomé R., Martínez S. & Lacono C. (2010a) Horseshoe: (AT005). In: Quaternary Active Faults Database of Iberia v.3.0 - November 2015 (García-Mayordomo *et al.*, eds.), IGME, Madrid.

Gràcia E., Bartolomé R., Martínez S. & Lacono, C. (2010b) Marquês de Pombal: (AT004). In: Quaternary Active Faults Database of Iberia v.3.0 - November 2015 (García-Mayordomo *et al.*, eds.), IGME, Madrid.

Gueguen P., Gallipoli M., Navarro M., Masi A., Michel C., Guillier B., Karakostas C., Lekidis V., Mucciarelli M., Ponzio F. & Spina D. (2014) Testing Buildings Using Ambient Vibrations For Earthquake Engineering: A European Review. Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, Turkey, 12 pp.

Gupta A. & Zafar S. (2016) Seismic Microzonation – Principles and Methodology Ashutosh Gupta. *Int. Journal of Engineering Research and Application*, 6: 9-14.

Haghshenas E., Bard P.-Y., Theodulidis N. & SESAME WP04 Team (2008) Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio. *Bull. Earthq. Eng.*, 6: 75-108.

Hellel M., Chatelain J., Guillier B., Salem D., Oubaiche H. & Haddoum H. (2010) Heavier Damages without Site Effects and Site Effects with Lighter Damages: Boumerdes City (Algeria) after the May 2003 Earthquake. *Seismological Research Letters*, 81: 37-43.

Herak M. (2009) Recent applications of ambient vibration measurements in Croatia. In: Mucciarelli M, Herak M, Cassidy J (eds) *Increasing Seismic Safety by Combining Engineering Technologies and Seismological Data*. Springer. 281-292.

Hollender F., Andre M., Guyonnet-Benaize C., Cornou C., Caillot V. & Bard P.-Y. (2011) Can high daily-variation of noise level alter results of ambient vibration H/V technique? 4th IASPEI/IAEE International Symposium on Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Santa Barbara, USA, 6 pp.

Ibs-von Seht M. & Wohlenberg J. (1999) Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89: 250-259.

IGME (2015) QAFI v.3: Quaternary Active Faults Database of Iberia. Acedido "11 March 2016", a IGME web site: <http://info.igme.es/QAFI>.

Imai T. (1977) P-and S-wave velocities of the ground in Japan. In: Proceedings of the IX international conference on soil mechanics and foundation engineering, 2: 127–132.

Imai T. & Yoshimura Y. (1970) Elastic wave velocity and soil properties in soft soil (in Japanese). *Tsuchito-Kiso*, 18(1): 17–22.

Imai T. & Tonouchi K. (1982) Correlation of N-value with S-wave velocity and shear modulus. In: Proceedings of the 2nd European symposium of penetration testing, Amsterdam, pp 57–72.

INE (2012) Censos 2011 Resultados Definitivos, Instituto Nacional de Estatística.

Instituto Geográfico do Exército (1992) Carta militar de Portugal 1:25.000 Continente, série M888, 443 Moita.

Instituto Geográfico do Exército (1994a) Carta militar de Portugal 1:25.000 Continente, série M888, 454 Setúbal.

Instituto Geográfico do Exército (1994b) Carta militar de Portugal 1:25.000 Continente, série M888, 465 Outão- Setúbal.

Instituto Geográfico do Exército (1994c) Carta militar de Portugal 1:25.000 Continente, série M888, 466 Estuário do Sado- Alcácer do Sal.

Instituto Geográfico do Exército (2006) Carta militar de Portugal 1:25.000 Continente, série M888, 455 Águas de Moura- Palmela.

Instituto Geográfico do Exército (2009a) Carta militar de Portugal 1:25 000 Continente, série M888, 431 Lisboa.

Instituto Geográfico do Exército (2009b) Carta militar de Portugal 1:25.000 Continente, série M888, 432 Montijo.

Instituto Geográfico do Exército (2009c) Carta militar de Portugal 1:25.000 Continente, série M888, 442 Barreiro.

IPMA (Instituto Português do Mar e da Atmosfera) (2017) Consulta à base de dados de sismos.

Iyisan R. (1996) Correlations between shear wave velocity and in situ penetration test results (in Turkish). Chamber of Civil Engineers of Turkey. *Teknik Dergi* 7(2): 1187–1199.

JRA (Japan Road Association) (1980) Specification and interpretation of bridge design for highway - part V: Resilient Design, pp 14-15.

Japanese Geotechnical Society (1993) Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards (Revised Version), 46 pp.

Jinan Z. (1987) Correlation between seismic wave velocity and the number of blow of SPT and depth, Selected papers from the Chinese Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 92–100.

- Johnston A. & Kantler L. (1990) Earthquakes in stable continental regions. *Scientific American*, 262(3): 68-75.
- Keçeli A. & Cevher M. (2015) Soil Predominant Period and Resonance Relation of Building Height. *Jeofizik*, 17: 59-67.
- Kiku H., Yoshida N., Yasuda S., Irisawa T., Nakazawa H., Shimizu Y., Ansal A. & Erkan A. (2001) In situ penetration tests and soil profiling in Adapazari, Turkey. In: Proceedings of the ICSMGE/TC4 satellite conference on lessons learned from recent strong earthquakes, pp 259–265.
- K-NET and KiK-net, Strong Motion Seismograph Network, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Japan (<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>).
- Kobayashi H., Vidal F., Feriche M., Samano Y., Alguacil G. & Seo K. (1995) Evaluation of Dynamic Behaviour Structures with Microtremor. A Case Study in Granada City. Second Spanish – Japanese Workshop on Earthquake Ground Motions and Studies for Disaster Preparedness in Urban Areas. Granada, 23-24 October.
- Konno K. & Ohmachi T. (1998) Ground motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bull Seismol Soc Am*, 88: 228–241
- Kramer, S.L. (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice-Hall, 653 p.
- Kullberg J. (2000) *Evolução Tectónica da Bacia Lusitaniana*. Tese de doutoramento, Univ. Nova de Lisboa, 361 p.
- Kullberg M., Kullberg J. & Terrinha P. (2000) - Tectónica da Cadeia da Arrábida. In Tectónica das regiões de Sintra e Arrábida, Mem. Geociências, Museu Nac. Hist. Nat. Univ. Lisboa, 2: 35-84.
- Kullberg J., Terrinha P., Pais J., Reis R. & Legoinha P. (2006) Arrábida e Sintra: dois exemplos de tectónica pós-rifting da Bacia Lusitaniana. In *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria* (R. Dias R., Araújo A., Terrinha P. & Kullberg J., Eds.) Univ. Évora, pp. 369-396.
- Kullberg J., Rocha R., Soares A., Rey J., Terrinha P., Azeredo A., Callapez P., Duarte L., Kullberg M., Martins L., Miranda R., Alves C., Mata J., Madeira J., Mateus O., Moreira M. & Nogueira C. (2013) A Bacia Lusitaniana: Estratigrafia, Paleogeografia e Tectónica. *Geologia de Portugal, Volume II – Geologia Meso-cenozoica de Portugal*. Editores: Dias R., Araújo A., Terrinha P. & Kullberg J., Escolar Editora, *Geologia de Portugal Volume II*: 196-347.
- Lacave C., Bard P.-Y. & Koller M. (1999) Microzonation: techniques and examples. In Block 15: Naturgefahren-Erdbebenrisiko (em [www.ndk.ethz.ch](http://www.ndk.ethz.ch)) 23 pp.
- Lachet C. & Bard P.-Y. (1994) Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique. *Journal of Physics of the Earth*, 42: 377–397.
- Lane J., White E., Steele G. & Cannia J. (2008) Estimation of bedrock depth using the horizontal-to-vertical (H/V) ambient-noise seismic method. Proc. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Philadelphia, USA, 13 pp.
- Lee S. (1990) Regression models of shear wave velocities. *J Chin Inst Eng*, 13: 519–532.
- Lomholt S., Rasmussen E., Andersen C., Vejbaek O., Madsen L. & Steinhardt H. (1995) Seismic Interpretation and Mapping of the Lusitanian Basin, Portugal, DGU Service Report no. 65, contribution to the MILUPOBAS project, EC Contract no. JOU2-CT94-0348, Ministry of the Environment, Geological Survey of Denmark, 78 pp. Relatório Interno, não publicado.

- Lopes I. (2005) *Caracterização geotécnica de solos no domínio das pequenas deformações - Aplicação do método das ondas superficiais*. Tese de Doutoramento. Universidade de Lisboa, 369 pp.
- Louie J.N. (2001) Faster, better: Shear-Wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91: 347-364.
- Manuppella G., Antunes M., Pais J., Ramalho M. & Rey J. (1999) Carta Geológica de Portugal na Escala 1/50.000 e Notícia Explicativa da Folha 38-B Setúbal. Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação. Lisboa.
- McNamara D., Stephenson W., Odum J. & Williams R. (2014) Site response in the eastern United States: A comparison of Vs30 measurements with estimates from horizontal: vertical spectral ratios The Geological Society of America Special Paper 509.
- Mendecki M., Glazer M. & Mycka M. (2014) Application of passive seismic to shallow geological structures in urban áreas. *Studia Quaternaria*, 31: 115–122.
- Messele H. & Tades K. (2002) The study of seismic behavior buildings located on different site in Addis Ababa (Ethiopia) by using microtremors and analytical procedure. Joint Study on microtremors and seismic microzonation in earthquake countries. Workshop to Exchange Information, Hakone-Gora, Kanagawa, Japan.
- Mhaske S. & Choudhury D. (2011) Geospatial contour mapping of shear wave velocity for Mumbai city. *Natural Hazards*, 59: 317-327.
- Mirzaoglu M. & Dýkmen Ü. (2003) Application of microtremors to seismic microzoning procedure. *Journal of the Balkan Geophysical Society*, 6: 143–156
- Mohamed A. & Fat-Helbary R. (2012) Site effect estimation at new Kima factory site, Aswan, South Egypt. 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal.
- Moniz C. (2010) *Contributo para o conhecimento da falha de Pinhal Novo-Alcochete, no âmbito da neotectónica do Vale Inferior do Tejo*. Dissertação de Mestrado, 128 pp.
- Moreira, V. (1982) Sismotectónica de Portugal Continental e Região Atlântica Adjacente, INMG, Lisboa.
- Moreira, V. (1984) Sismicidade histórica de Portugal Continental. *Rev. Inst. Nac. Met. e Geofísica*: 3-79.
- Moreira, V. (1991) Sismicidade Histórica de Portugal Continental, Revista do INMG.
- Mucciarelli M. & Gallipoli M. (2006) Comparison between  $V_{s30}$  and other estimates of site amplification in Italy. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology Geneva, Switzerland, paper 274.
- Mucciarelli M., Vona M., Ditommaso R. & Gallipoli M (2012) Experimental measurement of fundamental periods of damaged R.C. buildings. 15 WCEE, Lisboa, Portugal.
- Nakamura Y. (1989) A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface. *Quarterly Report of RTRI*, 30(1): 25-33.
- Nakamura, Y. (2000) Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. Proc. 12WCEE, New Zealand, Paper 2656, 8 pp.
- Nakamura Y. (2007) Characteristics of H/V Spectrum. NATO Advanced Research Workshop, Dubrovnik, Croatia, 2 pp.

- Nakamura Y. (2008) On the H/V Spectrum. 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 10 pp.
- Navarro M. & García-Jerez A. (2012) Analysis of site effects, building response and damage distribution observed due the 2011 Lorca, Spain, Earthquake. 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal, Paper 5557.
- Navarro M., Alcalá-García F., Vidal F., Enomoto T., Abeki N. & Sánchez F. (2002) Evaluation of Site Effects in Adra Town (southern Spain). *Física de la Tierra*, 14: 215-228.
- Navarro M., T. Enomoto, T. Yamamoto, A. García-Jerez, F. Vidal & M. Bretón (2008) Analysis of site effects and their correlation with damage distribution observed during the Colima (Mexico) earthquake of January 21 2003. 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Navarro M., Vidal F., Feriche M., Enomoto T., Sánchez F. & Matsuda I. (2004) Expected Ground–RC Building Structures Resonance Phenomena in Granada City (Southern Spain). 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada Paper No. 3308.
- Nazarian S., Stokoe K. & Hudson W. (1983) Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement Systems. *Transportation Research Record*, 930: 38-45.
- Nunziata C. (2007) A physically sound way of using noise measurements in seismic microzonation, applied to the urban area of Napoli. *Engineering Geology*, 93: 17–30.
- Nunziata C., Costanzo M., Vaccari F. & Panza G. (2012) Evaluation of Linear and Nonlinear Site Effects for the MW 6.3, 2009 L'Aquila Earthquake. *Earth and Planetary Sciences «Geology and Geophysics» Earthquake Research and Analysis - New Frontiers in Seismology*, 5: 155-176.
- Odum J., Stephenson W. & Williams R. (2010) Predicted and Observed Spectral Response from Collocated Shallow, Active- and Passive-Source Vs Data at Five ANSS Sites, Illinois and Indiana, USA. *Seismological Research Letters*, 81: 766-775.
- Odum J., Stephenson W., Williams R. & Hillebrandt-Andrade C. (2013)  $V_{S30}$  and Spectral Response from Collocated Shallow, Active, and Passive-Source Vs data at 27 sites in Puerto Rico. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103: 2709–2728.
- Ohba S. & Toriumi I. (1970) Dynamic response characteristics of Osaka plain. In: Proceedings of the annual meeting AIJ, 13(4): 61–73.
- Ohmachi T., Nakamura Y. & Toshinawa T. (1991) Ground motion characteristics in the San Francisco Bay area detected by microtremor measurements. Proc. 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, USA: 1643-1648.
- Ohsaki Y. & Iwasaki R. (1973) On dynamic shear moduli and Poisson's ratio of soil deposits. *Soils Founds*, 13(4): 61–73.
- Ohta Y. & Goto N. (1978) Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristics soil indexes. *Earthq Eng Struct Dyn*, 6: 167–187.
- Oliveira C. (1986) A Sismicidade Histórica e a Revisão do Catálogo Sísmico. Proc. 36/11/7368, I e D, Estruturas, Relatório 99/86 - NDA, LNEC, Lisboa, 192 pp.
- Oliveira C. & Sousa M. (1991) A contribution to reduce subjectivity in treatment of historical data, In: J. Mezcua and A. Udía (eds.), Seismicity, Seismotectonics and Seismic Risk of the Ibero-Maghrebian Region, Publicacion I.G.N. Série Monografía 8, Instituto Geografico Nacional, Madrid, 97-114.

- Oliveira C. (2004) Atualização das Bases-de-Dados Sobre Frequências Próprias de Estruturas de Edifícios, Pontos, Viadutos e Passagens de Peões a Partir de Medições Expeditas In-Situ. 5ª Conferência de Engenharia Sísmica Universidade do Minho, Braga, Portugal.
- Oliveira C. & Navarro M. (2010) Fundamental periods of vibration of RC buildings in Portugal from in-situ experimental and numerical techniques. *Bull Earthquake Eng.*, 8: 609-642.
- Oliveira R., Seco e Pinto P., Rebelo V. & Rodrigues V. (1997) Estudos geológicos e geotécnicos para o Projecto da Ponte Vasco da Gama, em Lisboa. Conferência Especial no 6º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa, Portugal.
- Opršal I., Zahradník J., Serpetsidaki A. & Tselentis G.-A. (2004) 3D hybrid simulation of the source and site effects during the 1999 Athens earthquake. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, paper 3337, 15 pp.
- Optim software & data solutions (2006) User's Manual SeisOpt ReMi Version 4.
- Ordóñez G. (2003) SHAKE2000: A computer program for the 1-D analysis of the geotechnical earthquake engineering problem.
- Ozalaybey S., Zor E., Ergintav S. & Tapırdamaz M. (2011) Investigation of 3-D basin structures in the Izmit Bay area (Turkey) by single-station microtremor and gravimetric methods. *Geophys. J. Int.*, 186: 883–894.
- Panzer F., Lombardo G., D'Amico S. & Galea P. (2013) Speedy Techniques to Evaluate Seismic Site Effects in Particular Geomorphologic Conditions: Faults, Cavities, Landslides and Topographic Irregularities. Engineering seismology, geotechnical and structural earthquake engineering, InTech pags. 141-145.
- Park C., Miller R. & Xia J. (1999) Multichannel analysis of surface waves (MASW). *Geophysics*, 64: 800–808.
- Parolai S., Bormann P. & Milkereit C. (2002) New relationships between  $V_s$ , thickness of sediments, and resonance frequency calculated by the H/V ratio of seismic noise for the Cologne area (Germany). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92: 2521–2527.
- Parolai S., Richwalski M., Milkereit C. & Fäh D. (2006) S-wave Velocity Profiles for Earthquake Engineering Purposes for the Cologne Area (Germany). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(1): 65-94.
- PEER Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. California ([peer.berkeley.edu/ngawest2](http://peer.berkeley.edu/ngawest2))
- Pischiutta M., Rovelli A., Vannoli P. & Calderoni G. (2011) Effects of Surface Geology on Seismic Motion 4th IASPEI / IAEE International Symposium 10 pp.
- Prenger-Berninghoff K., Cortes V., Sprague T., Aye Z., Greiving S., Głowacki W. & Sterlacchini S. (2014) The connection between long-term and short-term risk management strategies for flood and landslide hazards: examples from land-use planning and emergency management in four European case studies. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14: 3261–3278.
- Priolo E., Laurenzano G., Vuan A., Cecotti C. & Klinc P. (2004) Site response estimation in Vittorio Veneto (Italy). 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 14 pp.
- Pullammanappallil S.K. & Louie J. (1994) A generalized simulated annealing optimization for inversion of first-arrival times. *Bull Seismol Soc Am*, 84:1397–1409.

Quantum GIS 1.8.0-Lisboa: <http://www.qgis.org/>.

Queiroz G., Teves-Costa P., Gomes A., Escuer M., Senos L. & Matos L. (2007) Geologia Superficial e Ruído Sísmico em Ponta Delgada (S. Miguel, Açores). Proc. 5º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG, Peniche, Portugal: 81-84.

Rajiv R. (2005) Seismic Response Analysis of Dehradun City, India. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente, 85 pp.

Ramalhete D., Nunes J., Pena J., Senos M. & Teves-Costa P. (1998) Estudos de ruído de fundo na região de Lisboa e Vale do Tejo, 1º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG, Lagos, Portugal: 123-128.

Ribeiro A., Cabral J., Baptista R. & Matias L. (1996) Stress pattern in Portugal mainland and the adjacent Atlantic, West Ibéria. *Tectonics*, 15: 641-659.

Rigano R., Cara F., Lombardo G. & Rovelli A. (2008). Evidence of ground motion polarization on fault zones of Mount Etna volcano. *J. Geophys. Res.* 113, 17 pp.

RockWorks15, RockWare earth science and gis software ([www.rockware.com](http://www.rockware.com)).

Rosenblad L., & Li J. (2009) Comparative study of refraction micotremor (ReMi) and active source methods for developing low-frequency surface wave dispersion curves. *J. Envir. Eng. Geophys*, 14: 101–113.

Roux O., Cornou C., Jongmans D. & Schwartz S. (2012) 1-D and 2-D resonances in an Alpine valley identified from ambient noise measurements and 3-D modeling. *Geophys J. Int.*, 191: 579-590.

Roy N., SankarJakka R. & Wason H. (2013) Effect of surface wave inversion non-uniqueness on 1D seismic ground response analysis. *Natural Hazards*, 68: 1141–1153.

Salameh C., Mariscal A., Harb J., Bard P-Y., Guillier B., Cornou C. & Voisin C. (2014) Dynamic Properties of Beirut buildings: Instrumental Results from Ambient Vibrations. Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, Turkey: 1056, pp.12.

Sánchez F., Navarro M., García J., Enomoto T. & Vidal F. (2002) Evaluation of seismic effects on buildings structures using microtremor measurements and simulation response. *Structural Dynamics*, 2: 1003-1008.

Santisteban I., Mayordomo J., Martín A. & Carbó A. (2011) Comparison among SASW, ReMi and PS-logging techniques: Application to a railway embankment. *Journal of Applied Geophysics*, 73: 59–64.

Santisteban I., Muñoz A., Carbó A. & Ruiz M. (2012) Análisis comparativo de la resolución de las técnicas SASW, ReMi y crosshole para reconocer el perfil de rigidez en un terreno urbano, 7ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia e Geofísica, Donostia, Spain, S08: 634-639.

Schnabel P., Lysmer J. & Seed H. (1972) SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Report No. EECR 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University California, Berkeley, 114 pp.

Schnabel, P. (1973) *Effects of Local Geology and Distance from Source on Earthquake Ground Motions*. Berkeley, University of California. PhD. Thesis.

Seed, H. & Idriss, I. (1970) Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses, Report EERC 70–10. Berkeley, CA, USA: University of California.

Seed H. & Idriss I. (1981) Evaluation of liquefaction potential sand deposits based on observation of performance in previous earthquakes. ASCE National Convention Missouri, pp 81–544.

SESAME (2004) Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations. Measurements, processing and interpretation. WP12—Deliverable D23.12, p 62. Available as supplementary material at: <http://dx.doi.org/10.1007/s10518-008-9059-4>. Accessed 30 Nov 2010.

Silva V., Crowley H., Varum H. & Pinho R. (2014) Seismic risk assessment for mainland Portugal. *Bull Earthq Eng*, 13: 429-457.

Silveira G., Veludo I., Teves-Costa P., Maia L. & Escuer M. (2009) Utilização do ruído sísmico para estimar a estrutura superficial da crosta na cidade de Ponta Delgada – primeiros resultados. 6º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG, Caparica, Portugal.

Silvestre P., Teves-Costa P., Escuer M., Correia G., Cadet H. & Senos M.L. (2006) Zonagem sísmica de Ponta Delgada por meio de análise de vibrações ambientais – resultados preliminares. 5ª Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia e Geofísica, Sevilha, Espanha.

Stephenson W., Louie J., Pullammanappallil S., Williams R. & Odum J. (2005) Blind shear-wave velocity comparison of ReMi and MASW results with boreholes to 200 m in Santa Clara Valley: implications for earthquake ground-motion assessment. *B. Seismol Soc Am*, 95: 2506–2516.

Stephenson W., Odum J., McNamara D., Williams R. & Angster S. (2015) Ground-motion site effects from multimethod shear-wave velocity characterization at 16 seismograph stations deployed for aftershocks of the August 2011 Mineral, Virginia earthquake. *GSA Special Papers*, 509: 47–65.

Stone W., Yokel F., Celebi M., Hanks T. & Leyendecker E. (1987) Engineering spectra of the September 19, 1985 Mexico Earthquake, NBS/BSS 2155 pp.

Strobbia C. & Cassiani G. (2011) Refraction microtremors: Data analysis and diagnostics of key hypotheses. *Geophysics*, 76: 11–20.

Stucchi M., Rovida A., Gomez A., Alexandre P., Camelbeeck T., Demircioglu M., Gasperini P., Kouskouna V., Musson R., Radulian M., Sesetyan K., Vilanova S, Baumont B., Bungum H., Fäh D., Lenhardt W., Makropoulos K., Martinez Solares J., Scotti O., Živčić M., Albinì P., Battlo J., Papaioannou C., Tatevossian R., Locati M., Meletti C., Viganò D. & Giardini D. (2013) The SHARE European Earthquake Catalogue (SHEEC) 1000–1899. *J Seismology*, 17: 523–544.

Stucchi M., Rovida A., Capera, A.A. *et al.* (2013) The SHARE European Earthquake Catalogue (SHEEC) 1000–1899. *J Seismol*, 17(2): 523-544.

Sykora D. & Stokoe K. (1983) Correlations of in situ measurements in sands of shear wave velocity. *Soil Dyn Earthq Eng*, 20(1–4): 125-136.

Teves-Costa P., Matias L. & Bard P.Y. (1996) Seismic behaviour estimation of thin alluvium layers using microtremor recordings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 15: 201-209.

Teves-Costa P., Rio I., Marreiros C., Ribeiro R. & Borges J. (1999) Source Parameters of old earthquakes: Semi-automatic digitalization of analog records and seismic moment assessment. *Natural Hazards*, 19: 205–220.

Teves-Costa P., Almeida I. & Silva P. (2001a) Microzonation of the Lisbon town: 1D theoretical approach. *Pageoph*, 158: 2579-2596.

Teves-Costa P., Vales D. & Vicêncio H. (2001b) Estudo de ruído ambiental na cidade de Faro. 5º Encontro Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Açores, Portugal.

- Teves-Costa P., Oliveira C. & Senos M. (2007) Effects of local site and building parameters on damage distribution in Angra do Heroísmo - Azores. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27: 986-999.
- Teves-Costa P., Escuer M. & Senos M. (2008) Medidas de vibrações ambientais na cidade da Horta – Açores. Proc. 6ª Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia e Geofísica, Tomar, Portugal: 459-460.
- Teves-Costa P., Rodrigues I., García-Fernández M. & Jiménez M. (2012a) Ambient-noise surveys to characterize soils in the Lower Tagus Valley for the evaluation of earthquake scenarios. 15 WCEE Lisbon, Portugal.
- Teves-Costa P., Almeida I. & Rodrigues I. (2012b) Distribution of peak and spectral frequencies in Lisbon. Application of geological and geotechnical data. 15 WCEE Lisbon, Portugal.
- Teves-Costa, P. & Veludo I. (2013). Soil characterization for seismic damage scenarios purposes – Application to Angra do Heroísmo (Azores). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11: 401-421.
- Teves-Costa P., Almeida I., Rodrigues I., Matildes R. & Pinto C. (2014). Geotechnical characterization and seismic response of shallow geological formations in downtown Lisbon. *Annals of Geophysics*, 57: 24 pp.
- Thaker T., Rao K. & Gupta K. (2009) One Dimensional Ground Response Analysis of Coastal Soil Near Naliya, Kutch, Gujarat. *Indian Geotechnical Conference*, Vol. 1, 531-535.
- UNISDR/CRED (2016) *Poverty & Death: Disaster Mortality, 1996-2015*, 22 pp.
- UNISDR (2009) *Terminology on Disaster Risk Reduction*, 30 pp.
- Veludo, I. (2008) *Cenários Sísmicos para a Cidade de Angra do Heroísmo*. Mestrado em Ciências Geofísicas Especialização em Geofísica Interna, Universidade de Lisboa Faculdade de Ciências, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, 134 pp.
- Vicêncio H. & Graça C. (2009) *Manual para a Elaboração, Revisão e Análise de Planos Municipais de Ordenamento do Território na Vertente da Protecção Civil*. Cadernos Técnicos PROCIV, 6.
- Vicêncio H., Teves-Costa P. & Caetano P. (2015) Geotechnical and Geological Characterization and Ambient Vibration Study of Shallow Geological Units in Barreiro and Setúbal Areas (Portugal). *Procedia Earth and Planetary Science*, 15: 187-192.
- Vilanova P. & Fonseca J. (2007) Probabilistic Seismic-Hazard Assessment for Portugal. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(5): 1702-1717.
- Villani F., Pucci S., Civico R., Marco De Martini P., Nicolosi I., Caracciolo F., Carluccio R., Di Giulio G., Vassallo M., Smedile A. & Pantosti D. (2014) Imaging the structural style of an active normal fault through multidisciplinary geophysical investigation: a case study from the Mw 6.1, 2009 L'Aquila earthquake region (central Italy). *Geophys. J. Int.*, 200: 1676–1691.
- Volti T., Burbidge D., Collins C., Asten M., Odum J. Stephenson W., Pascal C. & Holzschuh J. (2016) Comparisons between VS30 and Spectral Response for 30 Sites in Newcastle, Australia, from Collocated Seismic Cone Penetrometer, Active- and Passive-Source VS Data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106:1690-1709.
- Wang H., Xie L., Chen B., Zhang X., Kong F., Wang S. & Ye P. (2012) Effects of soil sites on ground motions in the Qionghai basin in the Wenchuan great earthquake. 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal.

Warnana D., Sungkono T. & Utama W. (2011) Assessment to the Soil-Structure Resonance Using Microtremor Analysis on Pare - East Java, Indonesia. *Asian Transactions on Engineering*.

Wathelet M., Jongmans D. & Ohrnberger M. (2004) Surface-wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements. *Near Surface Geophysics*, 2: 211-221.

Wathelet M., Jongmans D. & Ohrnberger M. (2005) Direct Inversion of Spatial Autocorrelation Curves with the Neighborhood Algorithm. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95: 1787–1800.

Yilmaz, Ö. (2015) Engineering Seismology With Applications to Geotechnical Engineering. Society of Exploration Geophysicists Investigations in Geophysics Series N° 17, 951.

Yong A., Hough S., Iwahashi J. & Braveman A. (2012) A terrain-based site-conditions map of California with implications for the contiguous United States. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 102: 114–128.

Yuncha Z. & Luzón F. (2000) On the Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio in Sedimentary Basins. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90: 1101–1106.

Zaharia B., Radulian M., Popa M., Grecu B., Bala A. & Tataru D. (2008) Estimation of the local response using the Nakamura method for the Bucharest area. *Romanian Reports in Physics*, 60: 131–144.

Zaslavsky Y., Ataev G., Gorstein M. & Shapira A. (2008) Assessment of site specific earthquake hazards in urban areas. A case study: The town of Afula, Israel, and neighbouring settlements. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 49(1): 93-108

Zywicki, D. (2007) The impact of seismic wavefield and source properties on ReMi estimates. Proceedings Innovate Applications of Geophysics in Civil Engineering, Reston, Virginia, USA.

## **B) LEGISLAÇÃO**

RSA (1983) Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes. Decreto-Lei n.º 235/83, de 31 de maio.

Lei n.º 58/2007, de 4 de setembro, Aprova o Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território.

IPQ (2010) NP - EN 1998-1 Eurocódigo 8: Projeto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios. Instituto Português da Qualidade, Portugal.

Lei n.º 31/2014, de 30 de maio, Lei de bases gerais da política pública de solos, de ordenamento do território e de urbanismo.

Decreto-Lei n.º 80/2015, de 14 de maio, Regime Jurídico dos Instrumentos de Gestão Territorial.

Decreto-Lei n.º 150/2015, de 5 de agosto, Regime de prevenção de acidentes graves que envolvem substâncias perigosas e de limitação das suas consequências para a saúde humana e para o ambiente, transposição da Diretiva n.º 2012/18/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 4 de julho de 2012.

## C) RELATÓRIOS GEOTÉCNICOS

Administração dos Portos de Setúbal e Sesimbra (2000) *Fichas de Sondagens Alstom*. Relatório interno, não publicado.

Cege (1994) *Caracterização Geológica-Geotécnica da Central Termoelétrica de Setúbal (Cais das Piritas)* EDP S.A. Relatório interno, não publicado.

Companhia dos Petróleos de Portugal (1956) *Relatório da Sondagem de Barreiro 1*. Relatório interno, não publicado.

Companhia dos Petróleos de Portugal (1959) *Relatório da Sondagem de Barreiro 2*. Relatório interno, não publicado.

Companhia dos Petróleos de Portugal (1962) *Reinterpretação Estratigráfica da Sondagem de Barreiro 1*. Relatório interno, não publicado.

Companhia dos Petróleos de Portugal (1963a) *Reinterpretação Estratigráfica da Sondagem de Montijo 1* Relatório interno, não publicado.

Companhia dos Petróleos de Portugal (1963b) *Reinterpretação Estratigráfica da Sondagem de Barreiro 2*. Relatório interno, não publicado.

Companhia dos Petróleos de Portugal (1963c) *Relatório da Sondagem de Barreiro 3*. Relatório interno, não publicado.

Companhia dos Petróleos de Portugal (1982-1983) *Relatório da Sondagem de Barreiro 4*. Relatório interno, não publicado.

Construção Técnicas (1987) *Prospeção Geotécnica do Terreno para Estudo da Remodelação do Edifício do Montepio Geral*. Relatório interno, não publicado.

Direção Geral de Portos (1991) *Relatório de Sondagens Geológicas Porto de Setúbal*. Relatório interno, não publicado.

Empresa de Sondagens e Fundações Teixeira Duarte (1970) *Captação de Água TD1 Pioneer Betão Pronto L.D.A.* Setúbal. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (1982) *Processamento do Conjunto da Informação Geológica-Geotécnica Barreiro Quimigal E.P.* Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2001a) *Prospeção Geotécnica Estação do Barreiro, Ferbritas S.A.*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2001b) *Prospeção Geotécnica P.G. em Possoilos, Litsa Ambiente Escola superior de Saúde de Setúbal*, Instituto Politécnico de Setúbal. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2001c) *Prospeção Geotécnica Parque de Mercadorias - Vale Rosa, CP - UTML*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2001d) *Prospeção Geotécnica Reservatório de Brancanes, Águas do Sado S.A.* Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2004a) *Estudo Geotécnico Escola Superior de Saúde de Setúbal, Instituto Politécnico de Setúbal*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2004b) *Estudo Geotécnico Prévio Nova Fábrica de Papel da Mitrena – Setúbal, Portucel - Empresa de Pasta de Papel*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2004c) *Prospecção Geotécnica Novo Cais para Navios Panamax, Setúbal, Sapec Agro S.A.*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2004d) *Prospecção Geotécnica Sistema de Drenagem Elevatório Subsistema Barreiro/Moita Alcochete, Afonsoeiro/Seixalinho, Estação Elevatória Bento Gonçalves, Atkins - Ambio*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2005a) *Prospecção Geotécnica Sistema de Drenagem Elevatório Subsistema Barreiro / Moita Alcochete, Afonsoeiro/Seixalinho, Estação Elevatória Lavradio, Atkins - Ambio*. Relatório interno não publicado.

Geocontrole (2005b) *Estudo Geotécnico Parque de Pellets de Carbono no Barreiro, ADP - Adubos De Portugal, S.A.* Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2005c) *Estudo Geotécnico Passagem Inferior da Recosta, Projeto Lisboa – Algarve Reformulação do Complexo Ferroviário do Barreiro, Ferbritas S.A., Refer E.P.*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2005d) *Estudo Geotécnico Reformulação do Complexo Ferroviário do Barreiro, Ferbritas S.A., Refer E.P.*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2005e) *Prospecção Geotécnica Rave – Lote 3A2 Lisboa - Montemor-o-Novo, Globalvia S.A.*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2005f) *Prospecção Geotécnica Sistema de Drenagem Elevatório Subsistema Barreiro / Moita Alcochete, Afonsoeiro/Seixalinho, Estação Elevatória Lavradio, Atkins - Ambio*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2005g) *Prospecção Geotécnica Sistema de Drenagem Elevatório Subsistema Barreiro / Moita Alcochete, Afonsoeiro/Seixalinho, Estação Elevatória Miguel Pais, Atkins - Ambio*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2005h) *Prospecção Geotécnica Sistema de Drenagem Elevatório Subsistema Barreiro / Moita Alcochete, Afonsoeiro/Seixalinho, Estação Elevatória Palhais, Atkins - Ambio*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2005i) *Relatório Descritivo Reconhecimento Geotécnico Estação Elevatória da Recosta - Barreiro, Simarsul*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2006) *Prospecção Geológica-Geotécnica ETAR do Barreiro Tetraplano Lda.* Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2007a) *Estudo Geotécnico Central de Cogeração do Barreiro, Construtora da Bairrada S.A.*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2007b) *Estudo Geotécnico Obras de Arte, Electificação e Modernização de Estações e Apeadeiros no troço Barreiro – Pinhal Novo, Ferbritas S.A., Refer E.P.*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2007c) *Estudo Geotécnico Urbanização da Quinta dos Loios, Habiserve*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2008a) *Estudo Geológico Geotécnico Empreitada de Concepção/Construção de Troços de Emissários e Condutas Elevatórias de Águas Residuais no Subsistema Barreiro/Moita Pfeiffer Manvia*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2008b) *Estudo Geotécnico Empreendimento das Cordoarias Lote 9, Progesto Arquitectura*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2008c) *Estudo Geotécnico Urbanização da Mata dos Lóios Lote 104 – Barreiro, Urbiportal Ld.ª*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2008d) *Estudo Prévio Prospeção Geotécnica Relatório Descritivo Tomo I – Memória Descritiva e Prospeção Geotécnica Terceira Travessia do Tejo em Lisboa Chelas-Barreiro, Rave S.A.*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2008e) *Projeto de Estabilização e Reconstrução do Cais Fluvial do Barreiro - Linha do Alentejo Poços de Inspeção de Fundações, Consulgal, Consultores De Engenharia E Gestão, S.A.*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2008f) *Reconhecimento Geológico Geotécnico Projecto de Estabilização e Reconstrução do Cais Fluvial do Barreiro - Linha do Alentejo Poços de Inspeção de Fundações, Consulgal, Consultores De Engenharia E Gestão, S.A.*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2009) *Estudo Geotécnico Emissário da Recosta - Barreiro, Aquino e Rodrigues S.A.*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2010) *Estudo Geotécnico Escola Básica e Secundária Alfredo da Silva Barreiro, Teixeira Trigo S.A.*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2012a) *Geotechnical Site Investigation Interpretative Report Liquid Tank Terminal In Lavradio Reservoir F2851 Cuf – Direcção Fabril de Amoníaco de Portugal, S.A.*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2012b) *Reconhecimento Geotécnico Etar do Barreiro, Ambio Consultores de Engenharia e Tecnologia do Ambiente, Ld.ª*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2013a) *Complementary Site Investigation Factual Report Liquid Tank Terminal In Lavradio Reservoir F2851 Cuf – Direcção Fabril de Amoníaco de Portugal, S.A.*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2013b) *Estudo Geotécnico Posto de Abastecimento de Gasóleo Estação Fluvial do Barreiro Ensaios DPSH, Metalcário*. Relatório interno, não publicado.

Geocontrole (2014) *Estudo Geológico-Geotécnico Estações Elevatórias de Águas Residuais de Santo António-Poente e do Bairro da Liberdade, Sisaqua S.A.*. Relatório interno, não publicado.

Geoma Geotecnia e Mecânica De Solos (1997) *Terminal das Fontainhas, F.B.O. Consultores S.A.*. Relatório interno, não publicado.

Geoprolífero (2012) *Relatório Final Estudo Geotécnico Passadiço de Alburrica, Profico – Projectos, Fiscalização e Consultoria*. Relatório interno, não publicado.

Geosolve (2005) *Relatório Geológico-Geotécnico Relativo à Construção de Emissário (Polis 4 - Barreiro), Simarsul*. Relatório interno, não publicado.

Geossolve (2012) *Relatório Geológico-Geotécnico Projecto de Drenagem e Elevação de Águas Residuais no Concelho de Palmela e Cárcamo Lobo (Barreiro) e Bairro da Mesquita (Pinhal Novo)*. Relatório interno, não publicado.

Geoteste (2001a) *Relatório Estudo Geológico-Geotécnico Preliminar 4º Loteamento do Parque Industrial Sapec Bay – Viaduto Norte – Setúbal, Sapec Bay Imobiliária*. Relatório interno, não publicado.

Geoteste (2001b) *Relatório Estudo Geológico-Geotécnico Preliminar 4º Loteamento do Parque Industrial Sapec Bay – Viaduto Sul – Setúbal, Sapec Bay Imobiliária*. Relatório interno, não publicado.

Geoteste (2005) *Relatório Estudo Geológico-Geotécnico Monumento À Resistência Av. Luísa Todi – Setúbal, Câmara Municipal de Setúbal*. Relatório interno, não publicado.

Geoteste (2008) *Relatório Estudo Geológico-Geotécnico Ampliação e Remodelação do Fórum Municipal Luísa Todi – Setúbal, Câmara Municipal de Setúbal*. Relatório interno, não publicado.

Geoteste (2009a) *Relatório Estudo Geológico-Geotécnico Casa da Baía na Avenida Luísa Todi – Setúbal, Câmara Municipal de Setúbal*. Relatório interno, não publicado.

Geoteste (2009b) *Relatório Estudo Geológico-Geotécnico Centro Comercial Alegro – Setúbal, Multicento – Estabelecimentos Comerciais, S.A.*. Relatório interno, não publicado.

Geoteste (2009c) *Relatório Estudo Geológico-Geotécnico Mercado do Livramento – Setúbal, Câmara Municipal de Setúbal*. Relatório interno, não publicado.

Geoteste (2010a) *Relatório Estudo Geológico-Geotécnico Casa da Cultura – Setúbal. Câmara Municipal de Setúbal*. Relatório interno, não publicado.

Geoteste (2010b) *Relatório Estudo Geotécnico Quinta da Telha, Bensaúde S.A.* Relatório interno, não publicado.

Geoteste (2011a) *Relatório Estudo Geológico-Geotécnico Carmona – Sociedade de Limpeza e Tratamento de Combustíveis, S.A Lote de Terreno na Mitrena - Setúbal*. Relatório interno, não publicado.

Geoteste (2011b) *Relatório Estudo Geológico-Geotécnico Cenor – Projectos de Engenharia, Ld.ª Mitrena - Setúbal*. Relatório interno, não publicado.

Geoteste (2011c) *Relatório Estudo Geológico-Geotécnico dos Terrenos de Fundação do Viaduto da Av. D. Manuel I em Setúbal, H. Hagen*. Relatório interno, não publicado.

Geoteste (2011d) *Relatório Estudo Geológico-Geotécnico Fórum Barreiro, MDC – Multidevelopment Corporation Portugal, S.A.*. Relatório interno, não publicado.

Geoteste (2011e) *Relatório Estudo Geológico-Geotécnico Novo Mercado Municipal do Barreiro (Mercado 1º de Maio), MDC – Multidevelopment Corporation Portugal, S.A.*. Relatório interno, não publicado.

Geoteste (2011f) *Relatório Geotécnico Posto Abastecimento CEPESA Barreiro, Tetraplano Engenharia*. Relatório interno, não publicado.

Geoteste (2013a) *Relatório Estudo Geológico-Geotécnico Ampliação/Renovação da EB1/J1 do Viso Câmara Municipal de Setúbal*. Relatório interno, não publicado.

Geoteste (2013b) *Relatório Estudo Geológico-Geotécnico Complementar Centro Comercial Alegro – Setúbal, Multicento – MSF/SOMAGUE – Construção NCC Setúbal, ACE*. Relatório interno, não publicado.

Geoteste (2013c) *Relatório Estudo Geológico-Geotécnico Terreno da Lallemand Setúbal, Lallemand Ibéria S.A.*. Relatório interno, não publicado.

LNEC (1998) *Determinação da velocidade das ondas de cisalhamento e longitudinais na estação do Terreiro do Paço. Metropolitano de Lisboa, E.P. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.*

LNEC (2006) *Ensaio sísmicos entre furos de sondagem no local da nova fábrica de papel na Mitrena, em Setúbal. Laboratório Nacional de Engenharia Sísmica, Portucel – Empresa Produtora de Pasta e Papel, S.A.*

Sondagens e Fundações A. Cavaco (1959) *As Condições Geo-Hidrológicas Observadas nos Furos da Socel, Península de Mitrena*. Relatório Interno, não publicado.

Sondagens e Fundações A. Cavaco (1971a) *Relatório Final. Execução de um Furo de Pesquisa e ensaio nas Camadas do Miocénico Profundo da Região de Setúbal Mitrena. Furo AC - 4*. Relatório interno, não publicado.

Sondagens e Fundações A. Cavaco (1971b) *Relatório Final. Execução de um Furo de Captação Destinado ao Abastecimento de Água às Instalações Fabris do Consórcio Português de Panificação Setúbal*. Relatório interno, não publicado.

Sondagens e Fundações A. Cavaco (1972a) *Relatório Final. Execução de furos de sondagem e ensaio AC-01 e AC-5 nas camadas do Miocénico da Região de Setúbal/Sondagens*. Relatório interno, não publicado.

Sondagens e Fundações A. Cavaco (1972b) *Relatório Final. Execução de uma Nova Captação de Água Subterrânea, Inapa-Indústria Nacional de Papeis S.A.R.L.*. Relatório interno, não publicado.

Sondagens e Fundações A. Cavaco (1974a) *Relatório Final. Execução de Furos de Captação de Água para abastecimento das Instalações Fabris da Eurominas em Mitrena Setúbal Captação AC-1, Eurominas -Indústrias Mineiras L.D.A.* Relatório interno, não publicado.

Sondagens e Fundações A. Cavaco (1974b) *Relatório Final. Execução de Furos de Captação de Água para abastecimento das Instalações Fabris da Eurominas em Mitrena Setúbal Captação AC-2, Eurominas -Indústrias Mineiras L.D.A.* Relatório interno, não publicado.

Sondagens e Fundações A. Cavaco (1975) *Relatório Final. Furo de Captação de Água na Unidade dois de Mague em Setúbal, Construções Metal Mecânicas Mague S.A.R.L.*. Relatório interno, não publicado.

Sondagens Ródio (2003) *Reconhecimento Geológico e Geotécnico Loteamento Urbano Quinta do Quadrado Lote 1 Setúbal*. Relatório interno, não publicado.

Sondagens Ródio (2004) *Reconhecimento Geotécnico da Unidade Industrial de Moagem de Clinquer, Cimentos e Produtos Associados, Ld.<sup>a</sup>*. Relatório interno, não publicado.

Sopecate (2004) *Relatório Geotécnico Recolocação do Trem Naval de Combate à Poluição e de reboques, Companhia Portuguesa de Trabalhos Portuários e Construções, S.A.*. Relatório interno, não publicado.

Tecnasol FGE (1994) *Canais de Navegação, Somague e Etermar*. Relatório interno, não publicado.

Tecnasol FGE (1996) *Relatório da Prospeção Geológico-Geotécnica, Urbanização do Farol, Imobiliária Edifer*. Relatório interno, não publicado.

Tecnasol FGE (2000a) *Relatório Estudo Geológico-Geotécnico Construção de uma Urbanização na Quinta da Saboaria Setúbal, Solsado Ld.<sup>a</sup>*. Relatório interno, não publicado.

Tecnasol FGE (2000b) *Prospeção Geológico-Geotécnica Relatório, ETAR de Setúbal, Edifer Construções S.A.*, Relatório interno, não publicado.

Tecnasol FGE (2004a) *Estudo Geológico-Geotécnico Complementar, Portucel - Empresa de Pasta de Papel Mitrena/Setúbal*. Relatório interno, não publicado.

Tecnasol FGE (2004b) *Estudo Geológico-Geotécnico Escola Profissional de Setúbal Manteigadas Setúbal, Edifer Cosntruções S.A.*, Relatório interno, não publicado.

Tecnasol FGE (2004c) *Prospeção Geológico-Geotécnica Nota Técnica Etar do Barreiro Moita (Lavradio - Barreiro), Soares da Costa S.A.*, Relatório interno, não publicado.

Tecnasol FGE (2008) *Prospeção Geológico-Geotécnica, Nota Técnica Sistema de Observação do Canal de Rejeição do Centro de Produção de Setúbal, E.D.P. – Gestão da Produção de Energia, S.A.*. Relatório interno, não publicado.

Tecnasol FGE (2011) *Prospeção Geológico-Geotécnico Relatório Docca de Recreio das Fontaínhas Setúbal, Administração dos Portos de Setúbal e Sesimbra, S.A.*. Relatório interno, não publicado.

Teixeira Duarte (1998) *Reconhecimento Geotécnico Relatório, Fábrica da Igreja Paroquial do Vicariato de Santo André, Igreja e Sede Paroquial de Santo André, Quinta do Barrosos*. Relatório interno, não publicado.

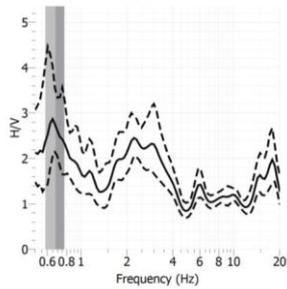
# ANEXOS



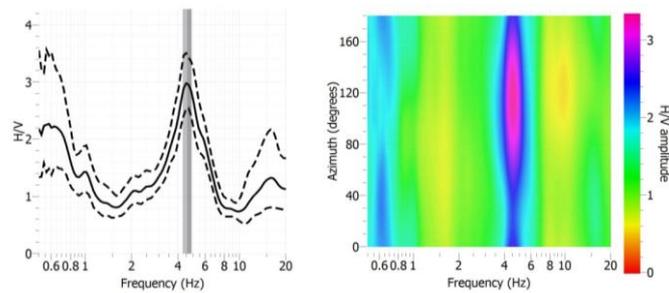
# ANEXO I - CURVAS H/V E GRÁFICOS DE FREQUÊNCIA-AZIMUTE DO BARREIRO

— média    - - - - máximos e mínimos    █  $F_0$

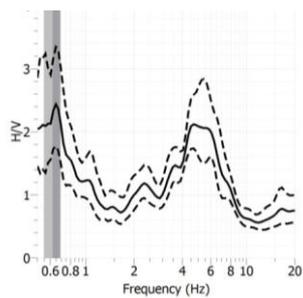
Registro 8



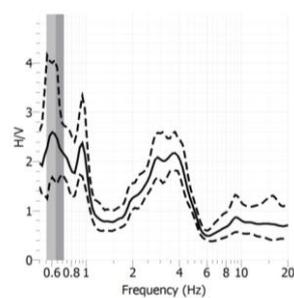
Registro 11



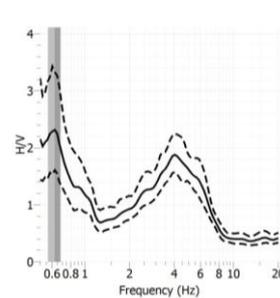
Registro 12



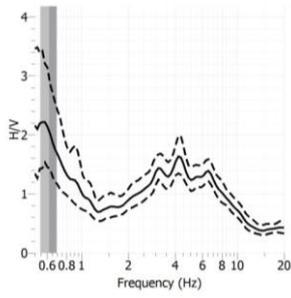
Registro 13



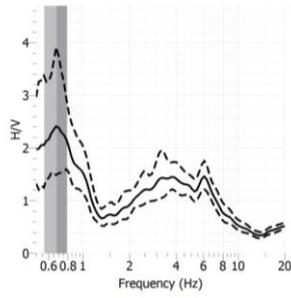
Registro 15



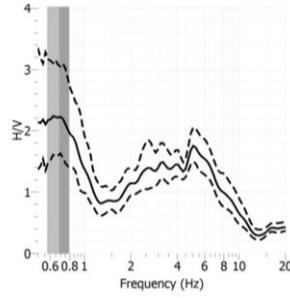
Registro 16



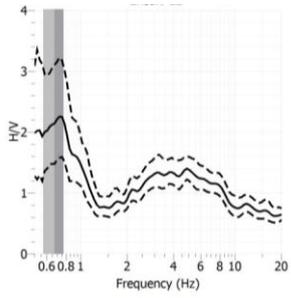
Registro 17



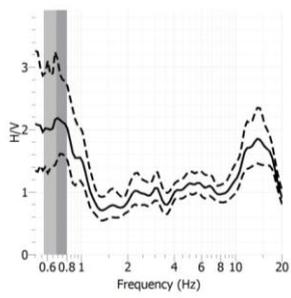
Registro 19



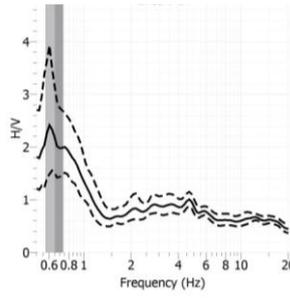
Registro 22



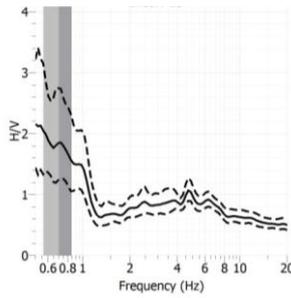
Registro 23



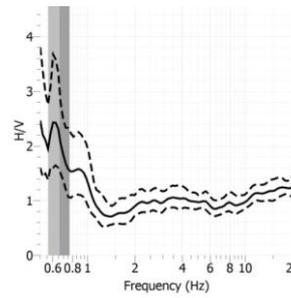
Registro 24



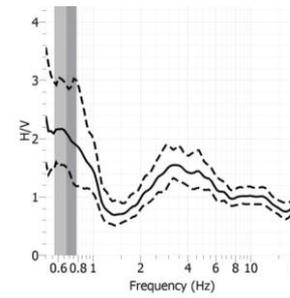
Registro 25



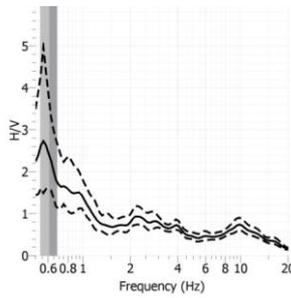
Registro 26



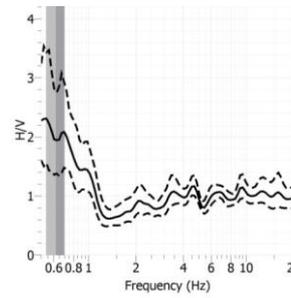
Registro 28



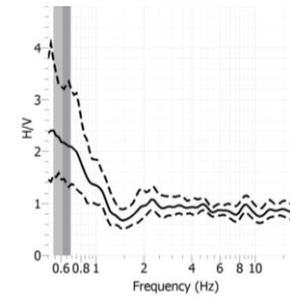
Registro 30



Registro 31

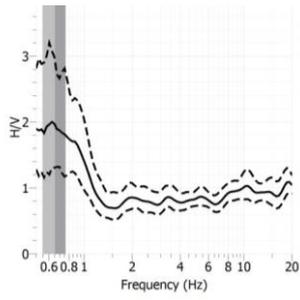


Registro 32

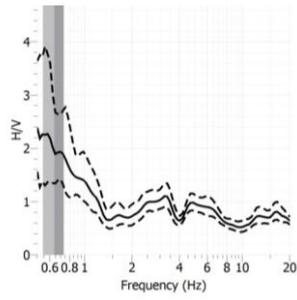


— média    - - - - máximos e mínimos    — F<sub>0</sub>

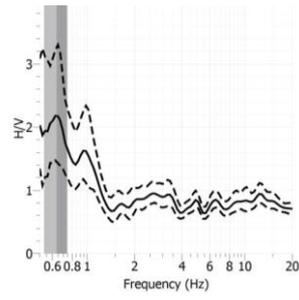
Registro 33



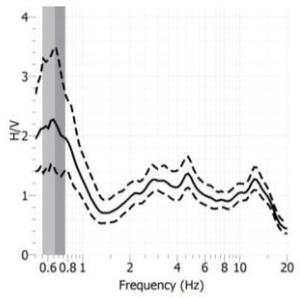
Registro 35



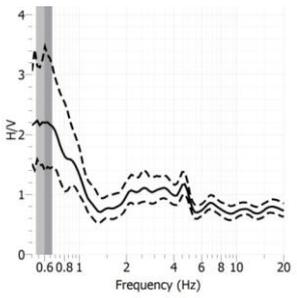
Registro 36



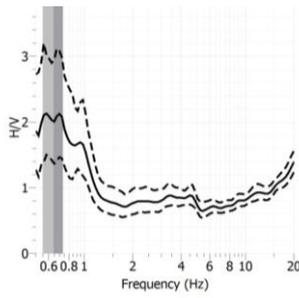
Registro 38



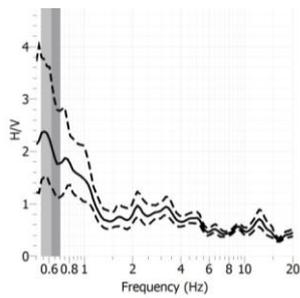
Registro 41



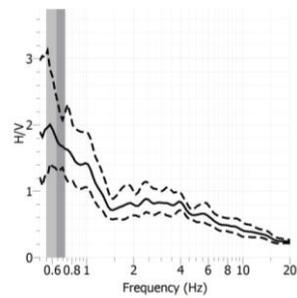
Registro 42



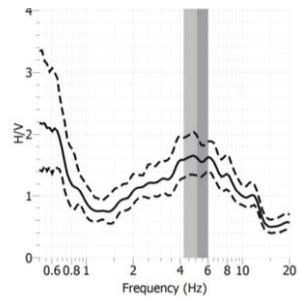
Registro 43



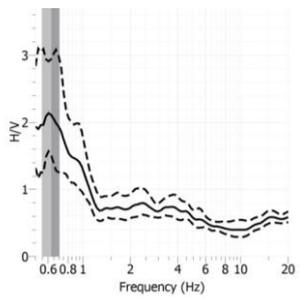
Registro 45



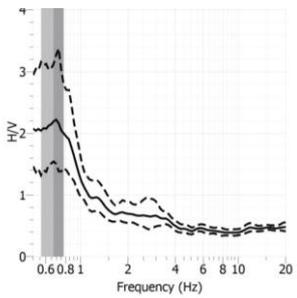
Registro 46



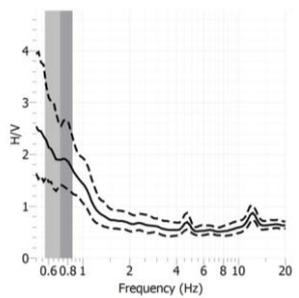
Registro 48



Registro 50

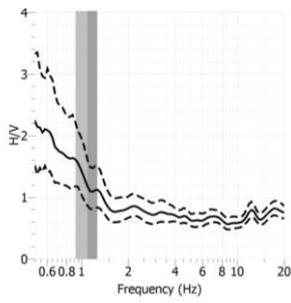


Registro 53

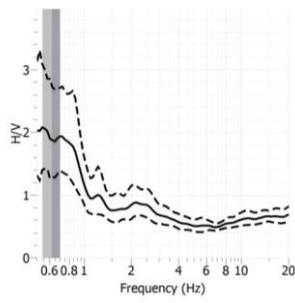


— média    - - - - máximos e mínimos    █ F<sub>0</sub>

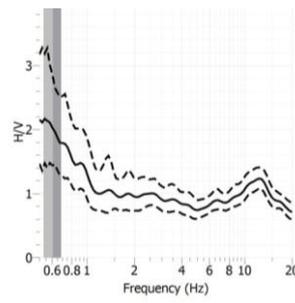
Registro 55



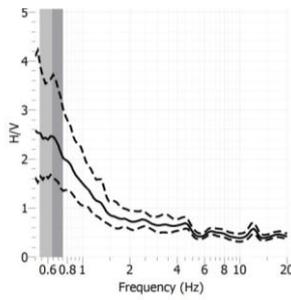
Registro 56



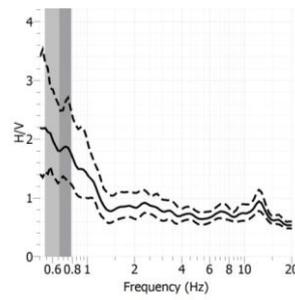
Registro 58



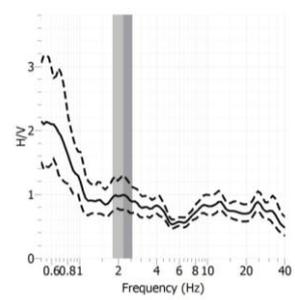
Registro 59



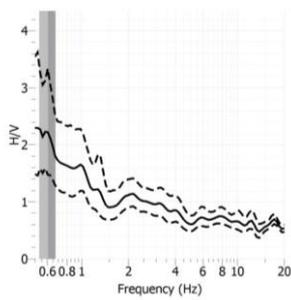
Registro 61



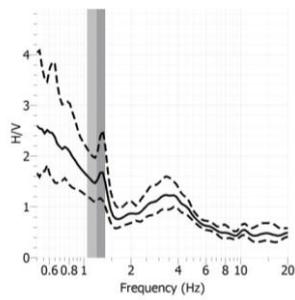
Registro 63



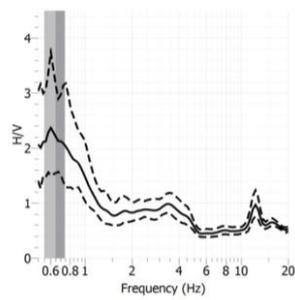
Registro 64



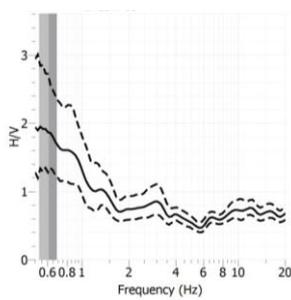
Registro 66



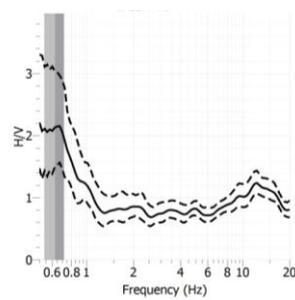
Registro 67



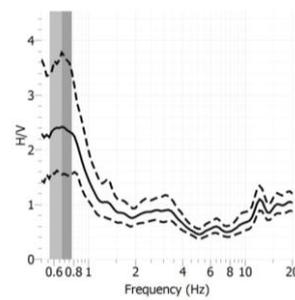
Registro 69



Registro 71

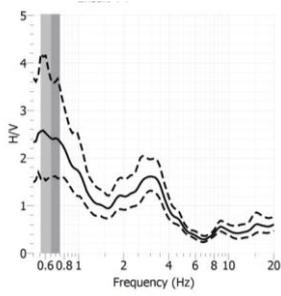


Registro 72

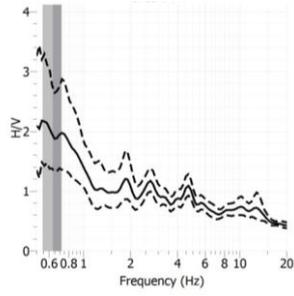


— média    - - - - máximos e mínimos    █  $F_0$

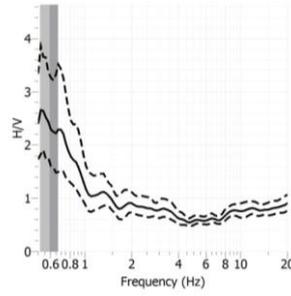
Registro 74



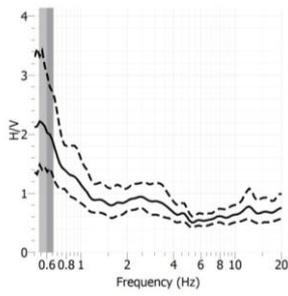
Registro 77



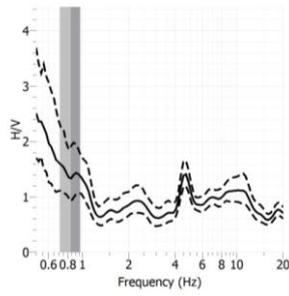
Registro 78



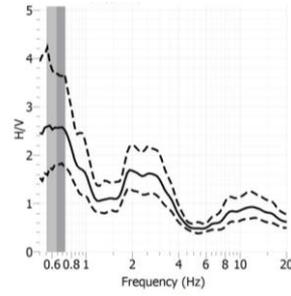
Registro 81



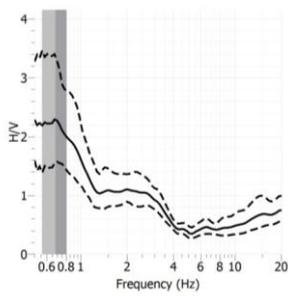
Registro 83



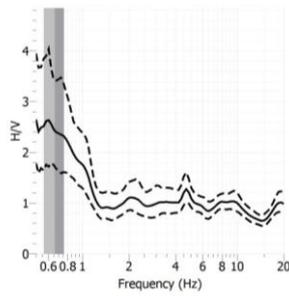
Registro 85



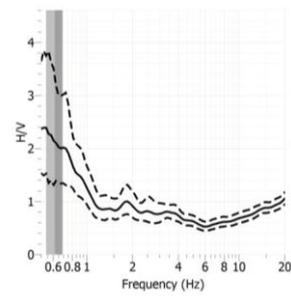
Registro 86



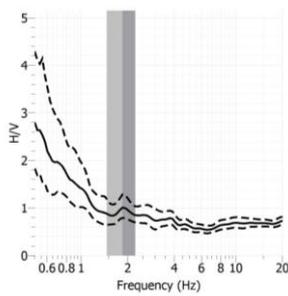
Registro 89



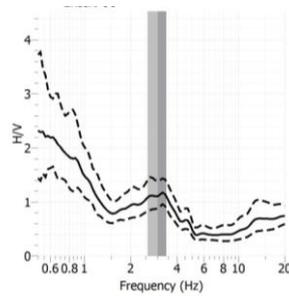
Registro 92



Registro 93

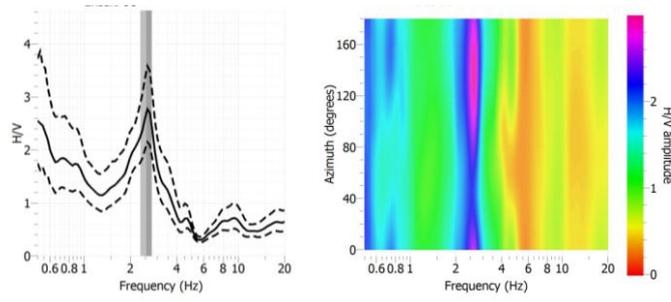


Registro 96

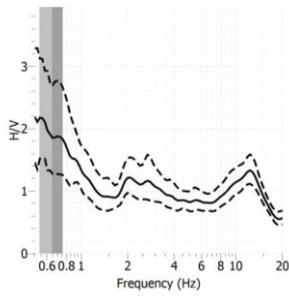


— média    - - - - máximos e mínimos    █ F<sub>0</sub>

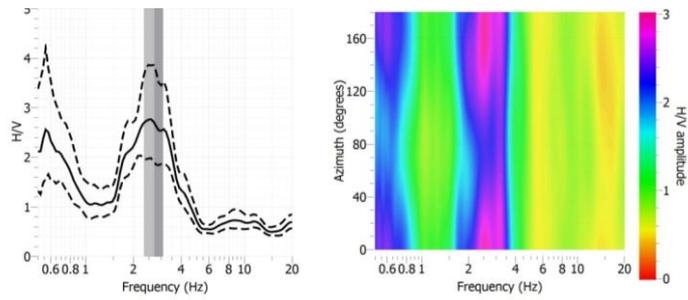
Registro 98



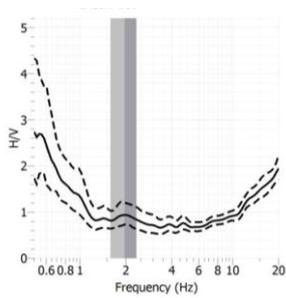
Registro 99



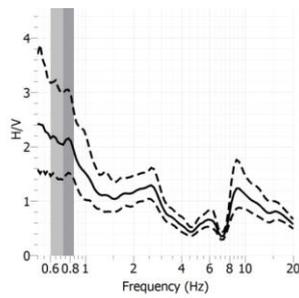
Registro 100



Registro 101

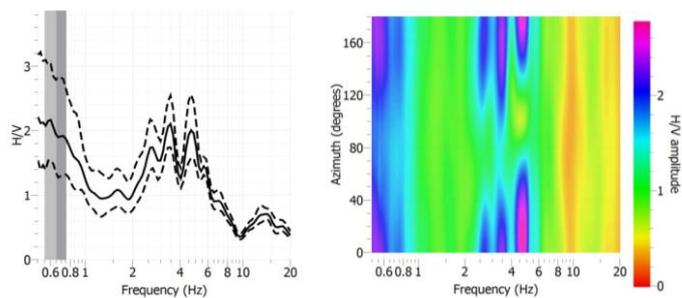


Registro 103

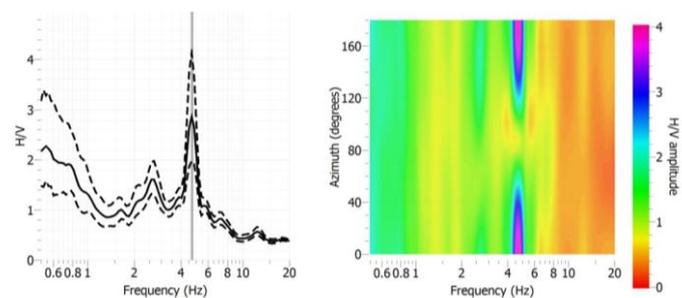


— média    - - - - - máximos e mínimos    █  $F_0$

Registro 104



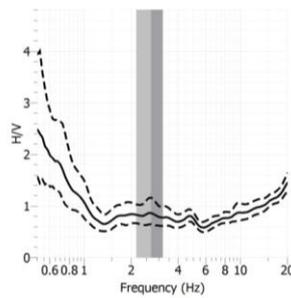
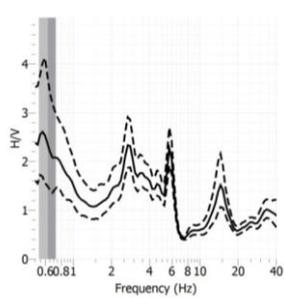
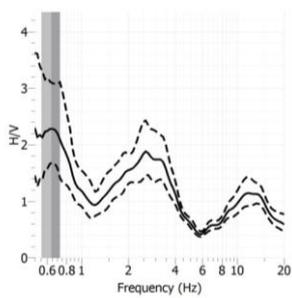
Registro 105



Registro 110

Registro 112

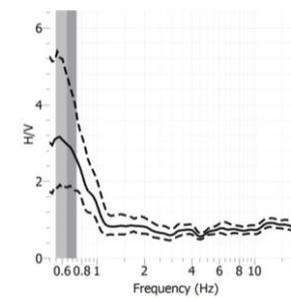
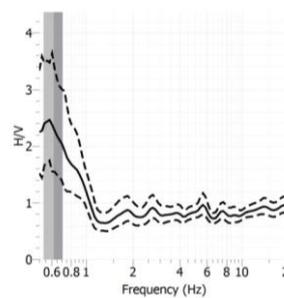
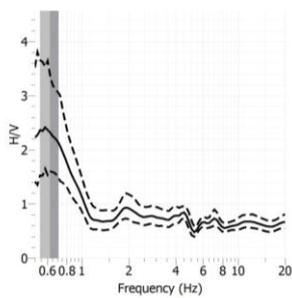
Registro 114



Registro 115

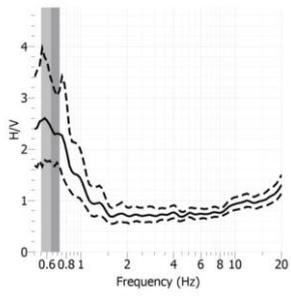
Registro 116

Registro 119

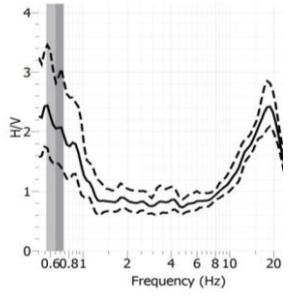


— média    - - - - máximos e mínimos     $F_0$

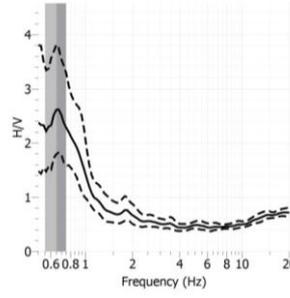
Registro 120



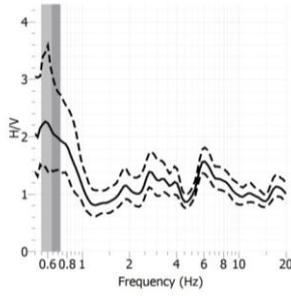
Registro 121



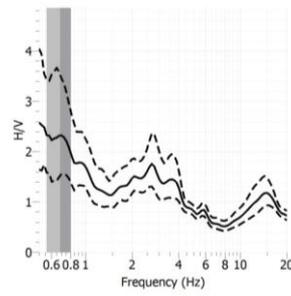
Registro 122



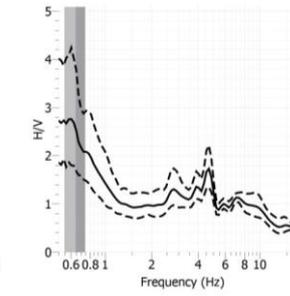
Registro 123



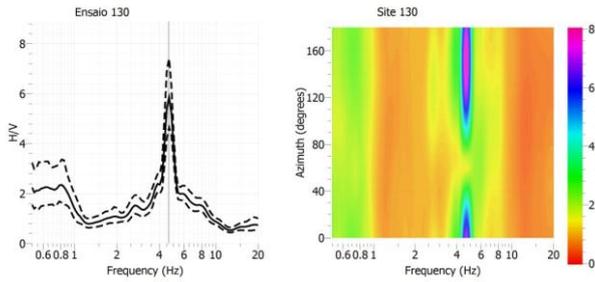
Registro 126



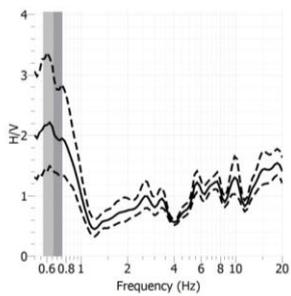
Registro 128



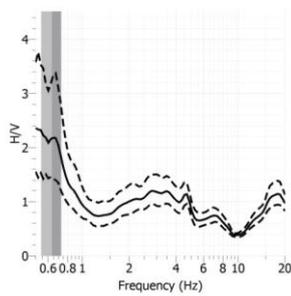
Registro 130



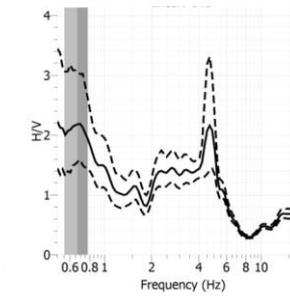
Registro 131



Registro 140

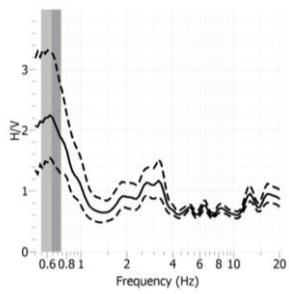


Registro 141

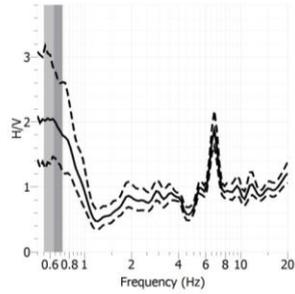


— média    - - - - máximos e mínimos    █ F<sub>0</sub>

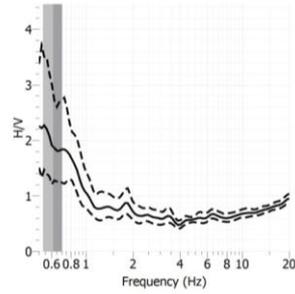
Registro 142



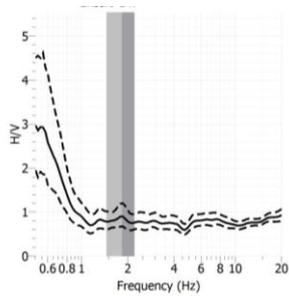
Registro 143



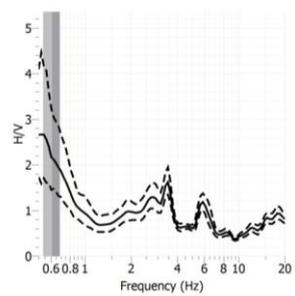
Registro 146



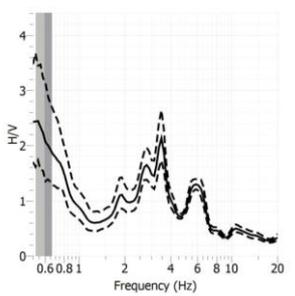
Registro 147



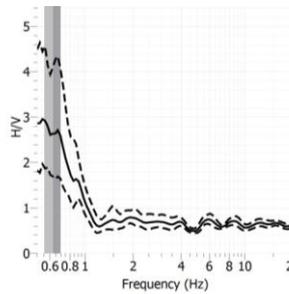
Registro 150



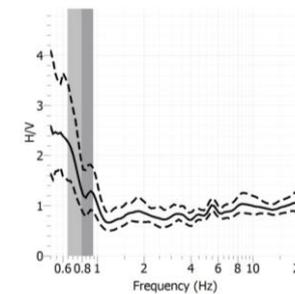
Registro 152



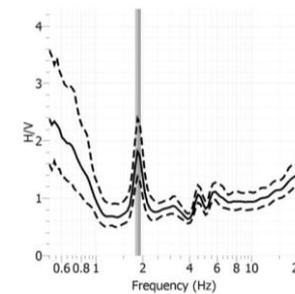
Registro 157



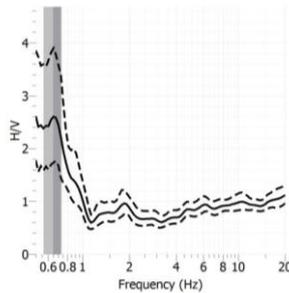
Registro 160



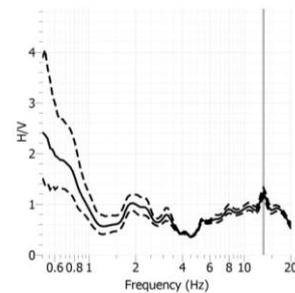
Registro 161



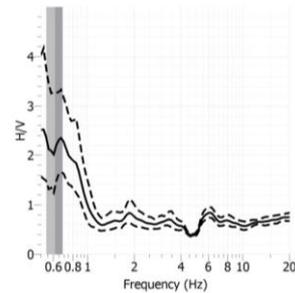
Registro 162



Registro 168

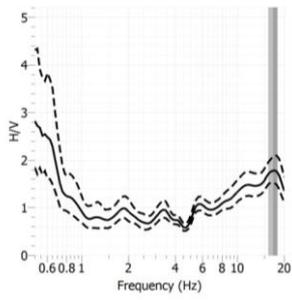


Registro 170

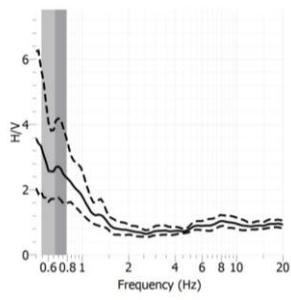


— média    - - - - - máximos e mínimos    █ F<sub>0</sub>

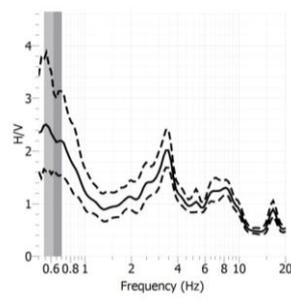
Registro 171



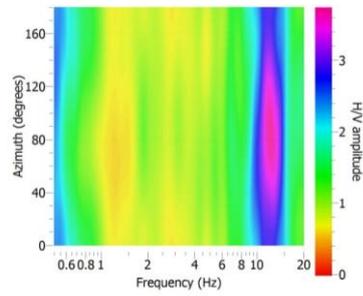
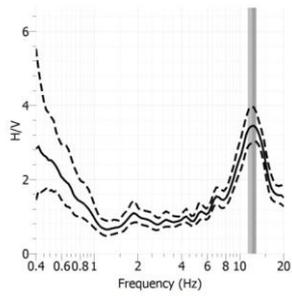
Registro 175



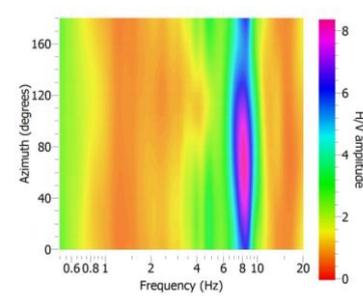
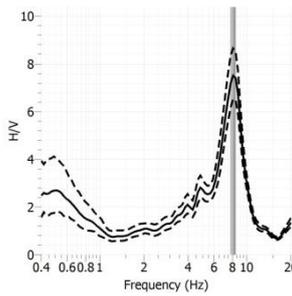
Registro 176



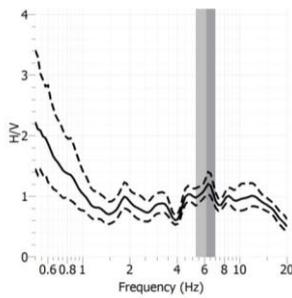
Registro 181



Registro 182

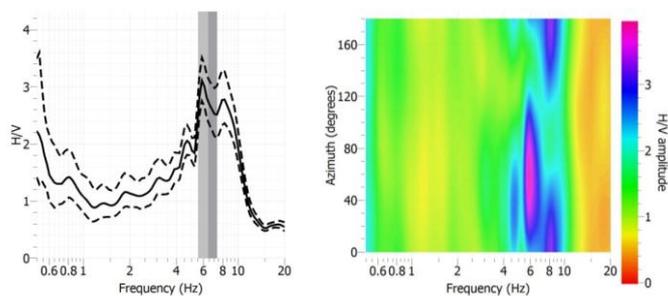


Registro 183

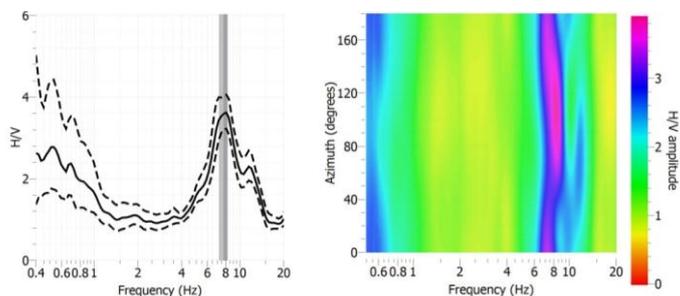


— média    - - - - - máximos e mínimos    —  $F_0$

Registo 184



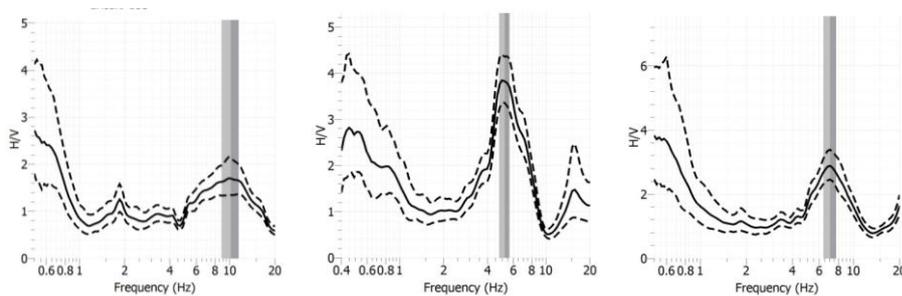
Registo 187



Registo 188

Registo 191

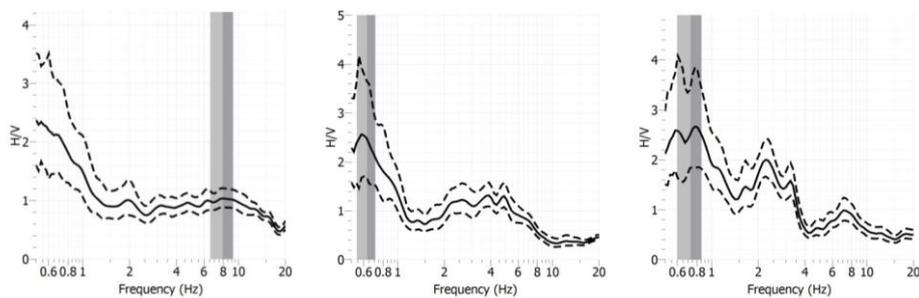
Registo 195



Registo 197

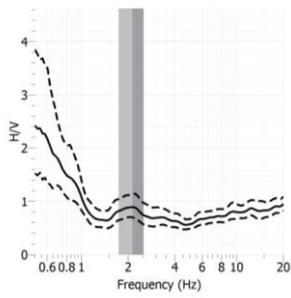
Registo 199

Registo 204

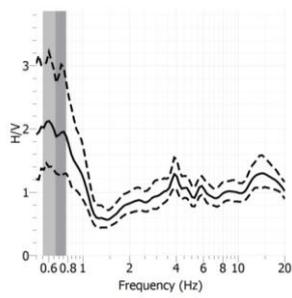


— média    - - - - máximos e mínimos    █  $F_0$

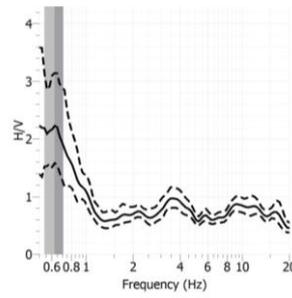
Registro 221



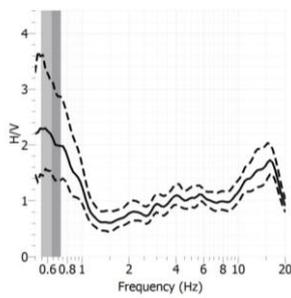
Registro 222



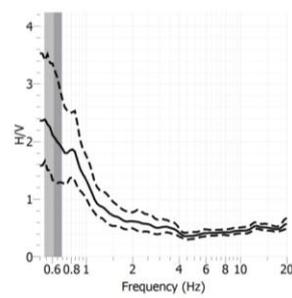
Registro 223



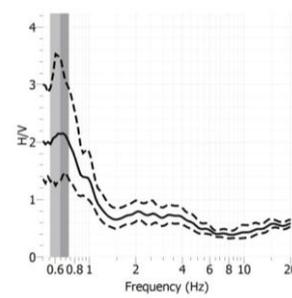
Registro 225



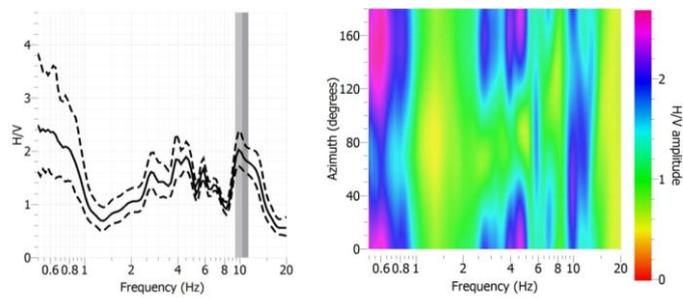
Registro 226



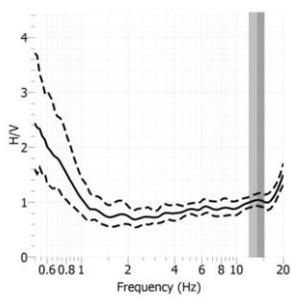
Registro 227



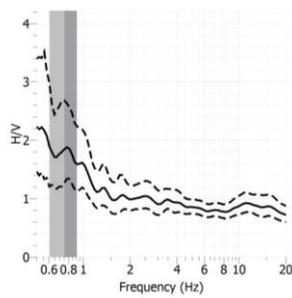
Registro 229



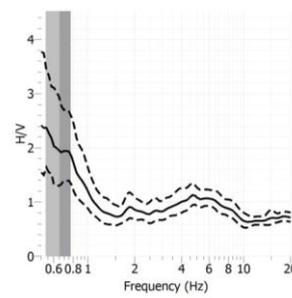
Registro 230



Registro 231

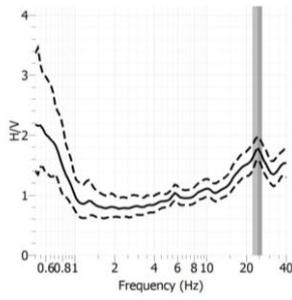


Registro 232

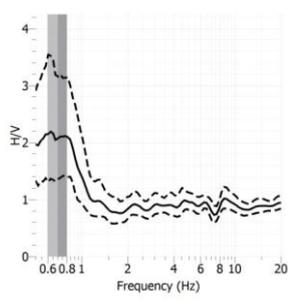


— média    - - - - - máximos e mínimos    █  $F_0$

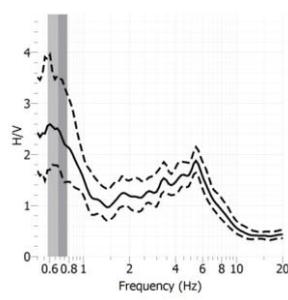
Registro 233



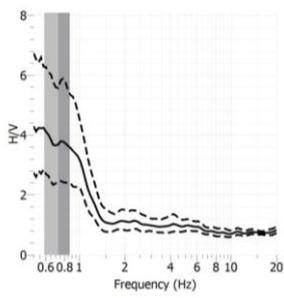
Registro 234



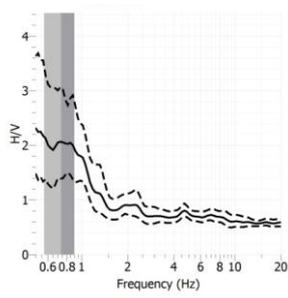
Registro 237



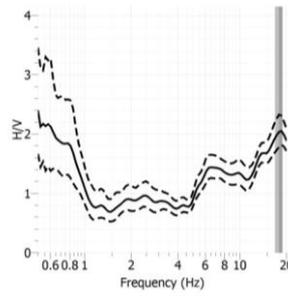
Registro 238



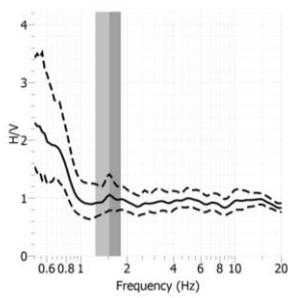
Registro 241



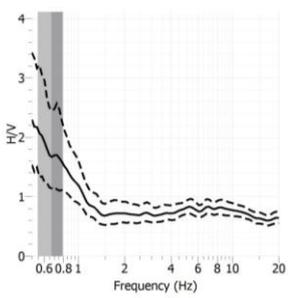
Registro 244



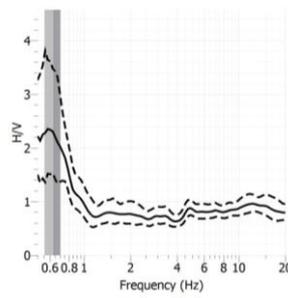
Registro 123



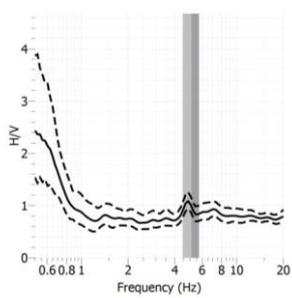
Registro 247



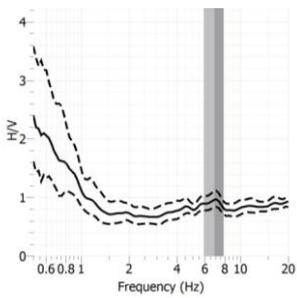
Registro 249



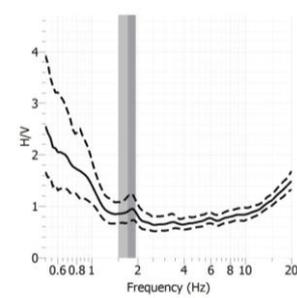
Registro 250



Registro 252

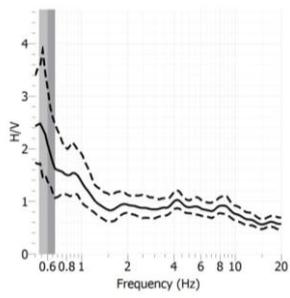


Registro 253

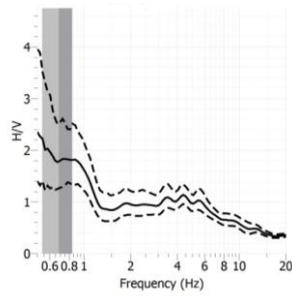


— média    - - - - máximos e mínimos    █ F<sub>0</sub>

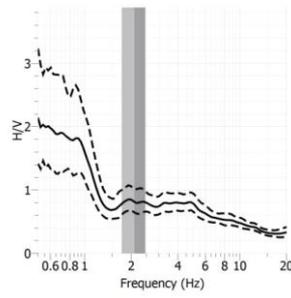
Registro 254



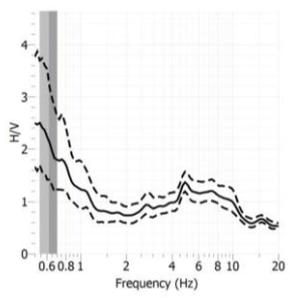
Registro 255



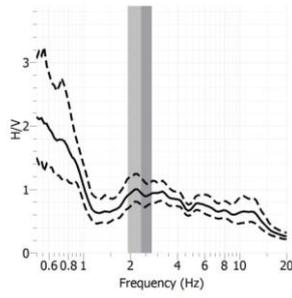
Registro 256



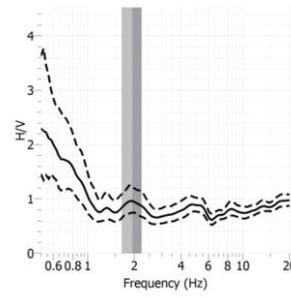
Registro 257



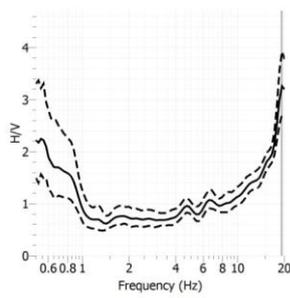
Registro 258



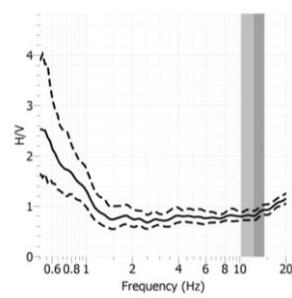
Registro 301



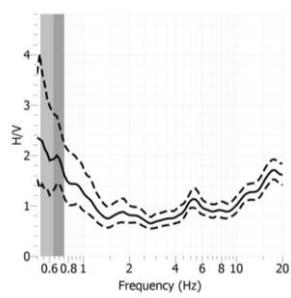
Registro 302



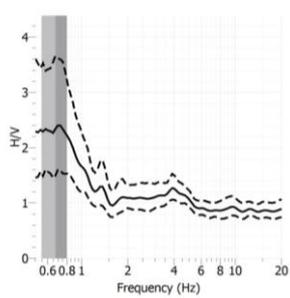
Registro 304



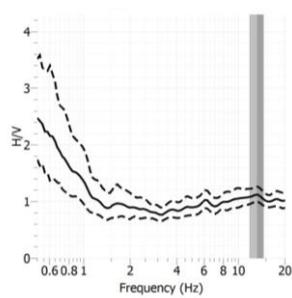
Registro 305



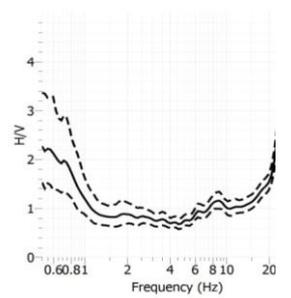
Registro 306



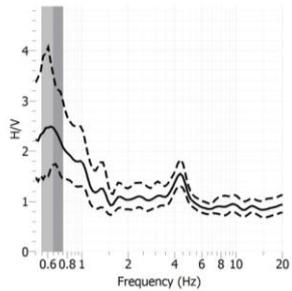
Registro 308



Registro 309



— média    - - - - máximos e mínimos    █ F<sub>0</sub>



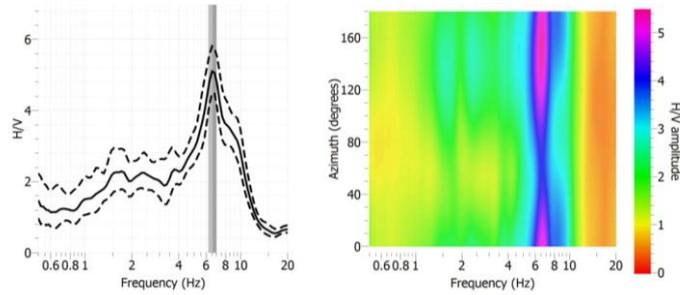
— média    - - - - máximos e mínimos     $F_0$



# ANEXO II – CURVAS H/V E GRÁFICOS DE FREQUÊNCIA-AZIMUTE DE SETÚBAL

— média      - - - - - máximos e mínimos      █  $F_0$

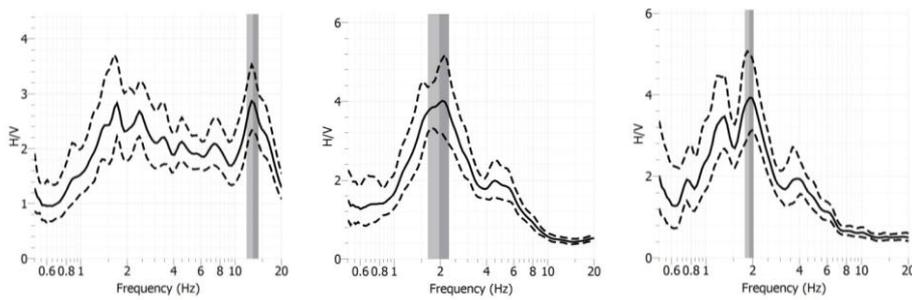
Registo 400



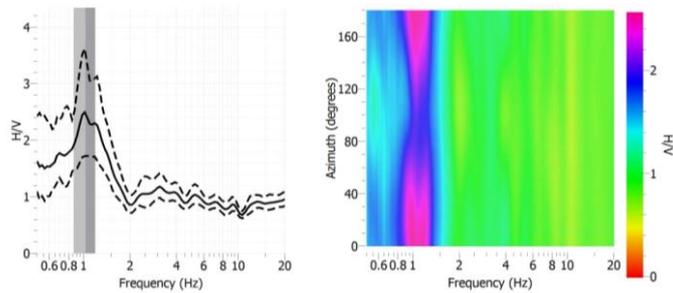
Registo 401

Registo 402

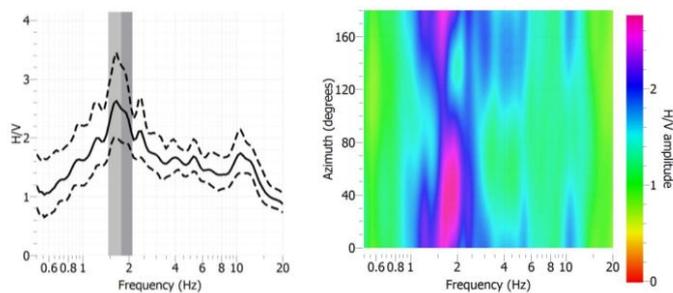
Registo 403



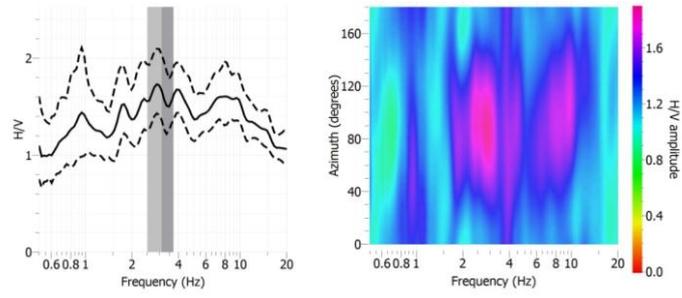
Registo 404



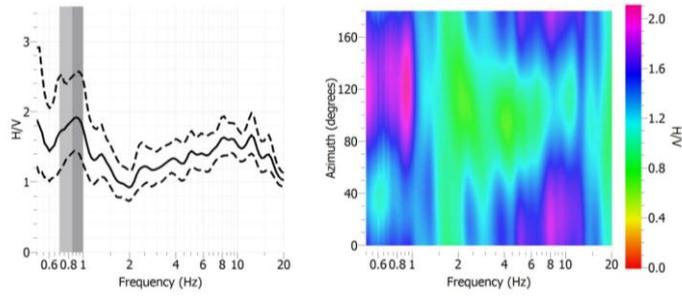
Registo 405



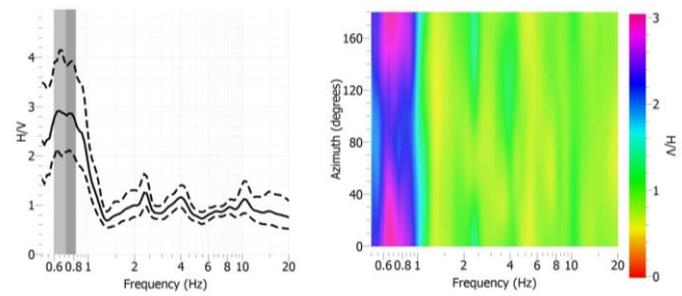
Registo 406



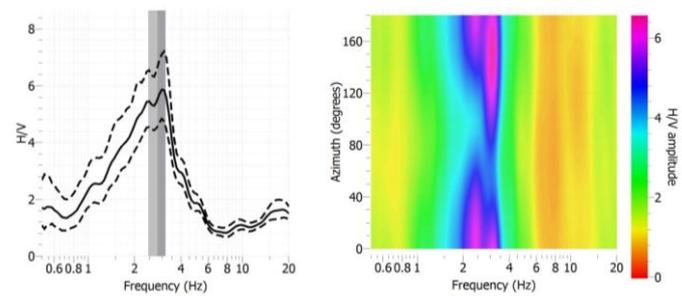
Registo 407



Registo 409

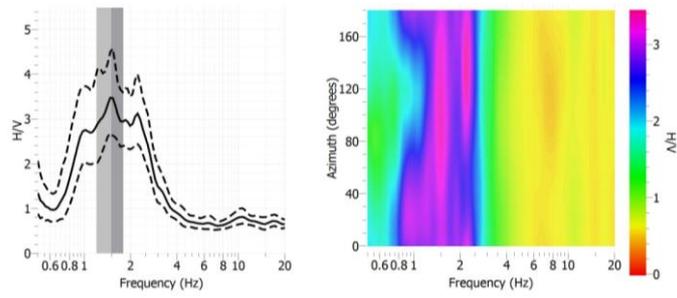


Registo 410

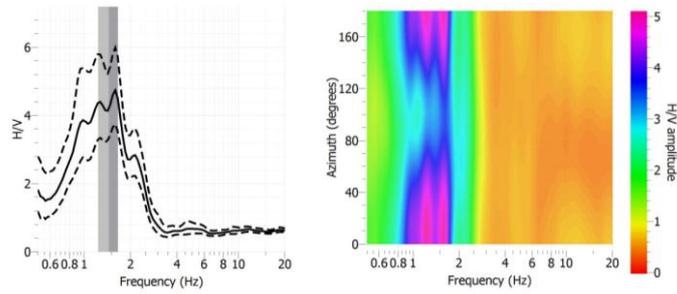


— média    - - - - máximos e mínimos     $F_0$

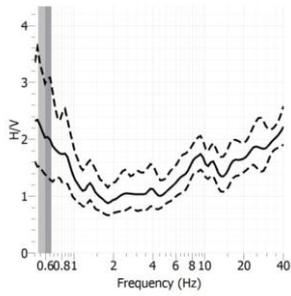
Registro 411



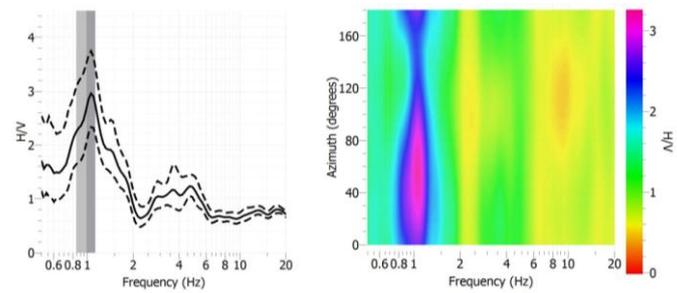
Registro 412



Registro 413

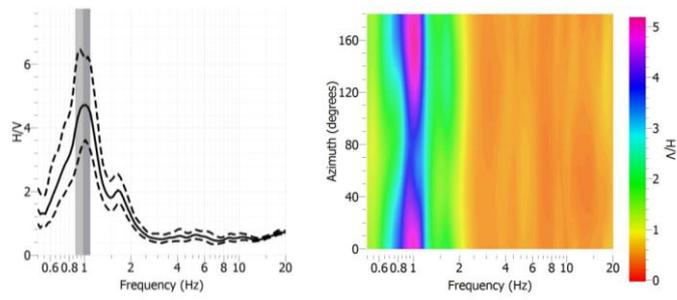


Registro 414

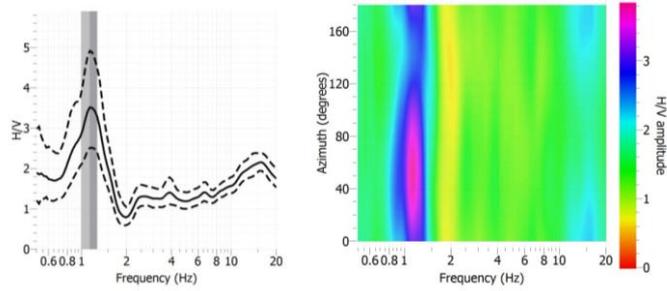


— média    - - - - máximos e mínimos     $F_0$

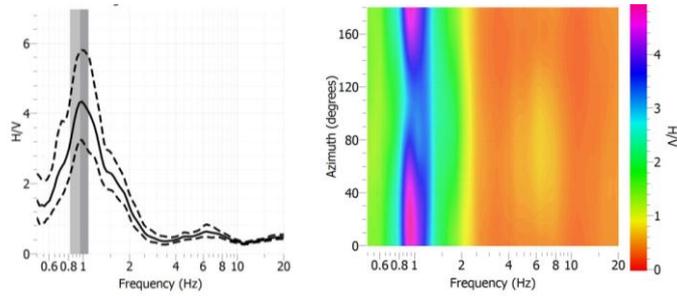
Registo 415



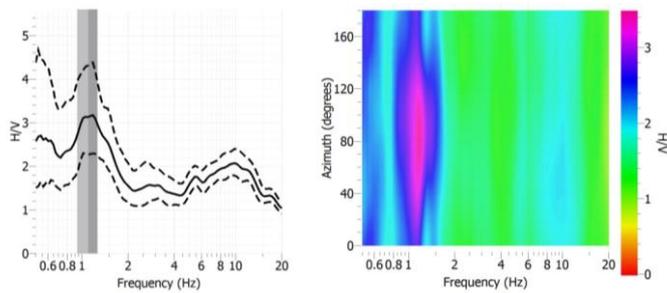
Registo 416



Registo 417

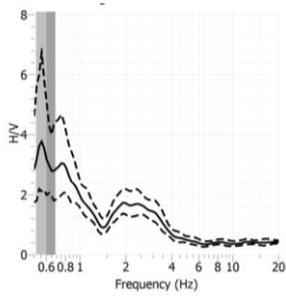


Registo 418

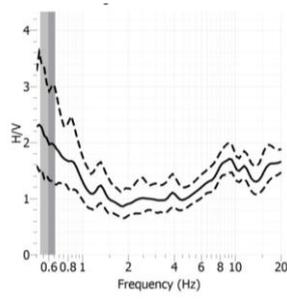


— média    - - - - máximos e mínimos     $F_0$

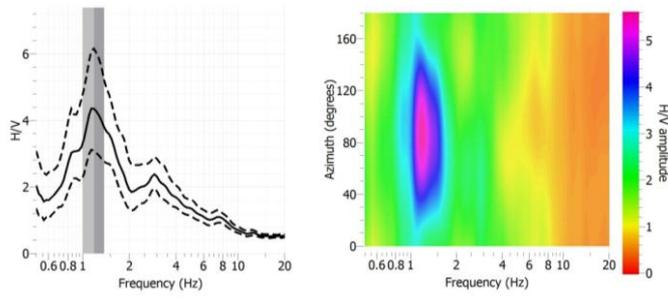
Registro 419



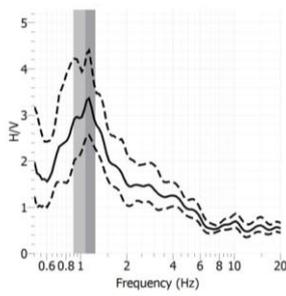
Registro 420



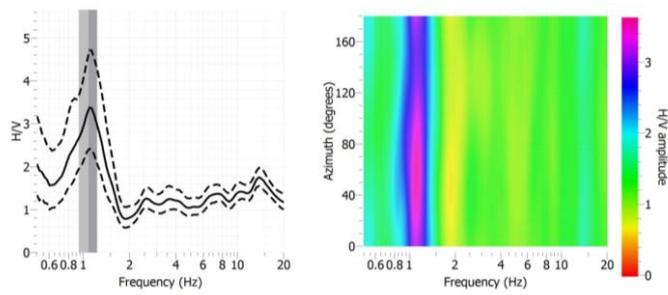
Registro 421



Registro 423

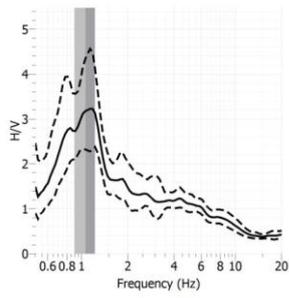


Registro 424

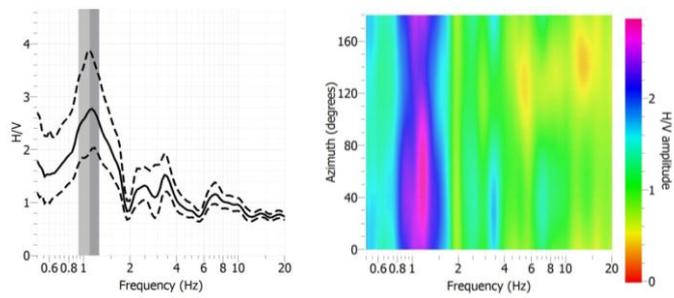


— média    - - - - máximos e mínimos      $F_0$

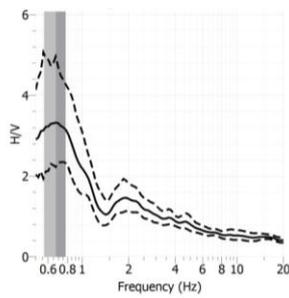
Registro 425



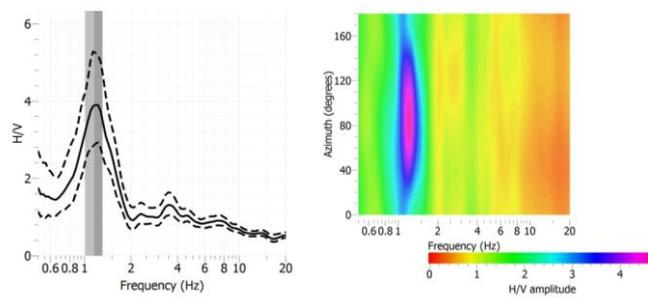
Registro 427



Registro 428

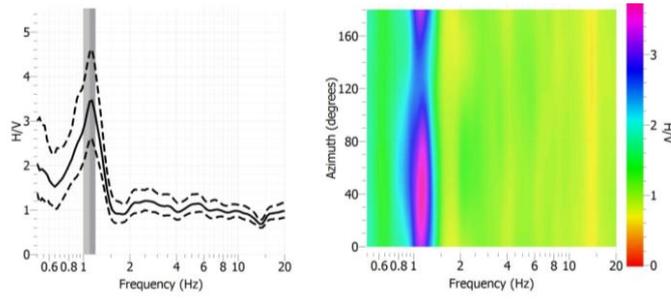


Registro 429

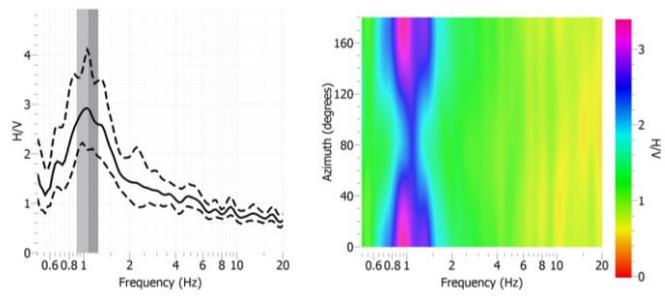


— média    - - - - máximos e mínimos    █ F<sub>0</sub>

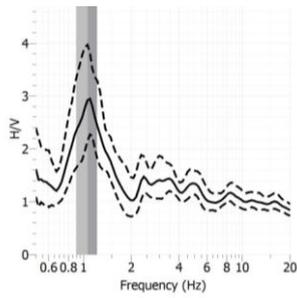
Registro 430



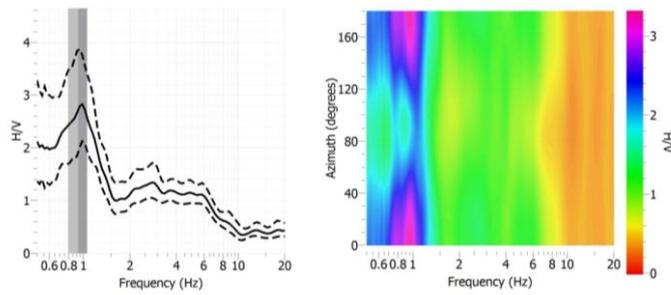
Registro 431



Registro 432

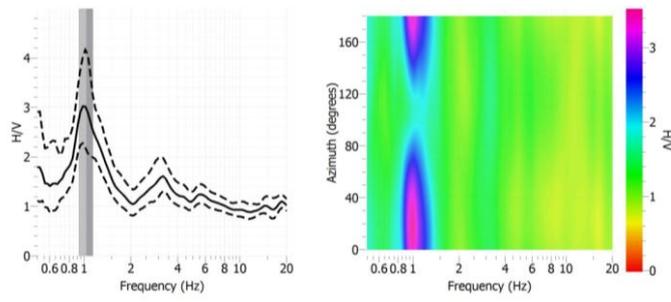


Registro 433

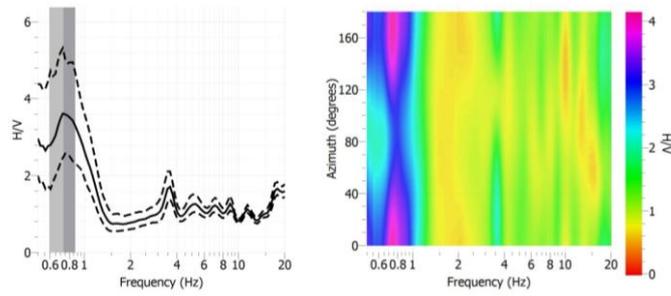


— média    - - - - máximos e mínimos     $F_0$

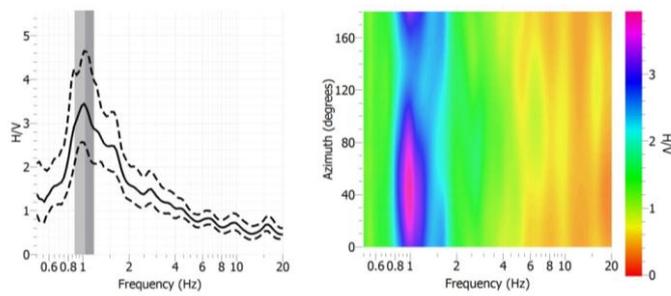
Registro 434



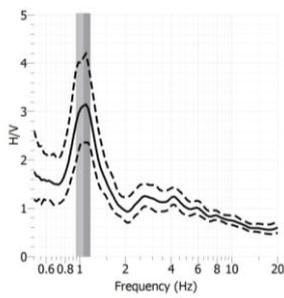
Registro 435



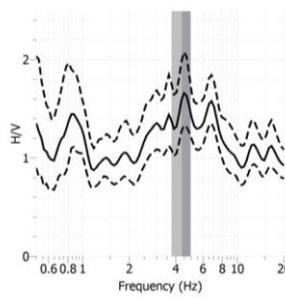
Registro 436



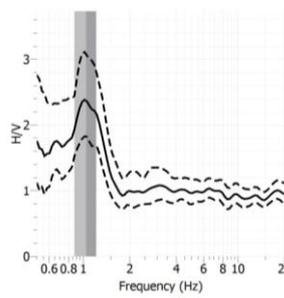
Registro 437



Registro 438

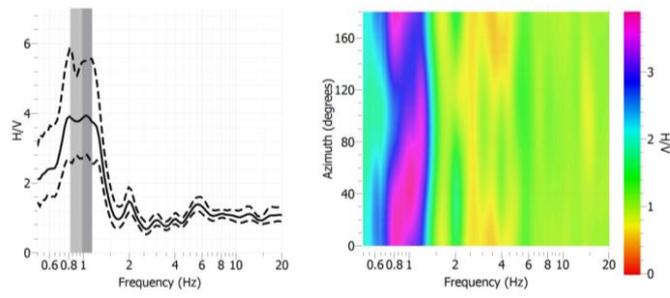


Registro 439

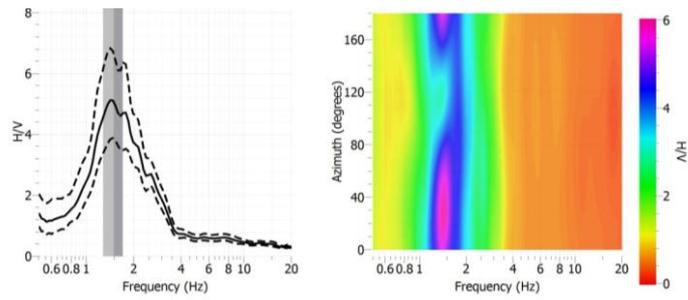


— média    - - - - máximos e mínimos    █  $F_0$

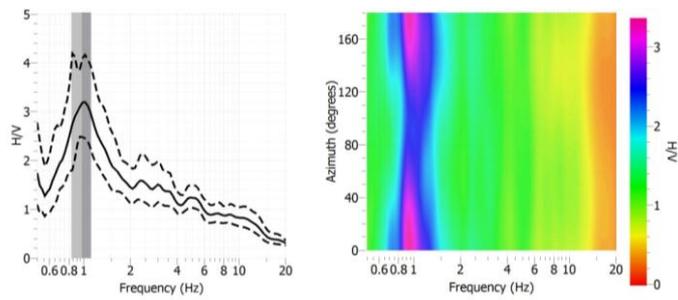
Registo 440



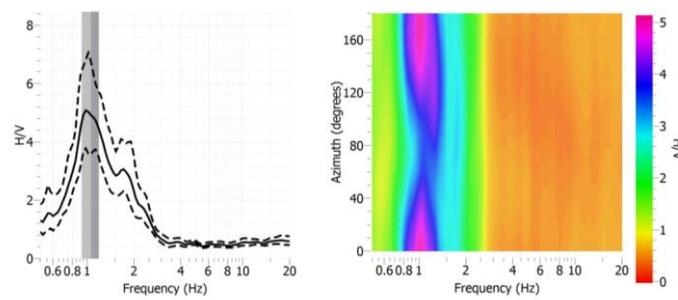
Registo 441



Registo 442



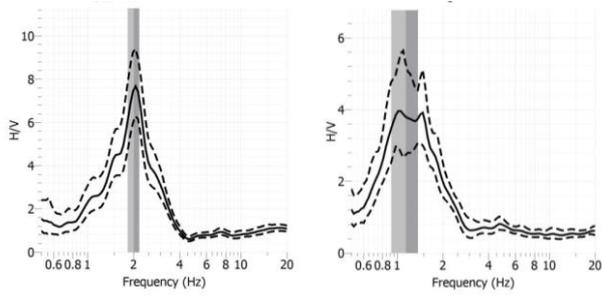
Registo 443



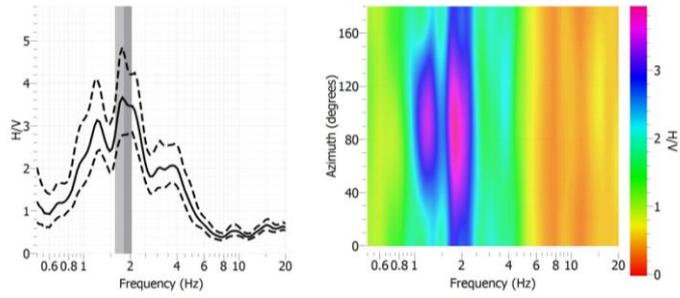
— média    - - - - máximos e mínimos     $F_0$

Registro 444

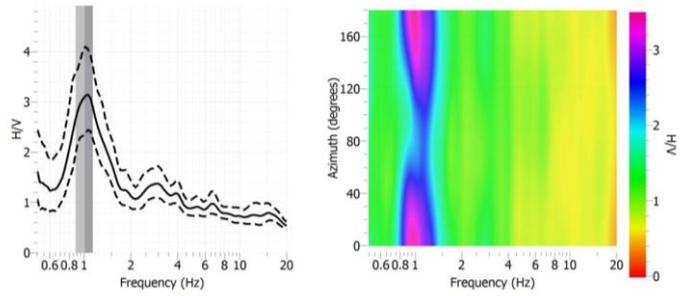
Registro 445



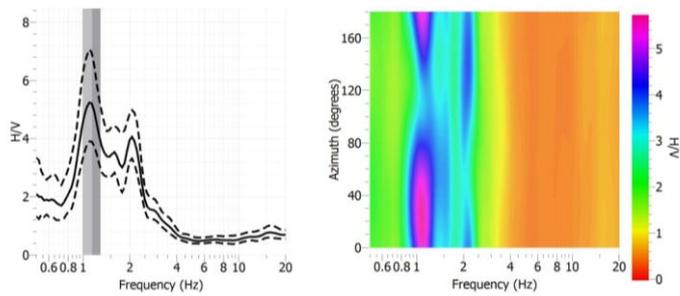
Registro 446



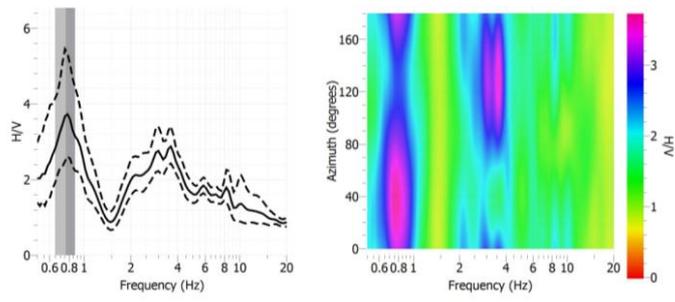
Registro 447



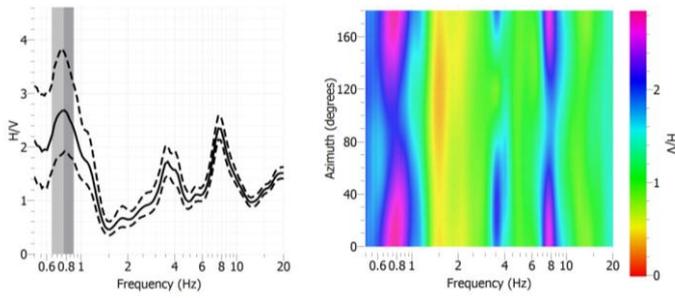
Registro 448



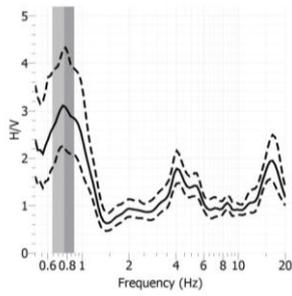
Registro 449



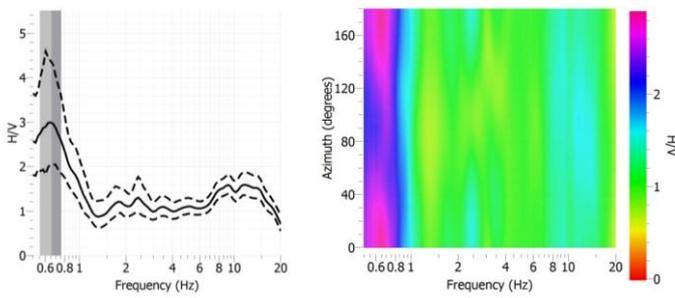
Registro 450



Registro 451

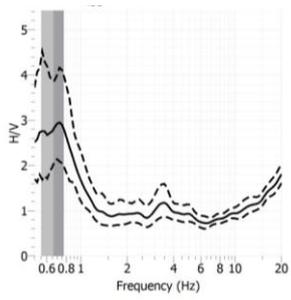


Registro 452

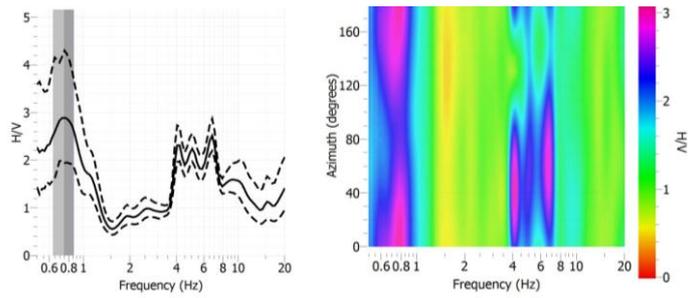


— média    - - - - máximos e mínimos     F<sub>0</sub>

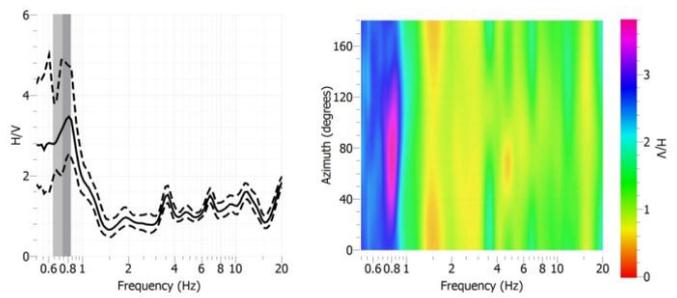
Registro 453



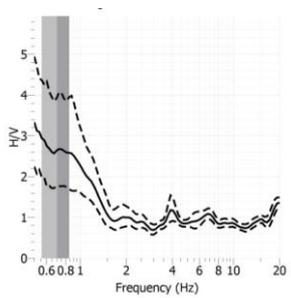
Registro 454



Registro 456

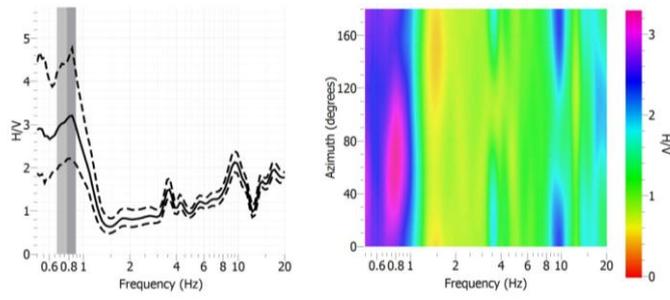


Registro 457



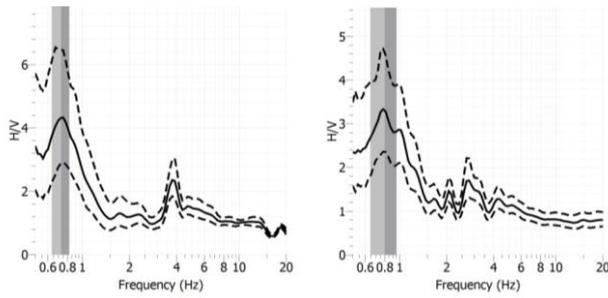
— média    - - - - máximos e mínimos      $F_0$

Registro 458

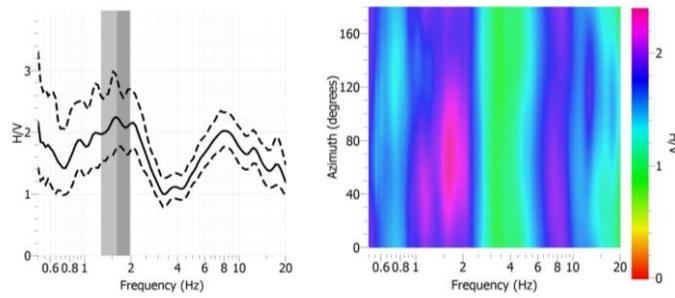


Registro 459

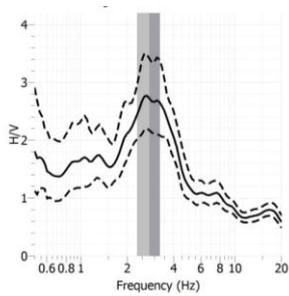
Registro 460



Registro 461

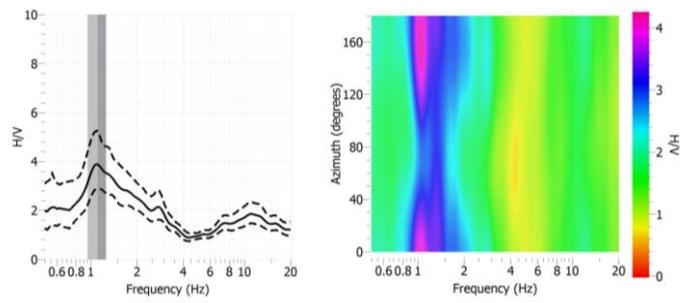


Registro 462



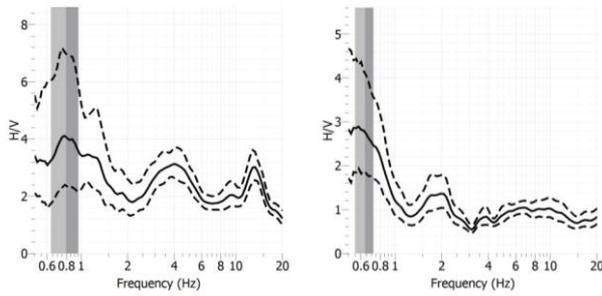
— média    - - - - máximos e mínimos     $F_0$

Registro 463

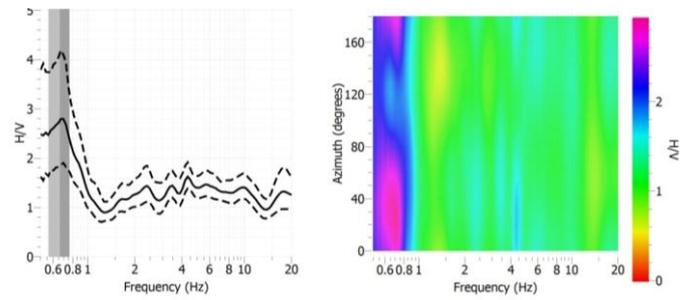


Registro 464

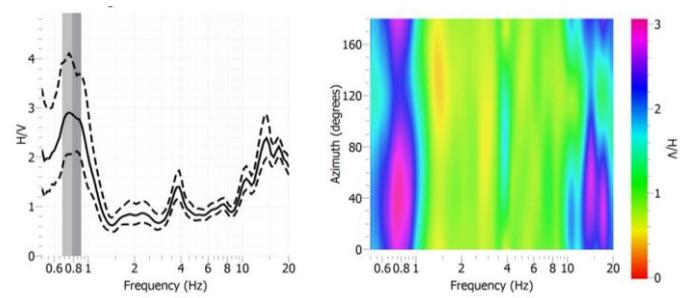
Registro 465



Registro 466

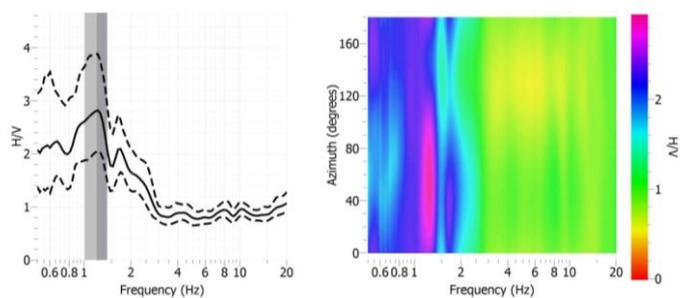


Registro 467

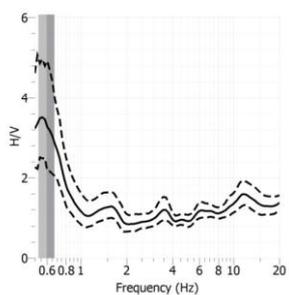


— média    - - - - máximos e mínimos     $F_0$

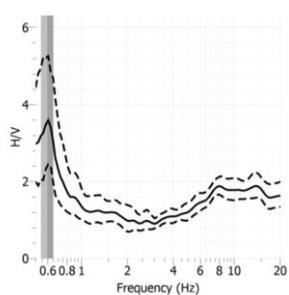
Registro 468



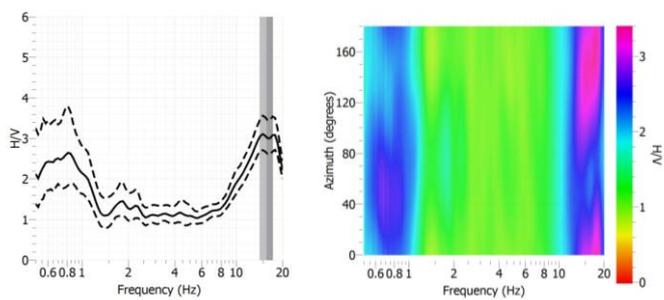
Registro 469



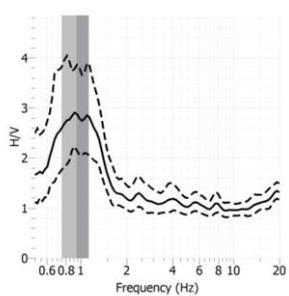
Registro 470



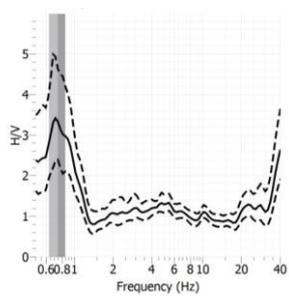
Registro 471



Registro 472

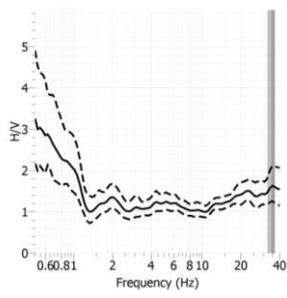


Registro 473

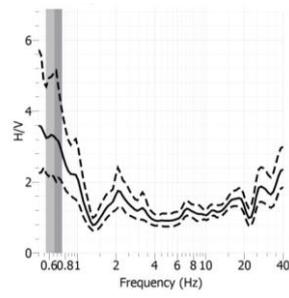


— média    - - - - máximos e mínimos    █  $F_0$

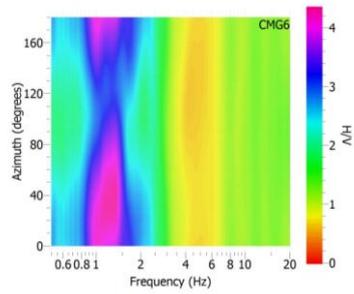
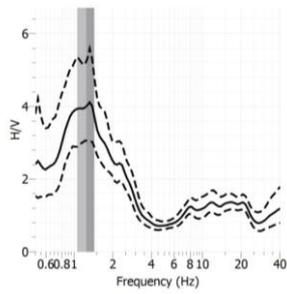
Registro 474



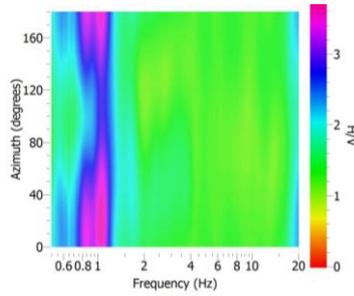
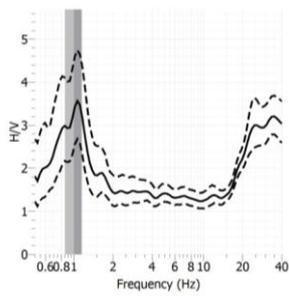
Registro 475



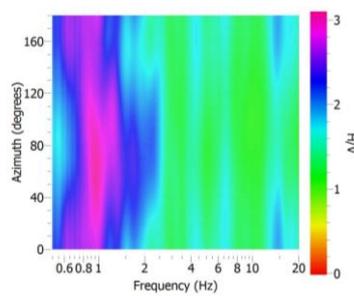
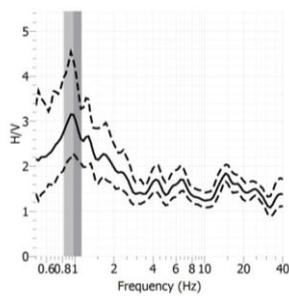
Registro 476



Registro 477

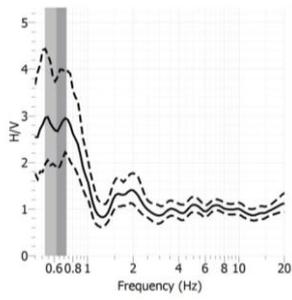


Registro 478

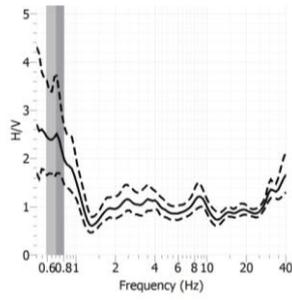


— média    - - - - máximos e mínimos      $F_0$

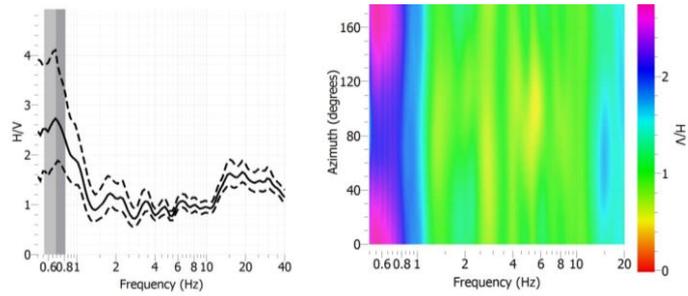
Registro 479



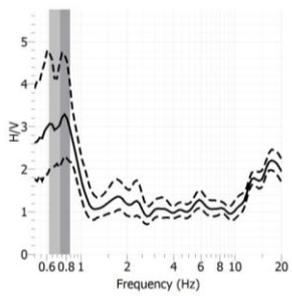
Registro 480



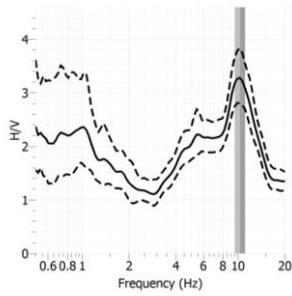
Registro 481



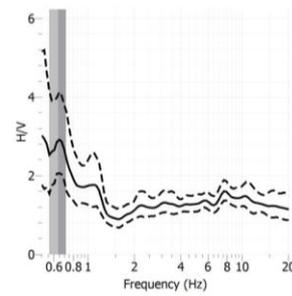
Registro 482



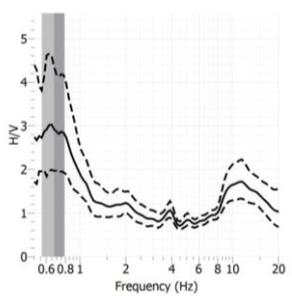
Registro 483



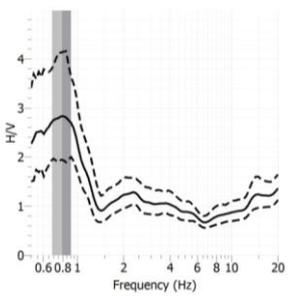
Registro 484



Registro 485

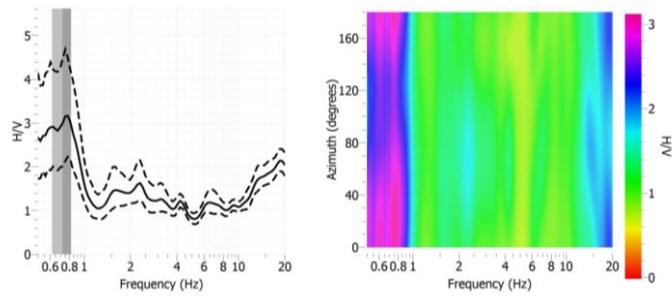


Registro 486

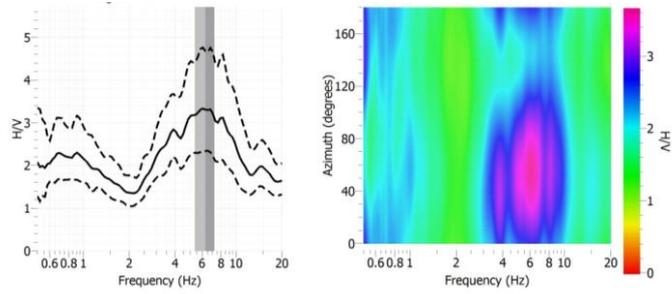


— média    - - - - máximos e mínimos     $F_0$

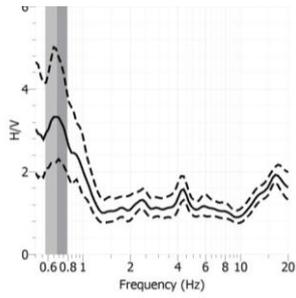
Registo 487



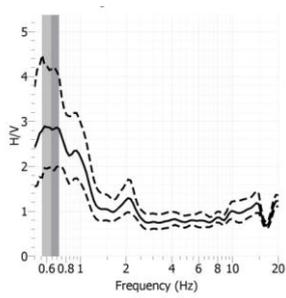
Registo 488



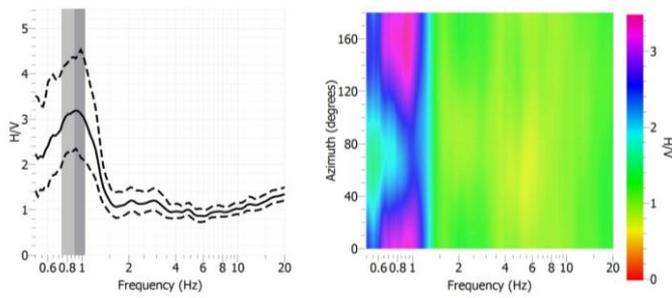
Registo 489



Registo 490

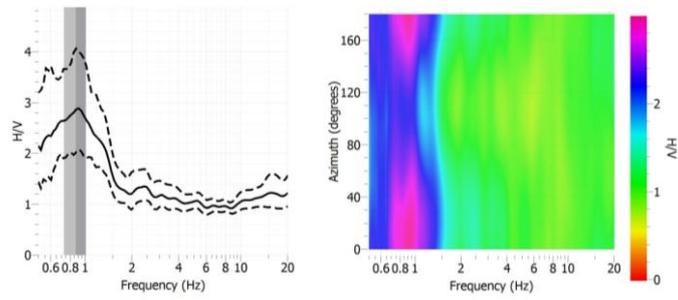


Registo 491

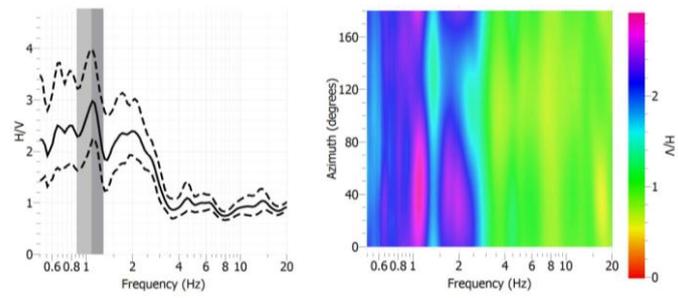


— média    - - - - máximos e mínimos     $F_0$

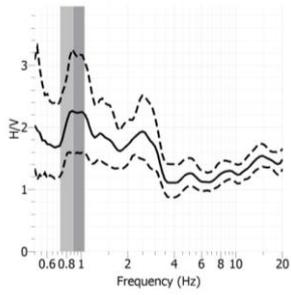
Registo 492



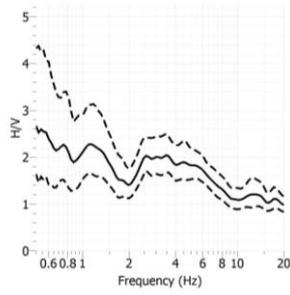
Registo 493



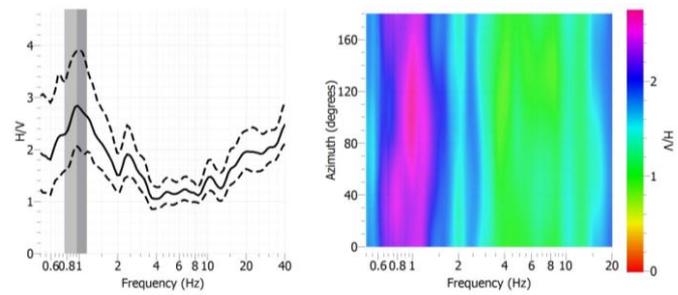
Registo 494



Registo 495

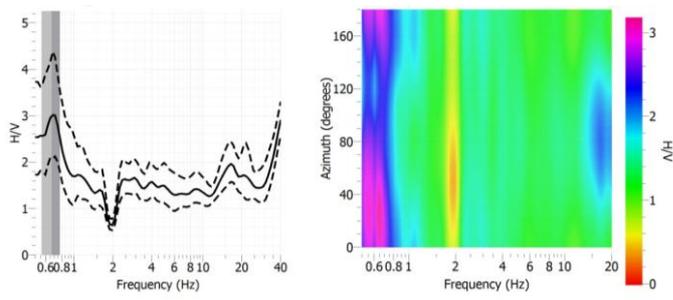


Registo 496

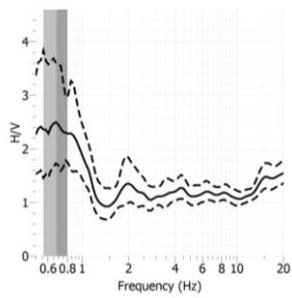


— média    - - - - máximos e mínimos     $\text{F}_0$

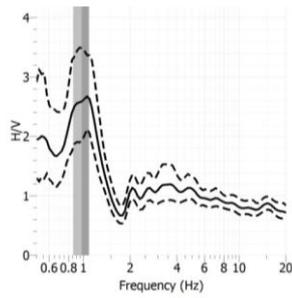
Registro 497



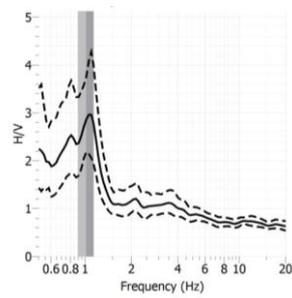
Registro 499



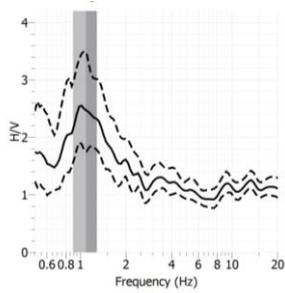
Registro 500



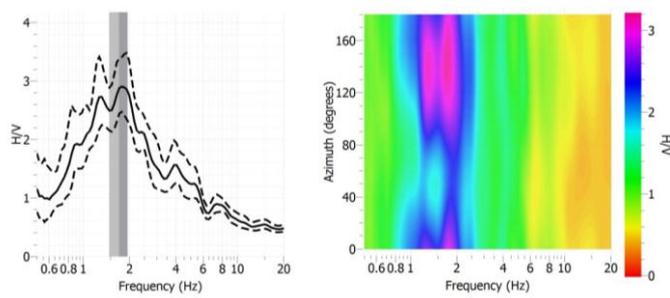
Registro 501



Registro 502

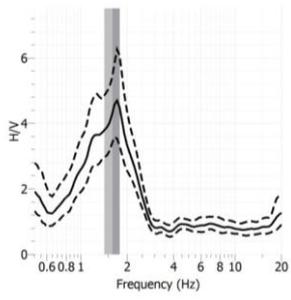


Registro 503

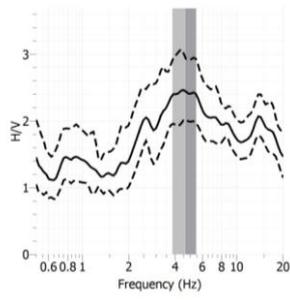


— média    - - - - máximos e mínimos     $F_0$

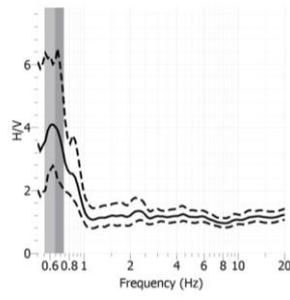
Registro 504



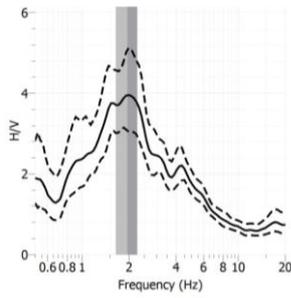
Registro 505



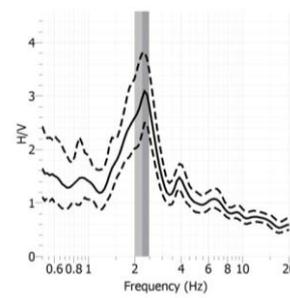
Registro 506



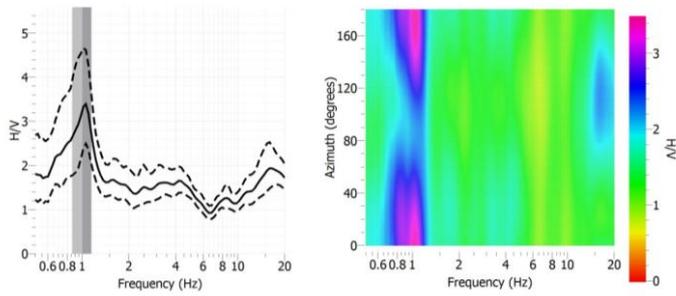
Registro 507



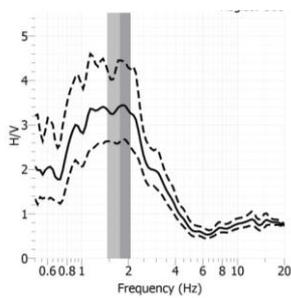
Registro 508



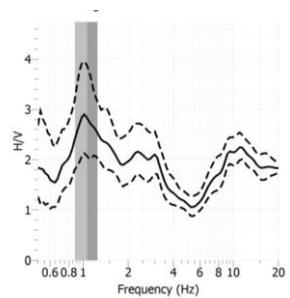
Registro 509



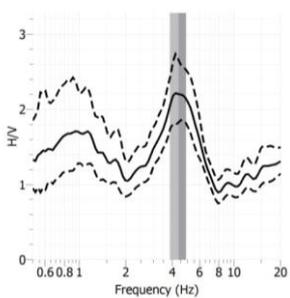
Registro 510



Registro 511

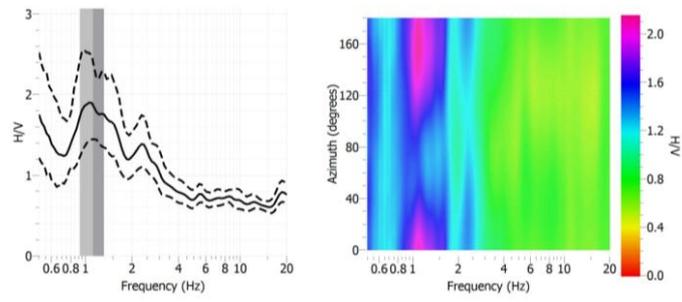


Registro 512



— média    - - - - máximos e mínimos    █ F<sub>0</sub>

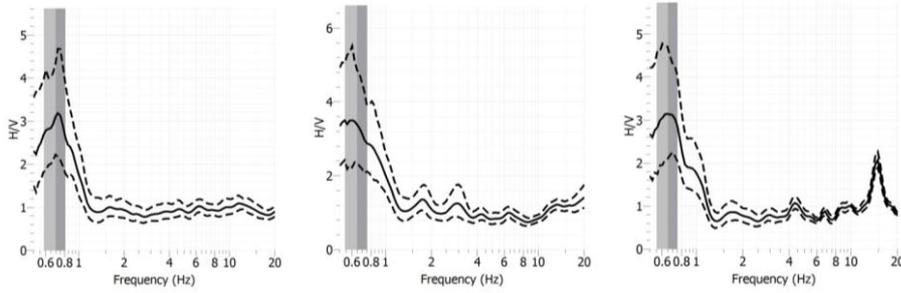
Registro 513



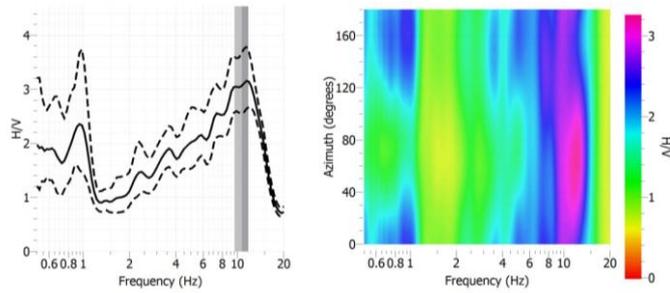
Registro 514

Registro 515

Registro 520



Registro 521



— média    - - - - - máximos e mínimos    —  $F_0$

## ANEXO III - RESULTADOS OBTIDOS COM AS CURVAS H/V NO BARREIRO

\* - Curva sem pico definido; a) Pico de frequência superior a 20 Hz.

Registro	F <sub>0</sub> (Hz)	F <sub>1</sub> (Hz)	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	Unidades Litoestratigráficas
8	0,6	2,2	2,9	2,4	Holocénico
11	4,5		3,0		Holocénico
12	0,6	4,7	2,4	2,1	Holocénico
13	0,6	3,7	2,6	2,2	Holocénico
15	0,6	4,0	2,3	1,9	Holocénico
16	0,6	4,2	2,2	1,6	Holocénico
17	0,7	6,1	2,4	1,5	Holocénico
19	0,6	5,0	2,2	1,6	Holocénico
22	0,7	4,9	2,3	1,4	Holocénico
23	0,7	13,8	2,2	1,8	Pliocénico
24	0,6		2,4		Pliocénico
25	0,7		1,8		Pliocénico
26	0,6		2,4		Pliocénico
28	0,6	3,2	2,2	1,5	Holocénico
30	0,6		2,7		Pliocénico
31	0,5		2,3		Pliocénico
32	*		*		Pliocénico
33	0,6		2,0		Pliocénico
35	0,6		2,3		Pliocénico
36	0,6	0,9	2,2	1,6	Pliocénico
38	0,6		2,3		Holocénico
41	0,5		2,2		Pliocénico
42	0,6		2,1		Pliocénico
43	0,6		2,4		Pliocénico
45	0,6		2		Pliocénico
46	5		1,7		Holocénico
48	0,6		2		Pliocénico
50	0,7		2,2		Pliocénico
53	*		*		Pliocénico
55	*		*		Pliocénico
56	0,5		2,1		Pliocénico
58	*		*		Pliocénico
59	0,6		2,5		Pliocénico
61	0,7		1,9		Pliocénico
63	*		*		Pliocénico
64	0,5		2,3		Holocénico
66	1,3	3,3	1,7	1,2	Holocénico
67	0,6		2,4		Pliocénico
69	*		*		Pliocénico
71	0,7		2,2		Pliocénico

Registro	F <sub>0</sub> (Hz)	F <sub>1</sub> (Hz)	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	Unidades Litoestratigráficas
72	0,7		2,4		Holocénico
74	0,6	3,0	2,6	1,6	Holocénico
77	0,5		2,2		Pliocénico
78	0,5		2,7		Pliocénico
81	0,5		2,2		Holocénico
83	0,9	4,7	1,4	1,4	Holocénico
85	0,6	2	2,6	1,7	Holocénico
86	0,7		2,3		Holocénico
89	0,6		2,6		Holocénico
92	0,5		2,4		Pliocénico
93	*				Pliocénico
96	3,2		1,2		Holocénico
98	2,6		2,8		Holocénico
99	0,7	12,3	1,9	1,3	Holocénico
100	2,6		2,8		Holocénico
101	*		*		Holocénico
103	0,8	2,6	2,2	1,3	Holocénico
104	0,6	3,5	2,2	2,0	Holocénico
105	4,7	2,7	2,9	1,6	Holocénico
110	0,6	2,6	2,3	1,9	Holocénico
112	0,6	2,8	2,6	2,4	Holocénico
114	*		*		Holocénico
115	0,6		2,4		Holocénico
116	0,6		2,5		Pliocénico
119	0,6		3,2		Pliocénico
120	0,6		2,6		Pliocénico
121	0,6	18,6	2,4	2,4	Pliocénico
122	0,7		2,6		Pliocénico
125	0,6	6,1	2,3	1,6	Holocénico
126	0,7	2,7	2,3	1,8	Holocénico
128	0,6	4,6	2,8	1,7	Holocénico
130	4,7		5,9		Holocénico
131	0,6		2,2		Pliocénico
140	0,6		2,2		Holocénico
141	0,7	4,7	2,2	2,2	Holocénico
142	0,7	3,2	2,2	1,2	Pliocénico
143	0,6	6,8	2,0	1,9	Pliocénico
146	0,5		2,3		Pliocénico
147	*		*		Pliocénico
150	0,5		2,7		Holocénico
152	0,5	3,5	2,5	2,1	Holocénico
157	0,5		3,0		Pliocénico
160	0,9		1,3		Pliocénico
161	1,9		1,8		Pliocénico
162	0,6		2,6		Pliocénico
168	13,3		1,2		Pliocénico
170	0,7		2,3		Pliocénico

Registro	F <sub>0</sub> (Hz)	F <sub>1</sub> (Hz)	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	Unidades Litoestratigráficas
171	17,2		1,8		Pliocénico
175	0,7		2,7		Pliocénico
176	0,5	3,4	2,5	2,0	Holocénico
181	12,5		3,5		Pliocénico
182	8,1		7,5		Holocénico
183	*				Pliocénico
184	5,9		2,7		Holocénico
187	8,1		3,6		Holocénico
188	9,9		1,7		Pliocénico
191	5,0		3,8		Holocénico
195	7		2,9		Holocénico
197	*				Holocénico
199	0,6		2,6		Holocénico
204	0,8	2,2	2,7	2,0	Holocénico
221	*				Pliocénico
222	0,6		2,1		Pliocénico
223	0,6		2,2		Pliocénico
225	0,6		2,1		Pliocénico
226	0,5		2,4		Pliocénico
227	0,7		2,2		Pliocénico
229	9,9	4,5	2	1,9	Pliocénico
230	*				Plistocénico
231	0,8		1,9		Plistocénico
232	*				Plistocénico
233	a)				Plistocénico
234	0,6		2,2		Pliocénico
237	0,6	5,4	2,6	1,9	Holocénico
238	0,8		3,8		Pliocénico
241	0,7		2		Pliocénico
244	a)				Plistocénico
246	*				Plistocénico
247	0,7		1,7		Pliocénico
249	0,6		2,5		Pliocénico
250	*				Pliocénico
252	*				Pliocénico
253	*				Pliocénico
254	0,5		2,5		Pliocénico
255	*				Pliocénico
256	*				Pliocénico
257	*				Plistocénico
258	*				Pliocénico
301	*				Pliocénico
302	a)				Plistocénico
304	*				Pliocénico
305	0,7		2		Pliocénico
306	0,7		2,4		Holocénico
308	*				Pliocénico

Registro	$F_0$ (Hz)	$F_1$ (Hz)	$A_0$	$A_1$	Unidades Litoestratigráficas
309	a)				Pliocénico
310	0,6	4,3	2,5	1,6	Holocénico

## ANEXO IV - RESULTADOS OBTIDOS COM AS CURVAS H/V EM SETÚBAL

\* - Curva sem pico definido; a) pico de frequência superior a 20 Hz.

Registo	F <sub>0</sub> (Hz)	F <sub>1</sub> (Hz)	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	Unidades Litoestratigráficas
400	6,5		5,1		Holocénico
401	12,8	1,7	2,9	2,8	Holocénico
402	2,1		4,0		Holocénico
403	1,9	1,3	3,9	3,5	Holocénico
404	1,0		2,5		Pliocénico
405	1,6		2,6		Holocénico
406	2,9		1,7		Jurássico
407	0,9		1,9		Miocénico
409	0,6		2,9		Holocénico
410	3,0		5,9		Holocénico
411	1,5		3,5		Holocénico
412	1,6		4,2		Holocénico
413	*		*		Pliocénico
414	1,1		3,0		Pliocénico
415	1,0		4,7		Holocénico
416	1,1		3,5		Pliocénico
417	1,0		4,3		Holocénico
418	1,2		3,2		Pliocénico
419	0,6		3,8		Holocénico
420	*				Holocénico
421	1,2		4,4		Holocénico
423	1,1		3,2		Holocénico
424	1,1		3,4		Pliocénico
425	1,1		3,2		Holocénico
427	1,1		2,8		Pliocénico
428	0,7		3,3		Pliocénico
429	1,2		3,9		Pliocénico
430	1,1		3,5		Pliocénico
431	1,1		2,9		Holocénico
432	1,1		2,9		Pliocénico
433	1,0		2,8		Pliocénico
434	1,0		3,0		Pliocénico
435	0,7		3,6		Pliocénico
436	1,0		3,4		Holocénico
437	1,1		3,1		Pliocénico
438	4,5		1,7		Miocénico
439	1,0		2,4		Pliocénico
440	1,1		3,9		Plistocénico
441	1,4		5,1		Holocénico
442	1,0		3,2		Holocénico
443	1,0		5,1		Holocénico
444	2,1		7,7		Holocénico

Registro	F <sub>0</sub> (Hz)	F <sub>1</sub> (Hz)	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	Unidades Litoestratigráficas
445	1,4		3,9		Holocénico
446	1,8	1,2	3,7	3,1	Holocénico
447	1,1		3,1		Holocénico
448	1,1	2,1	5,2	4,1	Holocénico
449	0,8	3,6	3,7	2,9	Holocénico
450	0,8	7,6	2,7	2,3	Pliocénico
451	0,8	16,6	3,1	1,9	Plistocénico
452	0,6		3,0		Plistocénico
453	0,7		3,0		Pliocénico
454	0,8		2,9		Holocénico
456	0,8		3,5		Pliocénico
457	0,7		2,7		Pliocénico
458	0,8		3,2		Pliocénico
459	0,8		4,3		Plistocénico
460	0,8		3,3		Pliocénico
461	1,6		2,2		Pliocénico
462	2,7		2,7		Holocénico
463	1,1		3,9		Holocénico
464	0,8	4,0	4,1	3,1	Holocénico
465	0,6		2,9		Plistocénico
466	0,7		2,8		Plistocénico
467	0,8		2,9		Plistocénico
468	1,2		2,8		Pliocénico
469	0,6		3,5		Plistocénico
470	0,6		3,6		Plistocénico
471	0,8	14,9	2,7	3,1	Pliocénico
472	0,9		2,9		Pliocénico
473	0,7		3,4		Pliocénico
474	a)				Pliocénico
475	0,6		3,3		Pliocénico
476	1,3		4,1		Holocénico
477	1,1		3,6		Holocénico
478	0,9		3,2		Holocénico
479	0,5		3,1		Pliocénico
480	0,7		2,5		Pliocénico
481	0,7		2,7		Pliocénico
482	0,8		3,3		Pliocénico
483	10,2		3,3		Pliocénico
484	0,7		2,9		Holocénico
485	0,7		3,0		Plistocénico
486	0,8		2,8		Pliocénico
487	0,8		3,2		Plistocénico
488	6,1		3,3		Miocénico
489	0,7		3,3		Plistocénico
490	0,6		2,9		Plistocénico
491	0,9		3,2		Pliocénico
492	0,9		2,9		Pliocénico

Registro	F <sub>0</sub> (Hz)	F <sub>1</sub> (Hz)	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	Unidades Litoestratigráficas
493	1,1		3,0		Pliocénico
494	0,9		2,6		Holocénico
495	*				Jurássico
496	0,9		2,8		Pliocénico
497	0,7		3,1		Miocénico
499	0,7		2,5		Plistocénico
500	1,1		2,7		Pliocénico
501	1,1		3,0		Pliocénico
502	1,0		2,6		Pliocénico
503	1,8	1,3	2,9	2,7	Holocénico
504	1,7		4,7		Holocénico
505	4,5		2,5		Jurássico
506	0,6		4,0		Pliocénico
507	2,0		4,0		Holocénico
508	2,3		3,1		Holocénico
509	1,1		3,4		Holocénico
510	1,8		3,4		Holocénico
511	1,0		2,9		Holocénico
512	4,2		2,2		Holocénico
513	1,1		1,9		Pliocénico
514	0,7		3,2		Plistocénico
515	0,6		3,5		Plistocénico
520	0,6		3,1		Plistocénico
521	11,4	1,0	3,2	2,4	Holocénico



## ANEXO V - CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO DOS RESULTADOS DE H/V SEGUNDO SESAME

Critérios SESAME		
Critérios de curva fiável ( <i>Reliability</i> )	$F_0 > 10/l_w$	$l_w$ = comprimento das janelas utilizado no cálculo de H/V $n_w$ = número das janelas selecionadas para o cálculo da curva média de H/V $n_c = l_w n_w F_0$ = número de ciclos significativos $F$ = frequência $F_{\text{sensor}}$ = frequência de corte do sensor $F_0$ = frequência do pico H/V $\sigma_F$ = desvio padrão da frequência de pico H/V ( $F_0 \pm \sigma_F$ ) $\varepsilon(F_0)$ = valor limite para a condição de estabilidade $\sigma_F < \varepsilon(F_0)$ $A_0$ = amplitude de pico H/V na frequência $F_0$ $A_{H/V}(F)$ = amplitude da curva H/V na frequência $F$ $F^-$ = frequência entre $F_0/4$ e $F_0$ para a qual $A_{H/V}(F^-) < A_0/2$ $F^+$ = frequência entre $F_0$ e $4F_0$ para a qual $A_{H/V}(F^+) < A_0/2$ $\sigma_{A(F)}$ = desvio padrão de $A_{H/V}(F)$ , $\sigma_{A(F)}$ é o fator pelo qual a curva média $A_{H/V}(f)$ deve ser multiplicada ou dividida $\sigma_{\log H/V}(F)$ = desvio padrão da curva $\log A_{H/V}(F)$ , $\sigma_{\log H/V}(F)$ é um valor absoluto que deve ser adicionado ou subtraído à curva média $\log A_{H/V}(F)$ $\theta(F_0)$ = valor limite para a condição de estabilidade $\sigma_A(F_0) < \theta(F_0)$
	$n_c F_0 > 200$	
	$\sigma_A(F) < 2$ para $0,5F_0 < F < 2F_0$ se $F_0 > 0,5\text{Hz}$ ou $\sigma_A(F) < 3$ para $0,5F_0 < F < 2F_0$ se $F_0 < 0,5\text{Hz}$	
Critérios de pico bem definido ( <i>Clear peak</i> )  (5 dos 6 critérios têm de ser cumpridos)	$\exists F^- \in [F_0/4, F_0] \mid A_{H/V}(F^-) < A_0/2$	
	$\exists F^+ \in [F_0, 4F_0] \mid A_{H/V}(F^+) < A_0/2$	
	$A_0 > 2$	
	$F_{\text{peak}}[A_{H/V}(F) \pm \sigma_A(F)] = F_0 \pm 5\%$	
	$\sigma_F < \varepsilon F_0$	
$\sigma_F < \theta F_0$		

Valores limite para $\sigma_F$ e $\sigma_A(F_0)$					
Gama de frequências (Hz)	< 0,2	0,2-0,5	0,5-1,0	1,0-2,0	> 2,0
$\varepsilon(F_0)$ (Hz)	0,25 $F_0$	0,20 $F_0$	0,15 $F_0$	0,10 $F_0$	0,05 $F_0$
$\theta(F_0)$ para $\sigma_A(F_0)$	3,0	2,5	2,0	1,78	1,58
$\log \theta(F_0)$ para $\sigma_{\log H/V}(F_0)$	0,48	0,40	0,3	0,25	0,2



## ANEXO VI - CLASSIFICAÇÃO DOS TERRENOS SEGUNDO O EC8

$V_{s30}$  - velocidade das ondas de corte nos primeiros 30 m de profundidade

$N_{SPT}$  - número de pancadas associadas aos ensaios SPT para a cravação de 30 cm

cu - coesão não drenada.

Tipos de terrenos	Perfil estratigráfico	Parâmetros		
		$V_{s30}$ (m/s)	$N_{SPT}$ (pancadas/30 cm)	cu (kPa)
A	Rocha ou outra formação geológica de tipo rochoso, que inclua, no máximo, 5 m de material mais fraco à superfície.	800	-	-
B	Depósitos de areia muito compacta, de seixo (cascalho) ou de argila muito rija, com uma espessura de, pelo menos, várias dezenas de metros, caracterizados por um aumento gradual das propriedades mecânicas com a profundidade.	360 – 800	50	250
C	Depósitos profundos de areia compacta ou medianamente compacta, de seixo (cascalho) ou de argila rija com uma espessura entre várias dezenas e muitas centenas de metros.	180 – 360	15 - 50	70 -250
D	Depósitos de solos não coesivos de compactidade baixa a média (com ou sem alguns estratos de solos coesivos moles), ou de solos predominantemente coesivos de consistência mole a dura.	180	15	70
E	Perfil de solo com um estrato aluvionar superficial com valores de $V_s$ do tipo C ou D e uma espessura entre cerca de 5 m e 20 m, situado sobre um estrato mais rígido com $V_s > 800$ m/s.			
S1	Depósitos constituídos ou contendo um estrato com pelo menos 10 m de espessura de argilas ou siltes moles com um elevado índice de plasticidade (PI 40) e um elevado teor em água.	100 (indicativo)	-	10 - 20
S2	Depósitos de solos com potencial de liquefação, de argilas sensíveis ou qualquer outro perfil de terreno não incluído nos tipos A – E ou S1.			



## ANEXO VII – GEOMETRIA DOS ENSAIOS REMI E RESULTADOS DE $V_{s30}$ NO BARREIRO

dx – distância entre os geofones; Tipo A – ensaio ativo; Tipo P – ensaio passivo.

ReMi	dx (m)	Tipo	Geologia à superfície	Duração (s)	$V_{s30}$ (m/s)	RMS (m/s)	Média $V_{s30}$ (m/s)	Média RMS (m/s)
2	3	P	Pliocénico	32	412	5,2	351	8
					315	4,4		
					367	14,5		
					311	7,0		
4	1,5	A	Holocénico	2	443	4,9	468	5
					407	5,0		
					406	4,9		
					440	6,3		
					458	4,9		
					541	6,6		
					536	5,0		
					512	3,9		
5	1,5	P	Holocénico	32	342	7,5	387	3
		A			445	4,6		
					407	2,7		
					364	2,5		
					320	2,7		
					346	1,7		
					446	6,5		
					378	2,1		
					427	2,4		
					381	3,1		
					397	2,2		
					386	2,6		
					7	3		
400	15,8							
363	16,4							
405	6,2							
8	3	P	Holocénico	32	236	16,8	270	19
					295	22,0		
					280	18,0		
9	1,5	A	Holocénico	2	313	1,7	327	3
					356	2,0		
					276	3,5		
					248	1,3		
					342	5,0		

ReMi	dx (m)	Tipo	Geologia à superfície	Duração (s)	V <sub>s30</sub> (m/s)	RMS (m/s)	Média V <sub>s30</sub> (m/s)	Média RMS (m/s)
					367	1,2		
					287	5,9		
					380	2,5		
					364	2,5		
		P		32	348	2,3		
					314	1,8		
					325	5,0		
10	1,5	A	Holocénico	2	285	1,5	392	4
					455	5,0		
					435	5,3		
11	3	P	Holocénico	32	340	3,9	344	7
					345	7,7		
					345	5,2		
					348	8,9		
					342	4,6		
					327	11,2		
					359	10,4		
12	3	P	Holocénico	15	277	13,0	280	19
					278	23,0		
				32	284	20,0		
13	1,5	A	Holocénico	2	318	2,0	320	2
					332	2,7		
					329	1,2		
					313	3,0		
					309	3,5		
					317	1,9		
14	1,5	A	Holocénico	2	342	3,3	343	3
					328	2,3		
					328	3,8		
					381	12,8		
					398	2,5		
					428	1,5		
					242	1,4		
					359	1,2		
					285	1,2		
15	1,5	A	Pliocénico	2	295	2,5	452	6
					300	2,5		
					588	7,5		
					623	9,9		
16	1,5	A	Holocénico	2	307	4,0	298	5
					288	5,4		
17	1,5	A	Holocénico	2	494	4,3	477	7

ReMi	dx (m)	Tipo	Geologia à superfície	Duração (s)	V <sub>s30</sub> (m/s)	RMS (m/s)	Média V <sub>s30</sub> (m/s)	Média RMS (m/s)
					527	4,0		
		P		15	410	11,7		
18	1,5	A	Plistocénico	2	484	6,7	470	6
					530	6,8		
					501	5,5		
					433	9,7		
					430	2,6		
					476	6,9		
					479	3,5		
		P		30	427	9,1		
19	1,5	A	Holocénico	2	283	1,5	289	1
					273	1,5		
					306	1,4		
					281	1,9		
					314	1,5		
					283	1,0		
					284	1,5		
20	3	P	Plistocénico	30	431	12,5	412	8
					389	9,5		
					415	6,7		
					434	8,7		
					389	4,5		
					405	4,0		
					423	8,1		
411	8,3							
21	1,5	A	Holocénico	2	312	1,7	280	2
					268	1,3		
					263	1,4		
					269	2,2		
					295	1,6		
					306	3,5		
					271	2,5		
					292	3,2		
					242	1,5		
					283	2,8		
					285	1,5		
					279	2,0		
22	3	P	Plistocénico	32	514	3,2	418	13
					403	18,0		
					382	8,6		
					374	22,0		
23	1,5	A	Pliocénico	2	413	9,3	456	11

ReMi	dx (m)	Tipo	Geologia à superfície	Duração (s)	V <sub>s30</sub> (m/s)	RMS (m/s)	Média V <sub>s30</sub> (m/s)	Média RMS (m/s)
					429	9,2		
					469	16,4		
					477	6,9		
					497	13,8		
					476	6,3		
		P		32	442	16,7		
					443	7,0		
24	3	P	Holocénico	32	313	3,5	311	5
					306	8,6		
					300	3,3		
					316	4,8		
					318	2,6		
25	1,5	A	Holocénico	2	335	13,2	323	5
					396	11,1		
					307	1,9		
					333	3,8		
					310			
					279	1,5		
					327	2,1		
					316	2,1		
					305	2,0		
26	1,5	A	Holocénico	2	278	3,6	338	4
					318	5,0		
					326	6,4		
					397	5,7		
					373	3,8		
					336	2,2		
27	1,5	A	Holocénico	2	340	0,6	331	9
					346	0,3		
					350	0,5		
					340	0,6		
					341	0,5		
					320			
					331	18,3		
					304	18,6		
					304	20,0		
					331	18,4		
28	1,5	A	Plistocénico	2	544	19,8	428	12
					463	10,6		
					496	38,0		
					352	8,9		
					391	8,0		

ReMi	dx (m)	Tipo	Geologia à superfície	Duração (s)	V <sub>s30</sub> (m/s)	RMS (m/s)	Média V <sub>s30</sub> (m/s)	Média RMS (m/s)
					361	10,7		
29	2	P	Holocénico	32	386	2,5	414	3
					378	1,7		
					478	5,0		
30	3	P	Plistocénico	32	432	10,8	358	11
					374	12,3		
					336	9,2		
					319	10,8		
					331	12,6		
31	3	P	Holocénico	32	303	3,7	304	4
					313	3,8		
					295	6,3		
					309	2,2		
					302	2,0		
32	2,5	P	Pliocénico	32	364	5,9	355	6
		A		2	354	2,9		
		P		32	370	3,4		
34	1,5	A	Holocénico	2	324	4,8	335	5
					410	3,2		
					290	2,1		
					278	8,2		
					452	6,8		
					287	3,5		
					302	5,6		
35	3	P	Holocénico	32	299	8,2	317	18
					325	7,8		
					325	6,6		
					336	11,0		
					363	53,0		
					291	2,5		
					289	7,6		
					328	58,0		
					294	4,3		
36	3	P	Pliocénico	32	368	8,0	351	7
					356	4,6		
					340	5,3		
					347	7,2		
					366	6,6		
					359	11,0		
					349	2,9		
					325	12,4		

ReMi	dx (m)	Tipo	Geologia à superfície	Duração (s)	V <sub>s30</sub> (m/s)	RMS (m/s)	Média V <sub>s30</sub> (m/s)	Média RMS (m/s)
37	3	P	Holocénico	32	351	8,2	355	9
					377	6,6		
					361	17,0		
					332	4,8		
38	2	P	Holocénico	15	234	1,6	230	2
				20	209	4,3		
				30	236	2,3		
					238	1,3		
					222	1,9		
					238	1,8		

## ANEXO VIII – GEOMETRIA DOS ENSAIOS REMI E RESULTADOS DE $V_{s30}$ EM SETÚBAL

dx – distância entre os geofones; Tipo A – ensaio ativo; Tipo P – ensaio passivo.

ReMi	dx (m)	Tipo	Geologia à superfície	Duração (s)	$V_{s30}$ (m/s)	RMS (m/s)	Média $V_{s30}$ (m/s)	Média RMS (m/s)
1	3	P	Holocénico	32	201	8,3	203	8
					225	9,7		
					222	10,1		
					202	12,0		
					200	8,6		
					193	3,0		
					191	7,1		
					188	3,0		
2	3	P	Holocénico	32	280	5,1	277	7
					279	6,3		
					286	6,2		
					282	6,4		
					283	8,7		
					257	5,6		
					293	10,3		
					264	4,5		
270	6,8							
3	3	P	Holocénico	32	252	8,1	242	5
					243	6,6		
					227	1,3		
					228	1,2		
					247	3,9		
					245	9,0		
					254	3,4		
4	3	P	Holocénico	32	302	7,0	299	4
					300	4,3		
					278	1,8		
					313	5,3		
					300	4,0		
5	3	P	Pliocénico	32	316	7,4	307	13
					340	11,6		
					271	9,6		
					284	14,4		
					306	35,2		
					328	7,7		
					281	9,5		
					330	8,7		

ReMi	dx (m)	Tipo	Geologia à superfície	Duração (s)	V <sub>s30</sub> (m/s)	RMS (m/s)	Média V <sub>s30</sub> (m/s)	Média RMS (m/s)
6	3	P	Holocénico	32	366	3,2	330	5
					310	6,1		
					305	2,0		
					351	2,5		
					332	7,6		
					309	4,6		
					340	12,3		
7	3	P	Holocénico	32	329	1,7	342	8
					334	6,3		
					361	6,0		
					336	6,2		
					340	10,3		
8	3	P	Pliocénico	32	340	8,9	304	18
					299	31,7		
					311	12,5		
					288	10,7		
9	5	P	Holocénico	32	318	16,3	307	5
					314	4,8		
					301	6,4		
10	2,5	P	Pliocénico	32	305	2,4	369	7
					386	10,2		
					350	6,1		
11	3	P	Pliocénico	32	370	5,1	243	6
					248	3,7		
					238	3,2		
					250	3,3		
					243	9,0		
					259	8,0		
					226	6,6		
12	2	P	Pliocénico	32	240	9,3	346	9
					407	17,3		
					315	5,7		
					326	3,6		
					329	14,4		
13	1,5	A	Holocénico	2	354	5,1	278	5
					247	2,1		
					264	0,7		
					291	2,1		
					198	25,8		
					339	1,2		
14	1,5	A	Holocénico	2	303	3,4	194	6
					303	1,5		
					191	5,7		

ReMi	dx (m)	Tipo	Geologia à superfície	Duração (s)	V <sub>s30</sub> (m/s)	RMS (m/s)	Média V <sub>s30</sub> (m/s)	Média RMS (m/s)
					203	10,2		
					203	9,1		
					208	8,6		
					196	2,5		
					196	4,8		
					184	4,2		
					194	3,5		
					181	6,0		
					184	3,0		
15	2	P	Pliocénico	32	246	2,1	232	3
					211	2,3		
					226	4,4		
					255	2,7		
					223	1,4		
					230	4,8		
16	1,5	A	Pliocénico	2	346	3,8	390	4
					383	1,8		
					420	3,5		
					392	4,8		
					370	4,1		
					429	3,4		
17	3	P	Holocénico	20	285	7,7	278	4
					265	4,5		
					259	2,1		
					297	3,0		
					279	3,2		
					274	5,3		
					284	2,9		
18	1,5	A	Holocénico	2	355	3,6	430	5
					384	3,4		
					417	4,7		
					490	4,3		
					436	5,6		
					479	5,7		
					482	4,9		
					396	5,0		
19	3	P	Pliocénico	32	390	8,0	411	18
					412	10,5		
					446	46,3		
					395	9,0		
20	1,5	A	Holocénico	2	410	8,7	324	3
					360	3,5		
					352	2,2		

ReMi	dx (m)	Tipo	Geologia à superfície	Duração (s)	V <sub>s30</sub> (m/s)	RMS (m/s)	Média V <sub>s30</sub> (m/s)	Média RMS (m/s)
					326	3,0		
					310	2,2		
					254	1,9		
					254	1,1		
21	1,5	A	Pliocénico	2	301	4,6	318	4
					316	5,8		
					313	4,7		
					303	3,8		
					317	5,4		
					322	2,7		
					335	2,0		
					332	2,6		
					320	1,2		
					319	2,3		
22	1,5	A	Plistocénico	2	293	10,1	354	9
					309	15,8		
					467	11,3		
					293	13,2		
					362	12,2		
					380	38,3		
					354	2,4		
					341	4,0		
					347	6,0		
					310	2,8		
					410	4,6		
					360	2,6		
					348	2,7		
					376	5,5		
23	3	P	Plistocénico	20	317	5,2	312	6
					313	6,5		
					307	7,3		
24	2,5	P	Pliocénico	32	364	3,8	342	4
					369	7,6		
					362	2,0		
					312	2,9		
					343	3,1		
					300	3,5		
26	5	P	Pliocénico	32	366	3,9	356	5
					345	6,2		
27	1,5	A	Pliocénico	2	300	3,2	316	3
					333	2,8		
					308	2,7		
					327	3,4		

ReMi	dx (m)	Tipo	Geologia à superfície	Duração (s)	V <sub>s30</sub> (m/s)	RMS (m/s)	Média V <sub>s30</sub> (m/s)	Média RMS (m/s)
					311	2,7		
29	3	P	Holocénico	32	383	6,5	384	5
					362	3,5		
					361	3,7		
				15	388	2,8		
					383	2,4		
				32	390	4,6		
				20	384	5,6		
					398	7,2		
					396	4,7		
					388	5,3		
390	7,0							
30	3	P	Holocénico	32	213	16,0	252	16
					312	12,8		
					290	8,7		
					237	21,0		
					210	21,0		
31	1,5	A	Jurássico	2	849	24,3	857	12
					921	8,9		
					821	2,7		
					842	11,3		
					832	8,4		
					876	14,7		
32	1,5	A	Holocénico	2	324	2,9	341	3
					317	4,2		
					360	2,8		
					352	2,4		
					345	3,3		
					356	4,3		
					365	2,8		
					314	3,1		
					328	3,1		
					325	3,2		
					344	2,8		
					356	3,7		
					342	3,5		
33	1,5	A	Pliocénico	2	364	6,3	347	5
					344	4,3		
					361	5,0		
					346	4,1		
					334	9,4		
					331	0,1		
34	3	P	Pliocénico	32	491	11,4	408	7

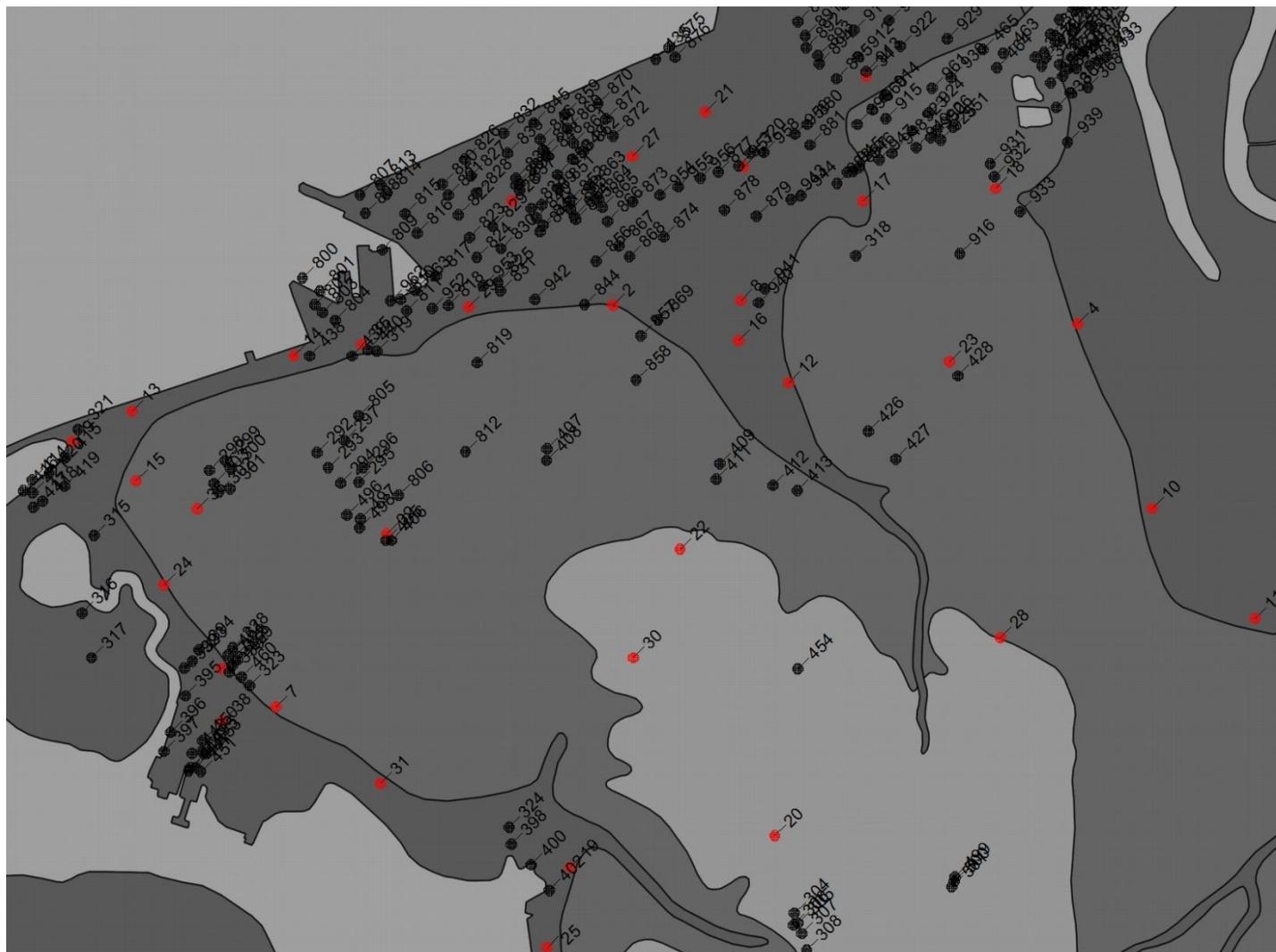
ReMi	dx (m)	Tipo	Geologia à superfície	Duração (s)	V <sub>s30</sub> (m/s)	RMS (m/s)	Média V <sub>s30</sub> (m/s)	Média RMS (m/s)
					386	5,1		
					347	4,1		
35	3	P	Pliocénico	32	342	3,6	334	4
					324	4,1		
					324	3,6		
					341	7,4		
					337	2,1		
36	2	P	Pliocénico	32	378	9,4	357	9
					343	4,1		
					350	12,7		
37	1,5	A	Pliocénico	2	439	7,2	423	7
					429	7,3		
					420	7,2		
					434	6,8		
					395	5,7		
38	3	P	Pliocénico	32	310	4,2	304	5
					301	8,1		
					296	4,6		
					283	5,2		
					330	1,7		
39	3	P	Plistocénico	32	299	13,5	337	8
					369	9,1		
					341	6,6		
					332	3,9		
					342	7,3		
40	1,5	A	Plistocénico	2	392	6,0	367	5
					350	4,2		
					345	2,5		
					339	2,0		
					300	7,7		
					296	6,3		
					477	4,2		
					321	8,3		
					377	5,5		
					378	4,4		
					461	4,5		
41	1,5	A	Holocénico	2	330	3,8	360	4
					375	3,5		
					349	4,2		
					352	3,5		
					342	3,4		
					337	3,6		
					380	4,2		

ReMi	dx (m)	Tipo	Geologia à superfície	Duração (s)	V <sub>s30</sub> (m/s)	RMS (m/s)	Média V <sub>s30</sub> (m/s)	Média RMS (m/s)
					362	3,1		
					342	3,5		
					394	4,0		
					396	2,8		
44	1,5	A	Plio-Plistocénico	2	495	8,7	432	12
					334	25,6		
					443	7,1		
					455	6,7		
45	2	P	Holocénico - Plistocénico	32	507	14,9	427	10
					381	10,7		
					392	5,8		
46	1,5	A	Pliocénico	2	610	10,6	560	8
					511	4,9		
					560	8,4		



## **ANEXO IX – LOCALIZAÇÃO E RESULTADOS DOS ENSAIOS REMI NO BARREIRO**

**Localização dos ensaios ReMi e das sondagens no Barreiro. Pontos vermelhos ensaios ReMi; Pontos pretos – sondagens**



### ReMi 2

Estes ensaios passivos realizaram-se no limite entre o Pliocénico e o Holocénico e os logs das sondagens mais próximas (844, 857, 869) apresentaram uma espessura das FS entre 0 e 4 m. Considerando-se os valores de  $V_s$  e que o local onde se realizaram os ensaios se encontra, no limite entre o Holocénico e o Pliocénico, considerou-se que o perfil de  $V_s$  se desenvolve no Pliocénico.

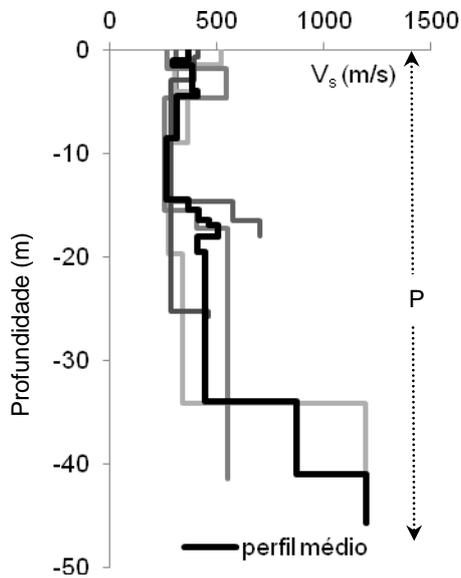


Figura A9.1 – Perfis de  $V_s$ . P – Pliocénico

### ReMi 4

Estes ensaios ativos realizaram-se no Holocénico e a sondagem mais próxima situou-se no Pliocénico a cerca de 250 m. O perfil médio de  $V_s$  mostrou a partir dos 3 m um acréscimo de  $V_s$  que corresponderá ao limite entre as formações superficiais e o Pliocénico. As interpolações efetuadas apresentam espessuras das FS superiores aos obtidos no perfil médio. Esta discrepância poderá ser devida à falta de sondagens no local onde se realizaram os ensaios.

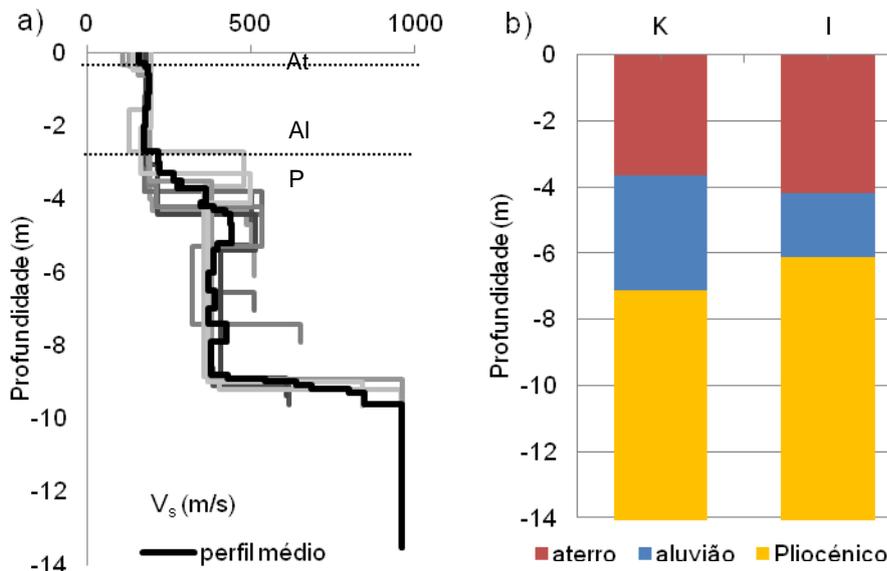


Figura A9.2 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). At – aterro; Al – aluvião; P – Pliocénico.

### ReMi 5

Estes ensaios ativos realizaram-se no Holocénico, a 20 m da sondagem 957 e a 50 m das sondagens 958 e 320. Identificou-se aterros do tipo 2 entre os 0,8 e os 3,3 m de profundidade e o limite entre as FS e o Pliocénico localizou-se aos 7 m de profundidade. O limite entre as aluviões e o substrato, obtido por interpolações para o ponto central dos ensaios ReMi, é compatível com o perfil médio de  $V_s$ . A profundidade do limite entre as formações superficiais e o Pliocénico, observado nas sondagens mais próximas, situa-se entre os 10 e os 6 m (957- 6,2 m, 958 -6,3 m e 320 -10 m). O perfil de  $N_{SPT}$  da sondagem 320 não evidenciou uma relação com o perfil médio de  $V_s$ .

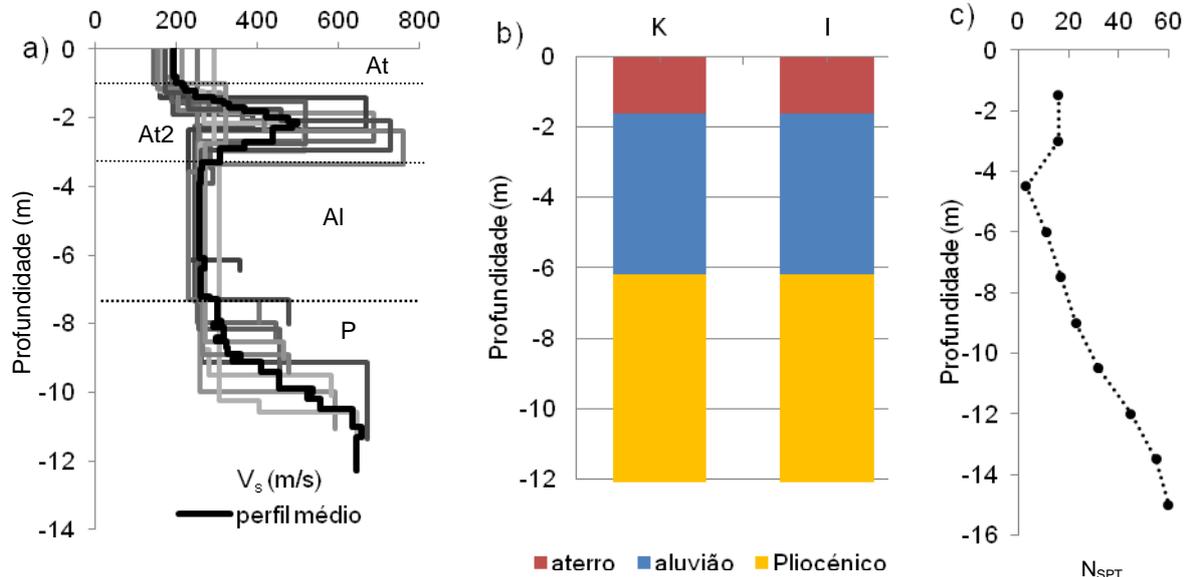


Figura A9.3 – (a) Perfis de  $V_s$ . At – aterros; At2 – aterros do tipo 2; Al – aluviões; P – Pliocénico; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K -Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias); (c)  $N_{SPT}$  da sondagem 320.

### ReMi 7

Estes ensaios passivos realizaram-se no Holocénico perto do limite com o Pliocénico. O perfil médio apresentou o limite entre as FS e o Pliocénico aos 3 m de profundidade. As discrepâncias obtidas entre  $V_s$  e as interpolações da espessura das FS e com os valores de  $N_{SPT}$  poderão dever-se à variação das propriedades geotécnicas ao longo da distância que separa as sondagens do local dos ensaios ReMi.

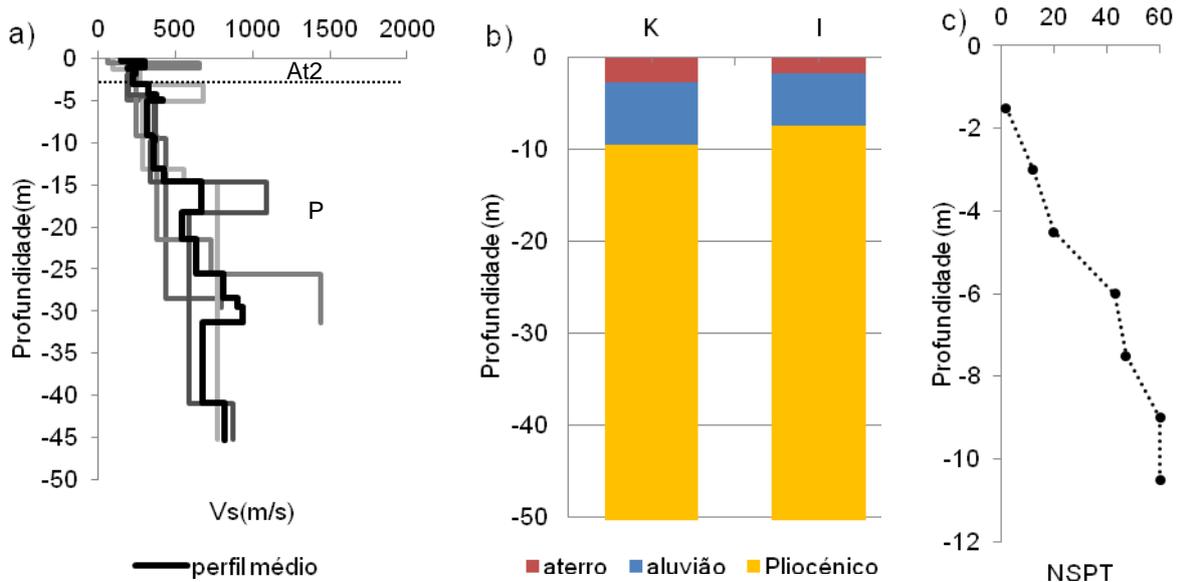


Figura A9.4 – (a) Perfis de  $V_s$ ; At2 – aterros do tipo 2; P – Pliocénico; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K -Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias); (c)  $N_{SPT}$  da sondagem 320.

### ReMi 8

Estes ensaios passivos realizaram-se no Holocénico a cerca de 60 m das sondagens 940 e 941 cujos logs apresentaram o limite entre as FS e o Pliocénico aos 12 m de profundidade. O perfil médio de  $V_s$  apresenta valores superiores a 400 m/s a partir dos 10,7 m (limite das FS com o Pliocénico) e o *bedrock* (800 m/s) situa-se aos 30 m. As interpolações obtidas para o ponto central do ensaio ReMi apresentam esse limite entre os 10 e 11 m.

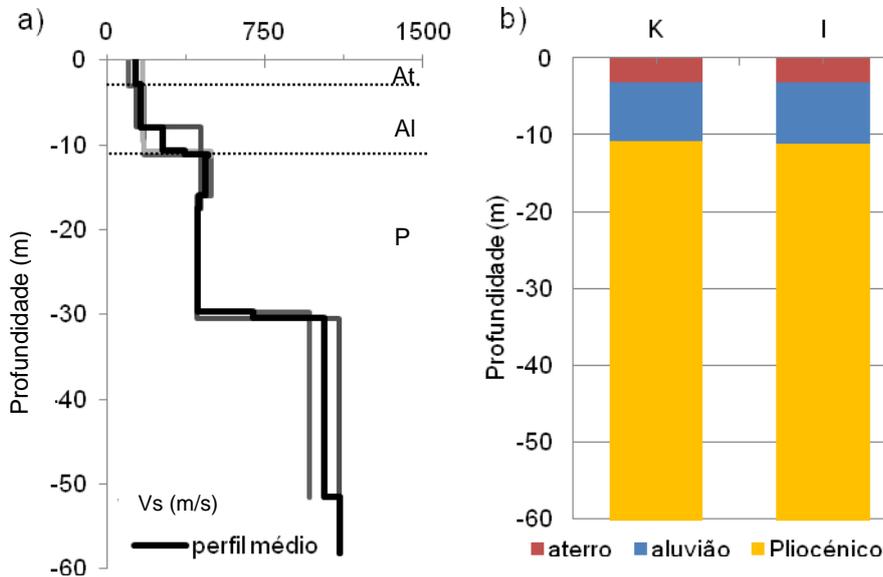


Figura A9.5 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). At – aterros; Al – aluviões; P – Pliocénico.

### ReMi 9

Estes ensaios ativos realizaram-se no Holocénico a cerca de 50 m das sondagens 321 e 415. O perfil médio de  $V_s$  apresentou o limite entre as FS e o Pliocénico aos 4,7 m de profundidade. Identificou-se uma estrutura de elevada rigidez entre os 0,6 e os 1,6 m (aterros do tipo 2). As interpolações apresentaram o limite entre as FS e o Pliocénico aos 6,5 m de profundidade. Os valores de  $N_{SPT}$  da sondagem 415 apresentam um aumento dos seus valores a partir dos 6 m o que estará de acordo com o perfil médio de  $V_s$ .

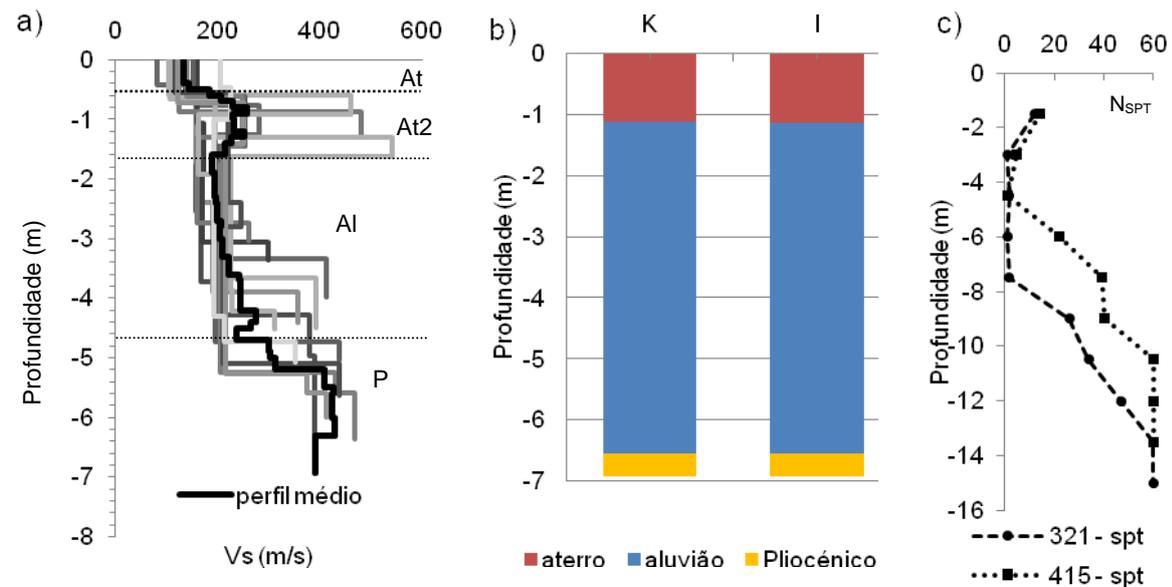


Figura A9.6 (a) Perfis de  $V_s$ ; At – aterros; At2 – aterros do tipo 2; Al – aluviões; P – Pliocénico; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K -Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias); (c)  $N_{SPT}$  das sondagens 321 e 415.

### ReMi 10

O conjunto destes 3 ensaios ativos realizaram-se no Holocénico e a sondagem mais próxima situou-se a cerca de 800 m do ponto central. O perfil médio de  $V_s$  mostra a existência de um aumento de velocidade aos 4,8 m de profundidade a que corresponderá o topo do Pliocénico. O valor relativo à espessura das FS obtido pela interpolação do inverso da potência das distâncias é idêntico ao de  $V_s$ .

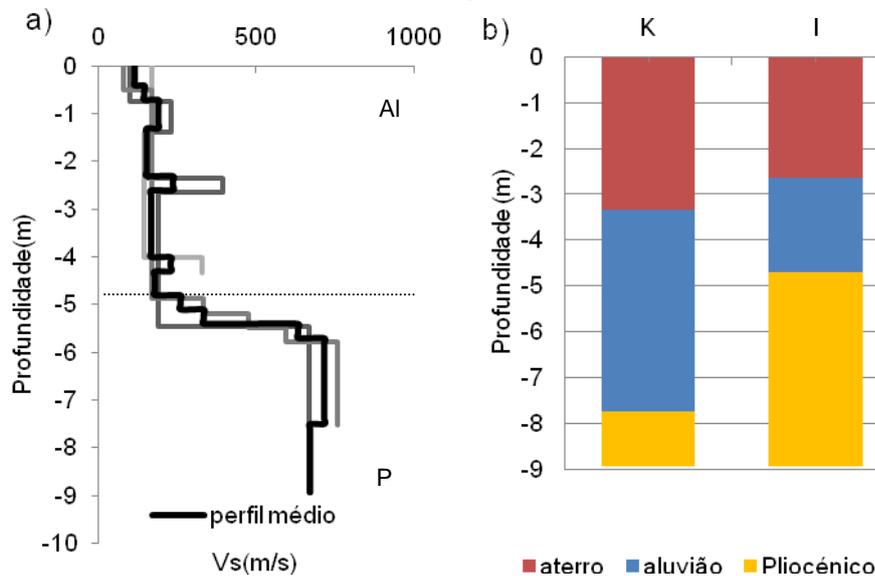


Figura A9.7 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). At – aterros; At2 – aterros do tipo 2; Al – aluviões; P – Pliocénico.

### ReMi 11

Estes ensaios passivos realizaram-se no Holocénico e a sondagem mais próxima localiza-se a cerca de 500 m do ponto central. O perfil médio de  $V_s$  apresenta um acréscimo de  $V_s$  aos 2,6 m de profundidade, a que corresponderá o limite entre as formações superficiais e o Pliocénico. As interpolações relativas às espessuras das formações superficiais obtidas para o ponto central apresentam valores de espessuras das formações superficiais entre os 3,75 (I) e os 8 m (K).

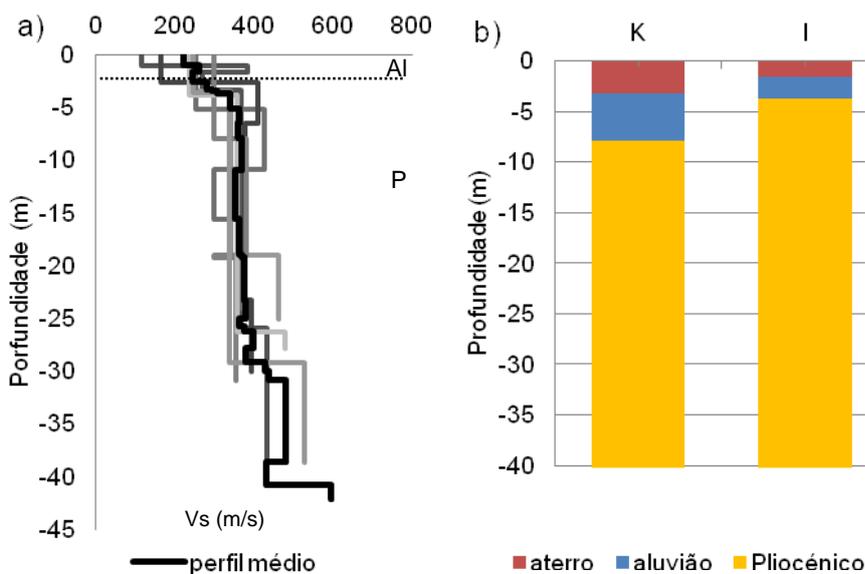


Figura A9.8 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). Al – aluviões; P – Pliocénico.

### ReMi 12

Estes ensaios passivos realizaram-se no Holocénico, perto do limite com o Pliocénico, e a sondagem mais próxima localizou-se a cerca de 330 m de distância. O perfil médio de  $V_s$  apresentou um aumento para velocidades aos 11,8 m de profundidade o que corresponderá ao limite entre as FS e o Pliocénico. A interpolação efetuada com todas as sondagens para o ponto central destes ensaios mostra que as espessuras das FS apresentam valores entre os 7 e os 9 m.

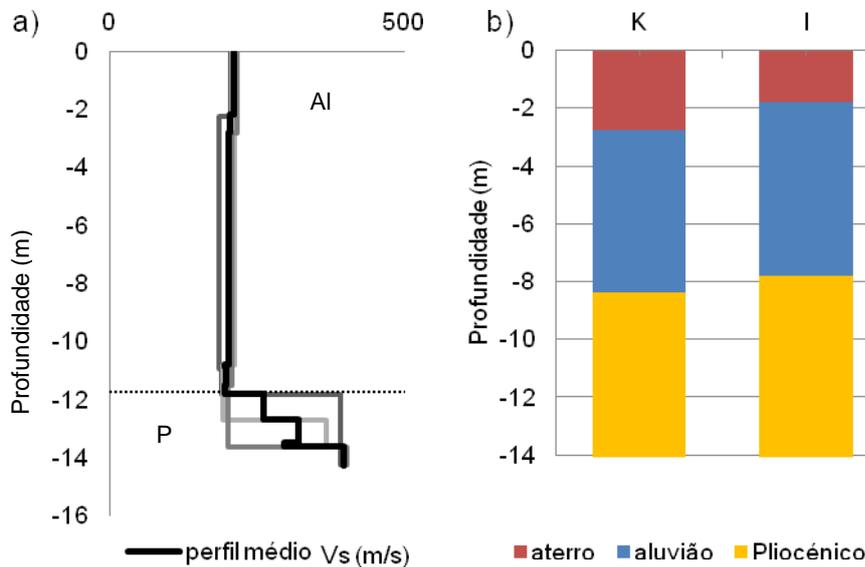


Figura A9.9 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). Al – aluviões; P – Pliocénico.

### ReMi 13

Estes ensaios ativos realizaram-se no Holocénico e a sondagem mais próxima (321) encontra-se a cerca de 200 m. Observou-se um aumento de  $V_s$  a partir dos 4,2 m tendo-se alcançado valores de 368 m/s aos 5,6 m de profundidade. Os valores relativos às espessuras das unidades obtidos por interpolação apresentaram o topo do Pliocénico entre os 7 e os 6 m, valores compatíveis com o perfil médio de  $V_s$ . O aumento de rigidez observado aos 4 m no perfil médio de  $V_s$  estará mais profundo no local da sondagem 321. Foi a partir dos 7,5 m que se observou um aumento de  $N_{SPT}$ .

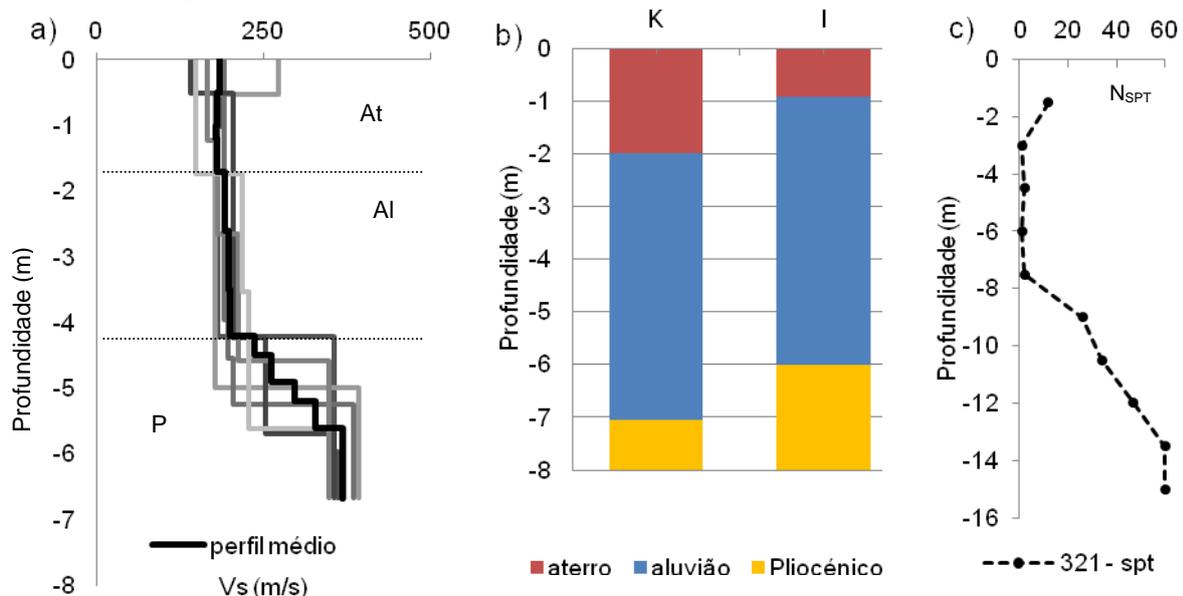


Figura A9.10 – (a) Perfis de  $V_s$ . At – aterro; Al – aluviões; P – Pliocénico; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K -Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias); (c)  $N_{SPT}$  da sondagem 321.

### ReMi 14

Estes ensaios ativos realizaram-se no Holocénico e verificou-se que o perfil médio de  $V_s$  apresenta o limite entre as FS e o Pliocénico entre os 2,5 e os 3,5 m. Obteve-se informação geotécnica com base na sondagem 438 executada a cerca de 50 m do ponto central. Segundo o seu *log* as formações superficiais apresentaram uma espessura de 3,8 m. As interpolações das espessuras das formações superficiais situaram-se entre os 7,5 e os 5,5 m. O valor de  $N_{SPT}$  de 36 alcançado aos 4,5 m de profundidade poderá corresponder ao acréscimo dos valores de  $V_s$  a partir do 2,6 m.

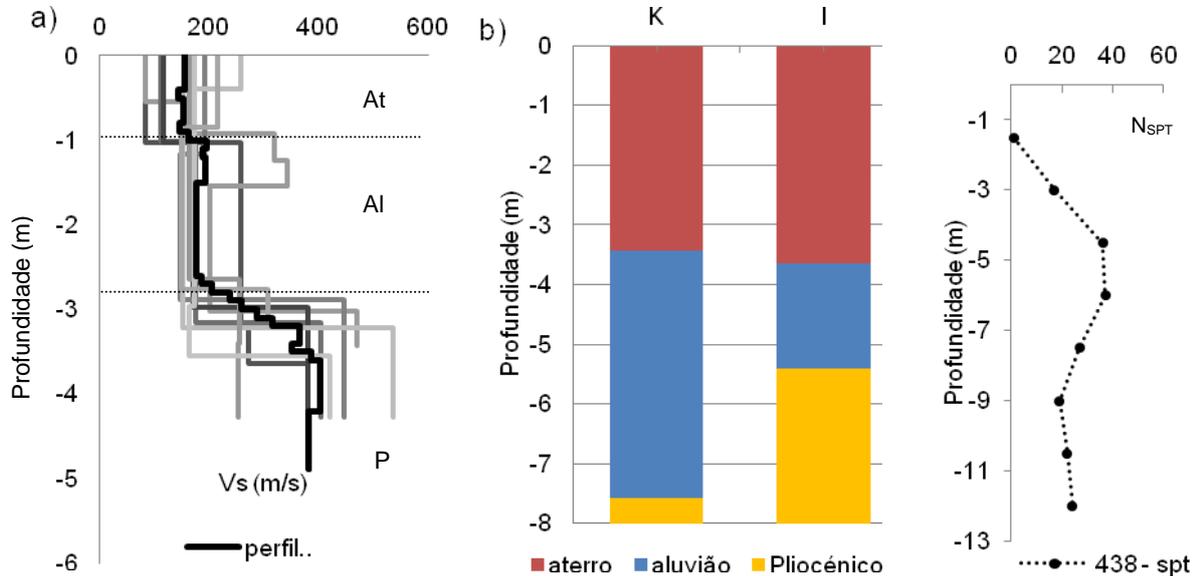


Figura A9.11 – (a) Perfis de  $V_s$ . At – aterro; Al – aluviões; P – Pliocénico; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K -Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias); (c)  $N_{SPT}$  da sondagem 438.

### ReMi 15

Estes ensaios ativos realizaram-se no Pliocénico e a sondagem mais próxima localizou-se a cerca de 250 m. O perfil médio de  $V_s$  mostra até aos 1,6 m de profundidade valores de  $V_s$  inferiores a 190 m/s. A partir desta profundidade já no Pliocénico, as velocidades são superiores a 270 m/s. Os resultados das interpolações apresentaram valores compreendidos entre os 5 e os 7 m para a espessuras das FS.

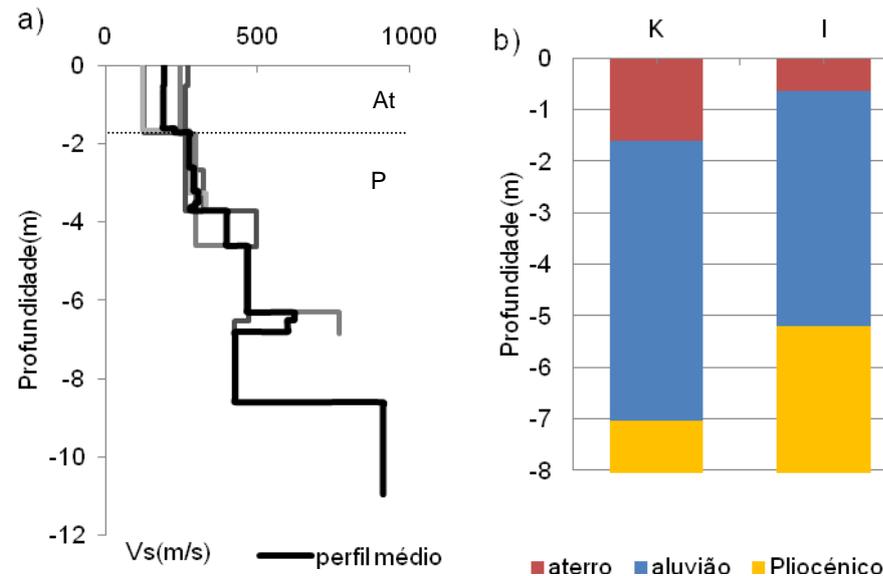


Figura A9.12 - (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). At – aterro; P – Pliocénico.

### ReMi 16

Estes ensaios ativos realizaram-se no Holocénico e as sondagens mais próximas situam-se a cerca de 170 m (sondagens 940 e 941). O perfil médio de  $V_s$  apresenta aos 5,9 m um aumento dos valores de  $V_s$  de 155 m/s para 215 m/s que corresponderá ao limite entre as FS e o Pliocénico. Os dados referentes às sondagens mais próximas e as estimativas obtidas por interpolação apresentam maiores profundidades do topo do Pliocénico (12-9 m) do que o perfil médio de  $V_s$  (6 m).

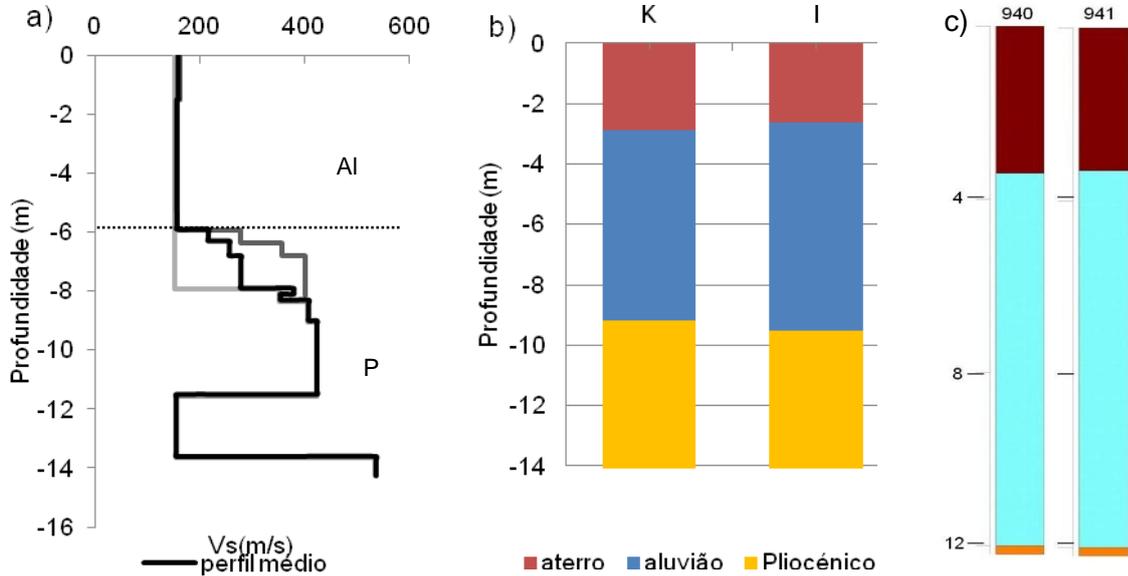


Figura A9.13 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). Al – aluviões; P – Pliocénico; (c) logs sondagens 940 e 941. Castanho – aterros, azul – aluviões, laranja – Pliocénico.

### ReMi 17

Estes ensaios ativos realizaram-se no Holocénico e as sondagens mais próximas encontram-se a cerca de 120 m do ponto central. O perfil médio de  $V_s$  apresenta um claro aumento de velocidades aos 9 m o que corresponderá ao topo do Pliocénico. Os logs das sondagens e as interpolações da espessura das FS apresentam uma boa consistência com o perfil médio de  $V_s$ .

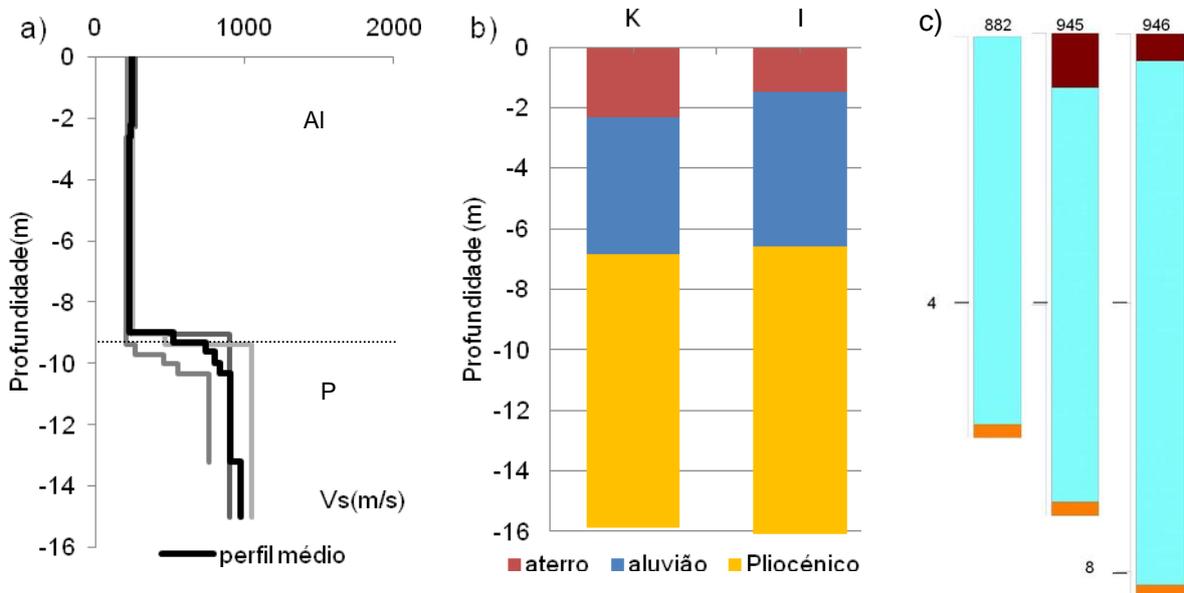


Figura A9.14 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). Al – aluviões; P – Pliocénico; (c) logs sondagens 882, 945 e 946. Castanho – aterros, azul – aluviões, laranja – Pliocénico.

**ReMi18**

Estes ensaios ativos realizaram-se no Pliocénico a uma distância de 40 m da sondagem 932. O perfil médio de  $V_s$  apresenta um aumento de velocidade a partir dos 2,8 m de profundidade o que corresponderá ao topo do Pliocénico. O  $\log$  da sondagem 932 apresenta uma boa relação com o perfil médio de  $V_s$ . Os valores da espessura das Fs obtidos pelas interpolações são superiores aos de  $V_s$ .

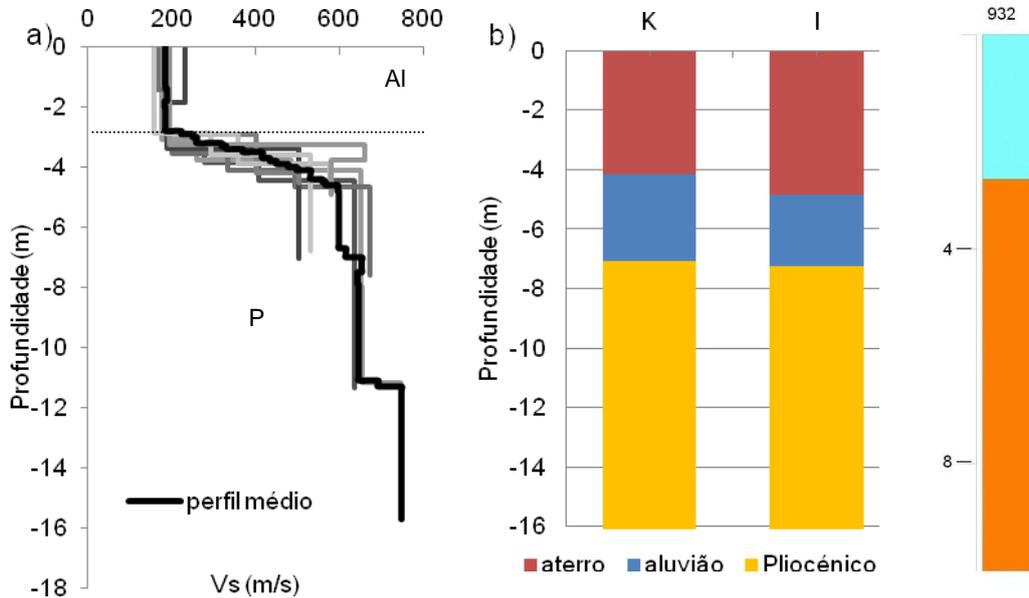


Figura A9.15 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). Al – aluviões; P – Pliocénico; (c)  $\log$  sondagem 932. Azul – aluviões, laranja – Pliocénico.

**ReMi 19**

Estes ensaios ativos realizaram-se no Holocénico perto do limite com o Pliocénico. O perfil médio de  $V_s$  apresentou até aos 2 m de profundidade velocidades entre os 180 e os 200 m/s, mas a partir dos 3 m a velocidade média aumentou para 310 m/s. O resultado de um ensaio de Penetração Dinâmica Super Pesada realizado a 60 m do ponto central indicou que o limite entre as FS e o Pliocénico se poderá situar aos 5 m. Os valores da espessura das FS obtidos por interpolação (8-9 m) foram superiores aos anteriores.

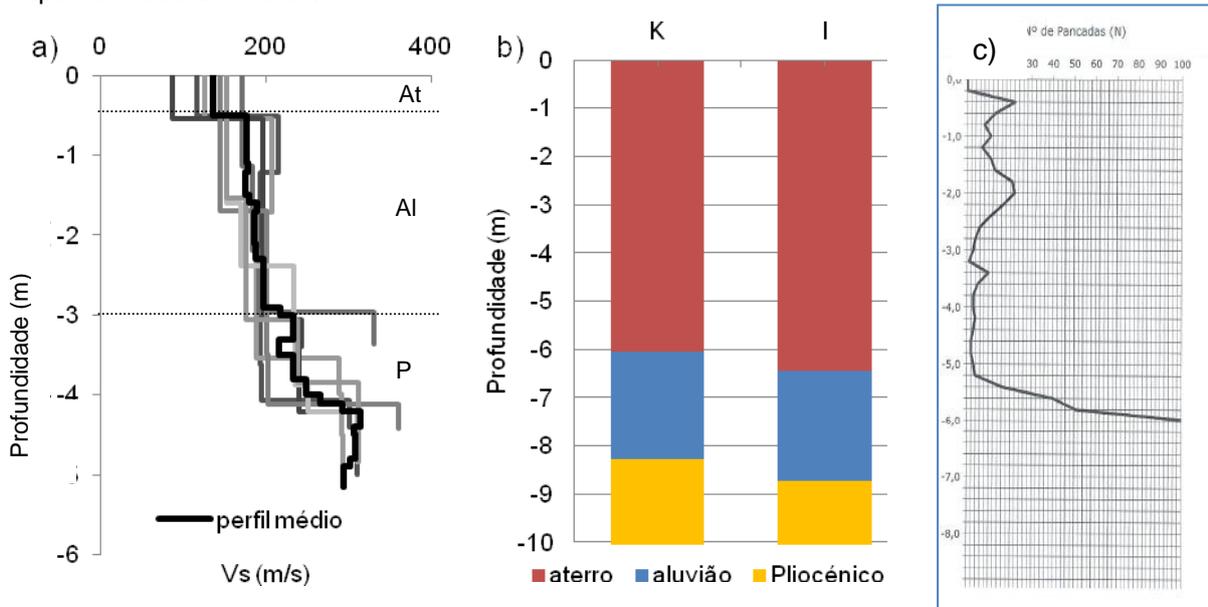


Figura A9.16 (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). At – aterros; Al – aluviões; P – Pliocénico; (c) resultado de um ensaio de penetrómetro dinâmico superpesado realizado a 60 m do ponto central do ensaio ReMi 19. Eixo vertical – profundidade, eixo horizontal – número de pancadas.

### ReMi 20

Estes ensaios passivos realizaram-se no Plistocénico já perto do limite com o Pliocénico, a mais de 250 m de uma sondagem. O perfil médio de  $V_s$  apresenta um aumento de velocidade a partir dos 6 m passando de 270 m/s para os 456 m/s aos 9 m. No local do ensaio ReMi, a diferença entre a cota a que se realizaram os ensaios ReMi (35,5 m) e a cota do limite entre o Plistocénico e o Pliocénico (29,5) é de 6 m. Este valor poderá corresponder ao segmento do perfil de  $V_s$  compreendido entre os 0,4 e 6 m de profundidade e que se desenvolverá no Plistocénico.

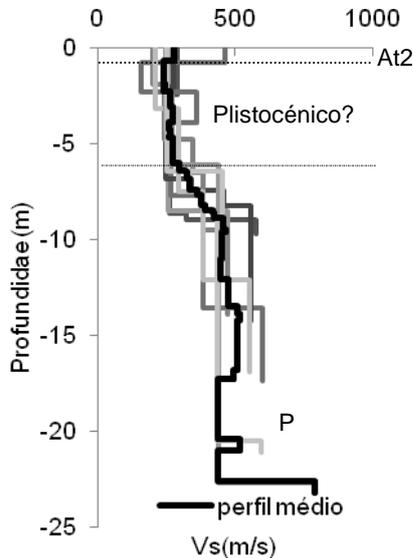


Figura A9.17 – (a) Perfis de  $V_s$ ; At2 – Aterros do tipo 2; P – Pliocénico.

### ReMi 21

Estes ensaios ativos realizaram-se no Holocénico e as sondagens mais próximas situam-se a mais de 200 m. O perfil médio de  $V_s$  apresentou um aumento de velocidade, entre os 6,2 e os 6,6 m de profundidade, o que poderá corresponder ao limite entre as FS e o Pliocénico. As interpolações relativas à espessura das FS foram superiores ao valor obtido com o perfil médio de  $V_s$ . Os valores de  $N_{SPT}$  obtidos em duas sondagens localizadas a mais de 200 m, apresentaram comportamentos opostos a partir dos 8 m. Os valores de  $N_{SPT}$  da sondagem 320, que apresentaram aumento dos seus valores a partir dos 6 m, estarão de acordo com o perfil médio de  $V_s$ .

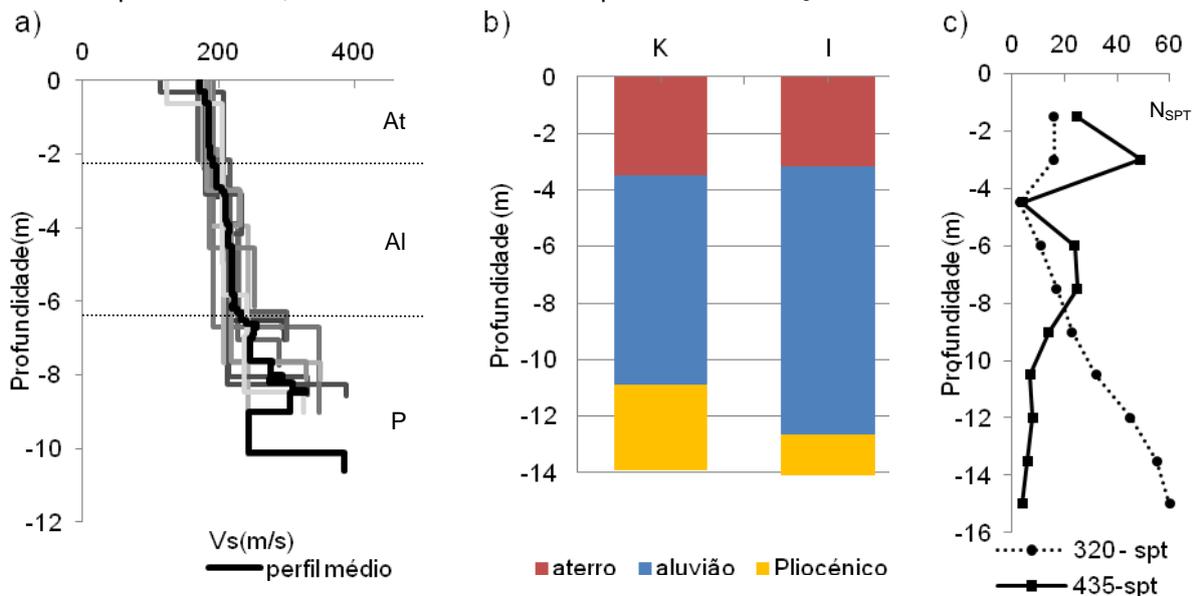


Figura A9.18 – (a) Perfis de  $V_s$ . At – aterros; Al – aluviões; P – Pliocénico (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K -Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias); (c)  $N_{SPT}$  das sondagens 320 e 435.

### ReMi 22

Os ensaios realizaram-se no Plistocénico e a sondagem mais próxima localiza-se a mais de 250 m do ponto central. O perfil médio de  $V_s$  inicia-se com valores acima dos 350 m/s e aos 16 m apresentou um aumento para valores superiores a 600 m/s. O limite entre o Plistocénico e Pliocénico poderá corresponder a esse aumento de velocidade e situar-se então aos 16 m de profundidade.

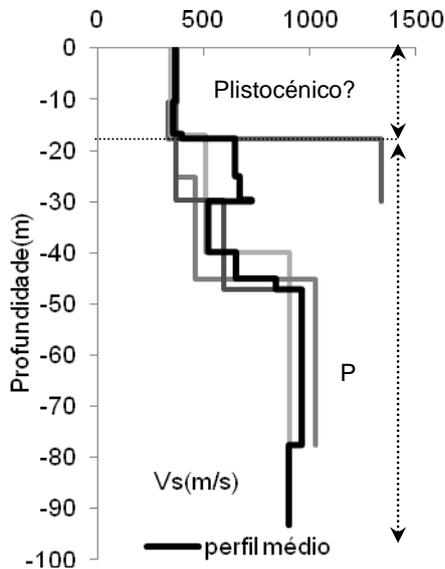


Figura A9.19 – Perfis de  $V_s$ . P – Pliocénico.

### ReMi 23

Estes ensaios passivos realizaram-se no Pliocénico a cerca de 58 m da sondagem 428. O perfil médio de  $V_s$  apresenta aos 2 m de profundidade um aumento de velocidade de 200 m/s para 500 m/s alcançando a partir dos 30 m de profundidade valores superiores a 1100 m/s. As interpolações relativas à espessura das FS apresentaram esse limite aos 2 m de profundidade. A sondagem 428 apresentou o limite entre as FS (aterros) e o Pliocénico aos 1,9 m de profundidade e os valores de  $N_{SPT}$  estão de acordo com a variação dos valores de  $V_s$ .

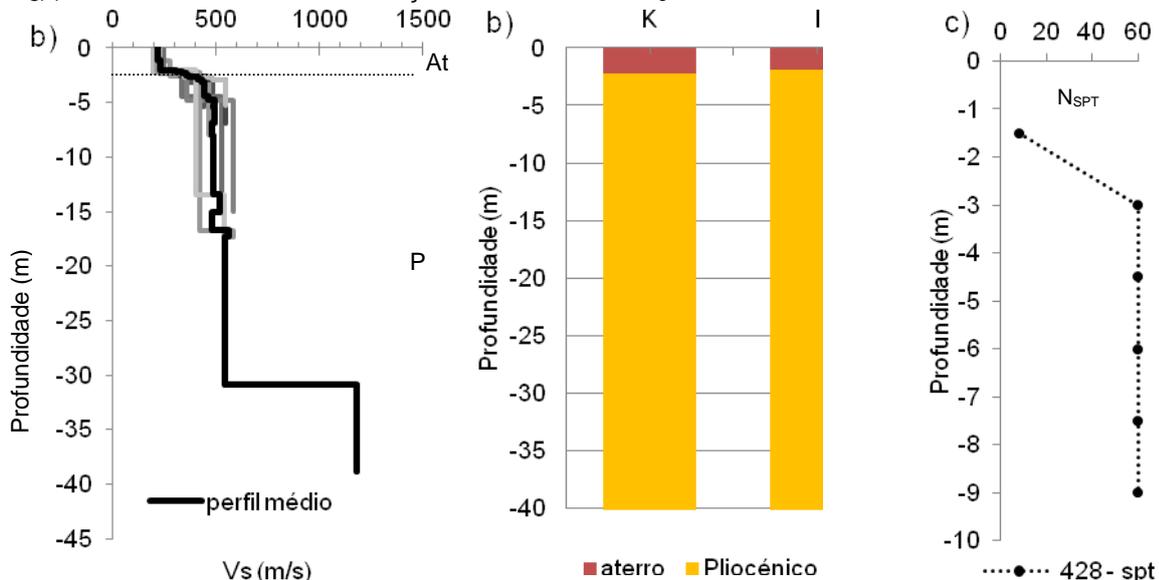


Figura A9.20 – (a) Perfis de  $V_s$ . At – aterros; P – Pliocénico (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K -Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias); (c)  $N_{SPT}$  da sondagem 428.

### ReMi 24

Estes ensaios passivos realizaram-se no Holocénico, perto do limite com o Pliocénico, e a sondagem mais próxima localiza-se a uma distância de 250 m. O perfil de  $V_s$  apresenta um aumento de velocidades a partir dos 3,4 m que corresponderá ao topo do Pliocénico. As interpolações efetuadas relativas à espessura das formações superficiais apresentaram valores entre os 5 e os 7 m.

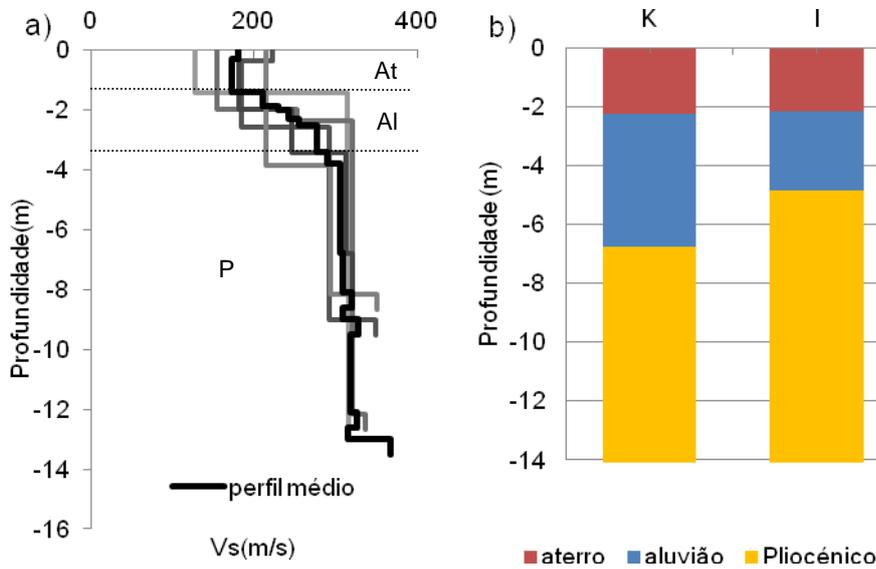


Figura A9.21 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). At – aterros; Al – aluviões; P – Pliocénico.

### ReMi 25

Estes ensaios ativos realizaram-se no Holocénico, perto do limite com o Pliocénico, e a sondagem mais próxima situa-se a cerca de 400 m. Nos primeiros 3 m o perfil médio de  $V_s$  apresenta dois patamares de velocidades que se deverão relacionar com as unidades presentes neste local. Um aos 1, 4 m (aterros) e outro até aos 3 m de profundidade (aluviões).

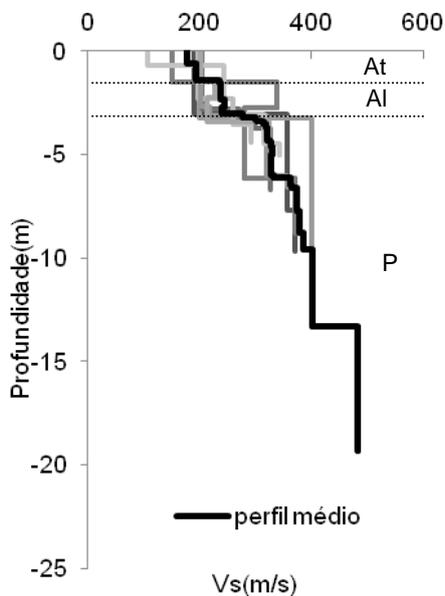


Figura A9.22 – Perfis de  $V_s$ . At – aterros; Al – aluviões; P – Pliocénico.

### ReMi 26

Estes ensaios ativos realizaram-se no Holocénico a cerca de 30 m da sondagem 837 (espessura FS de 7 m) e a 53 m da sondagem 838 (espessura FS aproximadamente de 12 m). O perfil médio de  $V_s$  apresenta no seu início um nível com velocidades de 320 m/s provavelmente devido à existência de um aterro do tipo 2. Verifica-se um aumento  $V_s$  a partir dos 6,2 m de profundidade devido à transição das formações superficiais para o Pliocénico. As interpolações relativas à espessura das FS apresentaram valores entre os 8 e os 9 m.

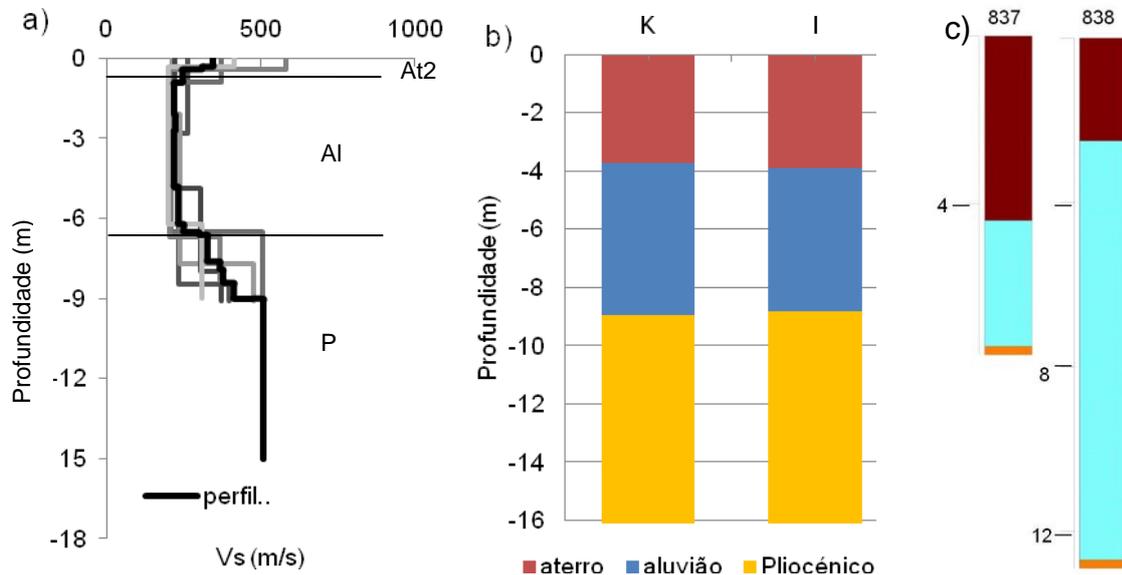


Figura A9.23 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). At – aterros; Al – aluviões; P – Pliocénico; (c) log sondagens 837 e 838. Castanho – aterros, azul – aluviões, laranja – Pliocénico.

### ReMi 27

Estes ensaios ativos realizaram-se no Holocénico e verifica-se que o perfil médio de  $V_s$  apresenta valores superiores a 300 m/s a partir de 1 m de profundidade e até aos 4 m. Trata-se de uma área do Holocénico com aterros do tipo 2. Entre os 4 m e os 18 m não existe um aumento de velocidades a que possa associar ao limite entre as formações superficiais e o Pliocénico. Os valores das espessuras das unidades obtidos por modulação para o ponto central dos ensaios Remi, apresentam o limite entre as formações superficiais e o Pliocénico situa-se entre os 15 e os 18 m.

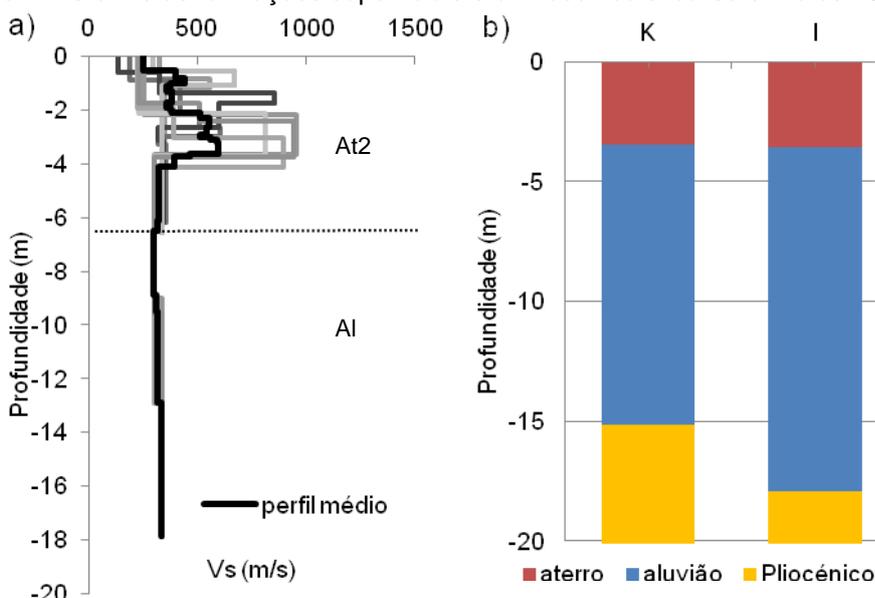


Figura A9.24 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). At2 – aterros do tipo 2; Al – aluviões.

Nas imagens do *Google Earth* do local ensaiado observam-se aterros que terão alcançado cotas superiores a 15 m segundo o extrato da carta topográfica 1:25.000 (Instituto Geográfico do Exército 2009). Atualmente o local do ensaio possuirá uma cota de 3 m, mas a colocação dos aterros terá compactado as formações superficiais o que se terá traduzido nas velocidades de 300 m/s encontradas para o Holocénico deste local.

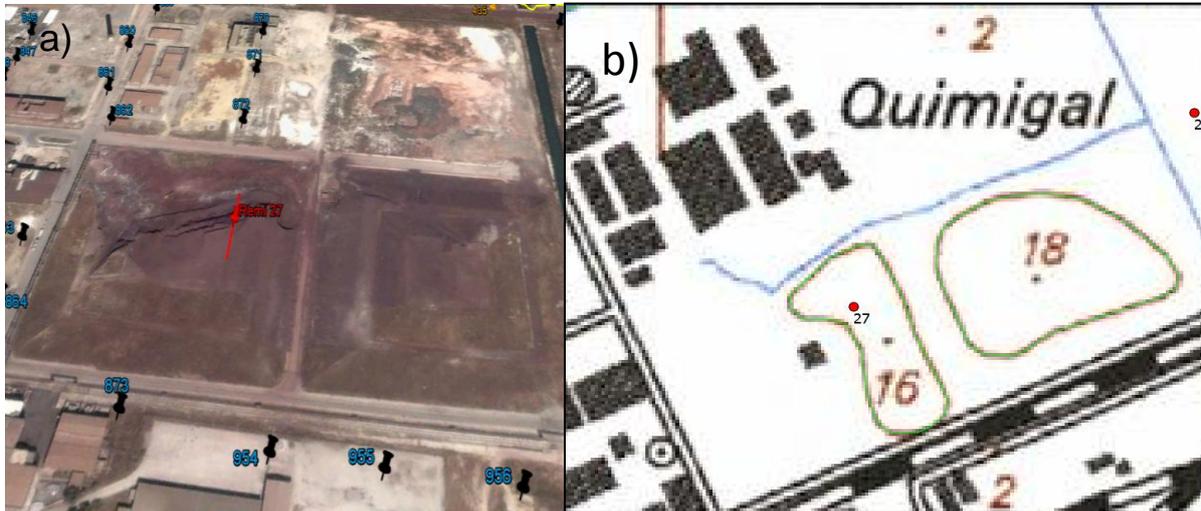


Figura A9.25 – (a) Imagem do *Google Earth* do local onde se realizarem os ensaios ReMi 27; (b) extrato da carta topográfica da mesma área (Instituto Geográfico do Exército 2009).

### ReMi 28

Estes ensaios ativos realizaram-se perto do limite do Plistocénico com o Pliocénico, com a sondagem mais próxima a cerca de 700 m. Observando-se o perfil médio de  $V_s$  poderemos inferir que será provável que o limite entre aterros e o Pliocénico se localize a 1,5 m de profundidade.

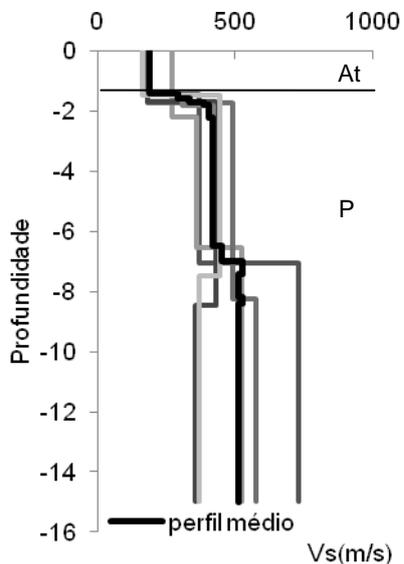


Figura A9.26 – Perfis de  $V_s$ .

### ReMi 29

Estes ensaios passivos realizaram-se quase no limite entre o Holocénico e o Pliocénico, com sondagens localizadas a menos de 100 m de distância do ponto central. Observando-se o perfil médio de  $V_s$  verifica-se que até aos 13 m de profundidade os valores de  $V_s$  se situam nos 290 m/s. Considerou-se que o perfil se desenvolve no Pliocénico. A espessura das formações superficiais obtida por modulação para o ponto central é cerca de 6 m. Comparando as espessuras das formações superficiais obtidas nas sondagens circundantes ao ponto central (sondagens 952, 818, 953, 825, 831 e 942) verifica-se que existem grandes variações nas espessuras das FS, mas a sondagem mais perto do ponto central (953) apresenta cerca de 1 m de aluviões.

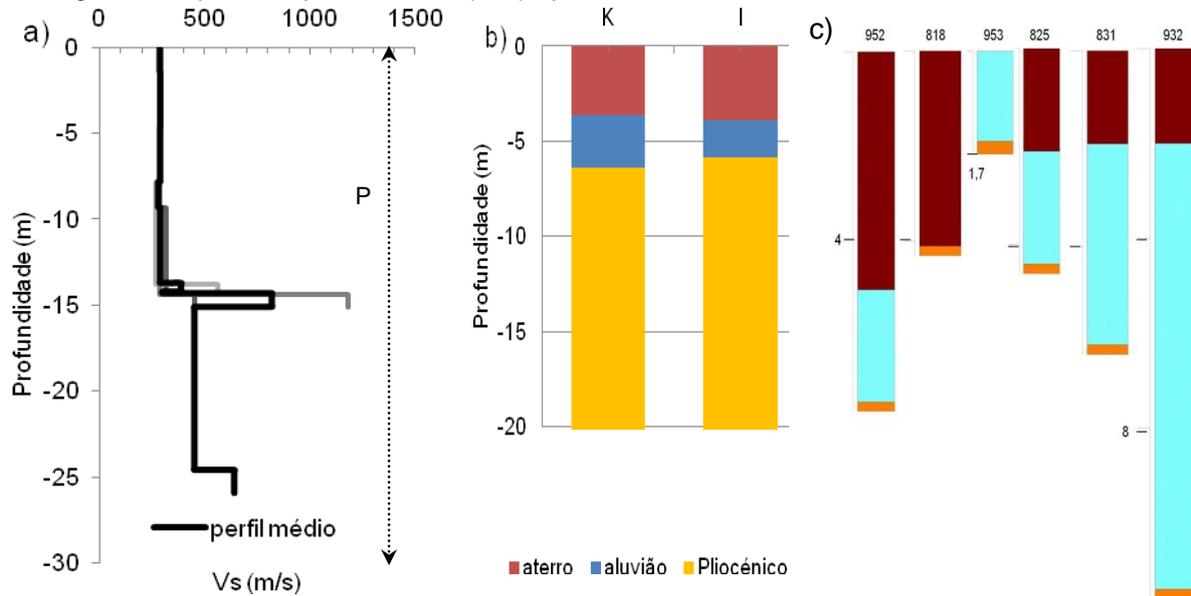


Figura A9.27 (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). P – Pliocénico; (c) log sondagens 952, 818, 953, 825, 831 e 942. Castanho – aterros, azul – aluviões, laranja – Pliocénico.

### ReMi 30

Estes ensaios passivos realizaram-se no Plistocénico e na berma de uma via principal do Barreiro. O perfil médio de  $V_s$  apresenta uma faixa com valores superiores a 600 m/s, provavelmente devido à existência de uma estrutura enterrada (redes de saneamento, de distribuição de água) que não foi identificada no local. Não é possível diferenciar no perfil médio de  $V_s$  um limite entre o Plistocénico e o Pliocénico.

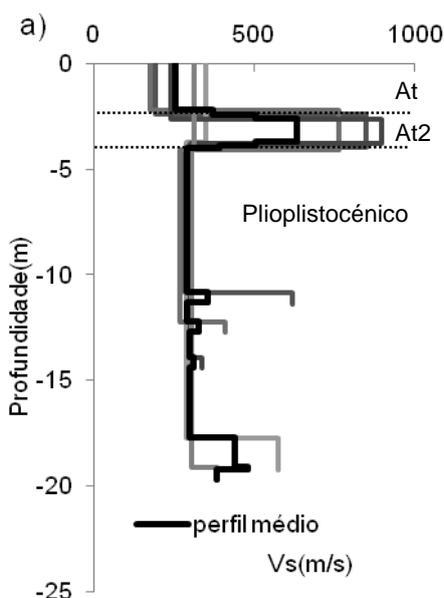


Figura A9.28 - Perfis de  $V_s$ . At – aterro, At2 – aterro do tipo 2.

### ReMi 31

Estes ensaios passivos realizaram-se no Holocénico ao longo da berma de uma via principal do Barreiro. Observando-se o perfil médio de  $V_s$  constata-se que o limite entre as FS e o Pliocénico se localizou aos 5 m de profundidade. As interpolações efetuadas para o ponto central colocam o topo do Pliocénico entre os 9 e os 12 m.

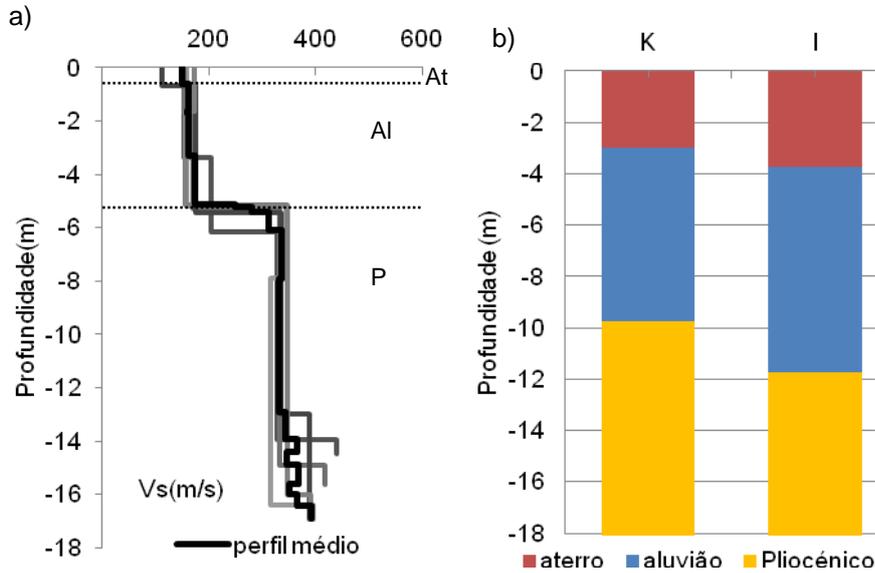


Figura A9.29 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). At – aterro, Al – aluvião, P - Pliocénico.

### ReMi 32

Estes ensaios passivos e ativos foram executados no Pliocénico, ao lado de uma estação ferroviária e a menos de 30 m das sondagens 405 e 406. O limite entre as FS e o Pliocénico situou-se aos 3,5 m de profundidade, onde se verificou um incremento de velocidade dos 200 m/s para os 390 m/s. As interpolações das espessuras das FS para o ponto central do ensaio ReMi apresentaram valores de 1 m para a espessura das FS. Os logs das sondagens 405 e 406 apresentaram esse limite aos 4 m de profundidade e o perfil de  $N_{SPT}$  não apresenta uma relação direta com o perfil de  $V_s$ .

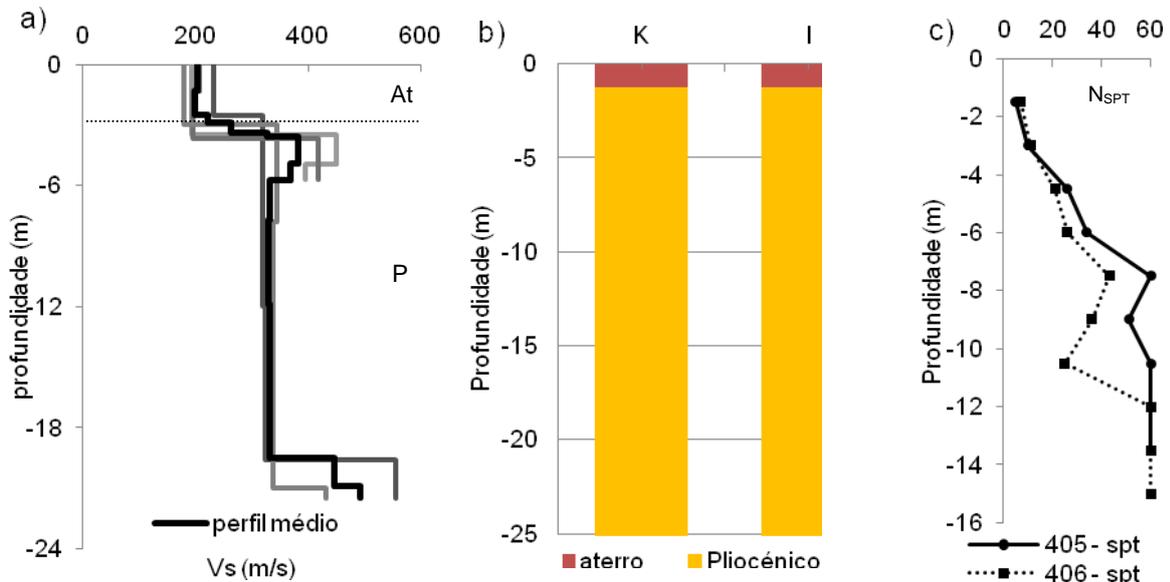


Figura A9.30 (a) Perfis de  $V_s$ . At – aterro; P - Pliocénico; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K -Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias); (c)  $N_{SPT}$  das sondagens 405 e 406.

### ReMi 34

Estes ensaios ativos realizaram-se no Holocénico e, para além das inúmeras sondagens que envolvem o local do ensaio, existem duas a menos de 100 m (912 e 913). A variação do perfil médio de  $V_s$  mostra que o limite entre as FS e o Pliocénico se situou aos 5 m de profundidade. Está presente entre os 0,6 e 1,7 m de profundidade, um nível com velocidade elevada (469 m/s) que poderá corresponder a um aterro de elevada rigidez (aterros do tipo 2). As sondagens 912 e 913 mostram que as espessuras das formações superficiais se situam entre os 0,6 e os 1,4 m. Outras sondagens (893, 894 e 895) apresentaram espessuras de FS entre os 4,8 e 3 m, próximas do valor encontrado na curva média e  $V_s$ . As interpolações efetuadas mostraram espessuras de FS idênticas ao valor obtido com o perfil médio de  $V_s$ .

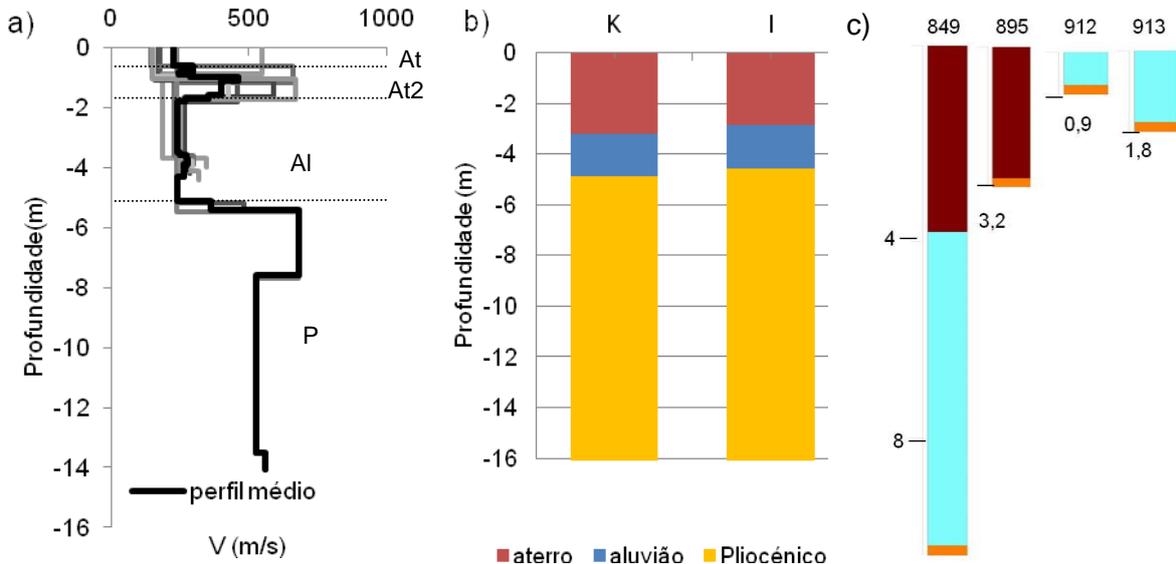


Figura A9.31 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). At – aterro; At2 – aterro do tio 2; Al – aluvião; P – Pliocénico; (c) log sondagens 894, 895, 912 e 913. Castanho – aterros, azul – aluviões, laranja – Pliocénico.

### ReMi 35

Estes ensaios passivos realizaram-se no Holocénico e a variação de  $V_s$  revelou que o limite entre as FS e o Pliocénico se situou aos 12 m. As sondagens 439, 440 e 319 apresentaram esse limite aos 2 m mas os valores de  $N_{SPT}$  da sondagem 319 poderão estar de acordo com o perfil médio de  $V_s$ . As interpolações calculadas para a espessura das FS são menores ao valor obtido com base em  $V_s$ .

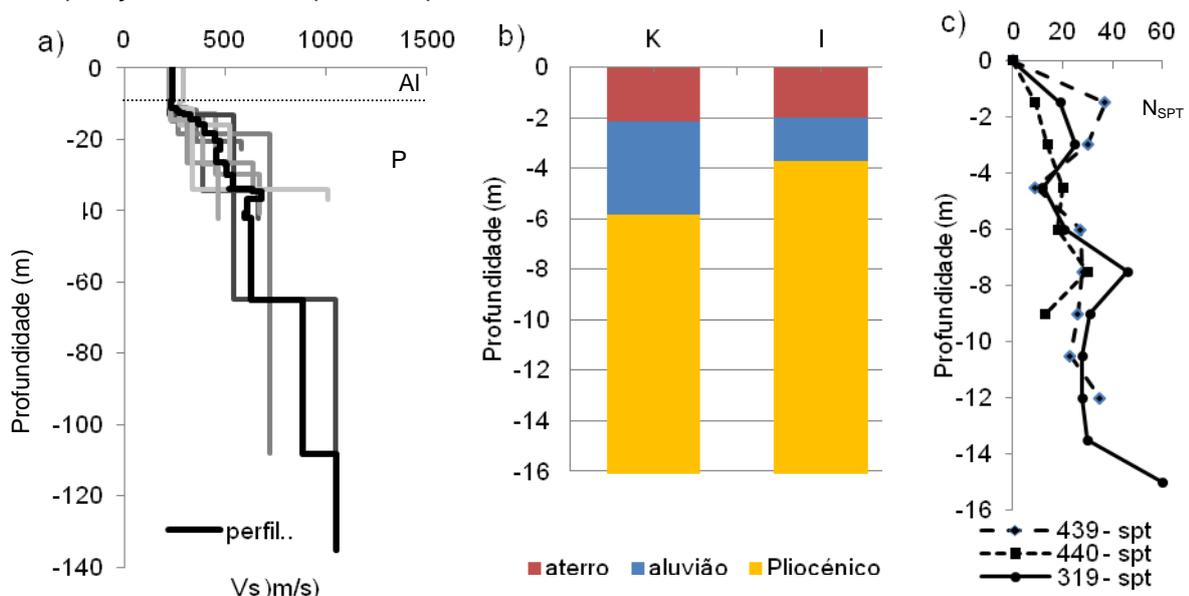


Figura A9.32 – (a) Perfis de  $V_s$ . Al – aluvião; P – Pliocénico; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias); (c)  $N_{SPT}$  das sondagens 319, 439 e 440.

**ReMi 36**

Estes ensaios passivos realizaram-se no Pliocénico e o perfil médio de  $V_s$  mostrou um aumento de velocidade entre os 2 e os 4 m. Os dados obtidos nos logs das sondagens mais próximas mostraram a presença de um nível de solo até 0,5 m de profundidade. As interpolações calculadas para a espessura das formações superficiais apresentaram valores semelhantes aos da curva média de  $V_s$ . Observando-se o perfil de  $N_{SPT}$  de quatro sondagens próximas verifica-se que  $N_{SPT60}$  pode corresponder ao aumento dos valores de  $V_s$ .

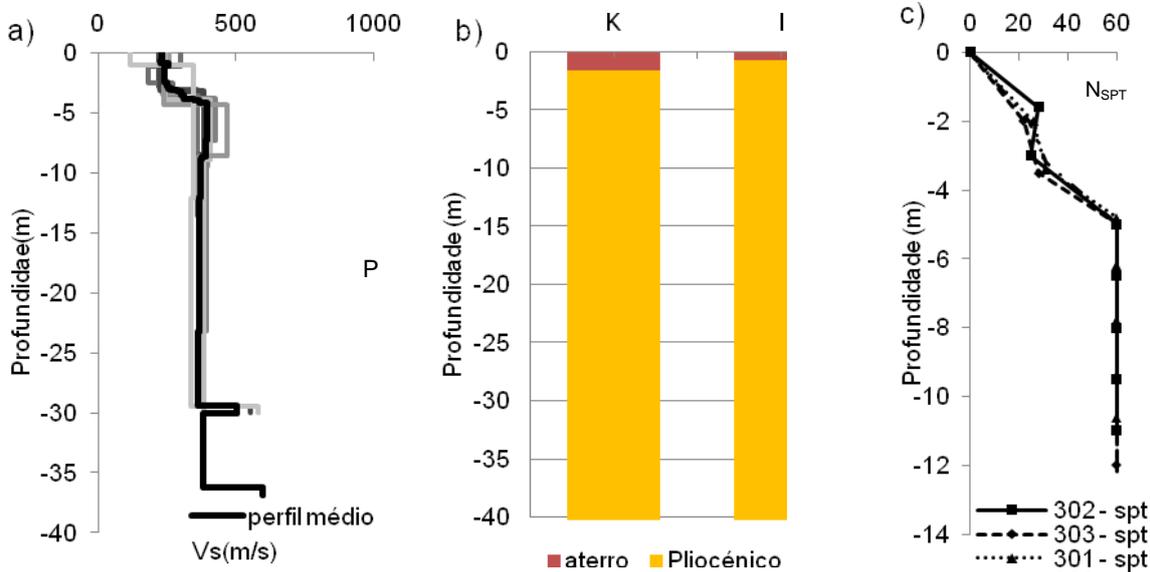


Figura A9.33 – (a) Perfis de  $V_s$ . P - Pliocénico; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K -Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias); (c)  $N_{SPT}$  das sondagens 298, 301, 302 e 303.

**ReMi 37**

Realizaram-se neste local quatro ensaios passivos no limite entre o Holocénico e o Pliocénico. O perfil médio de  $V_s$  apresenta um aumento de velocidade aos 3,7 m que corresponderá ao limite entre as FS e o Pliocénico. Segundo as interpolações efetuadas este limite situar-se-á aos 3 m de profundidade. A sondagem mais próxima (330) apresentou um valor de 0,8 m para a espessura das FS e o valor alcançado aos 3,5 m no seu perfil de  $N_{SPT}$  pode corresponder ao aumento do  $V_s$  verificado aos 3,7 m.

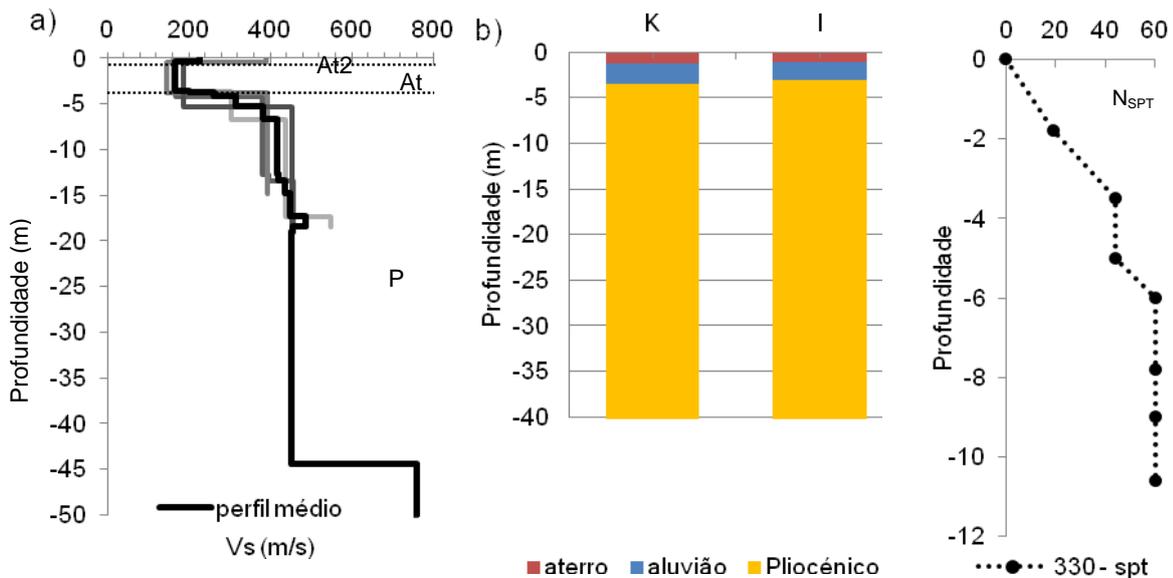


Figura A9.34 – (a) Perfis de  $V_s$ . At2 – aterros do tipo 2; At – aterros; P - Pliocénico; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K -Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias); (c)  $N_{SPT}$  da sondagem 330.

### ReMi 38

Estes ensaios passivos realizaram-se na gare marítima do Barreiro e foi possível obter informação sobre várias sondagens aqui executadas. A mais próxima situou-se a cerca de 85 m do ponto central. O perfil médio de  $V_s$  mostra a existência de uma superfície localizada perto dos 12 m de profundidade onde os valores de  $V_s$  mudam dos 165 m/s para os 330 m/s e que corresponde ao limite entre o Holocénico e o Pliocénico. Foi realizado um perfil entre as sondagens 450 e 323 e o local onde se realizaram os ensaios ReMi: verificou-se que o limite entre as formações superficiais e o Pliocénico se situará a cerca de 13 m de profundidade. As interpolações efetuadas mostram uma diferença de 3 m entre os dois métodos utilizados. Verifica-se que o método de Krigagem é aquele que se mais se aproximou dos valores da curva média de  $V_s$ .

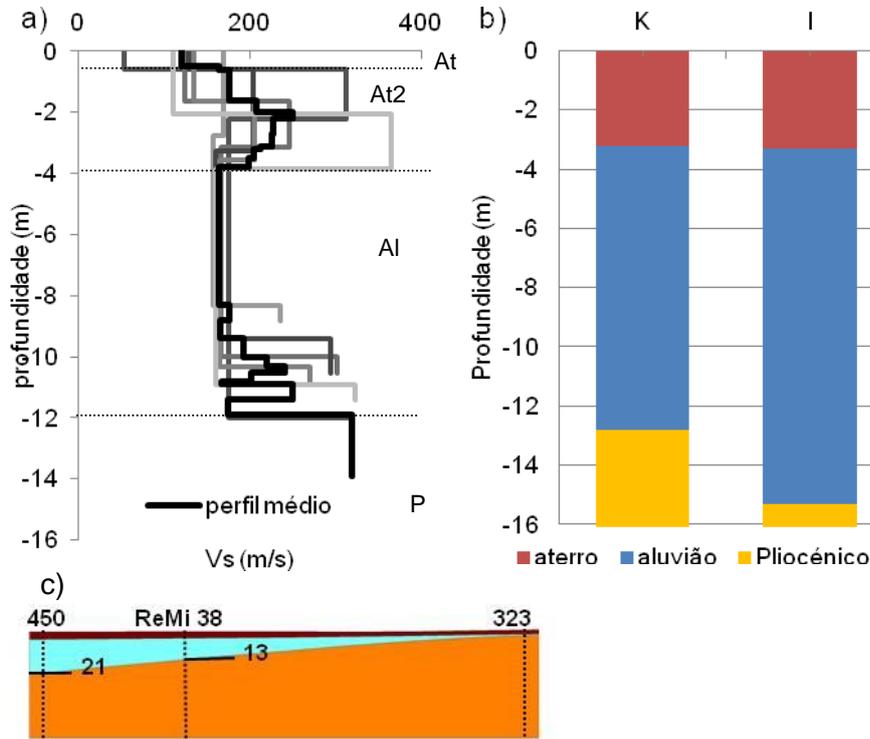
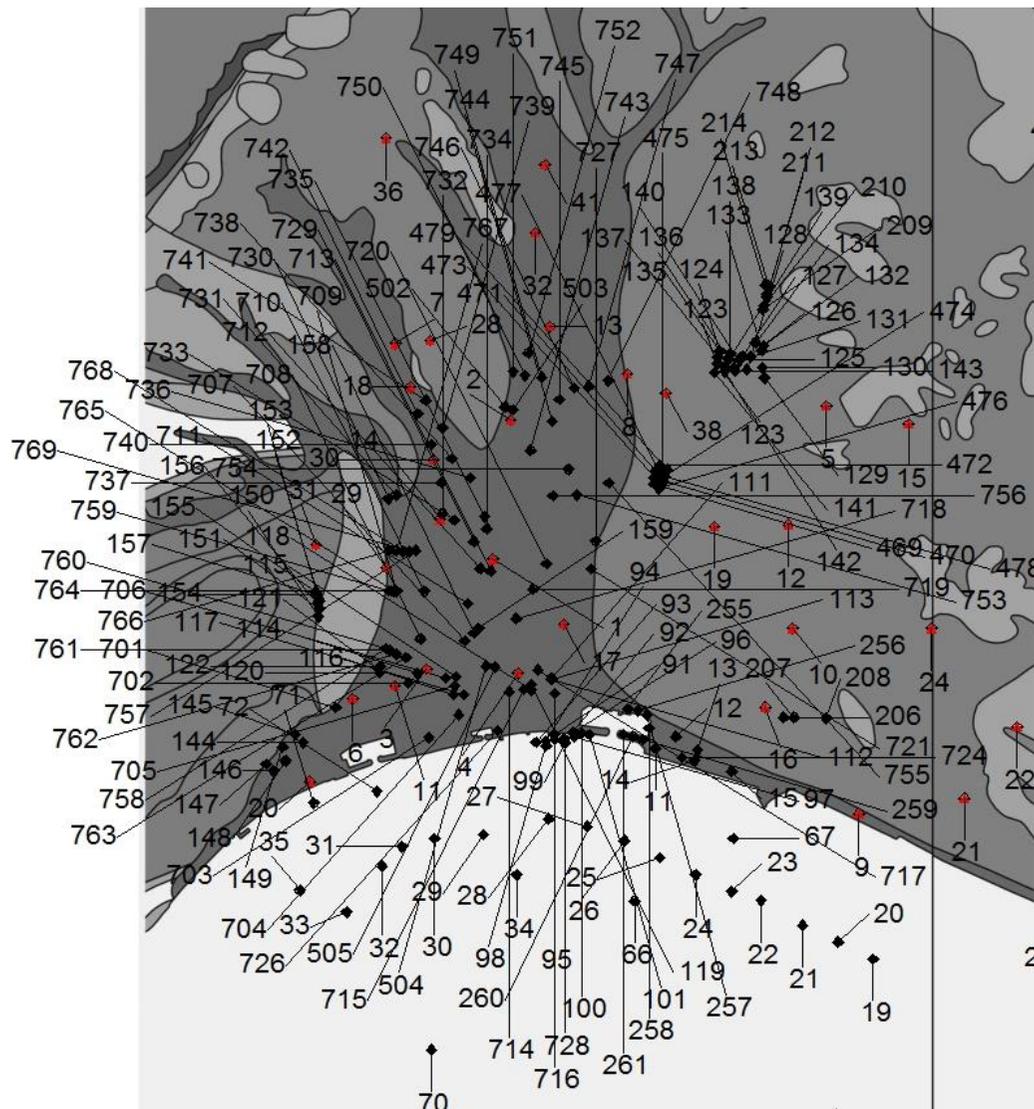


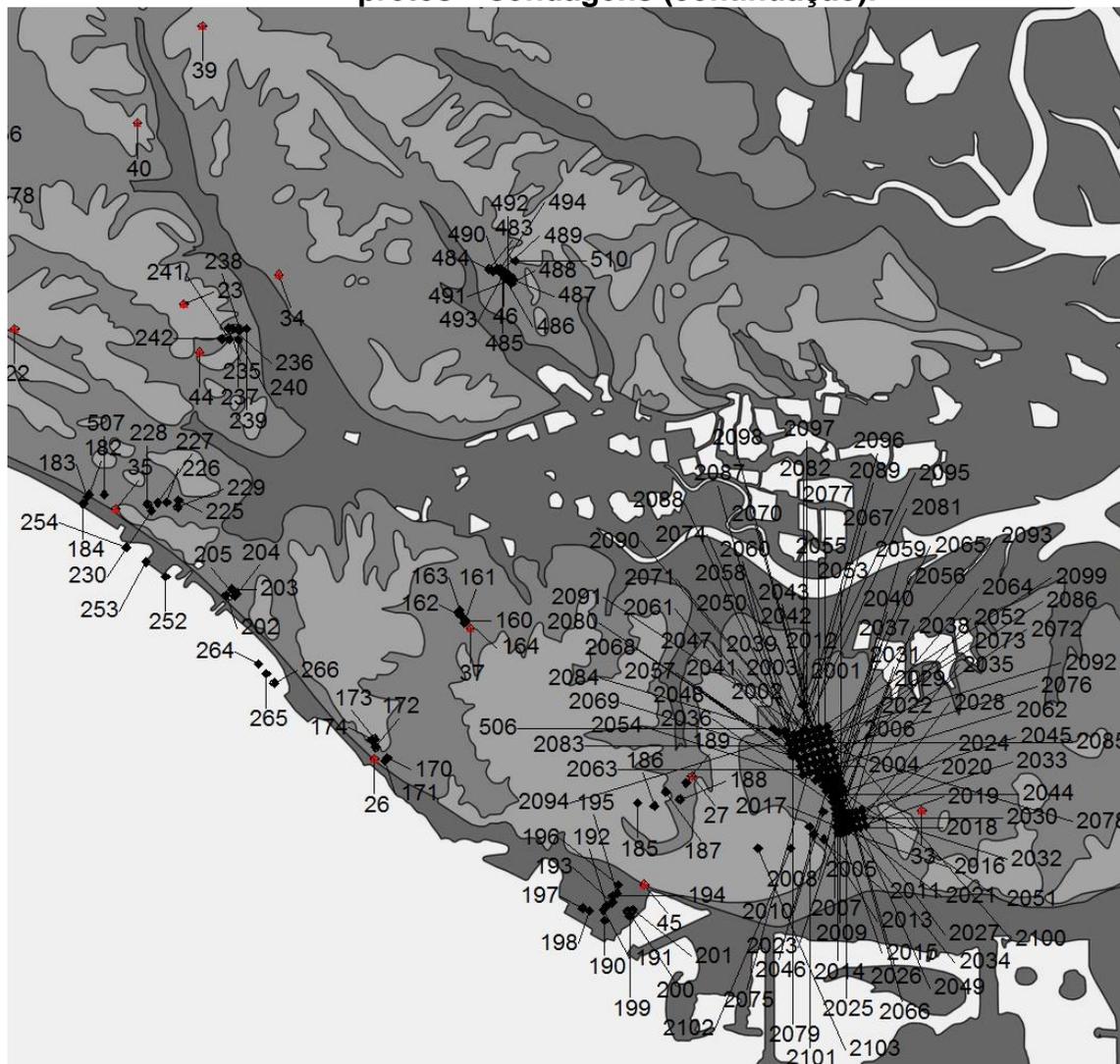
Figura A9.35 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). At2 – aterros do tipo 2; At – aterros; P – Pliocénico; (c) perfil geológico entre as sondagens 450 e 323. Castanho – aterros, azul – aluviões, laranja – Pliocénico.

## **ANEXO X – LOCALIZAÇÃO E RESULTADOS DOS ENSAIOS REMI EM SETÚBAL**

Localização dos ensaios ReMi e das sondagens em Setúbal e Mitrena. Pontos vermelhos ensaios ReMi; pontos pretos – sondagens.



Localização dos ensaios ReMi e das sondagens em Setúbal e Mitrena. Pontos vermelhos ensaios ReMi; pontos pretos – sondagens (continuação).



### ReMi 1

Estes ensaios passivos realizaram-se no Holocénico e observando-se o perfil médio verifica-se um aumento de  $V_s$  para valores superiores a 300 m/s aos 20 m de profundidade o que corresponderá ao limite entre os aluviões e o Pliocénico. As interpolações relativas à espessura das FS mostraram valores análogos, mas não é clara a distinção entre os aterros e aluviões no perfil médio de  $V_s$ . As sondagens que se localizam a 50 m do ponto central apresentaram o limite entre as FS e o Pliocénico aos 25 m de profundidade.

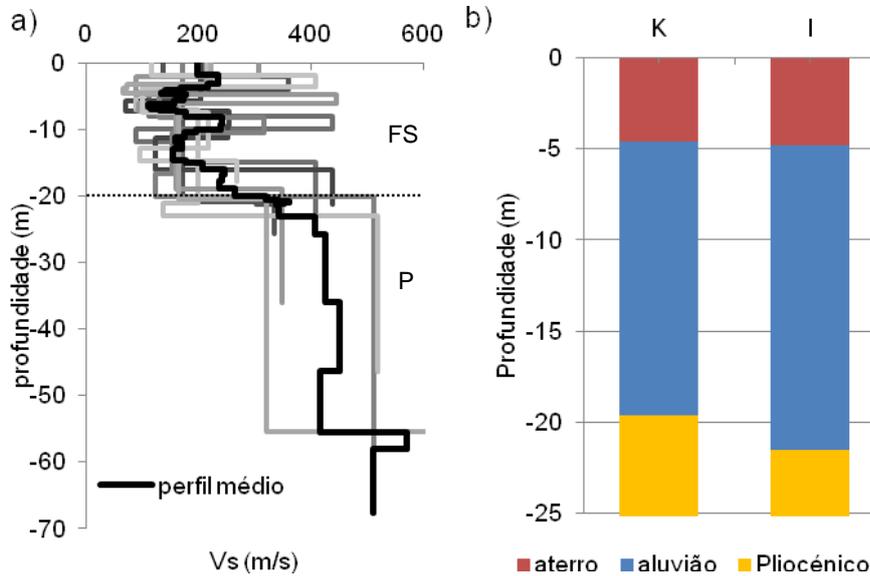


Figura A10.1 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K -Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). FS – formações superficiais; P - Pliocénico.

### ReMi 2

Estes ensaios passivos realizaram-se no Holocénico a cerca de 170 m de duas sondagens (502 e 503) que apresentaram espessuras de FS de 1,5 m. O perfil médio de  $V_s$  apresentou o limite entre as FS e o Pliocénico aos 7 m. As interpolações relativas às FS, sem os dados de Coelho (1980), apresentaram espessuras entre 14 e 16 m. O perfil médio de  $V_s$  foi obtido perto do limite com Pliocénico pelo que a espessura das FS no ponto central se deverá situar entre os 16 e os 1,5 m. A interpolação com a inclusão dos dados de Coelho (1980) apresentou valores para a espessura das FS de 7 m (Anexo XI). Não se observou uma relação direta os perfis de  $N_{SPT}$  e o perfil médio de  $V_s$ .

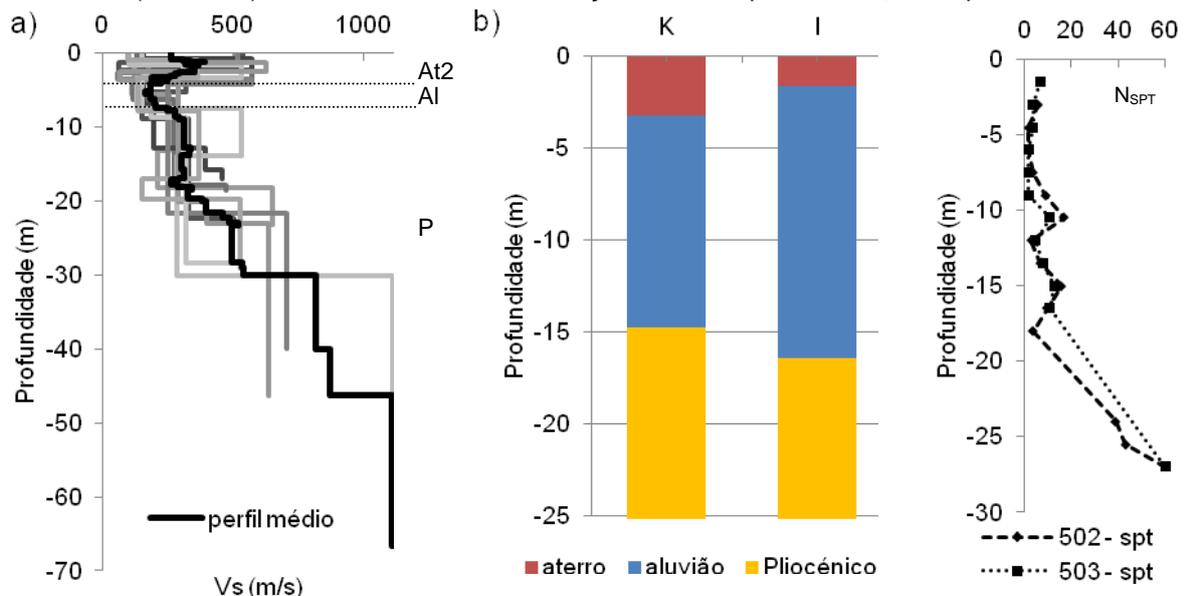


Figura A10.2 – (a) Perfis de  $V_s$ . At2 – aterros tipo 2; Al – aluvião; P - Pliocénico; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K -Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias); (c)  $N_{SPT}$  das sondagens 502 e 503.

### ReMi 3

Estes ensaios passivos realizaram-se no Holocénico e identificou-se no perfil de médio de  $V_s$  aos 18 m de profundidade o limite entre as FS e o Pliocénico. A sondagem mais próxima do ponto central (sondagem 114) e as interpolações calculadas apresentaram espessuras das FS superiores a 30 m. No entanto, a modulação da espessura das FS efetuada com as sondagens e com os dados de Coelho (1980) (Anexo XI) apresentou um valor que está de acordo com o perfil médio de  $V_s$  (21m). Observaram-se possíveis relações entre os valores de  $V_s$  e os de  $N_{SPT}$  que são assinalados nos respetivos perfis.

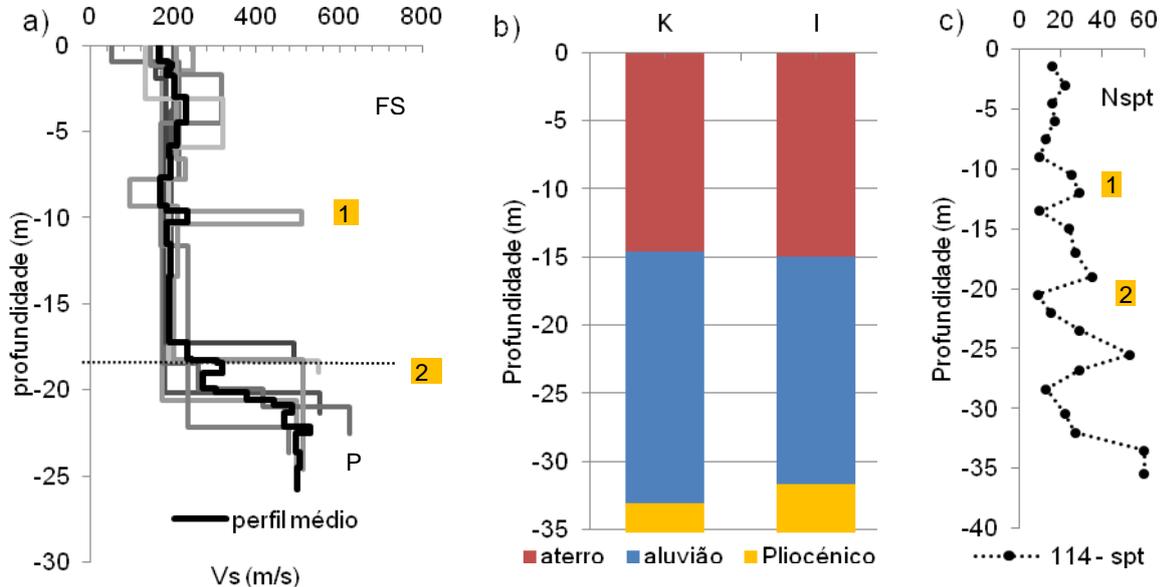


Figura A10.3 – (a) Perfis de  $V_s$ . FS – formações superficiais; P - Pliocénico; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K -Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias); (c) perfil de  $N_{SPT}$  da sondagem 114.

### ReMi 4

Estes ensaios passivos realizaram-se no Holocénico e o perfil médio de  $V_s$  apresentou o limite entre as FS e o Pliocénico aos 6,5 m. As interpolações das FS apresentaram espessuras superiores (13-15 m) e a interpolação obtida com a inclusão dos dados de Coelho (1980) apresentou uma espessura de 10 m (Anexo XI). A sondagem 119 (localizada a 90m dos ensaios ReMi) apresentou uma espessura de FS de 9 m. Assinalam-se nos gráficos as semelhanças observadas entre o perfil médio de  $V_s$  e o perfil de  $N_{SPT}$  da sondagem 119.

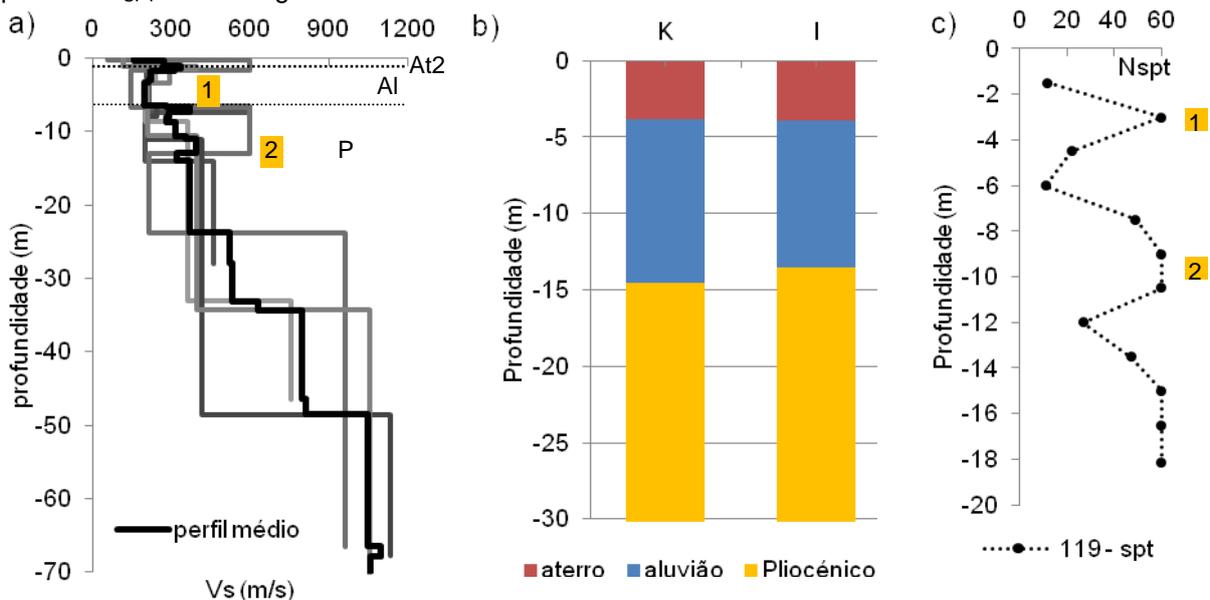


Figura A10.4 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). At2 – aterros do tipo 2; Al – aluviões; P – Pliocénico; (c) perfil de  $N_{SPT}$  da sondagem 119; 1 e 2 – semelhanças entre  $V_s$  e  $N_{SPT}$ .

### ReMi 5

Estes ensaios passivos realizaram-se numa das principais vias da cidade de Setúbal e no Pliocénico. As sondagens mais próximas situam-se a mais de 300 m. Para além das influências do material de aterro nos primeiros 6 m do perfil médio de  $V_s$ , verifica-se que a partir dos 22 m a velocidade média passa de 290 m/s para 422 m/s.

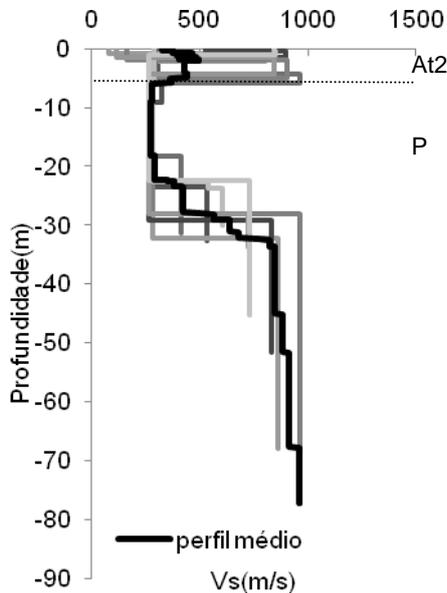


Figura A10.5 – Perfis de  $V_s$ . At2 – aterros do tipo 2; P - Pliocénico.

### ReMi 6

Este conjunto de ensaios passivos realizou-se no Holocénico e o perfil médio de  $V_s$  apresenta um acréscimo de velocidades aos 10,1 m de profundidade, de 240 para os 302 m/s, a que corresponderá o limite entre as formações superficiais e o Pliocénico. As interpolações calculadas para a espessura das formações superficiais, para o ponto central, apresentaram valores entre os 12 e os 13 m. A interpolação efetuada com os dados de Coelho (1980) apresentaram um valor de 8 m para a espessura das FS (Anexo XI). Analisaram-se três sondagens que distam cerca de 190 m dos ensaios ReMi (120, 121 e 122). Duas delas (120 e 122) apresentaram uma boa relação entre o perfil de  $N_{SPT}$  e o perfil médio de  $V_s$ .

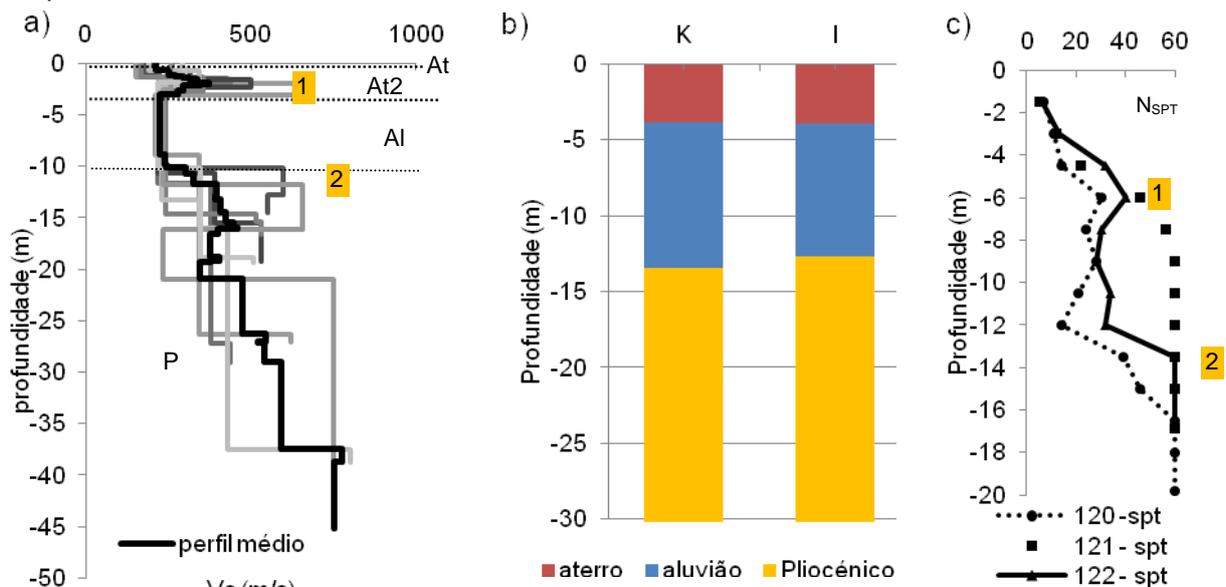


Figura A10.6 – (a) Perfis de  $V_s$ . At2 – aterros do tipo 2; Al – aluviões; P - Pliocénico; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K -Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias); (c) perfil de  $N_{SPT}$  das sondagens 120, 121, 122; 1 e 2 – semelhanças entre  $V_s$  e  $N_{SPT}$ .

### ReMi 7

Estes ensaios passivos realizaram-se no Holocénico e não foi possível obter informação geotécnica num raio de 300 m. O perfil médio de  $V_s$  evidencia a existência de uma estrutura superficial de velocidades elevadas que corresponderá à existência de aterros e/ou estruturas enterradas no local dos ensaios. Aos 6 m de profundidade observa-se um aumento dos valores de  $V_s$ , a que corresponderá o topo do Pliocénico.

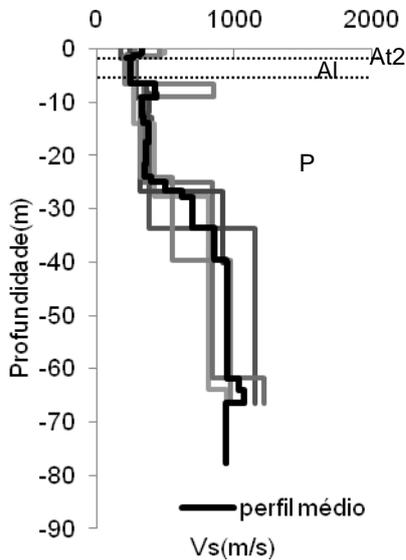


Figura A10.7 – Perfis de  $V_s$ . At2 – aterros do tipo 2; Al – aluviões; P - Pliocénico.

### ReMi 8

Estes ensaios passivos realizaram-se no Pliocénico. O perfil médio de  $V_s$  apresenta desde o seu início valores que podem ser atribuídos ao Pliocénico.

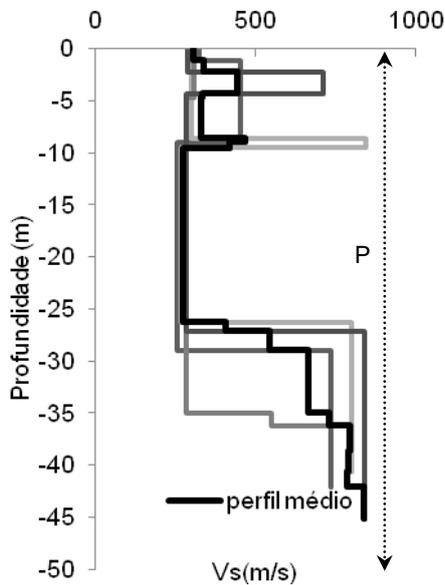


Figura A10.8 – Perfis de  $V_s$ . P - Pliocénico.

### ReMi 9

Estes ensaios passivos realizaram-se no Holocénico e pela análise do perfil médio de  $V_s$  considerou-se que o limite entre as FS e o Pliocénico se verificou aos 5 m de profundidade. As interpolações da espessura das formações superficiais apresentaram valores entre os 11 e os 14 m. A diferença entre estes valores e o valor encontrado com base no perfil médio de  $V_s$ , deve-se provavelmente ao facto de não ter sido possível obter informação geotécnica para o local do ensaio ReMi num raio de 300 m.

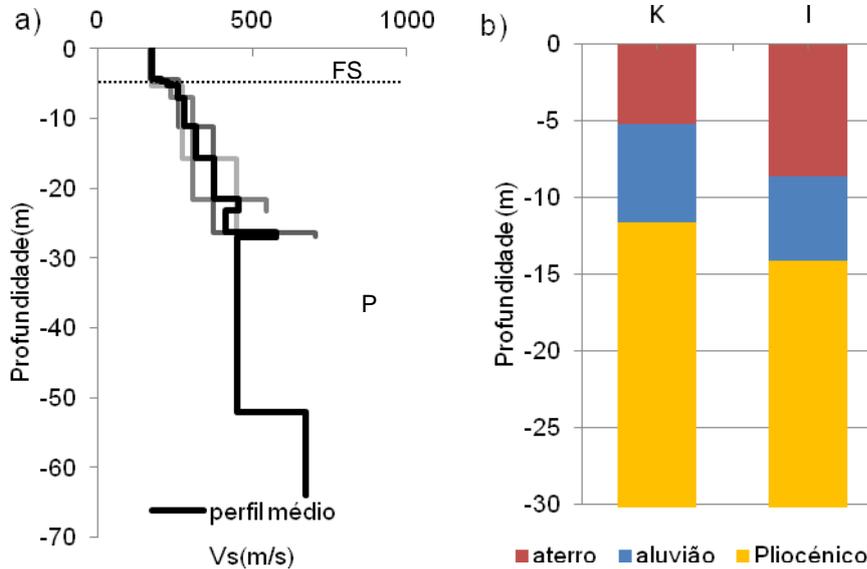


Figura A10.9 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). FS – formações superficiais; P - Pliocénico.

### ReMi 10

Estes ensaios passivos realizaram-se no Pliocénico e não foi possível obter informação geotécnica nas imediações do local. O perfil médio de  $V_s$  inicia-se com velocidades superiores a 250 m/s e alcançaram os 300 m/s aos 3 m de profundidade.

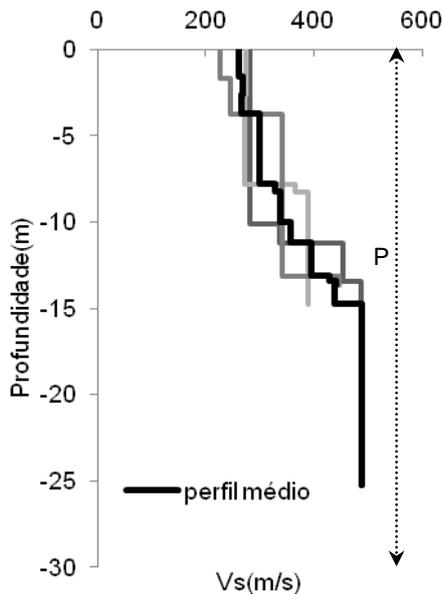


Figura A10.10 – Perfis de  $V_s$ . P - Pliocénico.

### ReMi 11

Estes ensaios passivos realizaram-se no Holocénico. Observando-se o perfil médio de  $V_s$ , verifica-se que a partir dos 20 m existe um aumento de velocidade que poderá corresponder ao limite entre as formações superficiais e o Pliocénico. As interpolações calculadas para a espessura das FS apresentaram valores compreendidos entre os 16 e os 17 m. Estes ensaios realizaram-se a 65 m de um local para o qual Coelho (1980) identificou o substrato a 25 m de profundidade. A interpolação efetuada com os dados de Coelho (1980) e as sondagens disponíveis apresentou um valor de 19 m para a espessura das FS (Anexo XI). As sondagens mais próximas apresentaram perfis de  $N_{SPT}$  com uma grande variação não tendo sido possível estabelecer uma relação entre estes e o perfil médio de  $V_s$ .

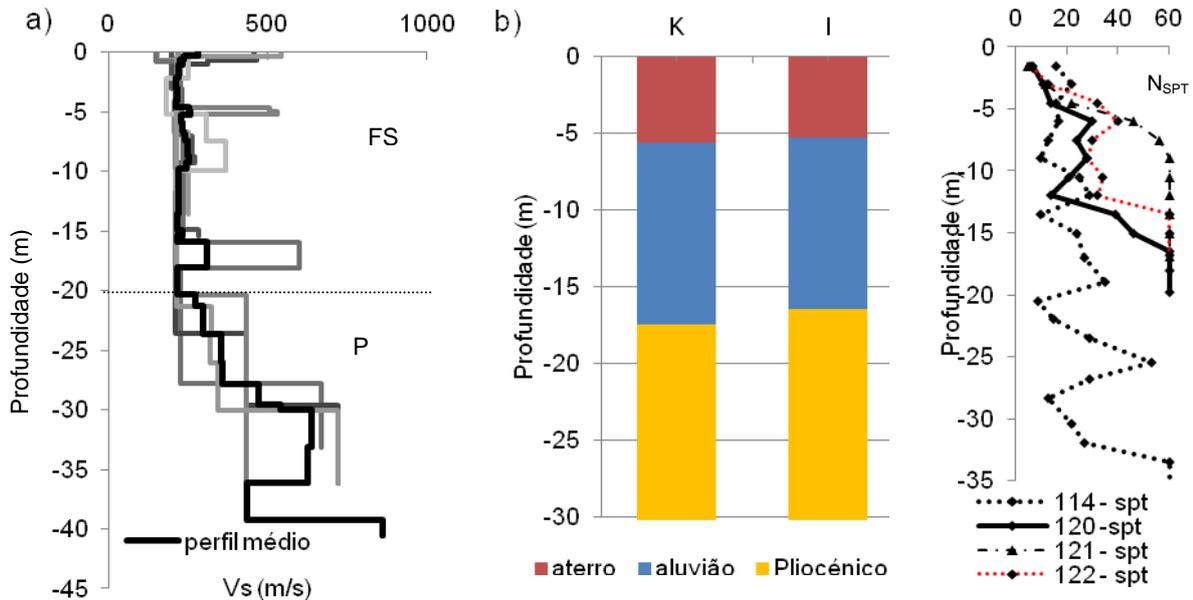


Figura A10.11 – (a) Perfis de  $V_s$ . FS – formações superficiais; P – Pliocénico; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K -Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias); (c) perfis de  $N_{SPT}$  das sondagens 114, 120, 121 e 122.

### ReMi 12

Este conjunto de ensaios passivos realizou-se no Pliocénico e não foi possível obter informação geotécnica localizada nas suas imediações. Observando-se a curva média verifica-se a existência de aterros até aos 2,3 m de profundidade e aos 30 m as velocidades alcançam os 800 m/s.

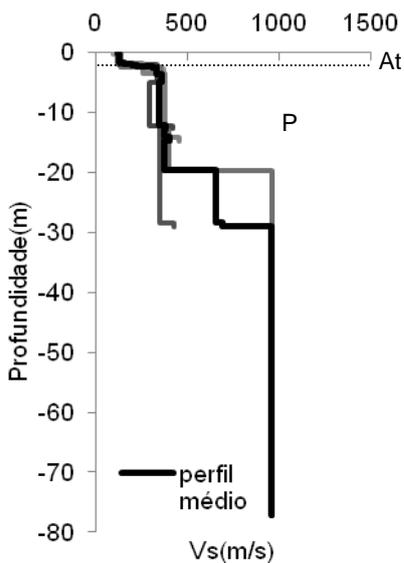


Figura A10.12 – Perfis de  $V_s$ . At – aterros; P - Pliocénico.

### ReMi 13

Estes ensaios ativos realizaram-se no Holocénico de Setúbal e o perfil médio de  $V_s$  apresenta nos primeiros 10 m uma velocidade média de 200 m/s. A partir desta profundidade existe um aumento de velocidades acentuado que corresponde ao limite entre os aluviões e o Pliocénico. A cerca de 160 m a sul do ponto central a espessura das formações superficiais apresenta um valor de 5 m (Coelho 1980). As interpolações calculadas para o ponto central apresentaram valores de espessuras entre os 12 e os 15 m. A interpolação em que se incluíram os dados de Coelho (1980) apresentou um valor de 6 m para espessura das FS.

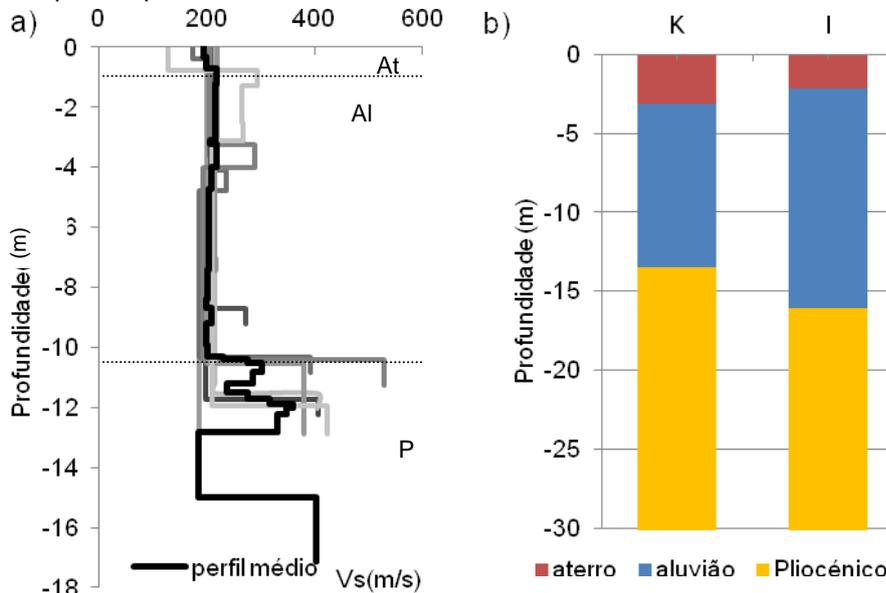


Figura A10. 13 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). At - aterros; Al – aluviões; P - Pliocénico.

### ReMi 14

Estes ensaios ativos realizaram-se no Holocénico e o perfil médio de  $V_s$  mostra a existência de aterros do tipo 2 até aos 5 m. Não se atravessou o limite entre as formações superficiais e o Pliocénico. A modulação efetuada para o ponto central apresenta valores entre os 16 e os 20 m para as espessuras das formações superficiais.

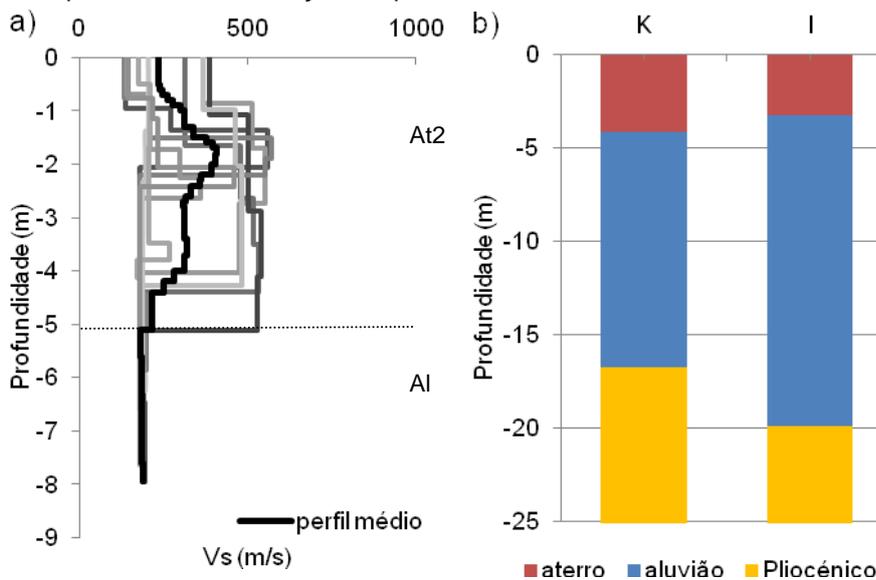


Figura A10.14 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). At2 – aterros do tipo 2; Al – aluviões.

### ReMi 15

Estes ensaios passivos realizados no Pliocénico apresentaram um perfil médio de  $V_s$  com baixas velocidades (inferiores a 200 m/s) até uma profundidade de 9 m. As sondagens 128 e 129, localizadas a cerca de 850 m a oeste do ponto central, apresentam aterros com espessuras compreendidos entre os 2 e os 6 m.

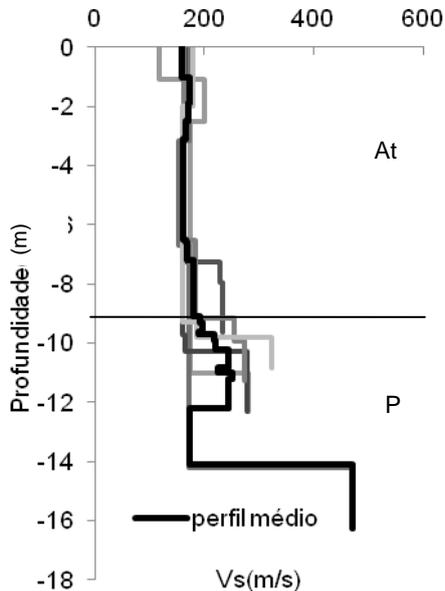


Figura A10.15 – (a) Perfis de  $V_s$ . At – aterros; P – Pliocénico.

### ReMi 16

Este conjunto de ensaios ativos realizou-se no Pliocénico a cerca de 100 m de duas sondagens (206 e 207). O perfil médio de  $V_s$  apresenta nos primeiros 2 m velocidades inferiores a 200 m/s a que corresponderá um nível de aterros, ou uma zona do Pliocénico descomprimida e/ou alterada. Os logs das sondagens consultados apresentam um nível de solo de 0,1 m. Comparando os valores de  $N_{SPT}$  com a velocidade de  $V_s$  ao longo do perfil médio observa-se que o aumento de  $V_s$  aos 9 m poderá corresponder ao valor de  $N_{SPT60}$  alcançado pelas duas sondagens aos 10 m de profundidade.

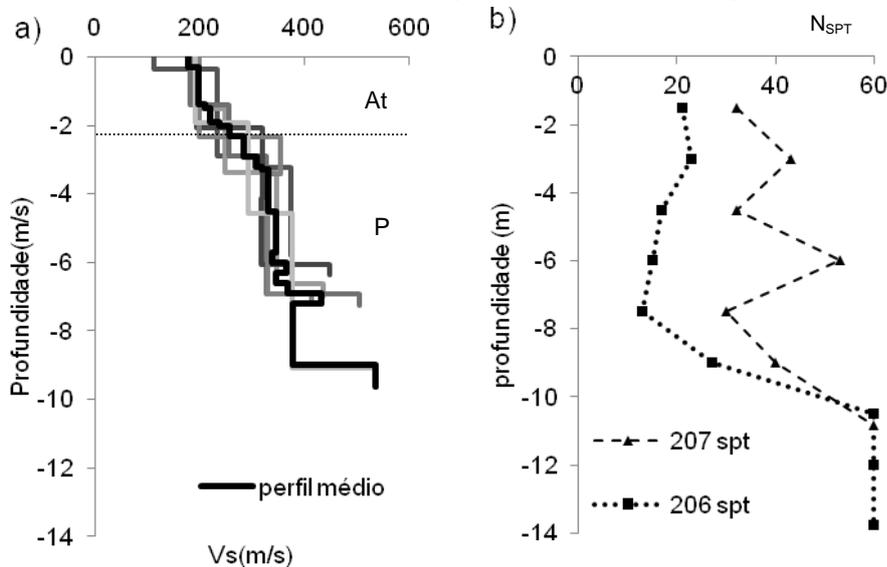


Figura A10.16 (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) valores de  $N_{SPT}$  das sondagens 207 e 208. At2 – aterros do tipo 2; AI – aluviões.

### ReMi 17

Estes ensaios passivos realizaram-se no Holocénico a cerca de 130 m do limite com o Pliocénico. O perfil médio de  $V_s$  apresentou um nível de elevada rigidez (aterro do tipo 2) aos 2 m de profundidade. O limite entre as unidades superficiais e o Pliocénico deverá corresponder ao aumento de velocidades de  $V_s$  para valores superiores a 240 m/s aos 10,8 m de profundidade. As interpolações calculadas para a espessura das FS apresentaram valores de 15 m de profundidade compatíveis com os valores obtidos nos perfis de  $V_s$ . A interpolação obtida com a inclusão dos pontos de Coelho (1980) apresenta uma espessura de 10 m para as FS (Anexo XI).

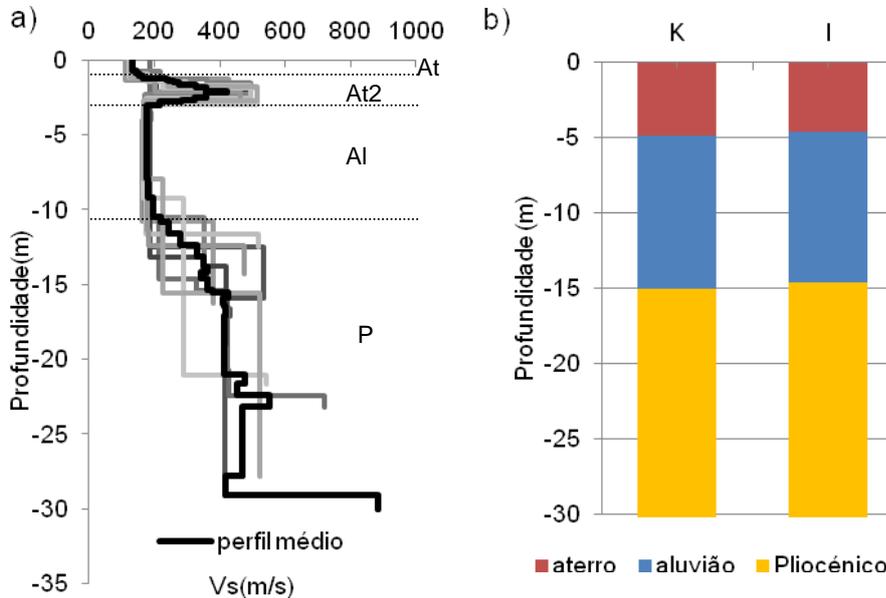


Figura A10.17 (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). At – aterros; At2 – aterros do tipo 2; Al – aluviões.

### ReMi 18

Estes ensaios ativos realizaram-se no Holocénico a 30 m do limite com o Miocénico. Coelho (1980) não identificou a existência de FS para um ponto localizado à mesma distância do limite com o Miocénico e a 100 m do ponto central do ensaio ReMi 18. O perfil médio de  $V_s$  apresenta a partir dos 0,5 m de profundidade valores superiores a 270 m/s e corresponderá ao limite entre as aluviões e o Pliocénico.

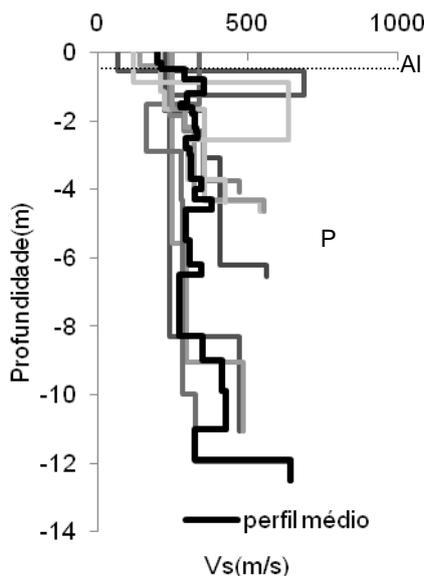


Figura A10.18 – Perfis de  $V_s$ . Al – aluviões; P - Pliocénico.

### ReMi 19

Estes ensaios passivos realizaram-se sobre o Pliocénico e as sondagens mais próximas localizam-se a mais de 300 m. Considerou-se que o perfil médio de  $V_s$  se desenvolve todo no Pliocénico.

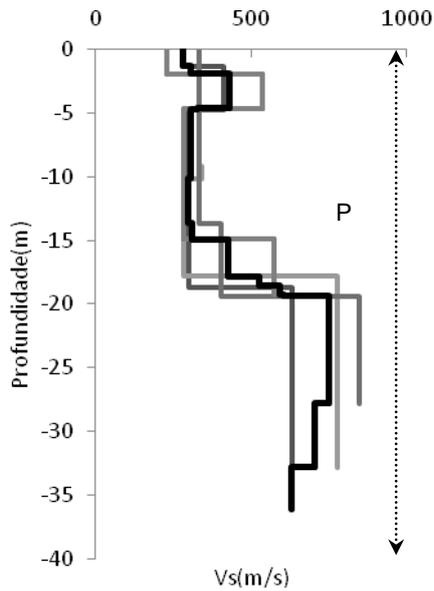


Figura A10.19 Perfis de  $V_s$ . P - Pliocénico.

### ReMi 20

Estes ensaios ativos realizaram-se no Holocénico a cerca de 160 m de 6 sondagens. O perfil médio de  $V_s$  apresenta até aos 5,3 m aterros, aterros do tipo 2 e aluviões. A partir desta profundidade o perfil médio de  $V_s$  desenvolve-se no Pliocénico e a cerca dos 18,5 m é provável que se tenham atingido formações do Cenozoico (Jurássico). As interpolações calculadas para a espessura das FS foram superiores ao valor encontrado para o perfil médio de  $V_s$ . O valor obtido com a interpolação dos valores das sondagens e dos pontos de Coelho (1980) apresentou uma espessura de 11 m para as FS.

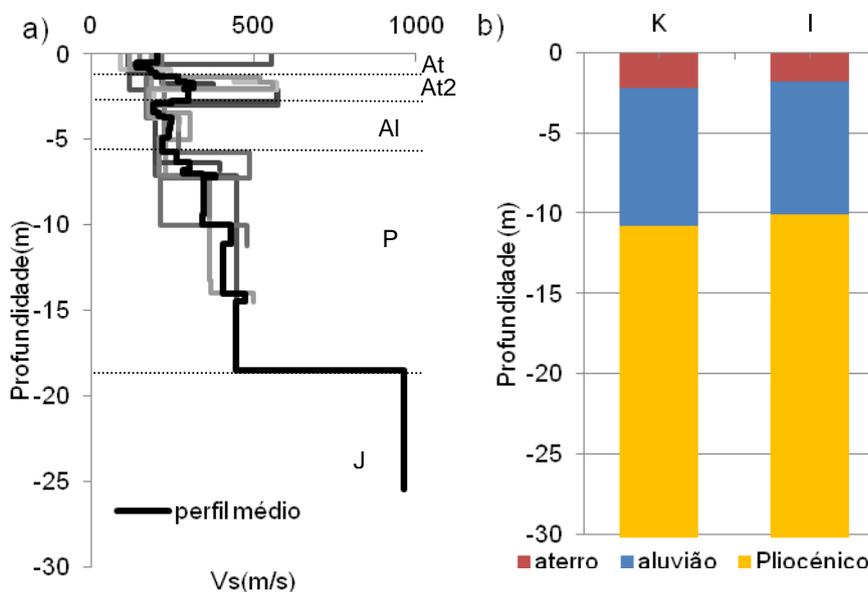


Figura A10. 20 - (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K -Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). At – aterros; At2 – aterros do tipo 2; Al – aluviões; P – Pliocénico; J – Jurássico.

### ReMi 21

Estes ensaios ativos realizaram-se no Pliocénico e não foi possível coligir informação geotécnica relativa a sondagens executadas na área envolvente. Observando-se o perfil médio de  $V_s$ , verifica-se que o limite entre as formações superficiais e o Pliocénico se situa entre os 2 e os 3 m de profundidade.

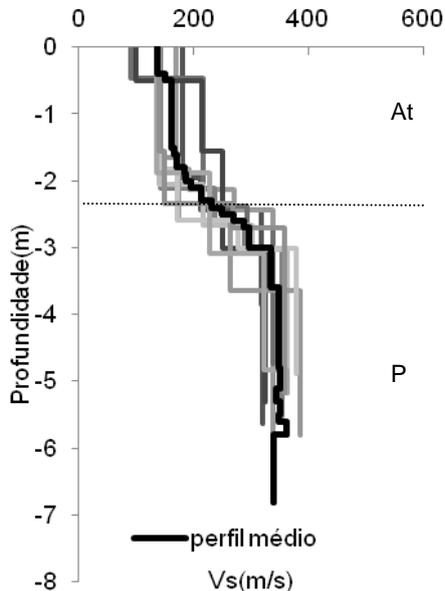
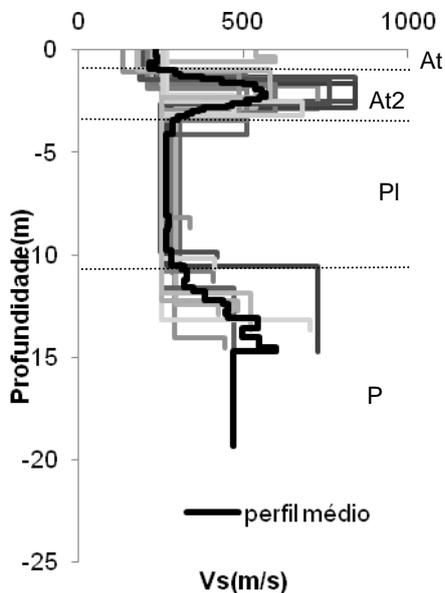


Figura A10.21 Perfis de  $V_s$ . At – aterro; P - Pliocénico.

### ReMi 22

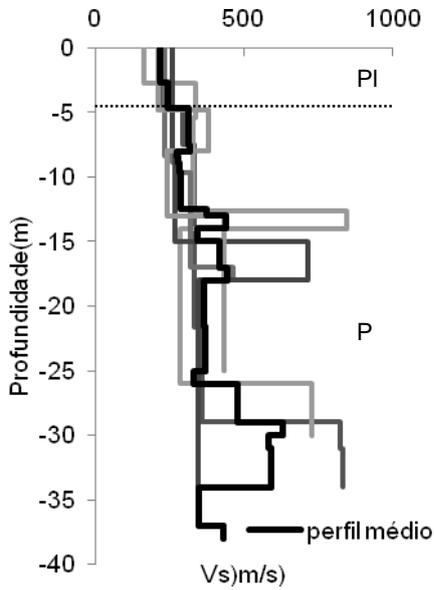
Segundo a carta geológica estes ensaios ativos realizaram-se no Pliocénico. O perfil médio de  $V_s$  identificou a existência de um nível com elevada rigidez com valores de  $V_s$  superiores a 500 m/s. Entre os 4 e os 10 m de profundidade a velocidade média de 266 m/s deverá corresponder ao Plistocénico, que deverá contactar com o Pliocénico aos 10 m.



A10.22 – Perfis de  $V_s$ . At – aterro; At2 - aterro do tipo 2; PI – Plistocénico; P - Pliocénico.

### ReMi 23

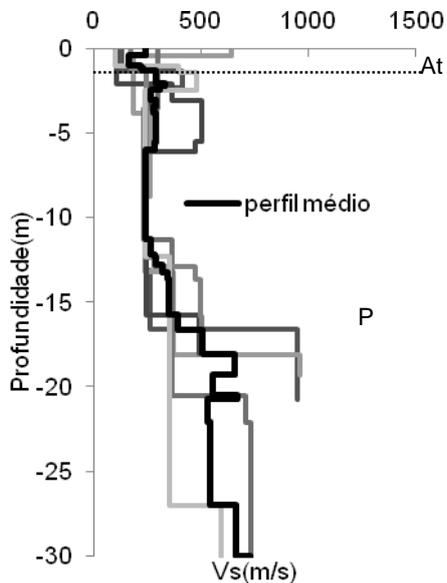
Estes ensaios passivos realizaram-se no Plistocénico e as sondagens mais próximas estão a mais de 300 m de distância relativamente ao ponto central. O perfil médio de  $V_s$  apresenta velocidades entre os 215 m/s e s 244 m/s nos primeiros 4,7 m de profundidade. Este intervalo deverá corresponder ao Plistocénico e as velocidades superiores corresponderão ao Pliocénico.



A10.23 – Perfis de  $V_s$ . PI – Plistocénico; P - Pliocénico.

### ReMi 24

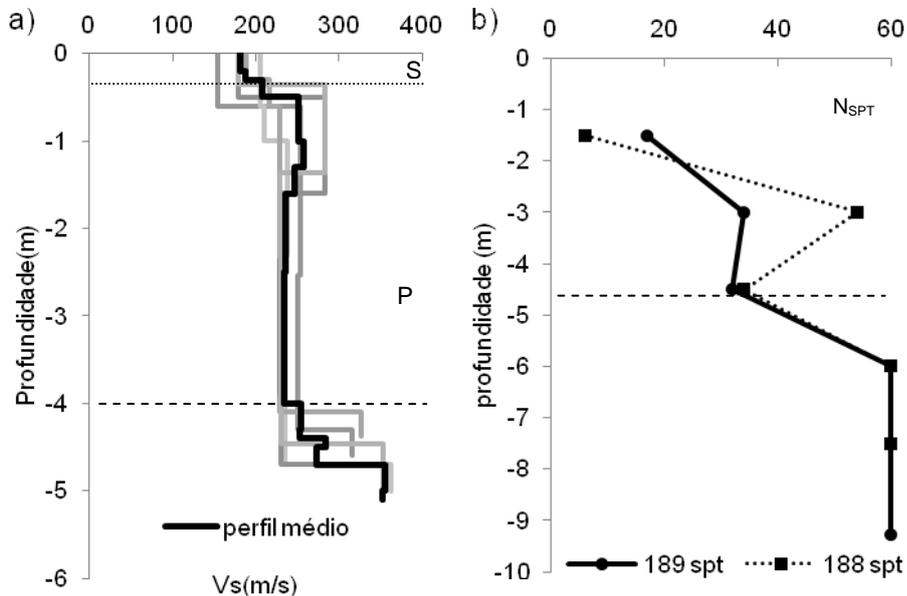
Estes ensaios passivos realizaram-se sobre o Pliocénico. Não foi possível coligir informação geotécnica do local onde se realizaram os registos.



A10.24 – Perfis de  $V_s$ . At – aterro; P - Pliocénico.

### ReMi 27

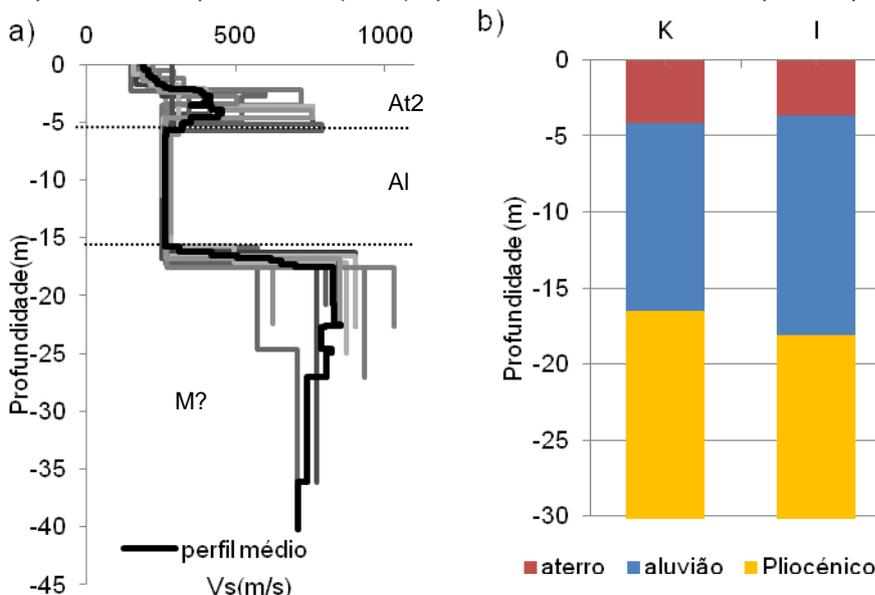
Estes ensaios ativos realizaram-se no Pliocénico e foi possível obter informação relativa a sondagens que se realizaram nesta área e a mais próxima (189) localiza-se a cerca de 50 m do ponto central. Observando-se o perfil médio de  $V_s$  verifica-se que nos primeiros 4,7 m o Pliocénico apresenta velocidades relativamente baixas, provavelmente devido a fenómenos de descompressão ou alteração. Os ensaios de SPT executados nas sondagens 187 e 189 (as mais próximas) apresentaram um aumento da rigidez dos materiais a partir dos 4 m de profundidade, valor compatível com o aumento de  $V_s$  aos 4,7 m.



A10.25 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) valores de  $N_{SPT}$  das sondagens 188 e 189. S – solo; P – Pliocénico. Linha preta a tracejado – aumento da rigidez dos materiais.

### ReMi 29

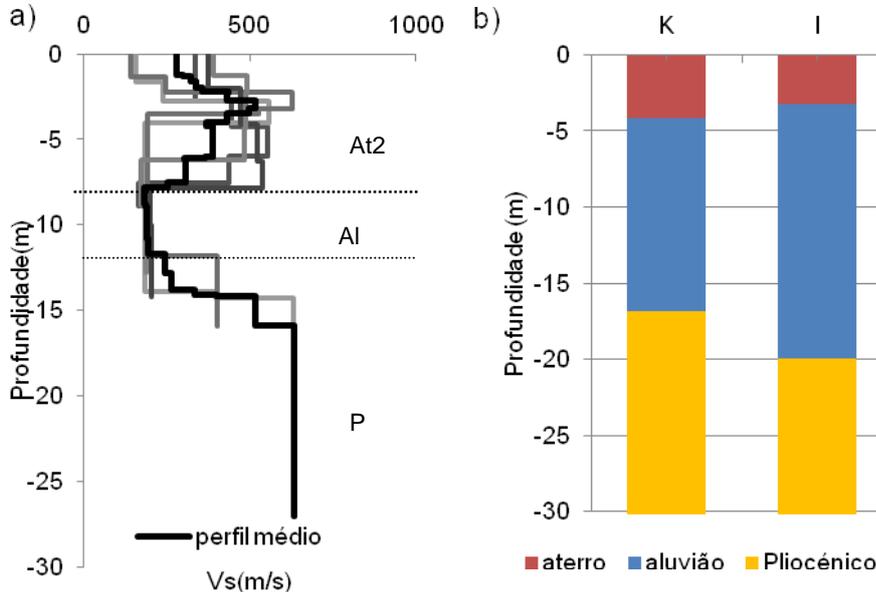
Estes ensaios passivos realizaram-se no Holocénico a cerca de 20 m do limite com o Miocénico. O perfil médio de  $V_s$  apresentou até aos 5,5 m de profundidade valores típicos de aterros do tipo 2 e aos 15,5 m observou-se um aumento das velocidades correspondente ao limite entre as formações superficiais e o substrato que aqui poderá ser o Miocénico. As interpolações dos valores da espessura das FS apresentaram valores superiores a 15 m. A interpolação com os valores disponibilizados por Coelho (1980) apresentou um valor de 8 m para espessura da FS (Anexo XI).



A10.26 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). At2 – aterros do tipo 2; Al – aluviões; M – Miocénico.

### ReMi 30

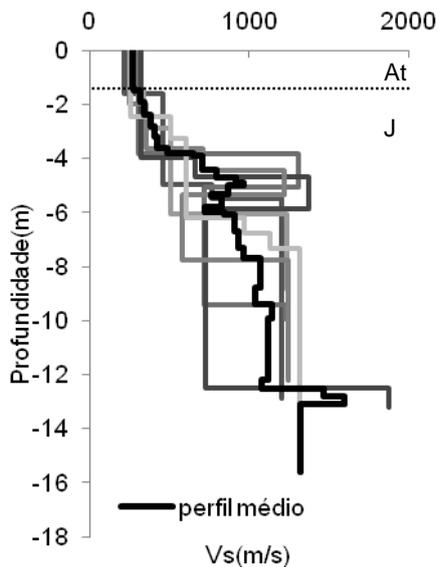
Estes ensaios passivos realizaram-se sobre um aterro que serve de fundação a uma via e que é sobrejacente ao Holocénico. Nos perfis de  $V_s$  observa-se a influência de materiais rígidos onde são alcançadas velocidades de 500 m/s. O limite entre as FS e o Pliocénico verifica-se aos 11,7 m onde se observa um aumento dos valores de  $V_s$ . Os cálculos das interpolações efetuadas para o ponto central mostraram que o topo do Pliocénico se situará entre os 17 e os 20 m de profundidade. A interpolação realizada com os dados de Coelho (1980) apresentou uma espessura de FS de 3 m.



A10.27 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) espessuras das unidades obtidas por interpolação de dados geotécnicos (K - Krigagem; I - Inverso da Potência das Distâncias). At2 – aterros do tipo 2; Al – aluviões; P – Pliocénico.

### ReMi 31

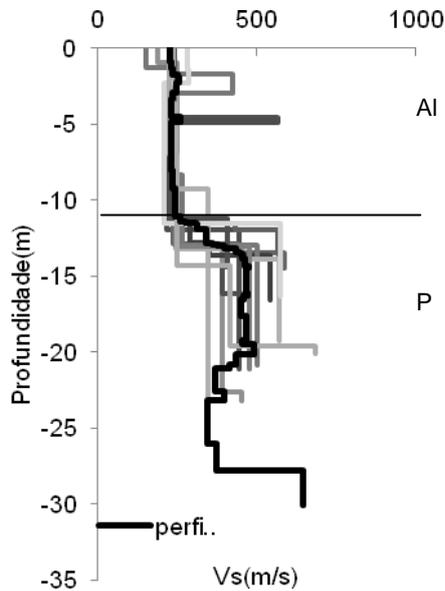
Estes ensaios ativos realizaram-se no Jurássico e o perfil médio de  $V_s$  apresenta velocidades superiores a 800 m/s a partir dos 4,7 m de profundidade. O nível mais superficial poderá corresponder a uma zona de rocha alterada.



A10.28 – Perfis de  $V_s$ ; A -aterro; J – Jurássico.

### ReMi 32

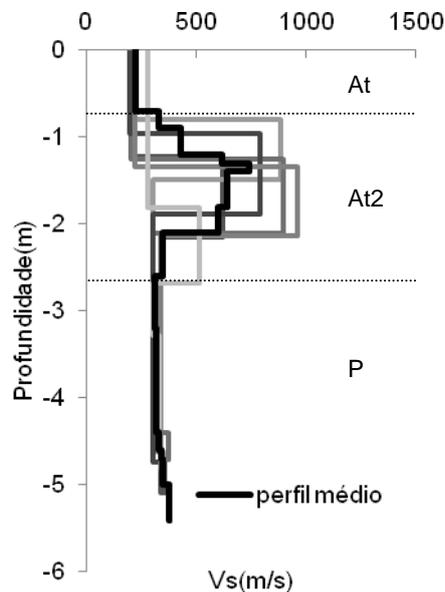
Estes ensaios ativos realizaram-se no Holocénico a cerca de 100 m do limite com o Pliocénico. O perfil médio de  $V_s$  apresentou aos 11 m de profundidade um acréscimo de velocidade a que corresponderá o topo do Pliocénico.



A10.29 – Perfis de  $V_s$ ; Al -aluvião; P – Pliocénico.

### ReMi 33

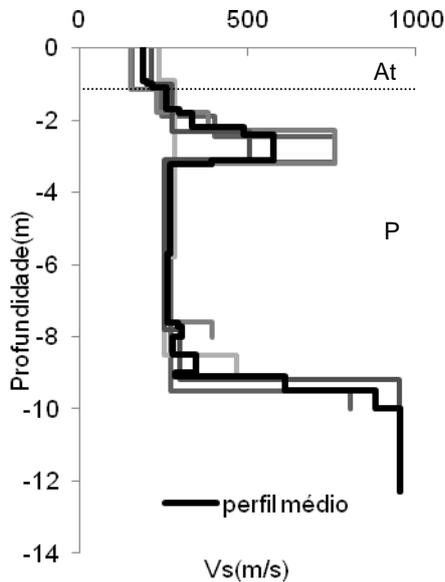
Estes ensaios ativos realizaram-se no Pliocénico e o perfil médio de  $V_s$  evidenciou um nível de aterros com elevada rigidez a que correspondem velocidades médias superiores a 600 m/s aos 1,3 m de profundidade.



A10.30 – Perfis de  $V_s$ ; At –aterro; At2 – aterro do tipo 2; P – Pliocénico.

### ReMi 34

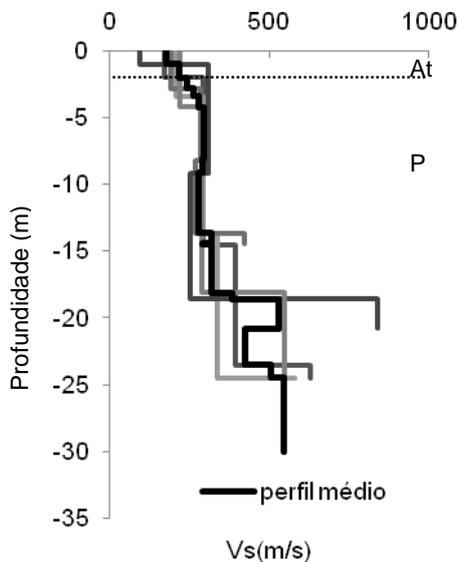
Estes ensaios passivos realizaram-se no Pliocénico e observando-se o perfil médio de  $V_s$  verifica-se existir entre os 2 e os 3 m de profundidade um nível com uma velocidade máxima de 575 m/s. Esta camada deverá corresponder a nível de elevada rigidez presente no Pliocénico e aos 9,5 m de profundidade é alcançado o *bedrock*.



A10.31 – Perfis de  $V_s$ ; At – aterro; P – Pliocénico.

### ReMi 35

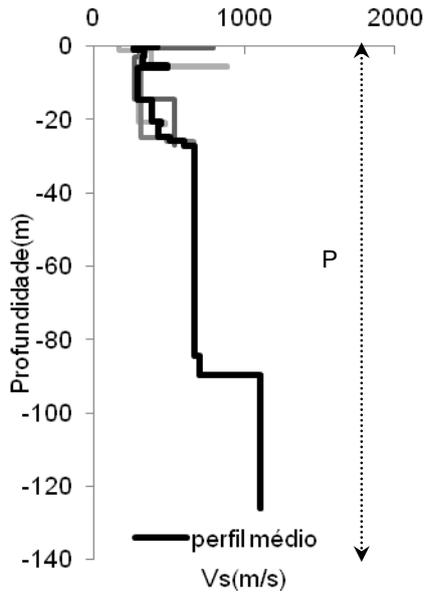
Estes ensaios passivos realizaram-se no Pliocénico perto do limite com o Holocénico. O perfil médio de  $V_s$  mostra uma estabilização de velocidades a partir dos 4 m e até cerca do 18 m entre os 270 e os 290 m/s.



A10.32 – Perfis de  $V_s$ ; At – aterro; P – Pliocénico.

### ReMi 36

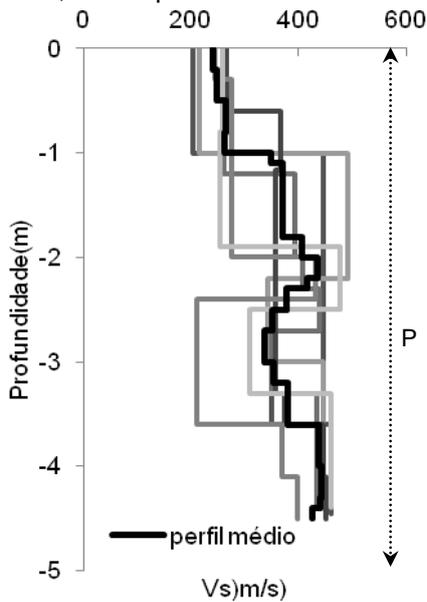
Estes ensaios passivos realizaram-se no Pliocénico e o perfil médio de  $V_s$  apresenta valores superiores a 300 m/s e desenvolve-se todo no Pliocénico.



A10.33 – Perfis de  $V_s$ . P – Pliocénico.

### ReMi 37

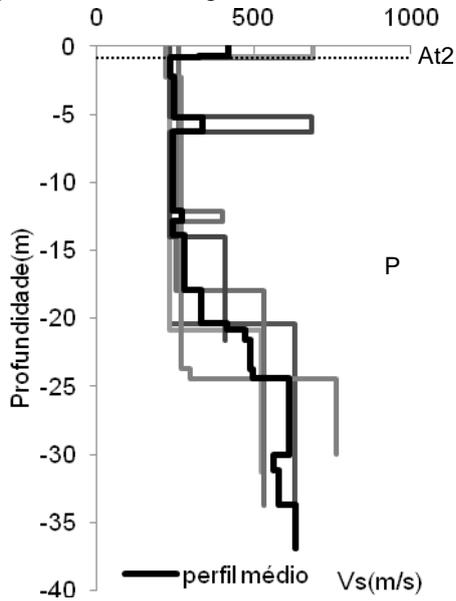
Estes ensaios ativos realizaram-se no Pliocénico e a curva média desenvolve-se no Pliocénico até aos 4,5 m de profundidade.



A10.34 - Perfis de  $V_s$ . P – Pliocénico.

### ReMi 38

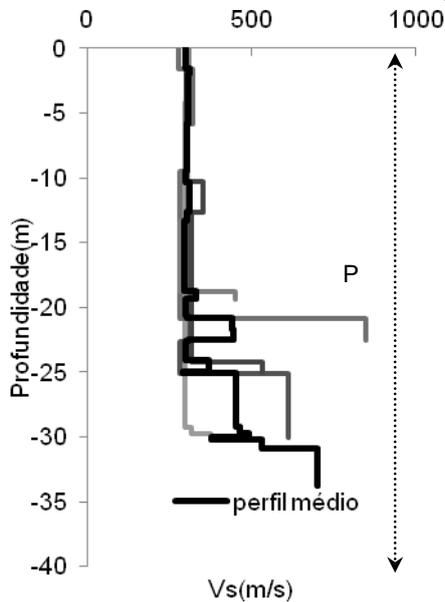
Estes ensaios passivos realizaram-se no Pliocénico e nos primeiros 0,8 m do perfil médio de  $V_s$  observa-se uma velocidade superior a 400 m/s, que corresponderá à existência de uma estrutura de elevada rigidez (aterros tipo 2). Até aos 13 m de profundidade os valores médios de  $V_s$  situam-se entre os 230 e os 240 m/s. Observou-se um aumento de velocidades a partir dos 17 m de profundidade atingindo-se velocidades superiores a 600 m/s aos 30m.



A10.35 - Perfis de  $V_s$ . At2 – aterros do tipo 2; P – Pliocénico.

### ReMi 39

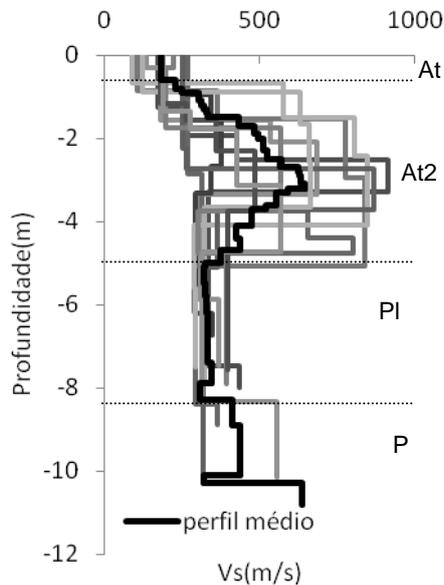
Estes ensaios passivos realizaram-se no Pliocénico e o perfil médio de  $V_s$  apresenta uma velocidade constante até aos 20 m tendo-se atingido valores de 700 m/s a partir dos 30 m de profundidade.



A10.36 - Perfis de  $V_s$ . P – Pliocénico.

### ReMi 40

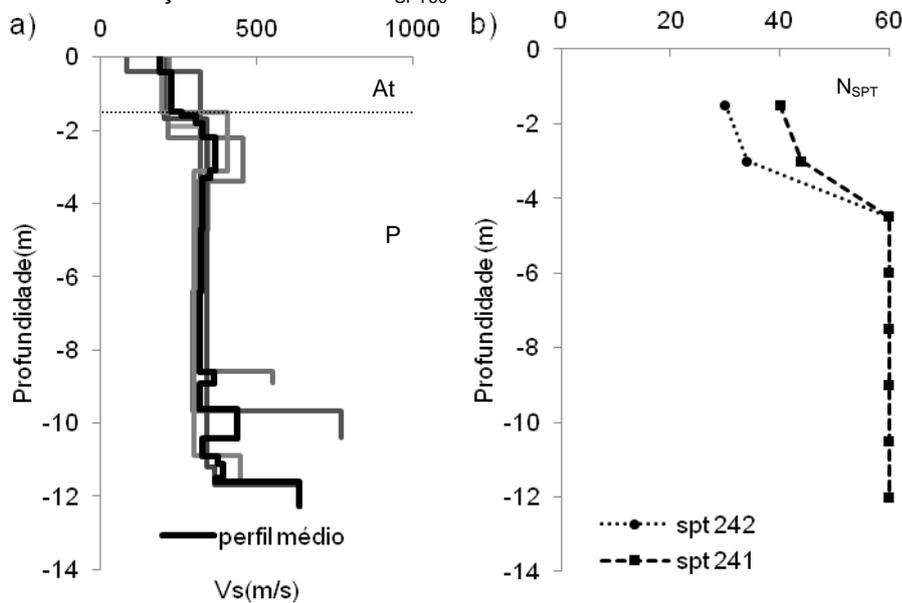
Estes ensaios ativos realizaram-se no Plistocénico e observa-se um nível superficial com valores elevados de velocidades que poderão corresponder à presença de um aterro do tipo 2. O incremento de velocidade aos 8,3 m de profundidade poderá corresponder ao topo do Pliocénico.



A10.37 - Perfis de  $V_s$ . At – aterro; At2 – aterro do tipo 2; Pl – Plistocénico – Pliocénico.

### ReMi 44

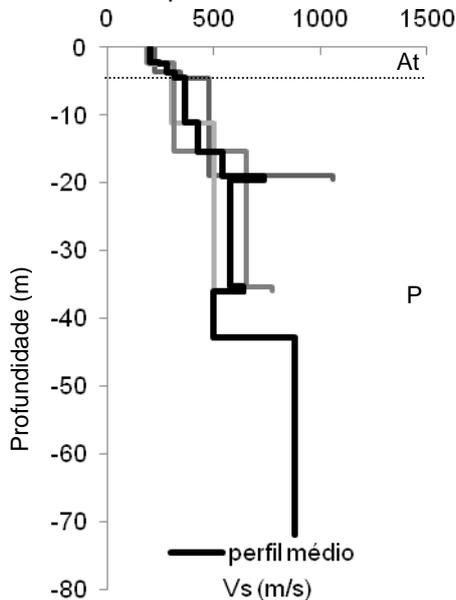
Os ensaios ativos realizaram-se no Pliocénico e o perfil médio de  $V_s$  apresenta um aumento de velocidade a partir dos 1,5 m de profundidade, poderá corresponder ao contacto entre formações superficiais (aterros) e o Pliocénico. As duas sondagens localizadas a cerca de 160 m do ponto central dos ensaios ReMi apresentaram um aumento de rigidez pronunciado entre os 2,5 m e os 4,5 m onde alcançaram valores de  $N_{SPT60}$ .



A10.38 – (a) Perfis de  $V_s$ ; (b) valores de  $N_{SPT}$  das sondagens 242 e 241. At - aterro; P – Pliocénico.

### ReMi 45

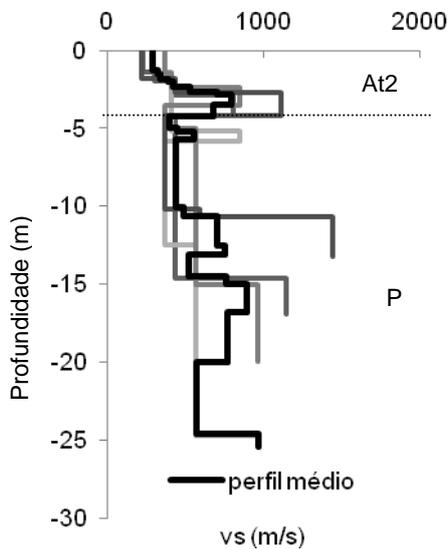
Os ensaios passivos realizaram-se no limite entre o Holocénico e o Plistocénico e verificou-se que aos 2,5 m de profundidade existe um aumento de  $V_s$  para valores superiores a 250 m/s. Esta profundidade corresponderá ao topo do Pliocénico e alcançaram-se velocidades superiores a 800 m/s aos 42 m de profundidade.



A10.39 - Perfis de  $V_s$ . At – aterro; At2 – aterro do tipo 2; P – Plistocénico – Pliocénico.

### ReMi 46

Estes ensaios ativos realizaram-se no Pliocénico. O perfil médio de  $V_s$  apresenta nos primeiros metros um comportamento típico de aterros do tipo 2 com estruturas de rigidez elevada. Nos logs das sondagens analisadas não foi possível identificar aterros com as espessuras indicadas pelos ensaios ReMi.

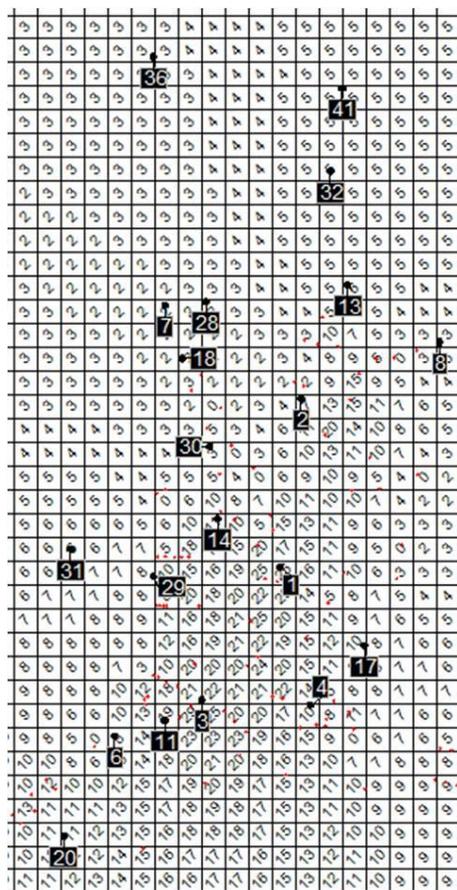


A10.40 - Perfis de  $V_s$ . At2 – aterro do tipo 2; P - Pliocénico.



# ANEXO XI – RESULTADOS DA INTERPOLAÇÃO DA ESPESSURA DAS FS PARA SETÚBAL

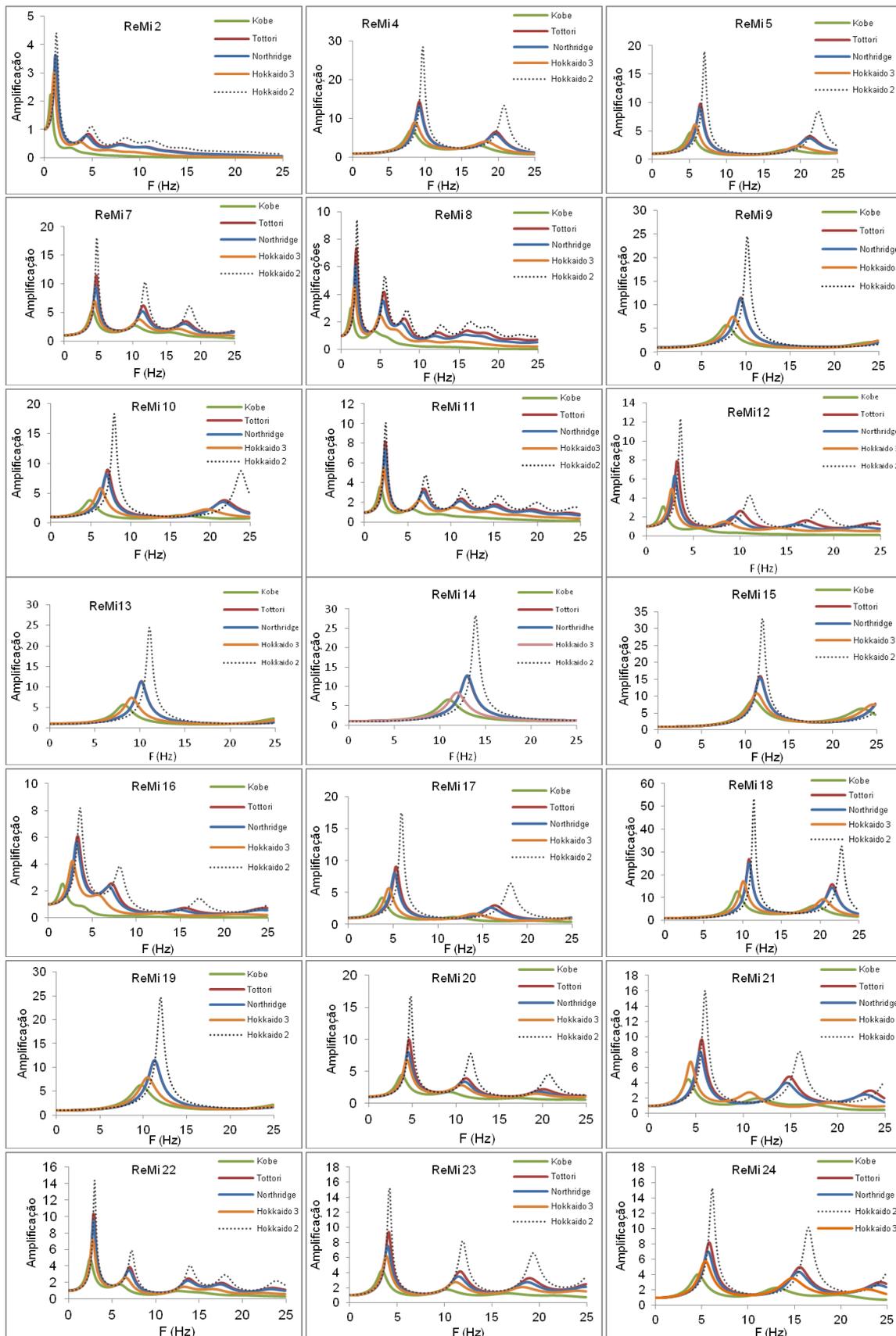
Grelhas de interpolação das espessuras das FS (número dentro das grelhas). A interpolação foi realizada com dados de sondagens e com os dados de Coelho (1980). Localização dos ensaios ReMi – números brancos com fundo preto. Dimensão das grelhas 100x100 m.

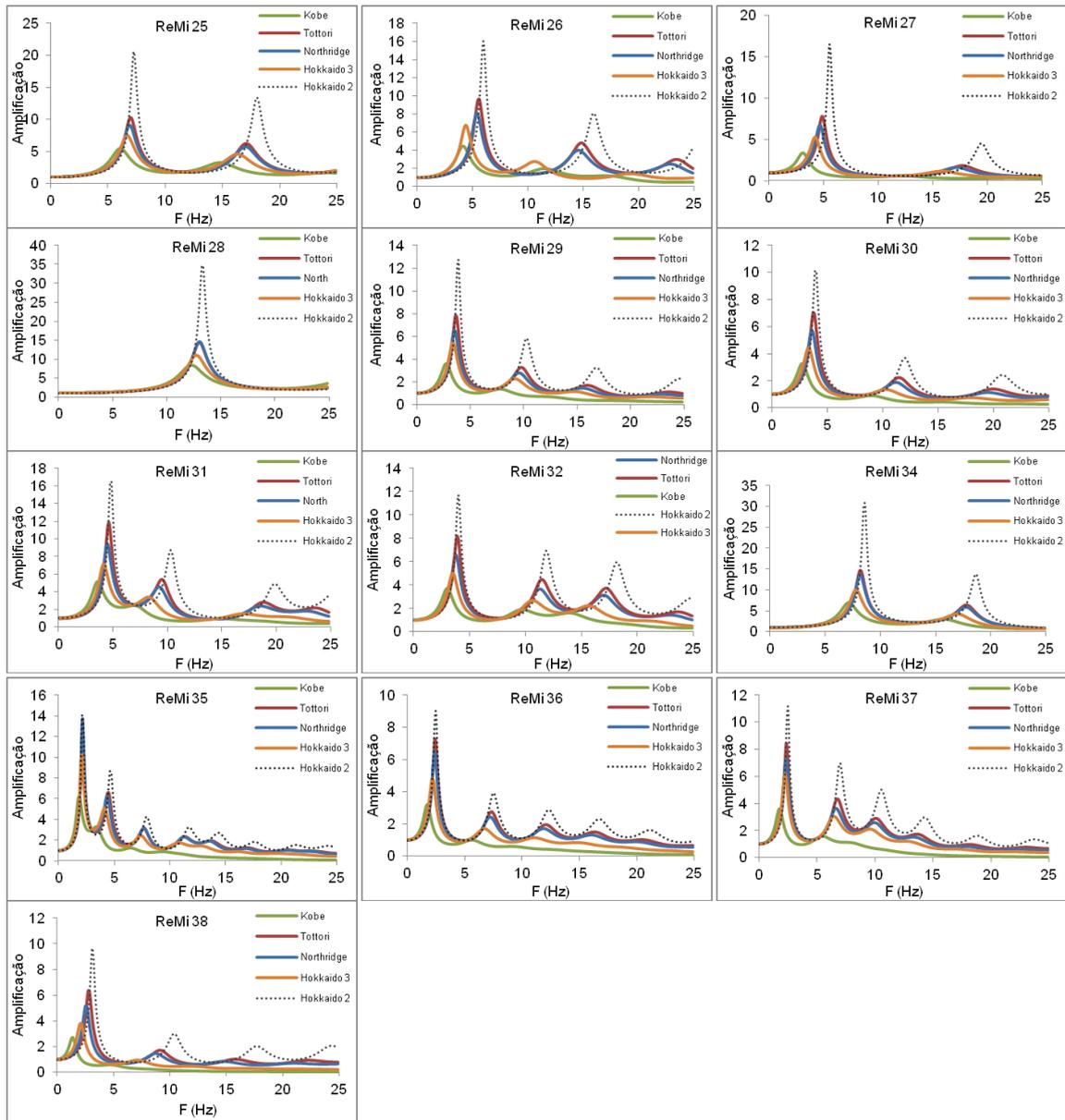




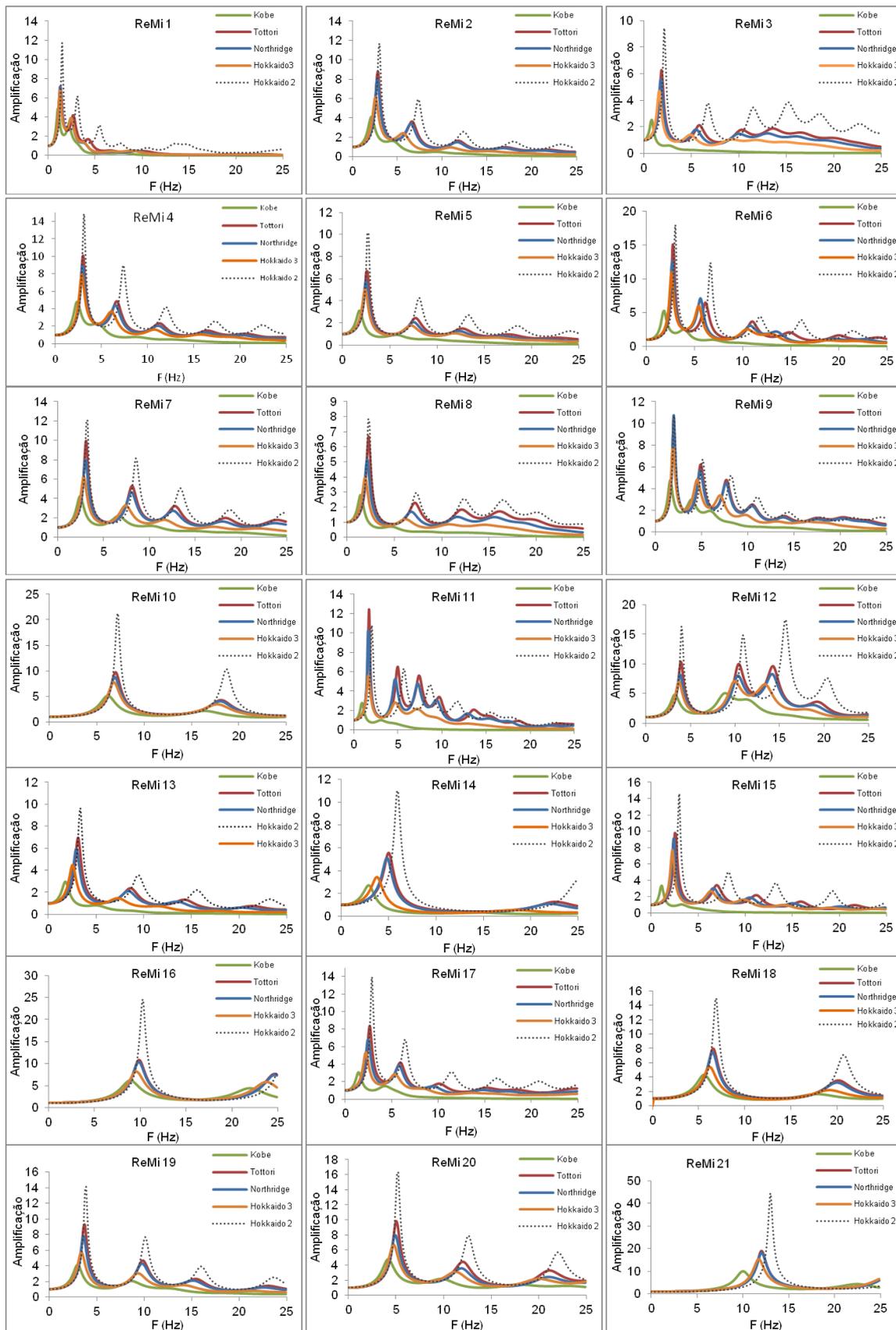
## **ANEXO 12- FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA**

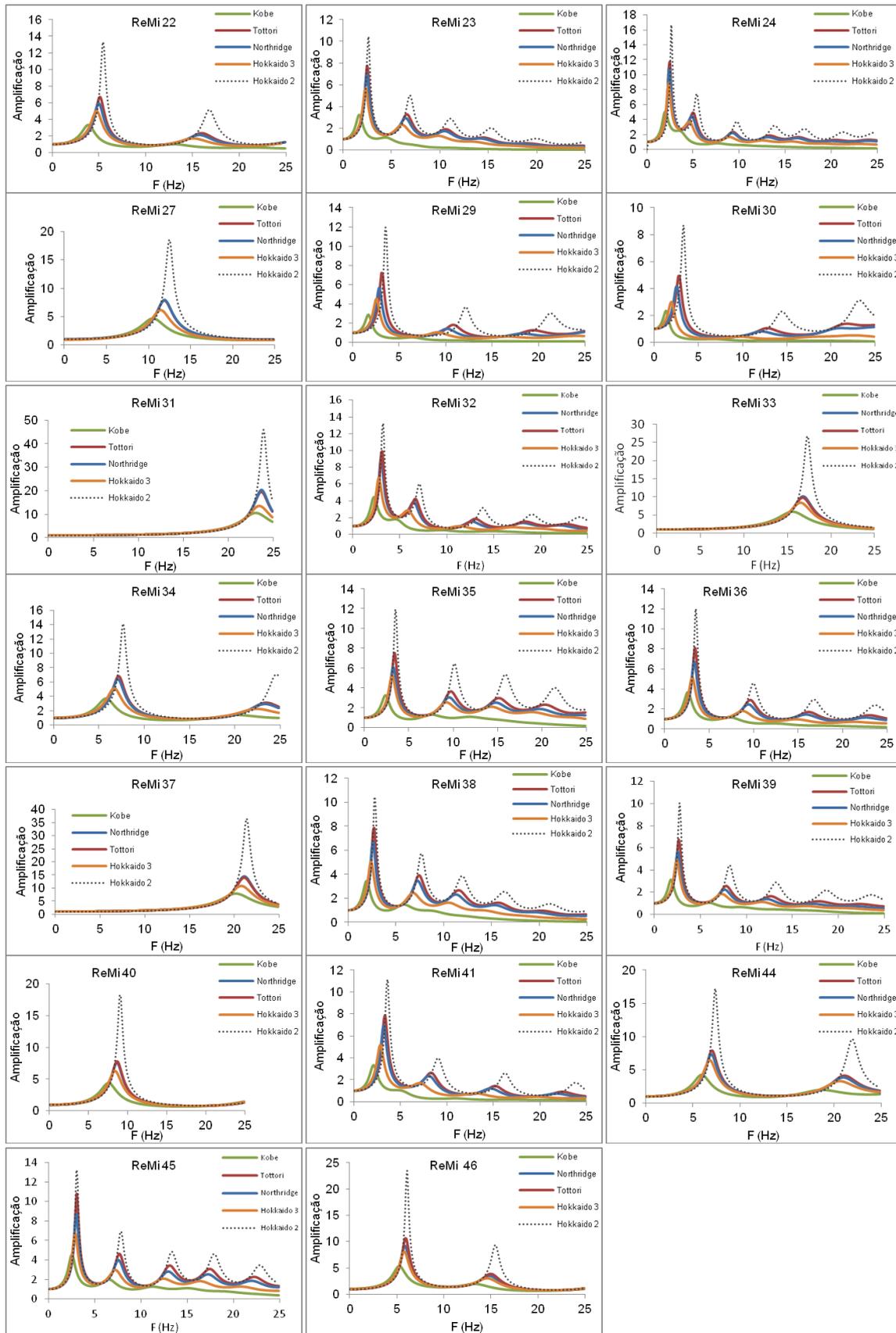
# Barreiro





# Setúbal







## ANEXO XIII – CARACTERIZAÇÃO DOS EDIFÍCIOS ENSAIADOS E VALORES DO SEU PERÍODO NATURAL DE VIBRAÇÃO

T (s) H/V<sub>E</sub> - período natural determinado com base na curva média H/V;

T<sub>L</sub> (s) - período natural longitudinal determinado a partir do espectro da componente longitudinal;

T<sub>T</sub> (s) – período natural transversal determinado a partir do espectro da componente transversal;

\* - conjunto de edifícios que constituem o novo hospital de Setúbal.

Edifício	Nº de pisos	Tipologias	Comprimento (m)	Largura (m)	T (s) H/V <sub>E</sub>	T <sub>L</sub> (s)	T <sub>T</sub> (s)
1	7	Betão	46	43	0,44	0,28	0,29
2	3,5	Alvenaria	54	26	1,6	-	0,28
3	3,5	Alvenaria	57	18	0,11	0,10	0,12
4	9	Betão	30	22	0,67	0,39	0,39
5	12	Betão	20	15	0,53	0,53	0,53
6	5,5	Betão	-	-	0,35	-	-
7	16	Betão	36	20	0,82	0,83	0,83
8	7,5	Betão	20	15	0,28	0,28	0,29
9	4,5	Betão	20	15	0,29	0,28	0,29
10	3	Alvenaria	20	20	0,18	-	-
11	6	Betão	-	-	0,28	-	-
12	4	Betão	20	10	0,16	0,16	0,17
13	3,5	Alvenaria	34	12	0,24	0,24	0,24
14	3	Alvenaria	13	6	0,25	0,24	0,24
15	4,5	Betão	15	13	0,22	0,21	0,21
16	7	Betão	47	14	0,34	0,35	0,35
17	2	Alvenaria	44	33	0,16	0,16	-
18	2	Betão	-	-	-	-	-
19	8	Betão	19	14	0,53	0,52	0,52
20	11	Betão	27	11	0,59	0,56	0,56
21	9,5	Betão	20	15	0,50	0,45	0,42
22	2	Betão	66	15	0,11	0,10	-
23	7	Betão	17	14	0,27	0,30	0,27
24	2	Betão	45	8	0,10	-	0,10
25	12	Betão	20	20	0,67	-	-
26	13	Betão	14	12	0,79	0,76	0,76
27	12	Betão	15	12	0,61	0,61	0,61
28	10,5	Betão	44	26	0,54	0,49	0,54
29	10	Betão	-	-	0,59	0,56	0,56
30	8,5	Betão	84	30	0,51	0,50	0,42
31	8	Betão	30	13	0,43	0,37	0,39
32	7	Betão	126 *	22	0,29	0,30	0,28
33	7	Betão	70	15	0,27	0,28	0,25
34	2	Alvenaria	24	8	0,15	-	0,15
38	3	Alvenaria	50	10	0,15	0,29	0,29
39	2	Betão	86	16	0,11	-	0,11
40	2	Betão	27	12	0,11	0,11	0,09



# ANEXO XIV – VALORES DOS ÍNDICES DE PERIGO UTILIZADOS PARA CLASSIFICAR A SUSCETIBILIDADE DOS EDIFÍCIOS À OCORRÊNCIA DE FENÓMENOS DE RESSONÂNCIA SOLO-ESTRUTURA

Índice 1 de perigo = frequência natural do edifício (Hz) / frequência do pico da função de transferência (Hz).  
Índice de perigo 2 - valores de amplificação obtidos na interseção das frequências naturais do edifício ( $H/V_E$ ,  $F_L$ ,  $F_T$ ) com as funções de transferência obtidas com os vários sismos.

$H/V_E$  - frequência natural do edifício determinada com base na curva média H/V;  
 $F_L$  (s) - frequência natural longitudinal do edifício determinada a partir do espectro da componente longitudinal;  
 $F_T$  (s) – frequência natural transversal do edifício determinada a partir do espectro da componente transversal;  
Amp – Amplitude.

		<b>Edifício 1</b>				
		Índice de perigo 1				
Frequência natural do edifício		Frequências dos picos das funções de transferência				
		Northridge 2,87 Hz	Tottori 2,75 Hz	Kobe 1,87 Hz	Hokkaido2 3 Hz	Hokkaido3 2,62Hz
$H/V_E$	2,3 Hz	0,80	0,29	0,16	0,05	0,02
$F_L$	3,6 Hz	1,25	0,46	0,24	0,08	0,03
$F_T$	3,4 Hz	1,18	0,43	0,23	0,08	0,03
		Médio	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo

Índice final de perigo 1: Baixo

		Índice de perigo 2				
Frequência natural do edifício		Valores de amplificação obtidos na interseção das frequências naturais do edifício com as funções de transferência				
		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
$H/V_E$		2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	Amp≥5
$F_L$		2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	Amp≥5	2≤Amp<5
$F_T$		2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	Amp≥5	2≤Amp<5
		Médio	Médio	Médio	Alto	Médio

Índice final de perigo 2: Médio

		<b>Edifício 3</b>				
		Índice de perigo1				
Frequência natural do edifício		Frequências dos picos das funções de transferência				
		Northridge 10 Hz	Tottori 10,3 Hz	Kobe -	Hokkaido2 11,5 Hz	Hokkaido3 -
$H/V_E$	9,2 Hz	0,92	0,89	-	0,80	-
$F_L$	9,6 Hz	0,96	0,93	-	0,83	-
$F_T$	8,52 Hz	0,85	0,83	-	1,26	-
		Alto	Alto	-	Médio	-

Índice final de perigo 1: Alto

		Índice de perigo 2				
Frequência natural do edifício		Valores de amplificação obtidos na interseção das frequências naturais do edifício com as funções de transferência				
		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
$H/V_E$		Amp<2				
$F_L$		Amp<2	Amp<2	-	Amp<2	-
$F_T$		Amp<2	Amp<2	-	Amp<2	-
		Baixo	Baixo	-	Baixo	-

Índice final de perigo 2: Baixo

**Edifício 5**

		Índice de perigo1				
Frequência natural do edifício		Frequências dos picos das funções de transferência				
		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
		3 Hz	3,1 Hz	2,37 Hz	3,1 Hz	2,87 Hz
H/V <sub>E</sub>	1,9 Hz	0,63	0,61	0,80	0,61	0,66
F <sub>L</sub>	1,9 Hz	0,63	0,61	0,80	0,61	0,66
F <sub>T</sub>	1,9 Hz	0,63	0,61	0,80	0,61	0,66
		Baixo	Baixo	Médio	Baixo	Baixo

Índice final de perigo 1: Baixo

		Índice de perigo 2				
Frequência natural do edifício		Valores de amplificação obtidos na interseção das frequências naturais do edifício com as funções de transferência				
		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
H/V <sub>E</sub>		Amp<2	Amp<2	2≤Amp<5	Amp<2	2≤Amp<5
F <sub>L</sub>		Amp<2	Amp<2	2≤Amp<5	Amp<2	2≤Amp<5
F <sub>T</sub>		Amp<2	Amp<2	2≤Amp<5	Amp<2	2≤Amp<5
		Baixo	Baixo	Médio	Baixo	Médio

Índice final de perigo 2: Baixo

**Edifício 7**

		Índice de perigo1				
Frequência natural do edifício		Frequências dos picos das funções de transferência				
		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
		1,65 Hz	1,75 Hz	0,87 Hz	2,1 Hz	1,62 Hz
H/V <sub>E</sub>	1,2	0,74	0,70	1,40	0,58	0,75
F <sub>L</sub>	1,2	0,73	0,69	1,38	0,57	0,74
F <sub>T</sub>	1,2	0,73	0,69	1,38	0,57	0,74
		Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Médio

Índice final de perigo 1: Baixo

		Índice de perigo 2				
Frequência natural do edifício		Valores de amplificação obtidos na interseção das frequências naturais do edifício com as funções de transferência				
		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
H/V <sub>E</sub>		2≤Amp<5	2≤Amp<5	Amp<2	Amp<2	2≤Amp<5
F <sub>L</sub>		2≤Amp<5	2≤Amp<5	Amp<2	2≤Amp<5	2≤Amp<5
F <sub>T</sub>		2≤Amp<5	2≤Amp<5	Amp<2	2≤Amp<5	2≤Amp<5
		Médio	Médio	Baixo	Médio	Médio

Índice final de perigo 2: Médio

**Edifício 10**

		Índice de perigo1				
Frequência natural do edifício		Frequências dos picos das funções de transferência				
		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
		6,5 Hz	6,62 Hz	4,5 Hz	7,37 Hz	6 Hz
H/V <sub>E</sub>	5,68 Hz	0,87	0,86	1,26	0,77	0,95
F <sub>L</sub>	-	-	-	-	-	-
F <sub>T</sub>	-	-	-	-	-	-
		Alto	Alto	Baixo	Médio	Alto

Índice final de perigo 1: Alto

		Índice de perigo 2				
Frequência natural do edifício		Valores de amplificação obtidos na interseção das frequências naturais do edifício com as funções de transferência				
		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
H/V <sub>E</sub>		2≤Amp<5	2≤Amp<5	Amp<2	2≤Amp<5	2≤Amp<5
F <sub>L</sub>		-	-	-	-	-
F <sub>T</sub>		-	-	-	-	-
		Médio	Médio	Baixo	Médio	Médio

Índice final de perigo 2: Médio

**Edifício 11**

		Índice de perigo1				
		Frequências dos picos das funções de transferência				
Frequência natural do edifício		Northridge 3,12 Hz	Tottori 3 Hz	Kobe 2,37 Hz	Hokkaido2 2,87 Hz	Hokkaido3 2,87 Hz
H/V <sub>E</sub>	3,63 Hz	1,16	1,21	1,53	1,26	1,26
F <sub>L</sub>	-	-	-	-	-	-
F <sub>T</sub>	-	-	-	-	-	-
		Médio	Médio	Baixo	Baixo	Baixo

Índice final de perigo 1: Baixo

		Índice de perigo 2				
		Valores de amplificação obtidos na interseção das frequências naturais do edifício com as funções de transferência				
Frequência natural do edifício		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
H/V <sub>E</sub>		2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5
F <sub>L</sub>		-	-	-	-	-
F <sub>T</sub>		-	-	-	-	-
		Médio	Médio	Baixo	Baixo	Baixo

Índice final de perigo 2: Baixo

**Edifício 13**

		Índice de perigo1				
		Frequências dos picos das funções de transferência				
Frequência natural do edifício		Northridge 3,12 Hz	Tottori 3 Hz	Kobe 2,37 HZ	Hokkaido2 2,87 Hz	Hokkaido3 2,87 Hz
H/V <sub>E</sub>	4,18 Hz	1,34	1,39	1,76	1,46	1,46
F <sub>L</sub>	4,18 HZ	1,34	1,39	1,76	1,46	1,46
F <sub>T</sub>	4,18 Hz	1,34	1,39	1,76	1,46	1,46
		Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo

Índice final de perigo 1: Baixo

		Índice de perigo 2				
		Valores de amplificação obtidos na interseção das frequências naturais do edifício com as funções de transferência				
Frequência natural do edifício		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
H/V <sub>E</sub>		2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5
F <sub>L</sub>		2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5
F <sub>T</sub>		2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5
		Médio	Médio	Médio	Médio	Médio

Índice final de perigo 2: Médio

**Edifício 14**

		Índice de perigo1				
		Frequências dos picos das funções de transferência				
Frequência natural do edifício		Northridge 3,12 Hz	Tottori 3 Hz	Kobe 2,37 Hz	Hokkaido 2 2,87 Hz	Hokkaido 3 2,87 Hz
H/V <sub>E</sub>	4 Hz	1,28	1,33	1,69	1,39	1,39
F <sub>L</sub>	4,18 Hz	1,34	1,39	1,76	1,46	1,46
F <sub>T</sub>	4,18 Hz	1,34	1,39	1,76	1,46	1,46
		Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo

Índice final de perigo 1: Baixo

		Índice de perigo 2				
		Valores de amplificação obtidos na interseção das frequências naturais do edifício com as funções de transferência				
Frequência natural do edifício		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido 2	Hokkaido 3
H/V <sub>E</sub>		2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5
F <sub>L</sub>		2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5
F <sub>T</sub>		2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5
		Médio	Médio	Médio	Médio	Médio

Índice final de perigo 2: Médio

**Edifício 19**

		Índice de perigo1				
		Frequências dos picos das funções de transferência				
Frequência natural do edifício		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
		2,4 HZ	2,63 Hz	2,2 HZ	1,5 HZ	2,4 HZ
H/V <sub>E</sub>	1,88 HZ	0,78	0,71	0,85	1,25	0,78
F <sub>L</sub>	1,92 HZ	0,80	0,73	0,87	1,28	0,80
F <sub>T</sub>	1,91 HZ	0,80	0,73	0,87	1,27	0,80
		Médio	Baixo	Alto	Baixo	Médio

Índice final de perigo 1: Médio

		Índice de perigo 2				
		Valores de amplificação obtidos na interseção das frequências naturais do edifício com as funções de transferência				
Frequência natural do edifício		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
H/V <sub>E</sub>		2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5
F <sub>L</sub>		2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5
F <sub>T</sub>		2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5
		Médio	Médio	Médio	Médio	Médio

Índice final de perigo 2: Médio

**Edifício 20**

		Índice de perigo1				
		Frequências dos picos das funções de transferência				
Frequência natural do edifício		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
		1,25 Hz	1,26 Hz	2,2 Hz	1,5 Hz	1,25 Hz
H/V <sub>E</sub>	1,7 Hz	1,36	1,35	0,77	1,13	1,36
F <sub>L</sub>	1,77 Hz	1,42	1,40	0,80	1,18	1,42
F <sub>T</sub>	1,77 Hz	1,42	1,40	0,80	1,18	1,42
		Baixo	Baixo	Médio	Médio	Médio

Índice final de perigo 1: Médio

		Índice de perigo 2				
		Valores de amplificação obtidos na interseção das frequências naturais do edifício com as funções de transferência				
Frequência natural do edifício		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
H/V <sub>E</sub>		2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	Amp≥5	2≤Amp<5
F <sub>L</sub>		2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5
F <sub>T</sub>		2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5
		Médio	Médio	Médio	Médio	Médio

Índice final de perigo 2: Médio

**Edifício 24**

		Índice de perigo1				
		Frequências dos picos das funções de transferência				
Frequência natural do edifício		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
		9,7 Hz	9,7 Hz	8,6 Hz	10,15 Hz	9,3 Hz
H/V <sub>E</sub>	9,56 Hz	0,99	0,99	1,11	0,94	1,03
F <sub>L</sub>	-	-	-	-	-	-
F <sub>T</sub>	10,23 Hz	1,05	1,05	1,19	1,01	1,10
		Alto	Alto	Alto	Alto	Alto

Índice final de perigo 1: Alto

		Índice de perigo 2				
		Valores de amplificação obtidos na interseção das frequências naturais do edifício com as funções de transferência				
Frequência natural do edifício		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
H/V <sub>E</sub>		2≤Amp<5	2≤Amp<5	Amp<2	2≤Amp<5	2≤Amp<5
F <sub>L</sub>		-	-	-	-	-
F <sub>T</sub>		2≤Amp<5	2≤Amp<5	Amp<2	Amp≥5	2≤Amp<5
		Médio	Médio	Baixo	Médio	Médio

Índice final de perigo 2: Médio

**Edifício 32**

		Índice de perigo1				
Frequência natural do edifício		Frequências dos picos das funções de transferência				
		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
		3,62 Hz	3,75 Hz	3 Hz	3,87 Hz	3,4 Hz
H/V <sub>E</sub>	3,5 Hz	0,97	0,93	1,17	0,90	1,03
F <sub>L</sub>	3,3 Hz	0,91	0,88	1,10	0,85	0,97
F <sub>T</sub>	3,6 Hz	0,99	0,96	1,20	0,93	1,06
		Alto	Alto	Médio	Alto	Alto

Índice final de perigo 1: Alto

		Índice de perigo 2				
Frequência natural do edifício		Valores de amplificação obtidos na interseção das frequências naturais do edifício com as funções de transferência				
		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
H/V <sub>E</sub>		Amp≥5	Amp≥5	2≤Amp<5	Amp≥5	Amp≥5
F <sub>L</sub>		2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5	2≤Amp<5
F <sub>T</sub>		Amp≥5	Amp≥5	2≤Amp<5	Amp≥5	Amp≥5
		Alto	Alto	Baixo	Alto	Alto

Índice final de perigo 2: Alto

**Edifício 33**

		Índice de perigo1				
Frequência natural do edifício		Frequências dos picos das funções de transferência				
		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
		3,62 Hz	3,75 Hz	3 Hz	3,87 Hz	3,4 Hz
H/V <sub>E</sub>	3,7 Hz	1,02	0,99	1,23	0,96	1,09
F <sub>L</sub>	3,6 Hz	0,99	0,96	1,20	0,93	1,06
F <sub>T</sub>	4 Hz	1,10	1,07	1,33	1,03	1,18
		Alto	Alto	Médio	Alto	Alto

Índice final de perigo 1: Alto

		Índice de perigo 2				
Frequência natural do edifício		Valores de amplificação obtidos na interseção das frequências naturais do edifício com as funções de transferência				
		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
H/V <sub>E</sub>		Amp≥5	Amp≥5	2≤Amp<5	Amp≥5	2≤Amp<5
F <sub>L</sub>		Amp≥5	Amp≥5	2≤Amp<5	Amp≥5	Amp≥5
F <sub>T</sub>		Amp≥5	Amp≥5	Amp<2	Amp≥5	2≤Amp<5
		Alto	Alto	Médio	Alto	Médio

Índice final de perigo 2: Alto

**Edifício 34**

		Índice de perigo1				
Frequência natural do edifício		Frequências dos picos das funções de transferência				
		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
		5,5 Hz	5,87 Hz	-	6,7 Hz	4,87 Hz
H/V <sub>E</sub>	6,7 Hz	1,22	1,14	-	1,00	1,38
F <sub>L</sub>	-	-	-	-	-	-
F <sub>T</sub>	6,54 Hz	1,19	1,11	-	0,98	1,34
		Médio	Alto	-	Alto	Baixo

Índice final de perigo 1: Médio

		Índice de perigo 2				
Frequência natural do edifício		Valores de amplificação obtidos na interseção das frequências naturais do edifício com as funções de transferência				
		Northridge	Tottori	Kobe	Hokkaido2	Hokkaido3
H/V <sub>E</sub>		Amp<2	Amp<2	-	2≤Amp<5	Amp<2
F <sub>L</sub>		-	-	-	-	-
F <sub>T</sub>		Amp<2	Amp<2	-	2≤Amp<5	Amp<2
		Baixo	Baixo	-	Médio	Baixo

Índice final de perigo 2: Baixo